



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Instituto Politécnico

Maria Vittoria Moraschini Reis

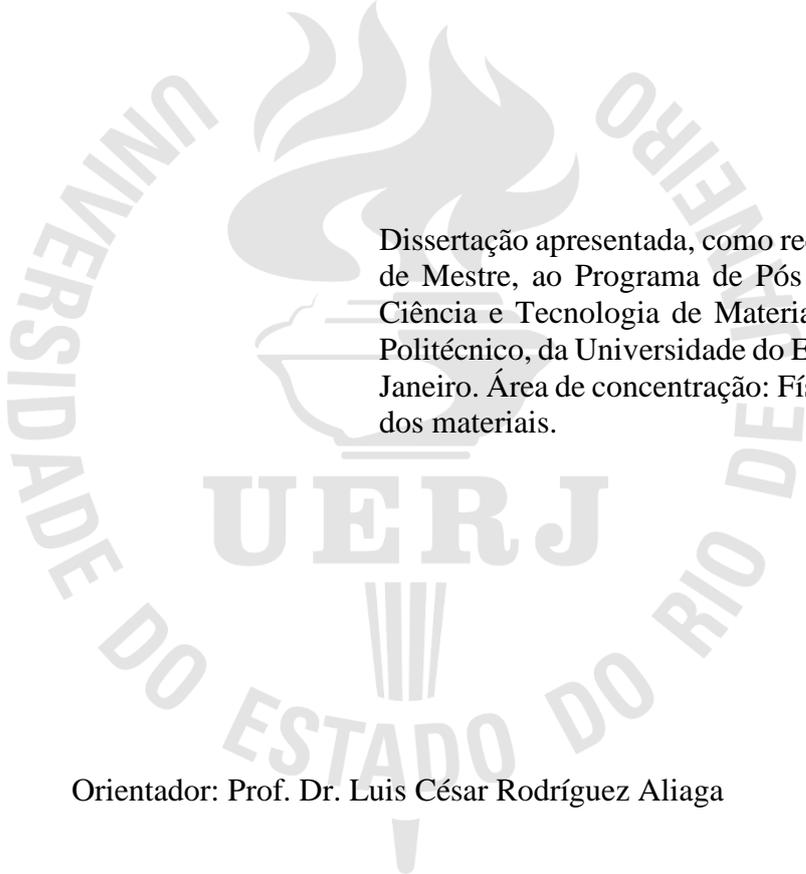
**Projeção do ferramental para soldagem por fricção de pino rotativo e  
análise microestrutural do cordão de solda da liga aa1050**

Nova Friburgo

2021

Maria Vittoria Moraschini Reis

**Projeção do ferramental para soldagem por fricção de pino rotativo e análise microestrutural do cordão de solda da liga aa1050**



Dissertação apresentada, como requisito do título de Mestre, ao Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Física e Mecânica dos materiais.

Orientador: Prof. Dr. Luis César Rodríguez Aliaga

Nova Friburgo

2021

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ/REDE SIRIUS/BIBLIOTECA CTC/E

R375 Reis, Maria Vittoria Moraschini.  
Projeção do ferramental para soldagem por fricção de pino rotativo e análise microestrutural do cordão de solda da liga aa1050 / Maria Vittoria Moraschini Reis. – 2021.  
75 f. : il.

Orientador: Luis César Rodríguez Aliaga.  
Dissertação (mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico.

1. Ligas de alumínio – Teses. 2. Solda e soldagem - Teses. 3. Microscopia eletrônica de varredura – Teses. 4. Propriedades mecânicas – Teses. I. Rodríguez Aliaga, Luis César. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto Politécnico. III. Título.

CDU 669.717

Bibliotecária Cleide Sancho CRB7/5843

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.



Assinatura

26/11/2021

Data

Maria Vittoria Moraschini Reis

**Projeção do ferramental para soldagem por fricção de pino rotativo e análise microestrutural do cordão de solda da liga AA1050**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de Concentração: Física e Mecânica dos Materiais, Linha de Pesquisa: Metalurgia Física.

Aprovada em 24 de agosto de 2021.

Banca examinadora:



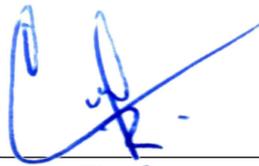
---

Prof. Dr. Luis César Rodríguez Aliaga (Orientador)  
Instituto Politécnico – UERJ



---

Prof. Dr. Ivan Napoleão Bastos  
Instituto Politécnico – UERJ



---

Prof. Dr. Ricardo Floriano  
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Nova Friburgo

2021

## DEDICATÓRIA

À minha família, em especial aos meus amados pais, Jorge e Bárbara, e a minha irmã, Maria Carolina, pela vivência do compromisso solidário, pelo aprendizado da humildade e pelo exemplo de amor e fé.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus por ter me dado o privilégio de ter nascido em uma família que sempre me proporcionou amor, conforto e educação de qualidade, e a Nossa Senhora por sempre me acompanhar, servindo de alento nos momentos difíceis;

À minha família, meus pais, Jorge Reis e Bárbara Moraschini, e a minha irmã, Maria Carolina Moraschini, pela unidade do nosso lar e incentivo em todos os momentos da minha vida;

Ao Prof. Dr. Luis César Rodríguez Aliaga a presença segura, competente e estimulante na minha caminhada na Pós-Graduação;

À Universidade do Estado do Rio de Janeiro – IPRJ, em especial ao Laboratório de Corrosão pelo aprendizado proporcionado e recursos oferecidos;

Aos professores do IPRJ pelas aulas, confiança, apoio e reflexões críticas;

Ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais por proporcionar ensino e pesquisa de qualidade e a chance de estar esta etapa da minha vida neste local de excelência;

Ao técnico da Oficina Mecânica do IRRJ, Umberto Alan Franco, pela pronta ajuda e atenção sempre que solicitado;

Aos amigos que fiz durante esse curso e me acompanharam durante esta trajetória dividindo os anseios, projetos e conhecimento;

Ao amigo e colega de profissão Eduardo Pereira Motta, pelas sugestões construtivas utilizadas neste documento;

Ao Técnico em Mecânica, Hélio José Machado, por ter oferecido, de bom grado, seu maquinário e conhecimento prévio para que as soldagens por fricção fossem realizadas;

Ao Antônio Carlos dos Santos Guzzo Júnior e ao Firjan SENAI Nova Friburgo, pelo auxílio fundamental na confecção do ferramental.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001.

## RESUMO

REIS, Maria Vittoria Moraschini. Projeção do ferramental para soldagem por fricção de pino rotativo e análise microestrutural do cordão de solda da liga aa1050. 2021. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2021.

Os segmentos industriais aeroespacial e automobilístico vêm em crescente desenvolvimento nas últimas décadas, tendo como principal atenção de investimento a redução de peso dos veículos, levando, conseqüentemente, à diminuição do consumo de combustível, tornando as ligas de alumínio, assim como os processamentos que as envolvem amplamente pesquisados. Dentro deste cenário, de desenvolvimento de materiais e processos destacam-se as ligas de alumínio e a soldagem por fricção por pino não consumível (FSW – *Friction Stir Welding*), devido ao custo/benefício que oferecem. Sendo assim, a principal abordagem desta pesquisa insere-se no âmbito da análise das propriedades microestruturais da liga de alumínio 1050 após a soldagem por FSW. Para isso, inicialmente, foram determinados os parâmetros adequados de soldagem e projetadas as ferramentas apropriadas compostas por ombro e pino, usinadas em aço VND. Para estudar o comportamento do fluxo do material por meio das roscas dos pinos adotou-se a geometria cilíndrica e passos de 1,25 mm; 1,5 mm e 2,0 mm, fatores os quais foram combinados com as velocidades de avanço de 5 mm/min e 10 mm/min e com as velocidades rotação da ferramenta de 1800 rpm e 2300 rpm, tornando possível o estudo da influência da soldagem FSW mediante a agitação do material deformado plasticamente sob esse conjunto de parâmetros. A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada levando a evidências amplas sobre a confiabilidade do conjunto pesquisado. O conjunto correspondente a velocidade de rotação de 2300 rpm, velocidade de avanço de 10 mm/min e o passo da rosca do pino de 2,0 mm, apresentou as melhores características nas análises visual e por MEV, indicando que seja o ideal para uma solda com boas propriedades mecânicas e microestruturais, entre as estudadas. Contudo, todas as amostras apresentaram diferentes níveis de porosidade

Palavras-chave: Segmentos Industriais. Liga de alumínio 1050. Friction Stir Welding. Propriedades Microestruturais.

## ABSTRACT

REIS, Maria Vittoria Moraschini. Tooling projection for friction stir welding and microstructural analysis of the 1050 aluminum alloy weld bead. 2021. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2021.

During the last decades both the aerospace and automobile segments have increased its development, with the main goal on reducing the weight of vehicles, consequently leading to a reduction in fuel consumption, making the development of aluminum alloys as well as the rout processing widely researched. Within this scenario of materials and processes development stand out the aluminum alloys and the friction stir welding process, due to the cost/benefit that they offer. Therefore, the main approach of this research falls within the scope of the analysis of the microstructural properties of the 1050 aluminum alloy submitted to FSW process. Initially, the proper welding parameters were determined and the appropriate tools were designed, consisting of shoulder and pin, machined in VND steel. To study the behavior of the material flow through the threads of the pins, a cylindrical geometry with 1.25 mm, 1.5 mm and 2.0 mm pitches were adopted; factors which were combined with the feed speeds of 5 mm/min and 10 mm/min under the tool rotation speeds of 1800 rpm and 2300 rpm, making it possible to study the influence of FSW welding by stirring the plastically deformed material under this set of parameters. Scanning electron microscopy (SEM) analysis was performed leading to ample evidence on the reliability of the research set. The set corresponding to rotation speed of 2300 rpm, feed speed of 10 mm/min and pin thread pitch of 2.0 mm, presented the best characteristics in visual and SEM analysis, indicating that it is ideal for a weld with good mechanical and microstructural properties, among those studied. However, all samples had different levels of porosity.

Keywords: Industrial segments. 1050 Aluminum alloy. Friction Stir Welding. Microstructural Properties.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Estrutura cristalina cúbica de face centrada, característica do alumínio evidenciando os planos {111}.....	14
Figura 2 -	Esquemática do processo de soldagem por fricção e mistura.....	19
Figura 3 -	Microestrutura típica da junta soldada por FSW.....	21
Figura 4 -	Diversas geometrias do pino. Destaque para a ferramenta de ombro plano com estrias em forma de espiral.....	27
Figura 5 -	Diversos formatos da geometria da ferramenta do processo FSW.....	28
Figura 6 -	Geometrias de ombro.....	29
Figura 7 -	Quadro resumo de modelos de pinos para a soldagem FSW.....	31
Figura 8 -	Efeito na direção do fluxo do material conforme a direção rotacional da ferramenta.....	32
Figura 9 -	Tipos de juntas que podem ser obtidas pelo processo FSW.....	34
Figura 10 -	Modelo de máquina fresadora utilizada para o processo de soldagem FSW.....	38
Figura 11 -	Geometria do ombro.....	40
Figura 12 -	a) Ombro projetado e usinado, b) Pinos projetados e usinados em aço VND com os seus respectivos passos.....	42
Figura 13 -	Conjunto de ferramentas ombro – pino acoplado.....	43
Figura 14 -	Representação esquemática da penetração da ferramenta na liga soldada por FSW.....	44
Figura 15 -	Representação esquemática de uma parte utilizada no processo de soldagem por FSW.....	46
Figura 16 -	Amostra soldada num teste preliminar dentro dos parâmetros: velocidade de rotação de 600 rpm, velocidade de avanço de 5 mm/min e pino de geometria cilíndrica com passo de rosca de 1,25 mm.....	50
Figura 17 -	Fotografias da superfície das juntas soldadas.....	51
Figura 18 -	a) Micrografias do metal base obtida por MEV no modo BSE, b) micrografia aumentada.....	53

Figura 19 -	Micrografias da região da zona de mistura sob diversos parâmetros de processo.....	54
Figura 20 -	Micrografias da região da zona de mistura sob diversos parâmetros de processo.....	55
Figura 21 -	Micrografias das zonas de transição entre a ZTA e a ZTMA – Nível 1 e Nível 2.....	56
Figura 22 -	Micrografias das zonas de transição entre a ZTA e a ZTMA – Nível 3.....	57
Figura 23 -	Micrografias das zonas de transição entre a ZTA e a ZTMA – Nível 4, Nível 5 e Nível 6.....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do alumínio à temperatura ambiente.....	15
Tabela 2 - Designação de ligas de alumínio para trabalho mecânico.....	17
Tabela 3 - Composição química nominal da liga aa1050.....	18
Tabela 4 - Propriedades mecânicas da liga aa1050 .....	37
Tabela 5 - Especificação técnica do aço vnd.....	41
Tabela 6 - Parâmetros do processo de soldagem fsw adotados para os testes de soldagem ....	44
Tabela 7 – Resumo de testes de soldas pelo processo de fsw .....	45

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
1	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	14
1.1	<b>Alumínio</b> .....	14
1.1.1	<u>Alumínio Puro</u> .....	14
1.1.2	<u>Ligas de Alumínio e a liga 1050</u> .....	16
1.2	<b>Soldagem por fricção e Mistura – FSW</b> .....	18
1.2.1	<u>Características Microestruturais de Ligas de Alumínio Soldadas por FSW</u> .....	20
1.2.1.1	Metal base – MB.....	21
1.2.1.2	Zona Termicamente Afetada – ZTA.....	21
1.2.1.3	Zona Termomecanicamente Afetada – ZTMA.....	22
1.2.1.4	Zona de Mistura – ZM.....	22
1.2.2	<u>Vantagens e Desvantagens do Processo FSW</u> .....	22
1.2.3	<u>Parâmetros do processo FSW</u> .....	24
1.2.4	<u>Tipos de Junta</u> .....	34
1.2.5	<u>Aplicações do Processo</u> .....	34
2	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	36
2.1	<b>Material das soldas</b> .....	36
2.2	<b>Equipamento Adaptado Para a Realização da Soldagem FSW</b> .....	37
2.3	<b>Elaboração do Projeto da Ferramenta</b> .....	38
2.4	<b>Execução dos Testes Prévios de Soldagem</b> .....	43
2.4.1	<u>Preparação dos Corpos de Prova para Soldagem por FSW</u> .....	46
2.4.2	<u>Preparação Metalográfica das Amostras Soldadas</u> .....	47
2.4.3	<u>Análise Microestrutural por Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV</u> .....	47
3	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	49
3.1	<b>Soldagem Pelo Processo FSW</b> .....	49
3.1.1	<u>Ajustes preliminares</u> .....	49
3.1.2	<u>Inspeção Visual das Soldas FSW</u> .....	51
3.2	<b>Caracterização Microestrutural</b> .....	53
	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	60
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	62
	<b>APÊNDICE A – Trabalho apresentado no ENMC 2019</b> .....	65
	<b>ANEXO A - Quadro resumo de modelos de pinos para soldagem FSW</b> .....	75

## INTRODUÇÃO

Durante os últimos anos, a demanda por estruturas leves aumentou consideravelmente em um esforço por reduzir o peso, o consumo de combustível e melhorar o impacto dos veículos como automóveis, motocicletas e outros, no meio ambiente. A fabricação de estruturas leves, a partir de união de chapas metálicas, vem sendo amplamente explorada. A junção de partes para produzir um único componente com propriedades mecânicas adequadas é de extrema importância na indústria automotriz. Assim, pode-se destacar a união de duas ou mais chapas de diferentes calibres de materiais iguais ou diferentes (CABIBBO, et al. 2014) na fabricação de veículos leves.

O uso de ligas de alumínio se destaca amplamente nos setores aeroespaciais e automobilísticos. Contudo, ligas tais como as das séries 2XXX e 7XXX, quando submetidas a processos de soldagem convencionais apresentam defeitos que impossibilitam a obtenção de juntas com adequada qualidade e alta resistência mecânica. O uso destas ligas em proporções comerciais, porém, tem como consequência à adequação das mesmas aos processos de produção e união de forma eficaz para compor veículos de transportes.

Utilizando os processos tradicionais de soldagem, que envolvem fusão, MIG, MIG/MAG, SAW, defeitos como trincas a quente, porosidade e vazios de contração podem ser causados devido a diferentes coeficientes de dilatação térmica e contração de solidificação das partes fundidas que estão envolvidas, o que pode ocorrer, em especial, quando as ligas em questão possuem baixo ponto de fusão. Tais efeitos nas juntas tornam impraticável o uso em aplicações estruturais. Neste sentido vem sendo explorada a possibilidade de uso de ligas mais simples como a AA1050 (MEHTEDI, M. E.; et al. 2017).

Por outro lado, o processo FSW – *Friction Stir Welding*, foi desenvolvido na década de 90 pelo TWI – *The Welding Institute* (TWI, 2007). Trata-se de uma técnica onde a união das partes a serem soldadas ocorre totalmente no estado sólido, atingindo, em geral, temperaturas abaixo de 500 °C, não excedendo 80 % da temperatura de fusão da liga. O uso deste processo é promissor, pois através dele juntas livres de defeitos são obtidas resultando em melhores propriedades mecânicas (BESHARATI-GIVI e ASADI, 2014). No processo FSW as soldas ocorrem pela energia friccional proveniente de uma ferramenta rotativa e não consumível localizada na região da junta, provocando uma mistura mecânica dos materiais, no estado sólido, através do calor proveniente do atrito. Com a temperatura e a deformação plástica imposta ao material ocorre a união metalúrgica das partes envolvidas e também alterações na

microestrutura e nas propriedades resultantes (THREADGILL et al, 2009). Fatores envolvidos neste método, como a eficiência energética, ausência de poça de fusão, de gases tóxicos e de respingos, garantem a manutenção das propriedades originais do material, auxiliando na obtenção de juntas com boas propriedades mecânicas (BESHARATI-GIVI e ASADI, 2014). Cada liga, porém, quando unida no estado sólido pelo processo FSW requer um projeto específico de ferramenta e adequação dos parâmetros de processo de forma exclusiva (MISHRA e MA, 2003).

Este trabalho tem por objetivo realizar o estudo de projeção e produção de ferramental apropriado para o processo de soldagem por FSW e sua aplicação à solda de liga a base de alumínio 1050 em fresa convencional, e a caracterização microestrutural do cordão de solda.

# 1 REVISÃO DE LITERATURA

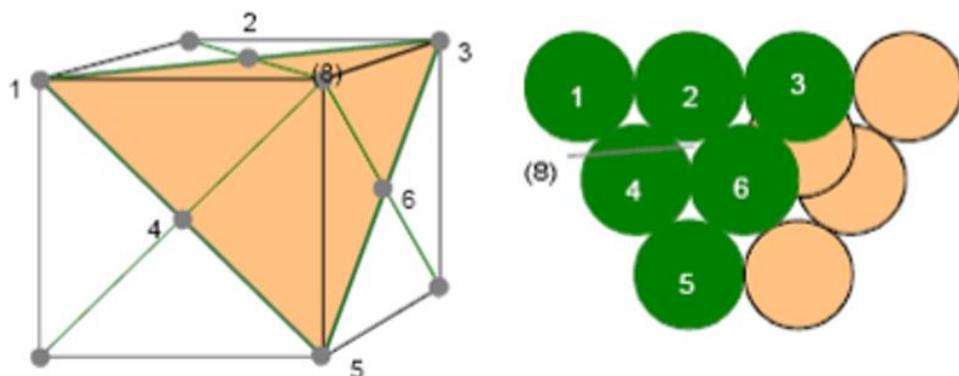
## 1.1 Alumínio

### 1.1.1 Alumínio Puro

Na tabela periódica o elemento químico alumínio está localizado na interseção do 13º grupo com o 3º período; possui número atômico 13; seu isótopo estável mais comum é o  $^{27}\text{Al}$ , o qual possui 13 prótons e 14 nêutrons em seu núcleo e sua valência química é 3, tendo seus elétrons distribuídos nas camadas como:  $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2$  e  $3p^1$ .

O arranjo atômico segue a estrutura cristalina cúbica de face centrada, CFC ou FCC – *face-centered cubic*, como se observa na Figura 1. O alumínio encontra-se estável, entre temperaturas de ordem de 4 K até seu ponto de fusão, aproximadamente, 933 K. O número de coordenação é 12 e cada célula unitária contém 4 átomos. Essa estrutura cristalina é frequentemente presente em metais dúcteis, e essa alta ductilidade advém dos diversos sistemas de escorregamento, relacionados com a alta densidade atômica nos planos  $\{111\}$  e as direções  $\langle 111 \rangle$ , que esta estrutura apresenta (COBDEN, 1991).

Figura 1 - Estrutura cristalina cúbica de face centrada, característica do alumínio evidenciando os planos  $\{111\}$



Fonte: COBDEN, 1991.

A Tabela 1 apresenta um resumo de algumas das propriedades mecânicas do alumínio, em diferentes níveis de pureza. Pode-se observar que o alumínio puro possui baixa resistência mecânica, o que o faz inutilizável em aplicações estruturais. A adição de outros elementos, porém, possibilita a formação de ligas com substancial melhora nas propriedades mecânicas. Entre os principais elementos de liga estão o cobre, lítio, magnésio e manganês (COBDEN, 1991).

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do alumínio à temperatura ambiente

<b>Pureza (%)</b>	<b>Limite de escoamento 0,2% (MPa)</b>	<b>Limite de resistência à tração (MPa)</b>	<b>Alongamento em 50 mm (%)</b>
99,99	10	45	50
99,8	20	60	45
99,6	30	70	43

Fonte: HATCH, 1984.

Outra importante característica é a baixa densidade em relação aos outros metais, tendo um valor teórico de  $2698,72 \text{ kg/m}^3$ , cerca de um terço da densidade do ferro, tornando-o junto ao magnésio e ao titânio os elementos mais leves dentre os metais com maior utilização industrial. Essa característica é muito importante e desejável em metais e ligas, deste modo, as ligas de alumínio possuem grande aceitação no setor industrial de transportes, uma vez que a redução da massa gera menores custos com transportes, diminuição dos efeitos de vibrações, economia de energia, entre outros (COBDEN, 1991).

A resistência a oxidação, em ambientes corrosivos, também é uma característica notória do alumínio. A formação em sua superfície de um filme contínuo de óxido de alumínio, nomeado comumente como passivação, permite que este material seja exposto a agentes corrosivos, como água ou oxigênio, inibindo a sua deterioração. Caso essa camada de óxido seja danificada ela rapidamente é recuperada, devido ao volume molecular do óxido ser 1,3 vezes maior do que aquele do alumínio consumido em sua formação. Entretanto, essa variação de volume pode gerar tensões compressivas na camada, o que lhe confere adequada resistência a fadiga.

Em contato com oxigênio seco a camada passivada tem um valor limite de espessura entre 25 a 30 Å, em função da temperatura de exposição. Na presença de umidade pode ocorrer

aumento da espessura, que pode ser dobrada em situações de 100 % de umidade (COBDEN, 1991).

Vale ressaltar que a camada passiva pode ser aprimorada por anodização, processo onde ocorre imersão da amostra em solução anodizante, podendo conter ácido crômico, ácido fosfórico ou ácido sulfúrico. Neste processo, um catodo é conectado ao polo negativo de uma fonte e o polo positivo é ligado à amostra. A imersão do catodo na solução, com circuito ligado, leva a consequente liberação de oxigênio pelas moléculas de água, que se deposita na amostra formando um recobrimento de óxido (COBDEN, 1991).

### 1.1.2 Ligas de Alumínio e a liga 1050

As ligas de alumínio surgem da adição de outros elementos químicos ao alumínio, mantendo a baixa densidade e a resistência à oxidação, entretanto, provendo melhores propriedades mecânicas, ampliando, assim, o leque de uso em aplicações de engenharia. O alumínio tem capacidade de reagir prontamente e formar ligas com a maioria dos elementos metálicos (COBDEN, 1991).

De acordo com a finalidade da liga duas categorias principais são estabelecidas: ligas para fundição e as ligas para trabalho mecânico (forjadas). As ligas projetadas para trabalho mecânico podem ser processadas por processos de conformação plástica, como laminação, extrusão, forjamento e trefilação. A Tabela 2 apresenta a nomenclatura das diversas famílias de ligas em função dos principais elementos de liga (ASM HANDBOOK, 1990).

Na Tabela 2 observa-se que o cobre é o principal elemento de liga nas ligas da série 2XXX tendo, frequentemente, o magnésio como segundo elemento em quantidade. Nestas ligas os tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento são adotados como os mecanismos de endurecimento a fim de aumentar as propriedades mecânicas, devido a formação de finos precipitados dispersos e coerentes com a matriz de Al- $\alpha$ . Estas ligas são utilizadas em estruturas e elementos que requerem alta razão entre resistência mecânica e peso como em aeronaves, partes de suspensão, fuselagem e asas, rodas de caminhões e componentes que necessitem de boa resistência para temperaturas acima de 150 °C (ASM HANDBOOK, 1990).

Tabela 2 - Designação de ligas de alumínio para trabalho mecânico

Séries	Elemento(s) de liga majoritário(s)
1XXX	Alumínio comercialmente puro
2XXX	Cobre
3XXX	Manganês
4XXX	Silício
5XXX	Magnésio
6XXX	Magnésio e Silício
7XXX	Zinco
8XXX	Estanho e Lítio
9XXX	Aplicações futuras

Fonte: Adaptado de ASM HANDBOOK, 1990.

A subdivisão desta liga pode se dar em dois grupos: teores de magnésio relativamente baixos, como nas ligas AA2017, AA2025 e AA2219 e teores altos (Al-Cu-Mg), acima de 1,0% em peso, como na liga AA2024, que possui 1,5 % e na liga AA2618, com 1,6 %. O que difere nos dois grupos é a fase majoritária que auxilia no endurecimento por precipitação conforme a razão Cu/Mg, de acordo com a fase  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu ou S-Al<sub>2</sub>CuMg. As ligas de alumínio da série 2XXX estão entre as de maior resistência, maior módulo elástico, entretanto com menor soldabilidade entre as ligas (COBDEN, 1991). A liga AA2024 foi inicialmente considerada para o estudo neste trabalho, entretanto, devido à paralização forçada dos laboratórios não foi possível seu processamento sendo necessário sua mudança para a liga AA1050.

As ligas da família AA1XXX possuem um grau de pureza que varia entre 99,00% a 99,99%, sendo considerados alumínio comercialmente puro, onde esse grau é representado pelo segundo dígito da nomenclatura. Tem-se, então, que a liga AA1050 corresponde a 99,50% de pureza (HATCH, 1984).

A liga AA1050 não possui elementos de liga adicionado propositadamente e, sim, apenas impurezas, que são controladas ao longo do processo de produção não podendo ultrapassar o total de 0,50% em peso, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - composição química nominal da liga AA1050

Liga	Composição (% em peso)												
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	Ti	Outros elementos	Al mín.
AA1050	0,25	0,40	0,05	0,05	0,05	-	-	0,05	-	0,05	0,03	0,03	99,5

Fonte: Adaptado de COBDEN, 1991.

De forma geral, a baixa solubilidade do silício e do ferro, em temperatura ambiente, no alumínio, aumenta a possibilidade dessas impurezas se precipitarem na matriz sob a forma de intermetálicos do tipo  $Al_{12}Fe_3FeSi_2$ ,  $Al_3Fe$  ou  $Al_9Fe_2Fe_9Si_2$ . A rota de processamento empregada é responsável pelo tamanho, morfologia e distribuição dos grãos, formação e distribuição de precipitados o que pode levar a efeitos prejudiciais as propriedades mecânicas, uma vez distribuídos de forma grosseira ou concentrada no contorno do grão (HATCH, 1984).

A liga AA1050 é uma das mais comercializadas da família 1XXX, tendo entre as suas aplicações mais comuns em trocadores de calor, capacitadores, equipamentos de planta de processos químicos, acabamentos automotivos, recipientes para indústria alimentícia, refletores de lâmpadas (BLANCO FERNÁNDEZ, et al. 2012), revestimento de cabos, condutores elétricos e aplicações de arquitetura e uso decorativos (ASM HANDBOOK, 1990), além do uso como pó pirotécnico.

## 1.2 Soldagem por Fricção e Mistura – FSW

Este processo de soldagem foi concebido em 1991, em Cambridge no Reino Unido, no *The Welding Institute* (TWI, 2007), sendo patenteado em dezembro de 1991 pelo TWI. Tendo em vista a ampliação de suas aplicações e o aperfeiçoamento das juntas soldadas, muitas pesquisas vêm sendo desenvolvidas por meio de análises e verificação de parâmetros adequados para determinadas situações, conforme, por exemplo, o material a ser soldado e a geometria das peças.

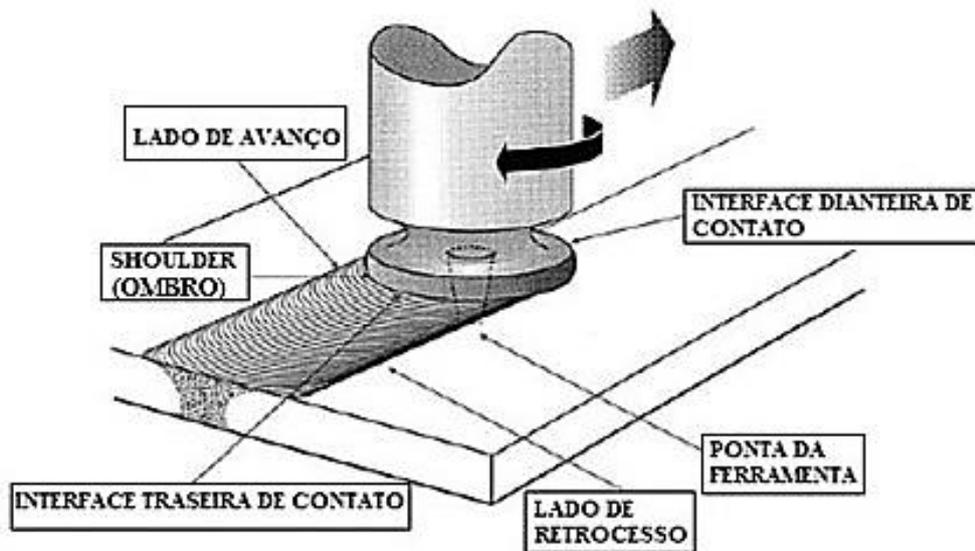
Inicialmente, a soldagem FSW foi produzida para união de ligas de alumínio, podendo, porém, ser realizado este processo em ligas de cobre e aço. Os materiais soldáveis pelo método possuem resultados satisfatórios quando em espessuras entre 1,6 mm e 50 mm, através de um

passo de solda, e até 75 mm para dois passos. O processo foi aplicado a diversos materiais obtendo qualidade da solda e repetibilidade satisfatórios para as ligas das séries: 2XXX (Al-Cu), 5XXX (Al-Mg), 6XXX (Al-Mg-Si) 7XXX (Al-Zn) e 8XXX (Al-Li), conforme estudos de Capelari e Mazzaferro (2009) e Gesella e Czechowski (2017).

Ligas metálicas com baixo ponto de fusão e difícil soldabilidade por métodos convencionais, baseados em fusão, têm sido beneficiadas por esse método. Em setores industriais, especialmente automobilístico e aeronáutico, a combinação de excelentes propriedades mecânicas e aplicabilidade em ligas de baixa densidade geradas por juntas soldadas por FSW, é de grande relevância para a produção em massa dos meios de transporte e, conseqüentemente, redução de consumo de combustível, também como de gases poluentes produto da combustão desses combustíveis (THOMAS et al., 1997).

A ferramenta de soldagem é composta por um ombro (*shoulder*), de maior diâmetro, que fica em contato com a superfície da solda, e pela ponta da ferramenta ou, também chamado por pino, de menor diâmetro, que efetivamente penetra nas chapas a serem unidas gerando o amolecimento e a união metalúrgica do material. A Figura 2 apresenta a montagem geométrica das peças e o ferramental no processo de solda por FSW, respectivamente (THOMAS et al., 1997).

Figura 2 - Esquematização do processo de soldagem por fricção e mistura



Fonte: Adaptado de THOMAS et al., 1997.

A fricção gerada pelo contato entre a ferramenta rotativa, ombro e pino, e as chapas a serem soldadas promovem a fonte de energia. O pino é inserido e rota na linha de contato entre

as chapas; o ombro deve estar em contato com a superfície e age como uma barreira que evita fluxo vertical de metal amolecido (plasticizado) durante a inserção inicial, garantido calor friccional adicional, criando, assim, uma camada de metal em volta da ferramenta. Este movimento rotacional promove o arraste de material amolecido da parte dianteira da ferramenta para a parte traseira. O ponto de inserção é geralmente em um dos extremos da linha de contato entre as chapas. A rotação do pino permite o coalescimento de material de ambas as chapas, gerando uma região soldada em estado sólido, sem fusão. O movimento longitudinal da ferramenta, estabelece a junta soldada (THOMAS et al., 1997).

Esta técnica não requer adição de metais, gases de proteção, preparação especial de superfície/bordas das partes e leva menores deformações se comparada a técnicas tradicionais de soldagem baseadas em fusão (THOMAS et al., 1997).

### 1.2.1 Características Microestruturais de Ligas de Alumínio Soldadas por FSW

As temperaturas atingidas durante o processo de FSW são consideravelmente baixas, sendo dificilmente observado um gradiente de temperatura nas regiões adjacentes afetadas pelo trabalho a quente proveniente do processo. Devido à excelente capacidade de transferência de calor dos metais, em particular do alumínio, a região adjacente é dividida em seções que são submetidas a perfis de aquecimento e resfriamento, gerando um gradiente microestrutural ao longo da seção transversal da solda (DAWES e WOODWARD, 1991).

Vantagens metalúrgicas entre o método de união em estado sólido FSW e os métodos regulares com presença de fusão são constatados. Como não há fusão a formação de trincas é minimizada, fato relevante do ponto de vista mecânico, uma vez que as trincas são concentradores de tensões, que conduzem à redução da tenacidade de partes metálicas. Além disso, não há modificação da composição química da liga, pois não ocorre evaporação do metal de solda. Este fato também é de grande relevância, já que pequenas alterações locais na composição de ligas podem gerar mudanças importantes nas propriedades (DAWES e WOODWARD, 1991).

O processo FSW pode afetar, porém, as propriedades mecânicas de ligas de alumínio tratáveis termicamente, como as das séries 2XXX, 6XXX e 7XXX, que necessitam de precipitados endurecedores, os quais podem ser extremamente sensíveis às temperaturas

atingidas durante o processo. De forma similar as peças soldadas por processos convencionais, as ligas de alumínio soldadas por FSW resultam em juntas com regiões de seção transversal características, como as apresentadas na Figura 3.

Figura 3 - Microestrutura típica da junta soldada por FSW



Legenda: A: região não afetada pelo processo; B: zona termicamente afetada (ZTA); C: zona termomecanicamente afetada (ZTMA) com algumas áreas de recristalização parcial e D: zona de mistura.

Fonte: Adaptado de DAWES e WOODWARD, 1991.

#### 1.2.1.1 Metal base – MB

Regiões não afetadas pelo processo FSW que possuem microestrutura original do metal base, mantendo as propriedades mecânicas previamente existentes (DAWES e WOODWARD; 1991).

#### 1.2.1.2 Zona Termicamente Afetada – ZTA

Correspondente a zona termicamente afetada (ZTA), região “B” da Figura 3, em geral não sofre influência de deformação mecânica, sendo a variação na temperatura decorrente da condutividade térmica das ligas metálicas suficiente e responsável por causar mudanças microestruturais.

Nas alterações da microestrutura pode haver crescimento e/ou dissolução de precipitados, que podem ser responsáveis pela diminuição das propriedades mecânicas e o aumento do tamanho de grão da estrutura. Contudo, estas alterações não são muito acentuadas como nos processos convencionais (GEVENOIS et al 2005).

### 1.2.1.3 Zona Termomecanicamente Afetada – ZTMA

A zona termomecanicamente afetada (ZTMA) localiza-se adjacente à zona de mistura, representada pela letra “C” da Figura 3, tendo a microestrutura influenciada pela temperatura e pelo trabalho mecânico provocando alterações tais como a recuperação dos grãos da estrutura cristalina, a recristalização parcial e uma modificação de cerca 90° na orientação dos grãos (CARLETTI, 2002).

O aumento das dimensões dos precipitados endurecedores também pode ocorrer, o que resulta em uma redução local da dureza (GEVENOIS et al 2005).

### 1.2.1.4 Zona de Mistura – ZM

Correspondente à região “D” da Figura 3, a zona de mistura é constituída por material coalescido arrastado pelo pino. Há presença de recristalização dinâmica gerando estrutura de grãos refinados ocasionados pelos altos níveis de deformação e alta temperatura que esta região está sujeita, ocasionando em uma microestrutura satisfatória em relação aos métodos tradicionais de soldagem a base de fusão. O declínio das propriedades mecânicas pode ocorrer através da dissolução e alteração morfológica dos precipitados presentes (GEVENOIS et al 2005).

Por outro lado, existe relatos que em dependência da rugosidade superficial do pino e as altas frequências de rotações durante o processo de solda, pode conduzir a alterações da estrutura desta zona, sendo possível a obtenção de estrutura manométrica e amorfa (GEVENOIS et al 2005).

## 1.2.2 Vantagens e Desvantagens do Processo FSW

Comercialmente este processo demanda uma energia relativamente baixa, permitindo a redução de custos, devido aos fatores (THOMAS e NICHOLAS; 1997):

- i. A quantidade de energia necessária para a realização de um passe é consideravelmente baixa; em comparação com outros processos de união, o FSW requer somente 2,5% da energia requerida na soldagem a laser, por exemplo (MISHRA e MA, 2005);
- ii. Pode ser realizada por dispositivos, como fresas ou robôs, tornando o processo automatizável;
- iii. Não necessita de consumíveis, como eletrodos de soldagens e gases de proteção;
- iv. A versatilidade no posicionamento para realização da solda leva a redução de custos uma vez que a movimentação da parte soldada durante a produção é evitada;
- v. Automação inerente ao método por ser realizado por robôs.

Algumas vantagens em relação aos métodos convencionais que envolvem fusão, como TIG, MIG/MAG e laser também são observadas, destacando (THOMAS e NICHOLAS; 1997):

- i. A união ocorre em estado sólido, ou seja, a temperatura de fusão dos materiais da junta não é alcançada, minimizando os defeitos que normalmente ocorrem nos processos de fusão e solidificação, tais como trincas, porosidades e segregações;
- ii. O baixo aporte térmico do método resulta em baixos índices de empenamento e distorção;
- iii. Em um único passe a capacidade de espessura soldada é de 50 mm, já em duplo passe pode chegar a 10 mm;
- iv. Qualquer tipo de liga de alumínio pode ser soldada, sendo estas similares ou dissimilares (TWI, 2007);
- v. Não há geração de resíduos, respingos, fumaça, radiação ultravioleta e outros fatores prejudiciais à saúde humana;
- vi. Método de alta robustez, reprodutibilidade e repetitividade (KASPARY, 2005);
- vii. Energeticamente eficiente, utiliza somente 2,5 % da energia necessária para realizar a soldagem a laser;
- viii. Capacidade de alta produtividade, realizando junções até sessenta vezes mais rápidas que o método de rebitagem manual;
- ix. Juntas produzidas com alta eficiência mecânica, próxima a 100% e resistência fadiga superior ao metal base (MISHRA e MA, 2005).

Além disso, a alta qualidade e baixa distorção das juntas obtidas por este método de soldagem somadas à sua versatilidade originam em melhorias expressivas no design de produtos.

Embora o processo apresenta todas as vantagens apresentadas, algumas limitações e desvantagens, podem também ser atribuídas ao processo, entre as que se destacam (THOMAS e NICHOLAS; 1997):

- i. Requer um sistema rígido de fixação das peças a serem soldadas devido as força axial e transversal presentes no processo;
- ii. Dificuldade de soldagem de materiais que possuem alto ponto de fusão;
- iii. Necessidade de uma ferramenta específica para cada liga soldada;
- iv. Complexidade na determinação dos parâmetros;
- v. Pouca flexibilidade do equipamento de soldagem;
- vi. Custo elevado com o maquinário para soldagem;
- vii. Uma cavidade é formada no final de cada passe no ponto de retirada da ferramenta.

Já em relação às ligas de alumínio pode-se afirmar (THOMAS e NICHOLAS; 1997):

- i. Não há presença de porosidade; a formação de vazios pode ocorrer, entretanto, a maior parte de combinação de parâmetros de soldagem resulta em soldas íntegras;
- ii. Por não ocorrer fusão metálica, as ligas suscetíveis a trincamento podem ser soldadas;
- iii. Ligas tratáveis termicamente podem ser soldadas com propriedades mecânicas resultantes satisfatórias;
- iv. Possibilidade de soldagem de materiais produzidos através de processos distintos, como a junção de partes extrudadas e fundidas ou de peças trabalhadas a frio e peças fundidas;
- v. Perfis extrudados de ligas de baixa densidades são de difícil obtenção em grandes dimensões e, frequentemente, não são indicados para soldas com fusão devido a uma distorção resultante significativa. O método FSW, porém, pode ser empregado gerando estruturas grandes, como compartimentos navais.

### 1.2.3 Parâmetros do processo FSW

Para se obter uma boa união das partes é necessário uma combinação adequada dos parâmetros do processo de soldagem para que o equilíbrio entre massa e volume sejam garantidos durante o escoamento do material, e também para evitar o desenvolvimento de defeitos volumétricos na zona de mistura. Determinadas variáveis independentes são empregadas a fim de controlar o processo, podendo influenciar as características da zona

recristalizada dinamicamente, zona de mistura, assim como na formação de defeitos, alterando, então, a qualidade final da junta obtida por FSW, são eles: a velocidade de avanço ao longo da linha da junta, a velocidade de rotação da ferramenta, o sentido horário ou anti-horário, a força vertical sobre a ferramenta, o ângulo de inclinação da ferramenta e o desenho da ferramenta de soldagem propriamente dita (NANDAN et al., 2008).

i. Velocidade de avanço

A velocidade de avanço ou de soldagem corresponde à distância percorrida pela ferramenta por unidade de tempo (mm/min), estando diretamente relacionada com a geração de calor no decorrer do processo. Baixas velocidades de soldagem provocam maior geração de calor e consequente elevação da temperatura, já altas velocidades implicam em menor geração de calor por unidade de comprimento da solda.

ii. Velocidade de rotação

Este parâmetro corresponde a frequência de giro do pino em unidades rpm. Está correlacionado com a geração de calor durante o processo de soldagem, tendo uma maior temperatura quando imposta uma maior velocidade de rotação, devido ao atrito entre a ferramenta e a peça ser maior, provocando o aumento do aquecimento. A movimentação do material e a mistura ao redor do pino são resultados da movimentação do pino, promovendo o escoamento da parte frontal para a parte posterior da ferramenta (MISHRA e MA, 2005). Segundo Aires (2007), a razão entre a velocidade de rotação da ferramenta e a velocidade de avanço é determinante na otimização dos parâmetros de soldagem.

iii. Força vertical de forjamento

A força vertical de forjamento é um fator responsável pelo aporte de calor e a diminuição de possíveis defeitos na junta soldada. A perda de qualidade da junta pode se dar pela aplicação da força indevida no equipamento que está realizando a soldagem, ademais, é possível gerar defeitos na superfície pela falta de força compressiva. Além disso, segundo Cruz (2009), observa-se que o excesso de força vertical de forjamento pode levar à formação de rebarba que se adere à superfície da peça, defeito este que pode ser verificado visualmente. Com a formação de rebarba a seção transversal da junta soldada é reduzida.

#### iv. Ângulo de inclinação da ferramenta

Este parâmetro é responsável por auxiliar na movimentação do material da parte da frente para a parte de trás do pino, assim como, na consolidação do material plastificado após a passagem do pino, por causa da maior pressão existente nesta região. A ferramenta responsável pela união entre as chapas, em geral, inclina-se, ligeiramente, no sentido da soldagem, gerando um ângulo de inclinação (SEGATTI, 2011).

#### v. Penetração da ferramenta

Este parâmetro está relacionado à função do comprimento do pino e ao ângulo de inclinação adotado, sendo responsável pela pressão imposta na parte posterior da ferramenta durante o processo de soldagem. Uma vez que o comprimento do pino é maior que a espessura das chapas a serem soldadas, o ombro da ferramenta não mantém muito contato com a chapa, deste modo se diminui a pressão entre o ombro e chapa, reduzindo a temperatura de soldagem e, gerando frequentemente, defeitos nas juntas (SEGATTI, 2011). É importante frisar, que a penetração do pino no material que está sendo soldado é de 70 % do valor da espessura da amostra (Torres, Ramirez; 2011).

#### vi. Geometria da ferramenta

A geometria da ferramenta é um fator de suma importância. Responsável pelo escoamento do material plastificado ao redor do pino e pela geração de aquecimento, impactando diretamente no desenvolvimento do processo de soldagem (CAPELARI, 2006). O atrito entre o ombro e a peça a ser soldada provém a maior parcela de calor gerado durante o processo. O ombro também é responsável por restringir a saída do material da região de solda, facilitando o escoamento do mesmo ao redor do pino. Já o pino atua de forma a forçar o deslocamento do material amolecido na peça de trabalho, em estado plastificado, nas direções de cima para baixo e da parte frontal para a posterior da ferramenta. O pino também pode atuar de forma a fragmentar e dispersar óxidos e impurezas da região da junta em soldagens realizadas no alumínio.

A ferramenta de ombro plano e com estrias em forma de espiral, como as apresentadas na Figura 4, estão entre as geometrias de ferramentas de maior uso para a realização do processo por FSW. Nesse tipo de configuração de ombro, não é necessário o ângulo de ataque da ferramenta, fato já pesquisado no *The Welding Institute* (TWI, 2007), favorecendo a execução

da soldagem em maquinários mais simples, como em centros de usinagens e em fresas universais, que não possuem o recurso de inclinação angular no eixo da árvore (ANDRADE, 2009). O ombro penetra na peça entre 0,1 e 0,25 mm, onde o excesso de profundidade, porém, gera muitas rebarbas. As estrias presentes no ombro da ferramenta direcionam o material para o interior do ombro no sentido do pino, de forma a reduzir rebarbas e regulando o nível de forjamento adequado do material.

O uso de pinos cilíndricos rosqueados com a ponta arredondada ou reta, citados na patente original da FSW, também são de uso frequente para a soldagem por FSW. Os pinos roscados com face reta são de uso comum, sendo a rosca do pino direita ou esquerda, independente da geometria do ombro. O tipo de rosca adotada é um parâmetro de grande relevância, podendo ser alterada a quantidade de fios por polegada, o que implica na mistura do material pré-aquecido e na quantidade de material agitado pelo pino. Além disso, é possível criar outras geometrias superficiais tais como a apresentada na Figura 4.

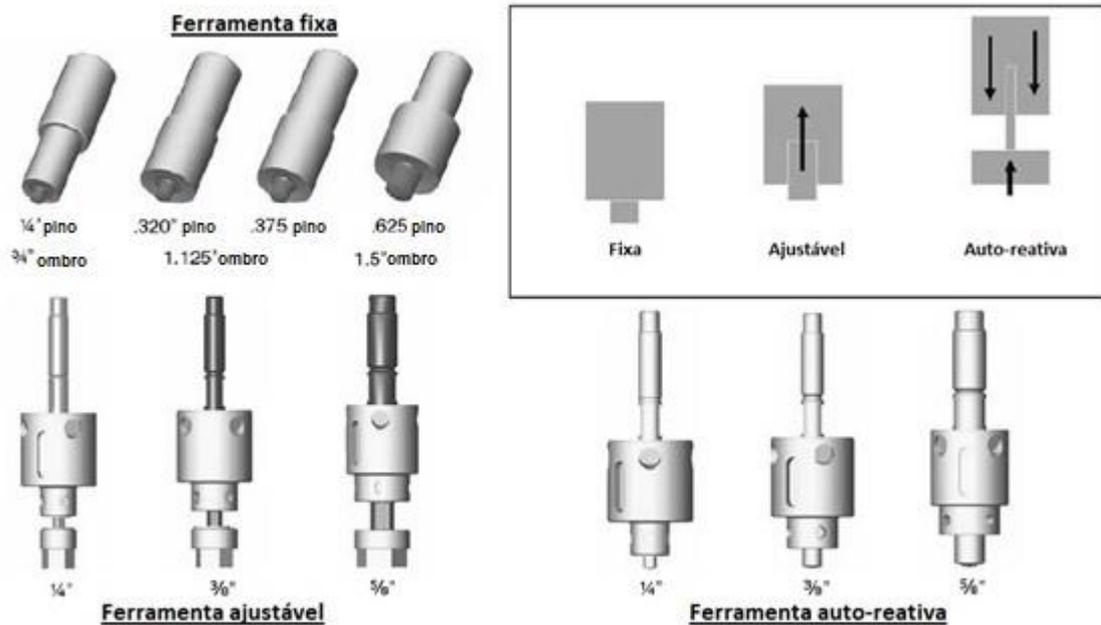
Figura 4 – Diversas geometrias do pino. Destaque para a ferramenta de ombro plano com estrias em forma de espiral



Fonte: AIRES, 2007; CAPELARI e MAZZAFERRO, 2009.

As ferramentas utilizadas no processo FSW abrangem três componentes: ombro, pino e recursos externos (parafusos de fixação para não ocorrer o deslocamento do pino durante o avanço do processo de soldagem) havendo variações nos formatos e materiais empregados. Estes materiais devem possuir características que incluem alta resistência ao desgaste e dureza, não interação com o material da liga, estabilidade dimensional e resistência à fluência em temperaturas ambiente e elevadas; capacidade de suportar ciclos térmicos repetidos sem fadiga; boa resistência à fratura; baixo coeficiente de expansão térmica e boa usinabilidade (MUBIAYI et al., 2019). Por outro lado, a geometria da ferramenta divide-se em três categorias: fixa, ajustável e auto-reativa, como se descreve na Figura 5.

Figura 5 - Diversos formatos da geometria da ferramenta do processo FSW



Fonte: Adaptado de MISHRA et al., 2007.

A ferramenta fixa é constituída por um único componente, composto de pino e ombro e somente pode ser utilizada para soldar peças com uma espessura específica, pois o comprimento do pino não pode ser alterado.

Nas ferramentas ajustáveis, os componentes ombro e pino atuam de forma independente, o que permite ajustes no comprimento do pino resultando em múltiplas configurações de ferramenta, facilitando a soldagem de peças com diversas espessuras.

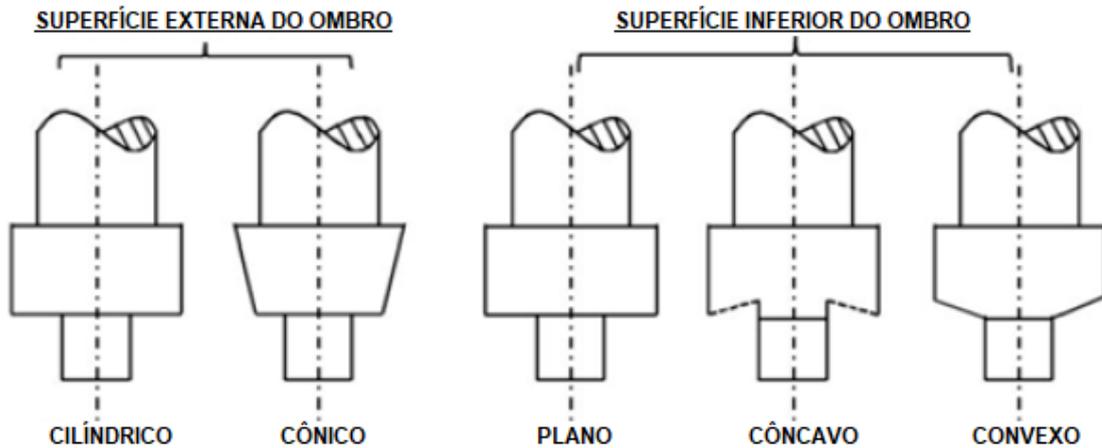
Já na ferramenta auto-reativa, os componentes ombro superior, ombro inferior e pino somente podem atuar de forma perpendicular à superfície do material a ser soldado, ao contrário das ferramentas fixa e ajustável que podem ser inclinadas longitudinalmente e lateralmente em relação à peça de trabalho (INFANTE e VIDA, 2014).

#### vi. Geometria do Ombro

O ombro possui, em geral, formato cilíndrico, entretanto, em muitos casos também é adotada a geometria cônica, como apresentado na Figura 6. A geometria exterior do ombro, cilíndrica ou cônica, possui uma influência insignificante sobre a qualidade da soldagem,

devido ao fato da profundidade da imersão do ombro ser consideravelmente pequena. O ombro da ferramenta é projetado com a finalidade de gerar um aquecimento através da fricção nas regiões da superfície da peça que está sendo soldada (CAO et al., 2012).

Figura 6 - Geometrias de ombro



Fonte: Adaptado de MISHRA; Ma., 2005.

A superfície inferior do ombro pode causar influências na qualidade da soldagem, podendo ser adotados três tipos de superfície: plano, côncavo ou convexo, como se observa na representação esquemática da Figura 6. A superfície plana é a mais simples, apresentando como desvantagem a pouca eficácia em reter o material que flui sob o ombro, gerando excesso de rebarba (CAO et al., 2012).

O ombro côncavo foi o primeiro modelo a ser desenvolvido e o mais comumente utilizado para a soldagem por FSW. Ele tornou-se muito útil uma vez que restringe a perda de material, pelos lados do ombro, resultando em bons cordões de solda. A angulação entre a borda do ombro e o eixo do pino é responsável por definir a concavidade do ombro. Usualmente tem valores em torno de 6 a 10 graus, sendo os valores de 2 a 4 graus os mais relatados na literatura como ângulos de inclinação adequados.

No período de tempo em que a ferramenta está imersa, o material deslocado pelo pino é alimentado para o interior da cavidade do ombro, uma vez que a região côncava do ombro funciona como um armazenador de volume de escape. Dessa forma, a inclinação da ferramenta se faz necessária para bloquear o material, impedindo a produção de rebarbas e permitindo que a extremidade traseira do ombro gere uma força compressiva (INFANTE e VIDA, 2014).

O perfil de ombro convexo é também utilizado em alguns casos. Entretanto, esse tipo de superfície tende a empurrar o material para longe do pino, dificultando o processo de soldagem, sendo necessário determinar de maneira adequada os parâmetros de processo. Através do uso deste perfil, com os parâmetros de processo otimizados, é possível obter uma maior flexibilidade na área de contato entre o ombro e a peça de trabalho, o que promove a união de peças com diferentes espessuras de forma mais fácil, além de auxiliar na capacidade de solda de curvaturas complexas (INFANTE e VIDA, 2014).

#### vi. Geometria do Pino

O pino da ferramenta tem a função de produzir aquecimento e deformação plástica do material de solda devido ao atrito entre o pino e partes da peça soldada. É importante destacar, que o pino deve ter os movimentos de rotação e translação para realizar a união das partes. Além disso, esse componente é responsável pela profundidade de deformação do material, que afeta o fluxo de material plastificado, fator relacionado diretamente a geometria do pino, assim como, a sua rugosidade superficial. Portanto, este componente interfere diretamente na qualidade da junta soldada (INFANTE e VIDA, 2014).

A Figura 7 apresenta o resumo dos modelos dos pinos e o tipo e rugosidade superficial. Pode-se observar que existe uma ampla quantidade de geometrias para os pinos e nem sempre a geometria cilíndrica é utilizada, também como a forma da superfície pode apresentar diversos tipos, podendo esta ser isenta de rugosidade, rosqueada, sulcada e hachurada.

Normalmente, os pinos voltados para o processo de soldagem por FSW possuem a geometria cilíndrica. A forma cônica também é usualmente utilizada uma vez que possui uma área de contato com a peça de trabalho maior, provocando uma geração de calor por atrito superior, o que conduz a um aumento da deformação plástica. O uso do pino com a geometria cônica também promove uma elevada pressão hidrostática na solda, o que é de suma importância para garantia de uma boa agitação do material e a integridade da zona de mistura. Deve-se atentar, porém, a que as altas temperatura e a pressão hidrostática podem levar ao severo desgaste da ferramenta (CAO et al., 2012).

Figura 7 - Quadro resumo de modelos de pinos para a soldagem FSW

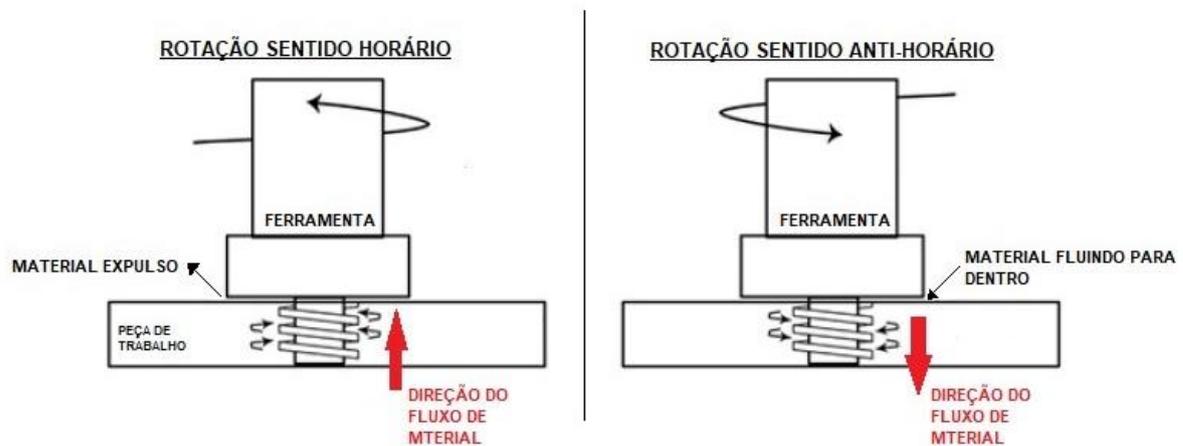
	FORMATO CILINDRICO		FORMATO CÔNICO			
	PLANO	ARREDONDADO				
FORMATO CILINDRICO	 CILINDRO LISO	 CILINDRO SULCADO	 CILINDRO COM PLANOS	 CILINDRO ROSQUEADO	 CILINDRO ROSQUEADO E SULCADO	 CILINDRO ROSQUEADO E PLANO
SUPERFÍCIE ENTRE A EXTREMIDADE E O PINO	 CIRCULAR	 TRÊS LADOS	 TRIANGULAR	 QUADRADO	 PENTAGONAL	 HEXAGONAL
FORMATO CÔNICO	 LISO	 SULCADO	 CÔNICO COM PLANOS	 ROSQUEADO	 ROSQUEADO E SULCADO	 ROSQUEADO E PLANO
SUPERFÍCIE ENTRE A EXTREMIDADE E O PINO	 CIRCULAR	 TRÊS LADOS	 TRIANGULAR	 QUADRADO	 PENTAGONAL	 HEXAGONAL

Fonte: Adaptado de CAO; WANJARA E LAROSE, 2012.

As superfícies externas podem ter formas e características diferentes, tais como o tipo de roscas, planos e sulcos. Por exemplo, se o pino for rosqueado para esquerda e estiver programado para rotacionar no sentido anti-horário, isso fará com que o material seja arrastado para baixo, através dos chanfros das roscas ao longo da superfície do pino. Este processo promove a agitação do material, o fechamento de vazios e a quebra de óxidos, permitindo boa qualidade do cordão de solda (CAO et al., 2012).

A Figura 8 apresenta a representação esquemática de processos de solda por FSW, onde os pinos com superfícies do tipo broca giram em sentidos horário e anti-horário. Observa-se que em dependência do sentido do giro do ferramental o fluxo do material é de baixo para cima ou de cima para baixo das partes soldadas.

Figura 8 - Efeito na direção do fluxo do material conforme a direção rotacional da ferramenta



Fonte: Adaptado de BANJARE et al., 2016.

De forma geral, os pinos que não possuem rosca são utilizados somente em situações específicas, como quando as roscas não suportam o esforço sem fraturar ou sofrer desgaste severo, logo, são aplicados em ligas que apresentam alta resistência ao desgaste ou que sejam bastante abrasivas e duras. A fim de se estudar o fluxo de material durante o FSW, esses pinos também são utilizados para gerar, de forma proposital, defeitos na junta soldada (INFANTE e VIDA, 2014).

#### vii. Materiais das ferramentas

Uma junta de boa qualidade, obtida através do processo FSW, é proveniente da utilização de uma ferramenta fabricada em material adequado. Segundo INFANTE e VIDA (2014), é importante que o material da ferramenta possua:

- I. Boa resistência ao desgaste: o desgaste significativo da ferramenta, pode levar ao aumento do custo do processo de soldagem, além da formação de alguns efeitos indesejáveis sobre a microestrutura da junta soldada;
- II. Boa resistência a fratura: é essencial que a ferramenta resista ao dano durante o mergulho da ferramenta. Esta característica corresponde tanto à deformação dos pinos, dilatação térmica ou fratura em duas ou mais partes da ferramenta;
- III. Boa resistência mecânica: Durante o processo de soldagem o pino é submetido a temperaturas de aproximadamente 70 a 90 % do ponto de fusão do material que está

sendo soldado, logo, é relevante que o material da ferramenta tenha alta resistência mecânica em elevadas temperaturas, caso contrário ele pode falhar;

- IV. Boa usinabilidade: devido às características complexas da geometria do ombro e o pino, uma boa usinabilidade promove facilidade na fabricação dessas peças;
- V. Baixo coeficiente de dilatação térmica: a dilatação volumétrica da ferramenta depende da temperatura que se alcança durante o processo de solda. Este parâmetro está estreitamente relacionado à condutividade térmica do material da ferramenta e, de forma indireta, ao material da peça de trabalho e de alguns outros parâmetros do processo. Um baixo coeficiente de dilatação térmica entre os materiais do pino e do ombro reduz as tensões térmicas, já a condutividade térmica elevada torna-se indesejável uma vez que a remoção excessiva de calor entre a interface ferramenta e peça de trabalho, requer uma alta velocidade de rotação da ferramenta para amolecer o material da peça a ser soldada e, também, para reduzir a tensão da ferramenta.

Como o ombro e o pino desenvolvem funções distintas, eles podem ser produzidos em materiais diferentes. Deve-se atentar, porém, à diferença de expansão térmica durante o projeto. Em ligas de alumínio soldadas por FSW, comumente é empregado aço ferramenta para trabalho a quente, como o AISI H13. Os aços VC 130 e VC 131 também são adequados ao uso (HILLER, 2007).

Sabe-se que tungstênio, molibdênio, nióbio e tântalo são utilizados como elementos de liga nos aços ferramenta. Entretanto, os metais refratários possuem limitação em sua disponibilidade, altos custo e longo prazo de entrega, criando barreiras quanto ao uso destes materiais. Já os carbetos são comumente empregados para a usinagem de ferramentas FSW em temperatura ambiente, devido ao fato de oferecerem maior resistência ao desgaste e razoável tenacidade à fratura. Matrizes metálicas reforçadas por partículas cerâmicas também têm sido utilizados como materiais para pinos e ombros, mas a natureza frágil do compósito pode levar à fratura durante o mergulho da ferramenta. Sendo assim, em um comparativo, os carbetos possuem melhor desempenho em elevadas temperaturas, sendo, portanto, mais apropriados para a produção de ferramentas de usinagem (INFANTE e VIDA, 2014).

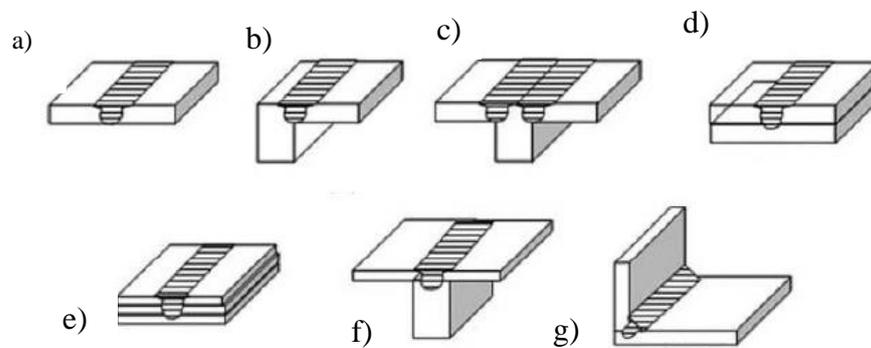
O nitreto cúbico de boro policristalino (PCBN) foi originalmente desenvolvido para a usinagem de aços ferramenta, ferros fundidos e super ligas, e, recentemente, foi aderido como um dos possíveis materiais para ferramenta do processo FSW para ligas de alta temperatura. O PCBN possui um baixo coeficiente de fricção, o que gera uma junta soldada de superfície lisa,

porém, os custos para a produção da ferramenta são muito elevados, devido altas temperaturas e pressões necessárias no processo de fabricação (INFANTE e VIDA, 2014).

#### 1.2.4 Tipos de Junta

O projeto de junta engloba a disposição dos perfis e chapas durante o processo de soldagem, sendo as juntas de topo, normalmente, as mais utilizadas. As diferentes configurações de junta, podem ser observadas na Figura 9 (SOUZA et al., 2013).

Figura 9 - Tipos de juntas que podem ser obtidas pelo processo FSW



Legenda: a) junta de topo, b) junta de topo a 90°, c) juntas de topo do tipo T tripartida, d) junta sobreposta, e) junta sobreposta múltipla, f) juntas de topo do tipo T bipartida e g) junta de topo em ângulo.

Fonte: Adaptado de SOUZA et al., 2013.

#### 1.2.5 Aplicações do Processo

É relatado que o processo FSW foi utilizado de forma comercial, por uma empresa naval, pela primeira vez, em 1997, através de soldas por fricção em painéis de alumínio com cerca de 6 m<sup>2</sup> de área superficial, com espessura de 3,15 mm, por uma empresa Norueguesa. No ano de 1999, a empresa Boeing também utilizou este processo, investido 15 milhões de dólares para realizar esse procedimento no tanque de combustível do foguete de lançamento Delta (POTOMATI, 2006). Em 2012, a Honda Motor Corporation do Japão também utilizou o

processo FSW para a união contínua de diferentes metais, como aço e alumínio, aplicado, pela primeira vez no mundo, na produção em massa de um veículo na linha de produção, realizando a soldagem de componentes do sub-chassi do Honda Accord modelo 2013. O uso desta tecnologia levou a uma redução de até 25% no peso em comparação ao sub-chassi convencional, soldado pelo processo MIG, o que, conseqüentemente, promove economia de combustível (WORLD HONDA, 2012). Atualmente diversas outras empresas vem adotando o processo FSW para a produção de componentes incluindo algumas construtoras de engenharia civil e fabricantes de botes e navios (GESELLA and CZECHOWSKI, 2017)

É importante salientar que a ferramenta no processo de solda por FSW não é consumível e, sua geometria volumétrica e superficial são essenciais no processo de soldagem. Em geral o conjunto é composto por um ombro e um pino que são responsáveis pelo amolecimento da peça, a agitação do material plastificado que resultará na junta soldada e no controle do material através do ombro (INFANTE e VIDA, 2014). Durante o processo, a maior parte de calor é gerado pelo ombro, o qual, também, restringe o material plastificado, que tende a escapar da junta, em torno do pino. O pino, por sua vez, tem como função arrastar, misturar e plastificar o material na região de mistura, excluindo a necessidade de fusão para a obtenção da solda (CAO et al., 2012).

Desta forma, tem-se, então, os parâmetros importantes para que a soldagem ocorra de forma plena. São eles: o diâmetro do ombro, o diâmetro do pino, o comprimento do pino, a velocidade de rotação e de avanço da ferramenta e, a escolha adequada da rugosidade superficial da ferramenta de acordo com o material a ser soldado (INFANTE e VIDA, 2014). Durante o processo de soldagem a ferramenta é submetida a altas temperaturas e severas tensões, principalmente, quando a liga em questão possui alta dureza, como os aços e ligas de titânio, o que pode levar a uma limitação para aplicações comerciais do processo FSW devido ao alto custo e vida curta das ferramentas (INFANTE e VIDA, 2014).

A soldagem de materiais pelo método FSW é um assunto relativamente novo, o que torna pouco conhecidos os parâmetros ideais para o processo adequado, assim como a geometria das ferramentas, fatores que são essenciais para a obtenção de uma solda com penetração total, boa mistura e acabamento livre de defeitos, deste modo deve se realizar um adequado estudo prévio a soldagem de componentes ou peças. Neste trabalho foi realizada projeção das ferramentas para uso em maquina fresadoras convencionais e o desenvolvimento será apresentado posteriormente no item metodologia.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais utilizados tanto nas soldagens quanto na fabricação dos componentes do ferramental. A metodologia utilizada na projeção das ferramentas e as técnicas de caracterização das amostras soldadas. Ademais, serão descritos os equipamentos complementares utilizados na preparação de amostras e na análise das juntas soldadas obtidas. É de salientar que os itens serão apresentados em tópicos específicos para seu melhor entendimento, dando ênfase ao item de elaboração e projeção das ferramentas, junto aos testes preliminares das soldas.

### 2.1 Material das soldas

No desenvolvimento deste trabalho foram utilizados diferentes materiais dependendo de seu uso na fabricação das ferramentas ou das amostras de solda. Neste item é apresentado somente o material utilizado na a preparação das amostras de solda, correspondente à liga de alumínio comercial AA1050.

A Tabela 3, apresentada anteriormente, mostra a composição química nominal deste material, onde se observa pequenos teores dos elementos de liga, que se introduzem como impurezas e por tanto, pode-se considerar que esta liga é próxima do alumínio comercialmente puro. Por outro lado, a Tabela 4 apresenta algumas das propriedades físicas e mecânicas da liga AA1050, destacando a baixa resistência mecânica e a alta ductilidade do material que, em princípio, facilitam o processo de soldagem por FSW.

Ademais se observa na tabela a grande mudança nos valores das propriedades mecânicas da liga AA150 quando na condição de recozida (O) e encruada por trabalho a frio com 75% de redução de área, na condição (H18). Considerando que o cordão de solda pelo processo FSW induz elevado grau de discordâncias é de se esperar uma melhora na resistência mecânica da solda.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas da liga AA1050

<b>MATERIAL</b>	<b>PROPRIEDADE</b>	<b>VALOR</b>
1050 O	Densidade	2,70 g/cm <sup>3</sup>
	Limite de resistência	76 MPa
	Limite de escoamento	28 MPa
	Alongamento	39%
	Módulo de elasticidade	69 GPa
	Dureza Brinell	21 HB
	Calor específico	0,9 J/g°.C
	Condutividade térmica	231 W/m.K
	Temperatura de fusão	646 a 657 °C
	1050 H18	Densidade
Limite de resistência		160 MPa
Limite de escoamento		145 MPa
Alongamento		7%
Módulo de elasticidade		69 GPa
Dureza Brinell		43 HB
Calor específico		0,9 J/g°.C
Condutividade térmica		227 W/m.K
Temperatura de fusão		646 a 657 °C

Fonte: Adaptado de MatWeb, 2021.

## 2.2 Equipamento Adaptado Para a Realização da Soldagem FSW

Para o processo de soldagem FSW utilizou-se uma fresa Clever, modelo 4VS, a qual possui controle da velocidade de rotação da ferramenta até 3800 RPM, cabeçote inclinável, indicador de posição da mesa digital e avanço automático nos 3 eixos (X, Y e Z). A Figura 10 apresenta uma fotografia do mencionado equipamento.

Todos os processos de FSW foram realizados sob o controle de deslocamento, sendo as placas unidas a topo e travadas na posição adequada da máquina fresadora usando grampos mecânicos da própria fresadora. A direção de soldagem foi normal à direção de laminação das chapas.

Figura 10 - Modelo de máquina fresadora utilizada para o processo de soldagem FSW



Fonte: DONIMAQ, 2021.

### 2.3 Elaboração do Projeto da Ferramenta

Como apresentado anteriormente, o processo de soldagem FSW permite obter tanto peças soldadas, quanto modificar a microestrutura das peças. Deste modo, é importante destacar que a técnica pode ser utilizada para ambos os fins. Até a presente data, diversos estudos foram reportados tratando da otimização de parâmetros para se obter cordões de solda adequados de ligas, tanto similares quanto dissimilares. Contudo, poucos trabalhos tem sido reportados respeito da modificação estrutural sendo este tema muito importante. Inicialmente, este o projeto pretendia dar ênfase a esse estudo, entretanto, o paro obrigatório dos laboratórios não permitiu levar adiante o estudo devido às limitações de usinagem das ferramentas para induzir

a modificação microestrutural dos cordões de solda, sendo necessário modificar o objetivo do estudo desta dissertação.

Como apresentado anteriormente, o sucesso de soldas por FSW depende em grande parte da ferramenta rotativa e não consumível, com variados designs, que é fabricada em materiais resistentes em alta temperatura, em geral superiores àsquelas dos materiais soldados. Item que será abordado posteriormente na seleção dos materiais para a fabricação das ferramentas.

Para possibilitar uma boa execução do projeto das ferramentas, foi necessário realizar ampla revisão da literatura, devido a que em muitos dos casos as informações são limitadas e contraditórias, induzindo a erros sistemáticos na concepção da geometria adequada.

Como foi descrito no capítulo antecedente, o processo FSW, essencialmente, consiste na introdução da ferramenta entre as faces adjacentes das peças de trabalho e rotacionada em frequências controladas, gerando calor de fricção que cria uma região amolecida em torno do pino imerso e na interface entre o ombro da ferramenta e a peça de trabalho. Ademais, o ombro fornece fricção adicional à peça de trabalho, além de evitar que o material plastificado seja expelido da solda. A resistência do metal, na interface entre a ferramenta rotativa e a peça de trabalho, cai para valores inferiores aquela da tensão de cisalhamento aplicada à medida que a temperatura aumenta. Assim, o material plastificado é extrudado do lado dianteiro para o lado posterior da ferramenta e, como a ferramenta é movida de forma constante ao longo da linha da junta a soldagem contínua é realizada.

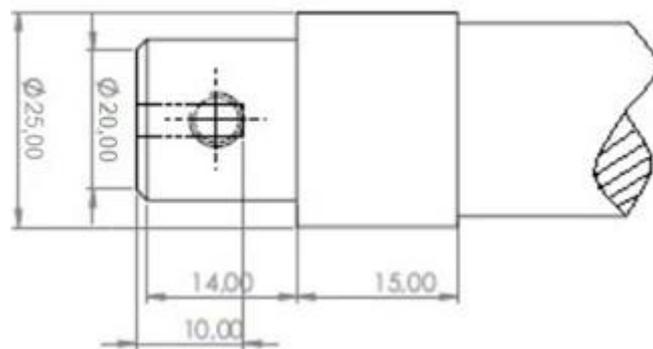
É importante mencionar que neste processo nenhum material de preenchimento é utilizado, eliminando a formação de defeitos próprios de soldagens obtidos por processos convencionais de fusão. Contudo, embora muitos autores relatam cordões de solda livres de defeitos, é possível que porosidade possa ser formada em função da geometria do pino utilizado e dos parâmetros de processo, fato que deve ser comprovado neste estudo.

Considerando estas observações, neste item descreve-se as etapas seguidas na elaboração do design das ferramentas, pois esta é a chave para experimentos de FSW bem sucedidos. Tendo em conta o importante papel do ombro no processo adotou-se, por sua simplicidade, o modelo de superfície plana, que embora apresenta a possível desvantagem de maior produção de rebarbas, foi o mais adequado em termos de usinabilidade, permitindo, uma rápida e fácil usinagem das ferramentas da soldagem. A Figura 11 apresenta a vista frontal da peça projetada com as respectivas medidas em milímetros. Pode-se observar que a ferramenta apresenta a peculiaridade de estar separada do pino, com a finalidade de otimizar o material na fabricação dos pinos e evitar a perda generalizada de pino e ombro. Ademais, o modelo de ferramenta ajustável, permite alcançar um número maior de combinações de parâmetros de soldagens

obtendo uma maior economia de recursos, alterando, assim, somente o componente pino, e reaproveitando o ombro da ferramenta.

Além disso, pode-se observar que o ombro apresenta um furo transversal de 5 mm, que aloca o parafuso de ajuste do pino, permitindo adequada fixação e acople entre pino e obro, respectivamente. Vale ressaltar, que para fixação do pino na ferramenta, utilizou-se um parafuso de especificação M5.

Figura 11 - Geometria do ombro



Fonte: A Autora, 2021.

É sabido que durante o processo de FSW há alta movimentação de material plastificado da amostra que conduz ao sucesso da solda e, em geral, depende da geometria dos pinos. Diversos tipos de geometria dos pinos também como da rugosidade superficial têm sido reportados. Para observar o comportamento do fluxo de material através das roscas, e sua influência na soldagem mediante a agitação do material deformado plasticamente, foram projetados pinos cilíndricos, em vez de cônicos, com três diferentes passos de roscas, sendo estas de 1,25 mm; 1,5 mm e 2,0 mm. Embora há pouca diferença no tamanho dos sulcos é de se esperar algumas diferenças na microestruturas dos cordões de solda realizados, em função das roscas dos pinos, da frequência de giro e da velocidade de avanço, durante os processos de soldagem.

Uma das mais importantes etapas na fabricação de componentes de máquinas-ferramentas é a seleção de materiais. Neste estudo, para este fim, foram considerados o custo do material e da usinagem também como a durabilidade. Além disto, é importante ressaltar que o ferramental foi projetado considerando que a realização do processo FSW deve ser executado, de forma apropriada, em dispositivos presentes em oficinas de usinagem convencional. No

projeto teve-se como premissa inicial o estudo de ligas a base de alumínio, e, posteriormente, sua possível aplicação a outros metais como, por exemplo, ligas a base de cobre e magnésio.

Após a análise detalhada das propriedades físicas e mecânicas de diversos materiais, determinou-se que as ferramentas devem ser fabricadas em aço. Este material, em dependência de sua composição química, apresenta adequada temperatura de fusão, boa usinabilidade, e pode posteriormente ser endurecido por tratamentos térmicos gerando uma boa dureza e resistência ao desgaste, também como adequada tenacidade, suficiente para realizar as soldas por FSW das ligas a base de alumínio. Contudo, vale evidenciar que para ligas à base de titânio, níquel e alguns aços, o custo de soldagem e a vida útil da ferramenta ainda são alvos de pesquisa, e o material da ferramenta é um item importante a ser desmembrado (INFANTE e VIDA, 2014), estando este item fora do escopo deste trabalho.

Para a soldagem de ligas de alumínio os materiais mais utilizados são os aços ferramenta. Dentro desse grupo de materiais, o aço AISI H13, composto por cromo/molibdênio trabalhado à quente e endurecido ao ar, tem sido amplamente utilizado, já que sua alta disponibilidade, elevada resistência ao desgaste, resistência à fadiga térmica, boa usinabilidade e baixo custo contribuem para tal. Aços endurecidos em óleo também são usados, tais como o aço ferramenta AISI D2, o aço SKD61 e o aço VND, que possui em sua composição carbono, manganês, cromo e tungstênio (INFANTE e VIDA, 2014). Neste trabalho, considerando as principais propriedades mecânicas e custo econômico, foi adotado o aço VND para a usinagem do ombro e pinos. A Tabela 5 apresenta os principais elementos químicos e seus respectivos teores presentes no aço. Pode-se observar que o aço apresenta alto teor de carbono e manganês, além de cromo e tungstênio, formadores de carbeto que endurecem o material após o respectivo tratamento térmico.

Tabela 5 - Especificação Técnica do Aço VND

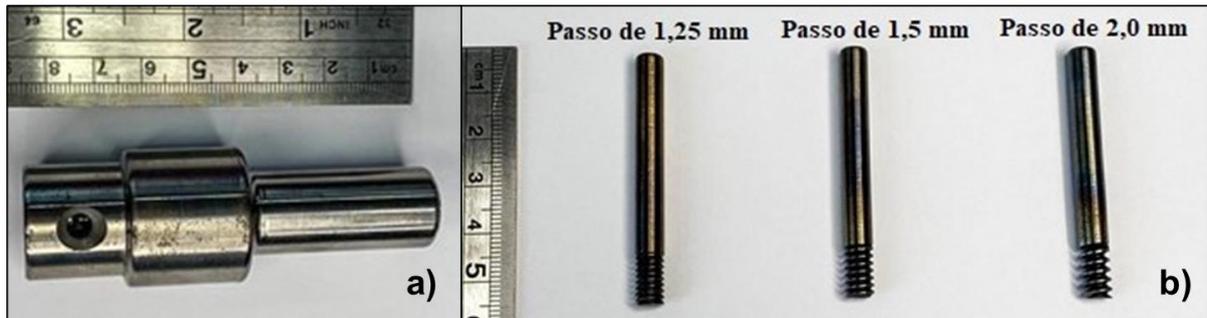
<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>	<b>W</b>
0,95	1,2	0,5	0,5

Fonte: Adaptado de Guia Prático, 2015.

Tendo elaborado o projeto das ferramentas e selecionado o material para as mesmas, passou-se a etapa de fabricação via usinagem convencional. A Figura 12 apresenta as fotografias das ferramentas produzidas. Pode-se observar na Figura 12 (a) o ombro da

ferramenta, entanto que, na Figura 12 (b) as os três pinos projetados onde se aprecia as diferenças no rosqueamento dos mesmos.

Figura 12 - a) Ombro projetado e usinado, b) Pinos projetados e usinados em aço VND com os seus respectivos passos



Fonte: A Autora, 2021.

Após a usinagem dos ombros e dos pinos, visando o aumento da resistência mecânica e dureza superficial das ferramentas, foi realizado o tratamento térmico de têmpera, nos seguintes passos (GGD Metals, 2015): pré-aquecimento a 600 °C; austenitização na faixa de temperaturas 790 - 820 °C; manutenção das ferramentas na temperatura por quinze minutos e, em seguida, resfriá-los em óleo morno com agitação e, por fim, resfriá-los em ar.

Feito a têmpera, o tratamento térmico de revenimento foi seguidamente realizado para eliminação de tensões residuais e da fragilidade adquirida através da têmpera, proporcionando tenacidade e resistência mecânica ao material. Como o aço VND não possui endurecimento secundário, a temperatura adotada para o revenimento foi de 200 °C durante duas horas (GGD Metals, 2015).

Após os respectivos tratamentos térmicos, das partes da ferramenta, foi realizada montagem das peças. A Figura 13 apresenta a fotografia da ferramenta após o acople de ambas as partes, ombro – pino, onde se aprecia o encaixe perfeito das partes com aparência de uma peça única.

Figura 13 - Conjunto de ferramentas ombro – pino acoplado



Legenda: a) ferramenta composta por ombro e b) ferramenta composta por ombro e pino.

Fonte: A Autora, 2021.

#### 2.4 Execução dos Testes Prévios de Soldagem

Tendo as ferramentas completamente funcionais, deu-se início aos testes preliminares, em amostras de alumínio comercialmente puro, com a finalidade de determinar os parâmetros adequados para a realização do processo de soldagem por FSW.

No processo de FSW existem diversos parâmetros que podem modificar a microestrutura do cordão de solda, portanto, é importante compreender a influência desses parâmetros envolvidos para, assim, poder determinar como realizar a soldagem de forma eficaz. Considerando este princípio, foi necessário observar a ocorrência de rebarbas, a presença de discontinuidades na junta e a penetração da solda, além de outros possíveis defeitos como porosidade ou microvazios. Para isto, foi realizada a inspeção visual com lupa de aumento de forma cuidadosa. A análise visual das amostras permitiu ter algumas conclusões referentes aos fatores avaliados. Deste modo, pode-se fazer ajustes no projeto da ferramenta e selecionar os parâmetros de soldagem apropriados.

A Tabela 6 apresenta os parâmetros que foram adotados para a realização dos testes, consistindo de: velocidade de rotação, velocidade de avanço e os passos de rosca atrelado à geometria da ferramenta.

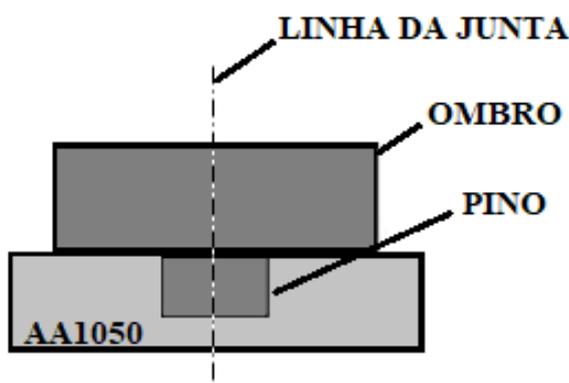
Tabela 6 - Parâmetros do processo de soldagem FSW adotados para os testes de soldagem

<b>VELOCIDADE DE ROTAÇÃO (RPM)</b>	<b>VELOCIDADE DE AVANÇO (mm/min)</b>	<b>PASSO DE ROSCA (mm)</b>
600	5	1,25
1800	5	1,25
1800	5	1,5
1800	5	2,0
2300	10	1,25
2300	10	1,5
2300	10	2,0

Fonte: A Autora, 2021.

Em todos os testes realizados, a penetração do pino foi de 70 % do valor da espessura da amostra, assim como estudado em outras pesquisas (Torres, Ramirez; 2011), ou seja, a penetração adotada na fase de testes foi de 2,8 mm, como representado esquematicamente na Figura 14.

Figura 14 - Representação esquemática da penetração da ferramenta na liga soldada por FSW



Fonte: A Autora, 2021.

Dos testes preliminares pode-se observar que quanto maior o passo de rosca, maior a facilidade de avanço da ferramenta, independente da velocidade de avanço programada. A Tabela 7 resume os parâmetros de soldagem adotados após as análises dos testes preliminares.

Tabela 7 – Resumo de testes de soldas pelo processo de FSW

1.	<b>Fatores Controláveis</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rotação;</li> <li>• Avanço;</li> <li>• Comprimento do pino (penetração).</li> </ul>					
2.	<b>Variáveis do Processo</b>	<b>VARIÁVEL</b>		<b>RELEVÂNCIA</b>			
		Tamanho da rebarba		Quanto menor melhor			
		Presença de descontinuidade		Quanto menor melhor			
		Penetração da solda		Quanto maior melhor			
3.	<b>Parâmetros do Processo</b>	<b>DESIGNAÇÃO</b>		<b>VALOR</b>	<b>UNIDADE</b>		
		Rotação		1800 e 2300	rpm		
		Avanço		5 e 10	mm/min		
		Passos do pino		1,25; 1,5 e 2,00	mm		
		Diâmetro do pino		6	mm		
		Força axial da ferramenta		Desconhecido	kN		
		Penetração		2,8	mm		
		Ângulo de inclinação da ferramenta		0	graus		
4.	<b>Definição dos Níveis de Fatores Controláveis</b>	<b>DESIGNAÇÃO</b>	<b>NÍVEL 1</b>	<b>NÍVEL 2</b>	<b>NÍVEL 3</b>	<b>NÍVEL 4</b>	
		Rotação	1800 rpm	1800 rpm	1800 rpm	2300 rpm	
		Avanço	5 mm/min	5 mm/mim	5 mm/mim	10 mm/mim	
		Ø do pino	6 mm	6 mm	6 mm	6 mm	
		Passo do pino	1,25 mm	1,5 mm	2,0 mm	1,25 mm	
		<b>NÍVEL 5</b>	<b>NÍVEL 6</b>				
		2300 rpm	2300 rpm				
		10 mm/mim	10 mm/mim				
		6 mm	6 mm				
		1,5 mm	2,0 mm				
5.	<b>Restrições Experimentais</b>	Pouca repetição nos ensaios devido à pouca quantidade de material disponível.					
6.	<b>Parâmetro de Qualidade</b>	Solda livre de defeitos (rebarbas, trincas, porosidades ou microvazios)					

Fonte: A Autora, 2021.

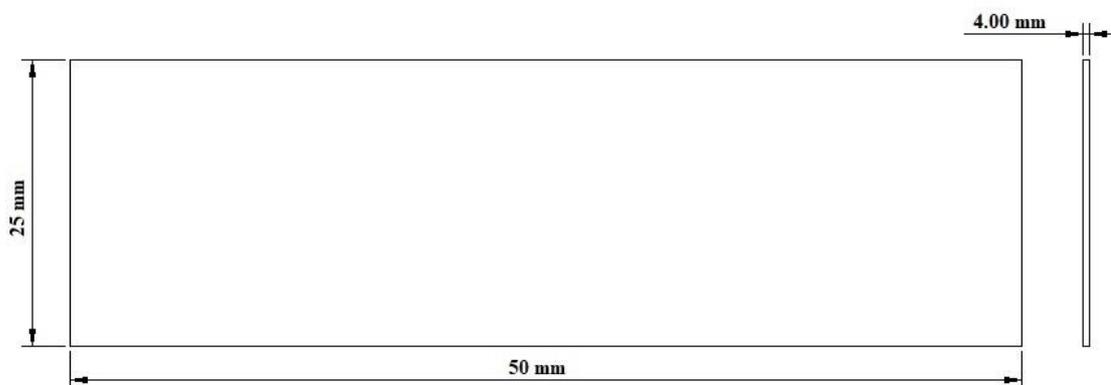
Antes de dar início ao avanço do pino no processo de soldagem é necessário um tempo de espera em que a ferramenta fica em contato com o material que será unido, somente com o movimento de rotação iniciado. Em todas as soldagens realizadas nesse trabalho, esse tempo foi de 30 segundos.

Também é importante ressaltar que, o passo de rosca dos pinos assume a direção direita, conforme o projeto da ferramenta, logo, o sentido de rotação da fresadora adotado foi o horário, para que dessa forma não ocorra a expulsão do material amolecido, fazendo com que o fluxo ocorra de baixo para cima e o ombro consiga restringir esse material de forma mais eficiente na região da junta soldada.

#### 2.4.1 Preparação dos Corpos de Prova para Soldagem por FSW

Os corpos de prova submetidos à solda por FSW foram produzidos a partir de uma chapa de alumínio comercial com espessura nominal de 4,00 mm, largura de 50 mm e comprimento de 500 mm. A chapa foi dividida em peças menores, conforme ilustra a Figura 15, para se obter diversas partes para as soldas. Importante ressaltar que os corpos de prova foram destinados tanto para os testes preliminares, onde foram definidos os parâmetros adequados de soldagem, quanto para a realização dos ensaios finais de solda.

Figura 15 - Representação esquemática de uma parte utilizada no processo de soldagem por FSW



Fonte: A Autora, 2021.

#### 2.4.2 Preparação Metalográfica das Amostras Soldadas

Uma amostra transversal da porção mediana de cada junta soldada, foi extraída com o auxílio do corte por Eletroerosão a Fio. A seguir, deu-se início ao processo de lixamento das amostras, de forma manual, através da utilização de água, por meio da combinação sequencial de lixas de granulometria: 150, 200, 320, 400, 600, 1000, 1200, 1500, 2000 e 2500  $\mu\text{m}$ . A cada mudança de lixa, a mostra era girada em  $90^\circ$ , de acordo ao aconselhado nas técnicas de preparo metalográfico.

Dando sequência ao processo de metalografia, a próxima etapa foi o polimento, na máquina LIXADEIRA/Politriz DP-10 Panambra, realizada com o auxílio de um feltro de 1  $\mu\text{m}$ . Primeiramente, a alumina de 3  $\mu\text{m}$  foi utilizada, passando, posteriormente, para a alumina de 1  $\mu\text{m}$ . A frequência de rotação da politriz foi de 150 rpm

#### 2.4.3 Análise Microestrutural por Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

A microscopia eletrônica de varredura é umas das técnicas de maior uso na caracterização estrutural de materiais devido a sua alta capacidade de detecção de características microestruturais ou ainda na escala manométrica dependendo do tipo de dispositivo utilizado.

A diferença dos microscópios ópticos, que utilizam a radiação de luz visível para a geração das imagens, os microscópios eletrônicos usam elétrons com diversos comprimentos de onda a qual depende da tensão de alimentação. A interação dos elétrons do feixe primário com os átomos da amostra pode gerar diferentes tipos de elétrons, fótons ou radiações. Nos MEVs, os dois tipos de sinais mais usados na geração de imagens são por elétrons secundários (SE) e elétrons restroespalhados (BSE). Os SE se originam nos átomos das regiões superficiais, da amostra como resultado de interações inelásticas entre o feixe de elétrons e a amostra, entretanto, os BSE advêm de regiões mais profundas da amostra e são originários do feixe de elétrons primário, que são refletidos de volta após as interações elásticas entre o feixe de elétrons e a os átomos da amostra.

O MEV tem a capacidade de gerar micrografias diferentes em função do sinal utilizado, seja este de SE, BSE ou ainda a mistura dos dois. No modo SE pode-se obter imagens onde

predomina o contraste topológico sendo de amplo uso no estudo da rugosidade superficial, superfície de fratura, entre outros. No modo BSE predomina o contraste químico, sendo este modo mais adequado para observar fases com composições químicas diferentes mesmo que estas sejam relativamente próximas devido à alta sensibilidade às diferenças no número atômico; quanto maior o número atômico, mais brilhante o material é representado na imagem. Outra importante característica do MEV é a elevada profundidade de foco, gerando imagens com aparência tridimensional. Ademais, permite a combinação da análise microestrutural com a microanálise química que são fatores que em muito contribuem para o amplo uso desta técnica.

Neste trabalho a microscopia eletrônica de varredura foi adotada para a observação e análise microestrutural das amostras antes e após soldagem por FSW. O equipamento utilizado foi o microscópio de bancada modelo HITACHI TM3000 do Laboratório de Tecnologia de Polímeros (TECPOL) do IPRJ. Todas as imagens foram coletadas no modo BSE.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item são apresentados os resultados e a análise da influência dos diversos parâmetros de soldagem que podem interferir sobre as características microestruturais obtidas através do processo FSW. Essa análise é feita por meio da confrontação dos resultados provenientes dos diferentes testes realizados, assim como, de um comparativo com os dados disponíveis na literatura.

#### 3.1 Soldagem Pelo Processo FSW

##### 3.1.1 Ajustes preliminares

Previamente aos ensaios de soldagem foram realizados diversos testes preliminares que auxiliaram na execução dos ajustes necessários, a fim de se obter soldas com o mínimo ou ausência total de defeitos. Para isso, foram realizados estudos, onde a velocidade de avanço, a velocidade de rotação e a penetração do pino da ferramenta foram avaliados e analisados em diversas circunstâncias em valores diversificados. Desta forma, os testes de soldagem foram executados visando classificar as soldas quanto à ocorrência dos seguintes fenômenos:

- Excesso de rebarbas;
- Vazios ao longo da solda;
- Quebra ou danificação que impossibilite o uso da ferramenta de soldagem;
- Penetração adequada do pino, conforme especificado no item 3.4

Foram adotados os seguintes passos padronizados para a soldagem das chapas:

- Limpeza das chapas com Metiletilcetona;
- Fixação das chapas na morsa da fresa, onde foi feita a adaptação do suporte de soldagem;
- Alinhamento dos elementos: pino e junta;
- Ajustes na velocidade de rotação e avanço;
- Início do processo de rotação do conjunto ferramental;

- Rotação da ferramenta, sem avanço, em contato com a peça durante 30 segundos;
- Deslocamento automático da ferramenta de forma longitudinal;
- Finalização do deslocamento e retirada da ferramenta.

A todo momento, a máquina fresadora foi observada de forma qualitativa, de modo a analisar fatores como vibração, ruído e aquecimento excessivo.

As diferentes combinações dos parâmetros, juntamente com a análise da geometria da ferramenta possibilitou a identificação da melhor combinação dos parâmetros de soldagem, os mesmos que foram apresentados anteriormente na Tabela 6 e Tabela 7.

Inicialmente, a velocidade de rotação de 600 rpm e velocidade de avanço de 5 mm/min, por meio do pino de geometria cilíndrica com passo de rosca de 1,25 mm foram adotados como parâmetros, porém, no primeiro teste realizado, levou a uma combinação de fatores não favoráveis para a continuidade dos testes dentro dessas condições de soldagem. Foi observado vibração e ruídos excessivos da máquina fresadora, dificuldade no avanço da ferramenta e penetração inadequada do pino, levando a soldagem inadequada e má sucedida. Visando a conservação das ferramentas e da máquina fresadora, optou-se, então, por não dar continuidade ao estudo desse conjunto de parâmetros, a seguir na Figura 16, apresenta-se a imagem da amostra soldada dentro dos parâmetros excluídos do estudo.

Figura 16 - Amostra soldada num teste preliminar dentro dos parâmetros: velocidade de rotação de 600 rpm, velocidade de avanço de 5 mm/min e pino de geometria cilíndrica com passo de rosca de 1,25 mm

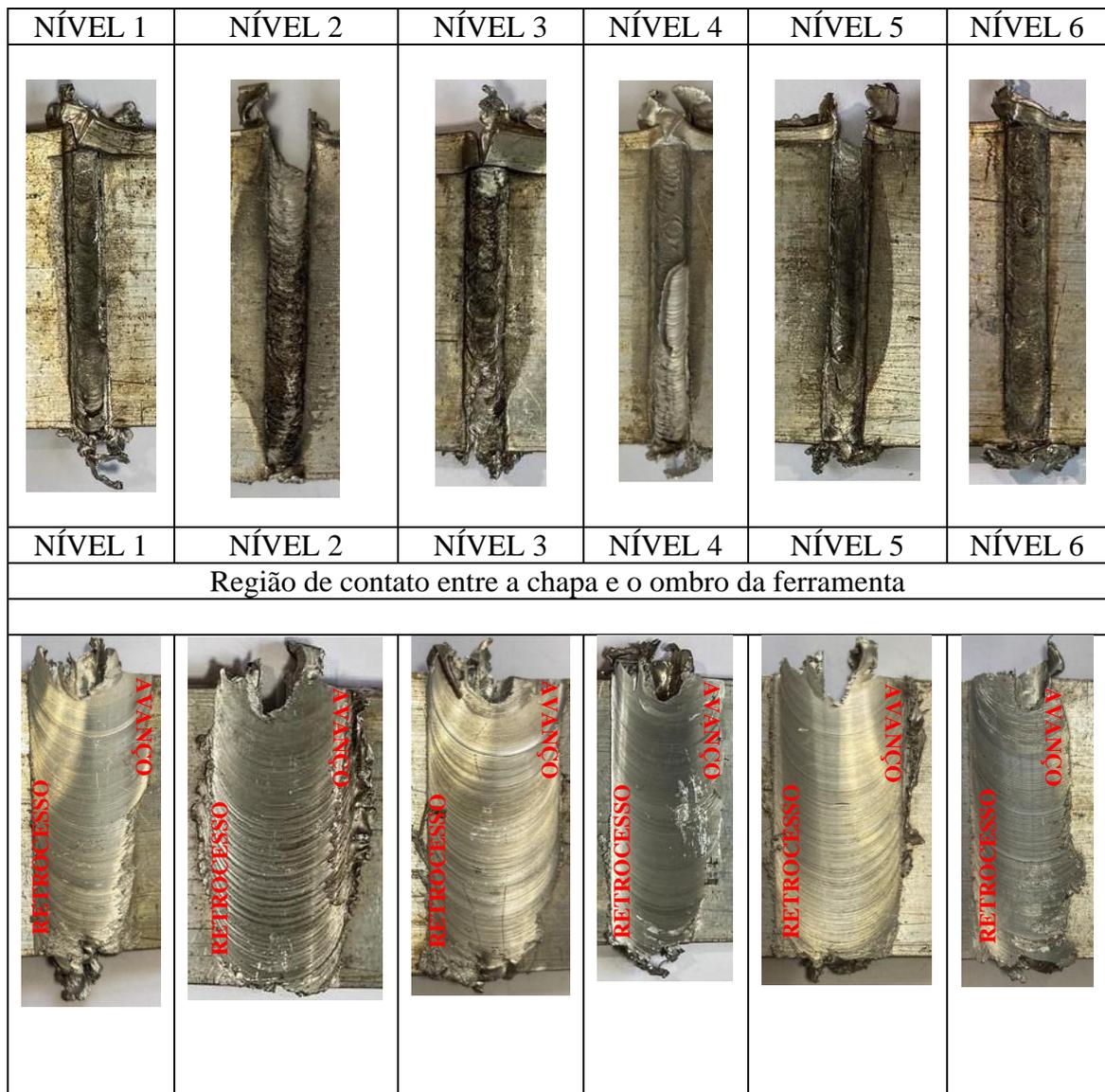


Fonte: A Autora, 2021.

### 3.1.2 Inspeção Visual das Soldas FSW

Tomando-se como base os dados da Tabela 6, foram realizadas as soldagens conforme os parâmetros estipulados. A Figura 17 apresenta fotografias das diversas peças de alumínio AA1050 soldadas por FSW, utilizadas para inspeção visual das amostras, como critério de avaliação qualitativa.

Figura 17 - Fotografias da superfície das juntas soldadas



Fonte: A Autora, 2021.

Por meio da inspeção visual, pode-se notar que o cordão de solda do Nível 2, correspondente à rotação de 1800 rpm, velocidade de avanço de 5 mm/min e passo da rosca do pino de 1,5 mm, apresentou características da junta uniforme, porém, com presença de rebarbas. No Nível 5, onde a rotação é de 2300 rpm, a velocidade de avanço 10 mm/min e o passo da rosca do pino de 1,5 mm observa-se a ocorrência de vazios na junta, possivelmente, proveniente da combinação do aumento da velocidade de rotação com o avanço da ferramenta, porém, também é notória a expulsão de material, levando à formação de rebarbas. Sendo assim, nos dois testes onde foram empregados os pinos com passo de 1,5 mm, a ocorrência de rebarbas é perceptível, não sendo o dispositivo de melhor desempenho de acordo com os testes estudados. Há também a possibilidade de ter ocorrido a ausência de penetração do ombro da ferramenta, em que nesses casos, pode ter somente tangenciado as chapas.

As juntas soldadas dos Níveis 1 e 3 apresentam adequada homogeneidade, com um bom preenchimento, embora a menor velocidade de avanço da ferramenta, tenha causado uma maior deformação plástica na parte final do cordão de solda.

O cordão de solda do Nível 4 não apresenta bom acabamento superficial, devido à formação de vazios em grande parte da junta, por possível falta de penetração do pino. A ausência de rebarbas é constatada, demonstrando que o ombro permaneceu eficiente quanto a retenção de material dentro da junta.

Já a junta do Nível 6, correspondente a velocidade de rotação de 2300 rpm, velocidade de avanço de 10 mm/min e o passo da rosca do pino de 2,0 mm, foi a que apresentou as melhores características, sem nenhum defeito aparente, indicando que, possivelmente, esse conjunto de parâmetros seja o ideal para uma solda com boas propriedades mecânicas e microestruturais, entre as estudadas nesse projeto.

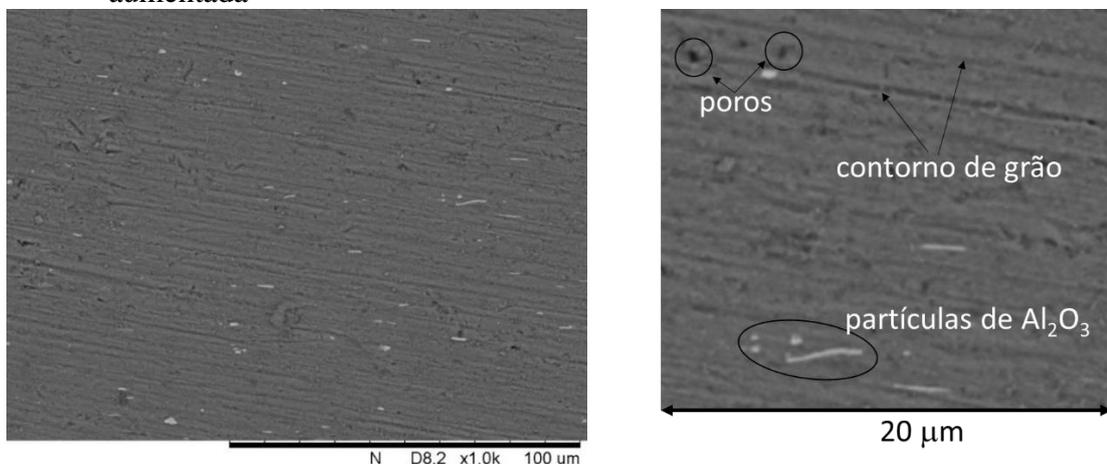
Em todas as amostras a mistura do material soldado, no cordão, apresenta-se eficaz, com exceção do cordão de solda do Nível 4, mesmo no trecho inicial, ocorrendo apenas o furo no final do trecho soldado, desvantagem intrínseca do processo FSW. A homogeneidade estrutural do cordão indica que a penetração do pino e o material plasticamente deformado permaneceu constante em todo o processo de solda.

### 3.2 Caracterização Microestrutural

Após a obtenção das soldas mediante o processo FSW, onde as partes são submetidas à ação de uma ferramenta rotativa que provoca influência em diversas formas na junta, por meio das características microestruturais, é possível prever os comportamentos do material em relação, por exemplo, à resistência corrosão ou à resistência mecânica. Desta forma, a seguir são apresentadas as micrografias de MEV e suas respectivas análises. Como as peças soldadas apresentam diversas regiões que sofreram diferentes níveis de influência das ferramentas de solda, foi necessário realizar a caracterização microestrutural em cada uma delas. Primeiramente, realizou-se a caracterização do metal base com a finalidade de se ter a microestrutura de referência na comparação com a microestrutura do cordão das soldadas, as mesmas que representa a união de duas partes pela ação da alta deformação plástica imposta pelas ferramentas.

A Figura 18 apresenta a micrografia de MEV, do modo BSE com magnificação de 1000X do metal base. Pode-se observar, na cor cinza escuro, grãos estreitos e alongados separados por linhas finas pretas correspondentes aos contornos de grão. Esta microestrutura é devida a que o material foi submetido ao processo de deformação plástica a frio gerando a microestrutura de grãos alongados, alinhados com a direção de laminação do material. Além disso também é possível observar regiões escuras dispersas no material correspondente à porosidade. Ademais, é claramente visível determinada quantidade de partículas, em cinza clara, devido à alumina aderida à superfície do material durante o processo de polimento do material.

Figura 18 - a) Micrografias do metal base obtida por MEV no modo BSE, b) micrografia aumentada



Fonte: A Autora, 2021.

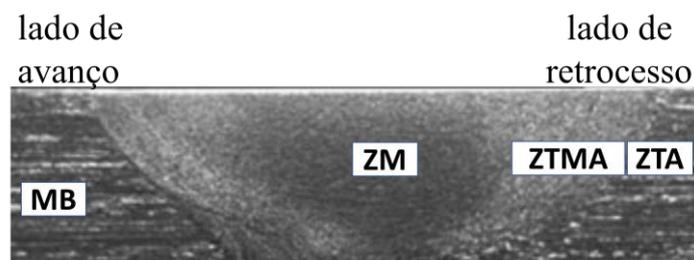
É importante destacar que a preparação metalográfica das amostras, após o processo de soldagem FSW, não foi de fácil realização, uma vez que o material possui baixa dureza e alta ductilidade tornando-o susceptível à deformação plástica, tanto durante os processos de retirada das amostras das seções de junta soldada quanto durante o preparo metalográfico de lixamento e polimento. Como mencionado anteriormente, a estrutura texturizada deve-se à submissão do material ao processo de deformação plástica a frio e, esta microestrutura serve como base para a análise da microestrutura dos cordões das soldas.

Como já é conhecido, o perfil da ferramenta (ranhuras) influencia a microestrutura do cordão de partes unidas por FSW. No processo de solda o perfil da ferramenta é a principal causa da mistura e recombinação do material plastificado por tanto pode conduzir a solda de boa ou limitada qualidade.

De modo geral, a região da zona de mistura, representada esquematicamente na Figura 3, apresenta uma microestrutura onde os grãos são equiaxiais, da ordem de alguns micrômetros, derivados da recristalização dinâmica imposta pelo elevado grau de deformação plástica e pela temperatura, conferidos ao material pela rotação e penetração da ferramenta nas partes durante o processo de soldagem (THREADGILL et al, 2009).

A Figura 19 apresenta uma micrografia óptica da seção transversal, perpendicular à direção de soldagem, para a amostra do Nível 6 com parâmetro de soldagem de velocidade de rotação da ferramenta de 2300 rpm e velocidade de deslocamento de 10 mm/min e passo de rosca do pino de 2.0 mm, que apresentou a melhor qualidade de solda. Observa-se as diferentes zonas da solda como a zona de mistura, a zona termomecanicamente afetada e a zona afetada pelo calor. Nesta micrografia se aprecia que as zonas correspondentes a ZTA e MB não apresentam significativas diferenças, entretanto a zona MB apresenta a textura bem definida. Estes resultados são similares a outros estudos reportados na literatura, contudo, é importante mencionar que nem todas as amostras apresentaram a descrita microestrutura.

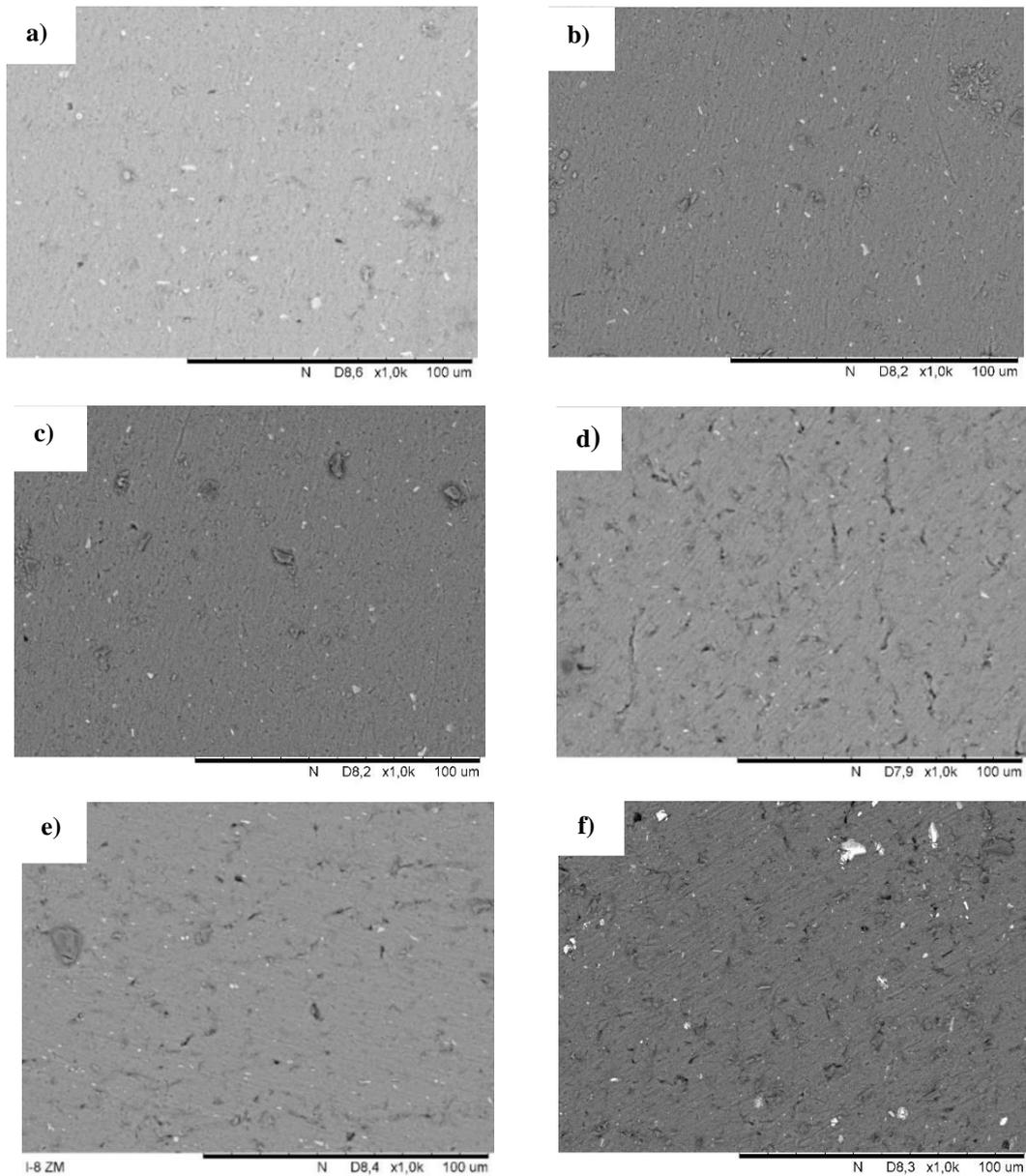
Figura 19 - Micrografias da região da zona de mistura sob diversos parâmetros de processo



Fonte: A Autora, 2021.

A Figura 20 apresenta diferentes imagens de MEV, no modo BSE, obtidas das ZM de amostras processadas sob diferentes parâmetros de processo utilizados para obter soldas apropriadas com o menor nível de defeitos. Pode-se observar as imagens correspondentes aos 6 níveis de processo, onde se verifica grãos recristalizados maiores em decorrência do aumento da velocidade de rotação do pino e do avanço da ferramenta.

Figura 20 - Micrografias da região da zona de mistura sob diversos parâmetros de processo



Legenda: a) Nível 1, b) Nível 2, c) Nível 3, d) Nível 4, e) Nível 5, f) Nível 6,

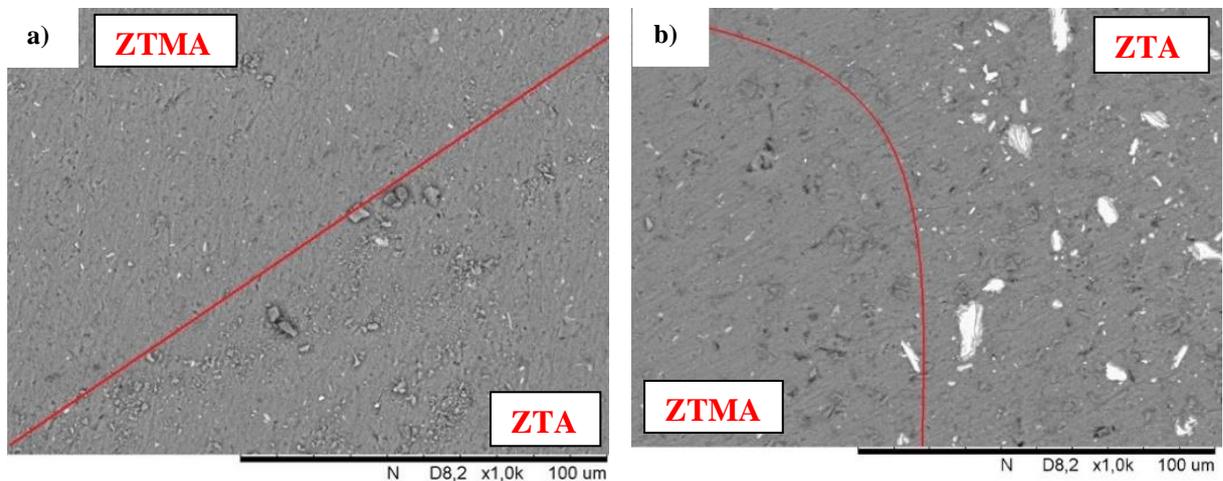
Fonte: A Autora, 2021.

É amplamente reportado que os cordões de soldas por FSW, apresentam em geral microestruturas livres de porosidade. Entretanto, neste estudo esta afirmação não é corroborada com base nas micrografias de MEV onde se observa, em todas as micrografias, diferentes níveis de porosidade de acordo aos parâmetros de processo. Importante ressaltar que as micrografias de MEV evidenciam os defeitos que não foram observados na microscopia óptica (MO) o que já era esperado dada a melhor resolução do MEV que ademais permite a obtenção de imagens em maiores magnificações.

Como foi apresentado anteriormente, as peças soldadas, além da zona do metal base, apresentam três importantes zonas diferenciadas entre si pela sua microestrutura sendo estas: as zonas ZTA e ZTMA além da ZM. Portanto, é importante também obter as características microestruturais destas zonas.

A Figura 21 e a Figura 22, apresentam imagens das micrografias correspondentes a ZTMA e a ZTA das amostras do Nível 1, Nível 2 e Nível 3, onde a velocidade de rotação da ferramenta utilizada foi de 1800 rpm e a velocidade de avanço de 5 mm/min, alterando apenas os passos das roscas.

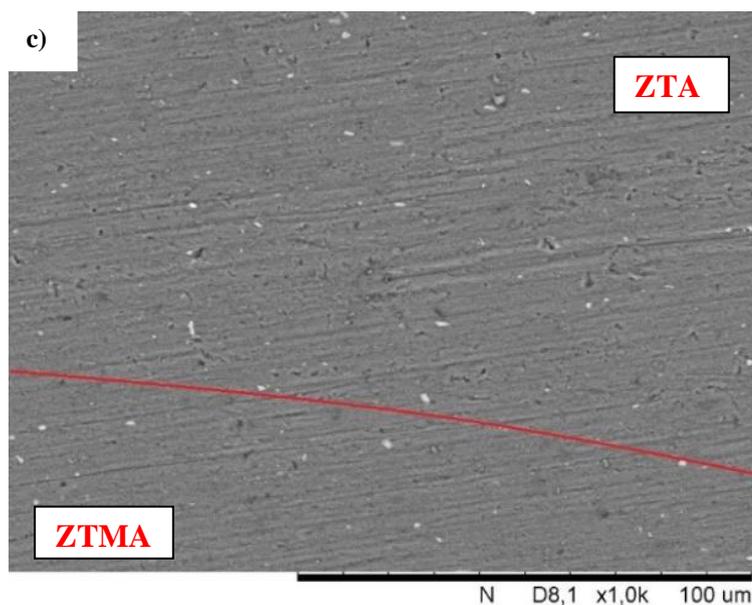
Figura 21 - Micrografias das zonas de transição entre a ZTA e a ZTMA – Nível 1 e Nível 2



Legenda: a) Nível 1, b) Nível 2

Fonte: A Autora, 2021.

Figura 22 - Micrografias das zonas de transição entre a ZTA e a ZTMA – Nível 3



Legenda: c) Nível 3.

Fonte: A Autora, 2021.

É possível verificar pelas micrografias de MEV, que não há diferenças significativas entre as microestruturas de ambas as zonas. Este inusitado comportamento pode estar relacionado a determinados fatores de processo, como por exemplo ao fato de que as amostras não foram expostas a altas temperaturas para afetar a microestrutura, e à deformação plástica homogênea que não conduzem à modificação nos grãos. Importante destacar que a liga AA1050 apresenta alta condutividade térmica, eliminando rapidamente o calor gerado pelo atrito entre as partes e a ferramenta. Por outro lado, a impossibilidade de visualização dos grãos da zona de mistura deve-se aos fenômenos de deformação e recristalização dinâmica que surgem como resultado da ação mecânica do pino da ferramenta.

O processo FSW impõe elevados níveis de deformação plástica, por tanto, alta formação de discordâncias, que podem servir como centros de nucleação de novos grãos, além disso, o crescimento de grão acontece geralmente devido a elevadas temperaturas locais. Considerando esta hipótese, e o fato de alta condutividade térmica do material, pode-se dizer que o aquecimento é localizado apenas a regiões pequenas e por intervalos de tempo bastante curtos. Desse modo, a combinação destes fatores possibilita a recuperação dinâmica, onde discordâncias em cunha com orientações opostas, são anuladas por causa da elevada mobilidade ocasionada pela alta temperatura localizada. Conforme o processo de soldagem avança, a deformação ininterrupta do material, imposta pela ferramenta, incorpora cada vez mais

discordâncias que distorcem a rede cristalina e termodinamicamente, devido à redução de energia, as discordâncias se alinham em determinadas direções, levando à formação de subgrãos com contornos de baixo ângulo, o que é chamado de poligonização. Deformações subsequentes continuam ocorrendo, introduzindo ainda mais discordâncias na estrutura dos subgrãos, resultando em grãos de estrutura equiaxiais recristalizados com contorno de alto ângulo, livres de deformações (THREADGILL et al; 2009) e tamanho de grão relativamente grande como é o caso das amostras em análise deste trabalho. Contudo, esta é uma hipótese plausível não confirmada pelas micrografias devido as limitações impostas pelo MEV de bancada utilizado.

Adjacente à zona de mistura localiza-se a ZTMA, representada na Figura 19, e esta região teoricamente tipificada pela alta variação na orientação dos grãos, proveniente da ação mecânica, teoricamente apresenta pequenos grãos recristalizados que decai com o aumento da distância a partir da zona de mistura devido a que os fenômenos de recuperação e recristalização ocorrerem de forma menos intensa no núcleo de solda. Contudo, neste estudo não foi possível verificar o gradiente do tamanho de grão nesta região devido às limitações do equipo utilizado.

Sabe-se que as alterações microestruturais ocasionadas nas regiões da solda são influenciadas, de forma importante, pela taxa de aquecimento, temperatura de pico e resfriamento que está interligado ao aporte térmico, ou seja, quanto menor o aporte térmico, menor a taxa de resfriamento. Velocidades maiores de avanço resultam em menores aportes térmicos, como especificado na Equação 1 (WEY et al; 2011):

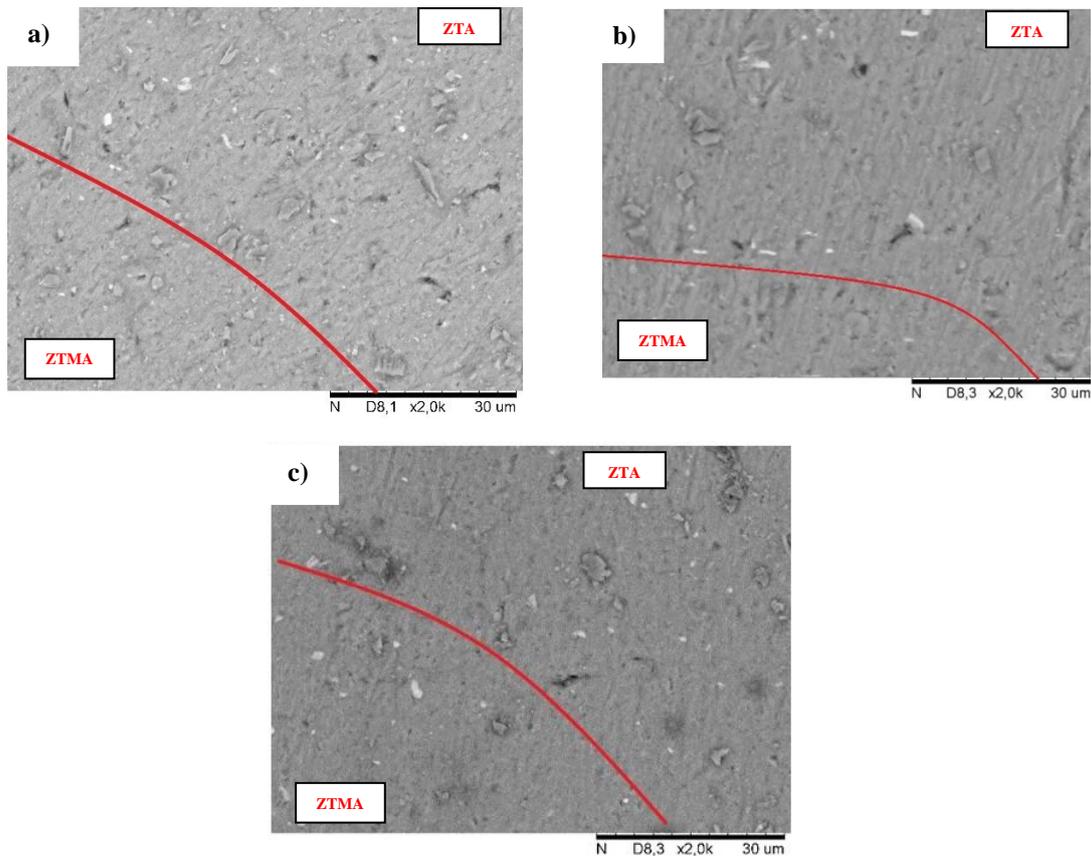
$$AT = \frac{2\pi T\omega}{v} \quad (1)$$

Onde a unidade da Equação (1) é representada em  $\left(\frac{J}{mm}\right)$ .

Para este estudo, a relação 1 indica que as soldas produzidas com a menor velocidade de rotação, 1800 rpm devem apresentar um maior refino de grão, com maior evidência nas zonas ZTA e ZTMA, em comparação com as amostras soldadas na velocidade de rotação de 2300 rpm, com avanço de 10 mm/min, que apresentaram um aumento no tamanho dos grãos, nas mesmas zonas, em bom acordo com o demonstrado nas imagens da Figura 20.

De forma complementar às imagens correspondentes à transição da microestrutura entre as zonas ZTA e ZTMA, a Figura 23 apresenta as micrografias de MEV correspondentes as amostras dos Níveis 4, 5 e 6, onde não é possível a observação clara da transição microestrutural sendo apenas visível pequenas evidencias da transição.

Figura 23 - Micrografias das zonas de transição entre a ZTA e a ZTMA – Nível 4, Nível 5 e Nível 6



Legenda: a) Nível 4, b) Nível 5 e Nível 6.

Fonte: A Autora, 2021.

Apesar da falta de evidências, a relação entre o aumento do refino microestrutural e a redução da temperatura envolvida no processo está condicionada ao processo de recristalização, onde as variáveis temperatura e tempo de exposição do material são de suma importância para que este fenômeno ocorra, resumidamente, em duas etapas. A primeira, a recristalização primária, que ocorre, em suma, nos contornos dos grãos deformados formando novos grãos e, a segunda etapa, que gera o crescimento desses grãos nucleados (THEODORO, 2013).

Sendo assim, nas juntas soldadas, a recristalização ativa-se tanto pela temperatura quanto pela deformação plástica, logo, a redução de temperaturas combinada com maiores velocidades de rotação da ferramenta pode levar a uma diminuição da incidência da recristalização secundária, o que justifica o refino da microestrutura observada, uma vez que a velocidade de avanço empregada foi maior.

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O estudo para o desenvolvimento do ferramental necessário para a realização de soldagem pelo processo FSW em torno convencional foi realizado. As ferramentas projetadas sob considerações de menor simplicidade foram usinadas em aço VND e submetidas a tratamentos térmicos para atingir propriedades mecânicas otimizadas.

A soldagem pelo processo de FSW foi estudada e aplicada na liga de alumínio comercial AA1050 sob diversos parâmetros de processo. Previamente a análise e projeção do ferramental necessário para o acoplamento em fresa comum de uso em oficinas mecânicas convencionais foi desenvolvido e fabricado. Entre as principais conclusões deste trabalho podem se destacar:

- Foi comprovado o bom potencial do processo FSW na produção de soldas de boa qualidade na liga de alumínio AA1050. Os resultados estão em bom acordo com os relatos nas publicações realizadas. A obtenção de adequados cordões de solda dependem fortemente da velocidade de rotação do pino também como da velocidade de avanço.
- Foi comprovada a forte influência do passo de rosca nos pinos. Nas chapas soldadas com os pinos de passo de rosca de 1,5 mm observa-se a ocorrência de rebarbas, tanto no Nível 2, quanto no Nível 5, indicando que apesar da velocidade de rotação e da velocidade de avanço, este pino não apresenta um bom desempenho em comparação com os outros em estudo.
- Soldas livres de defeitos e com mistura homogênea foram resultados de uma combinação de rotação da ferramenta, entre 1800 rpm e 2300 rpm, e passos do pino de 1,25 mm; 1,5 mm e 2 mm, mantendo a velocidade de avanço contínua em 10 mm/min. As soldas obtidas apresentaram uma boa qualidade superficial com pouca geração de rebarba.
- O conjunto de parâmetros correspondente a velocidade de rotação de 2300 rpm, velocidade de avanço de 10 mm/min e o passo da rosca do pino de 2,0 mm, foi o que apresentou as melhores características, sem nenhum defeito aparente, indicando que, possivelmente, seja o ideal para uma solda com boas propriedades mecânicas e microestruturais, entre as estudadas nesse projeto.

- O refinamento da microestrutura na região da zona de mistura ocorreu em todos os casos, proveniente da deformação plástica e do ciclo térmico envolvidos no processo de soldagem, resultando em grãos recristalizados.
- O aporte térmico é um fator importante para produzir juntas com boa qualidade, uma vez que combinado com outros parâmetros de soldagem permite adequada coalescência das partículas dispersas pelo pino formando grãos fortemente coesos.
- O aumento da velocidade de soldagem também diminui o aporte térmico, devido a redução do tempo o qual o material sofre fricção sob ação da ferramenta, logo, as soldas produzidas com a menor velocidade de rotação, 1800 rpm, apresentaram um maior refino de grão e uma maior evidencia das zonas ZTA e ZTMA.

É importante destacar, que o objetivo original do trabalho foi modificado devido ao problema de saúde generalizado imposto pela pandemia causada pelo vírus Covid-19. Desta forma, ao invés de realizar as soldas em ligas AA2024 e AA7050 foi estudada a liga comercialmente pura AA1050 que é monofásica. Por tanto, como recomendações para trabalhos futuros fica o estudo das ligas acima mencionadas, que apresentam pequenos teores de fases secundárias, para que a influência dessas fases possa ser avaliada. Também deve-se aplicar maiores velocidade de rotação a fim de se avaliar a formação de microestruturas nanocristalinas e amorfas.

## REFERÊNCIAS

- AIRES, L. *Análise experimental do comportamento à fadiga em juntas soldadas por fricção linear de ligas de alumínio para a indústria aeronáutica*. 2007. 1 v. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2007.
- ANDRADE, E. A. C. *Desenvolvimento de ferramenta Bobbin-Tool para o processo de soldadura por fricção linear. Caracterização e análise da liga de alumínio AA6061-T4*. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2009.
- ASM HANDBOOK. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. *ASM International*, v. 2, p. 41-118, 1990.
- BANJARE, P. N.; SAHLOT, P.; ARORA, A. An assisted heating tool design for FSW of thermoplastics, Gandhinagar. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 239, p. 83-91, 2016.
- BESHARATI-GIVI, M. K., B; ASADI, P. *Advances in Friction-Stir Welding and Processing*. 1. ed., 2014.
- BLANCO FERNÁNDEZ, J.; et al. Application of vibroacoustic signals to evaluate tools profile changes in friction stir welding on AA 1050 H24 alloy, *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 17, 501, 2012.
- CAO, X; WANJARA, P; LAROSE, S. Review of tools for friction stir welding and processing. *Canadian Metallurgical Quarterly*, v. 51, p. 205-261, 2012.
- CAPELARI, T. V; MAZZAFERRO, J. A. E. Avaliação da geometria de ferramenta e parâmetros do processo FSW na soldagem da liga de alumínio AA 5052. *Soldagem Insp*, São Paulo, v. 14, n. 3, p. 215-227, Jul/Set 2009.
- CARLETTI, C.B. *Propriedades mecânicas de juntas sobrepostas da liga Al 6061 soldadas por FSSW*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2002.
- COBDEN, R. Physical Properties, Characteristics and Alloys. In: Training in Aluminium in Application Technologies (TALAT). *The Welding Institute*, v. Lecture 1501, 1991.
- CRUZ, M. F. *Desenvolvimento dos parâmetros de Friction Stir Welding – FSW, aplicado na junção de topo de chapas finas de alumínio de alta resistência*. 2009. 1 v. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2009.
- DAWES, C. J; WOODWARD, R. Training in Aluminium Application Technologies (TALAT). Lecture 4410. Friction Stir Welding. *The Welding Institute*, 1991.
- DONIMAQ. Máquinas operatrizes. 2015. Disponível em: [http://www.donimaq.com.br/popup\\_imagem.php?imagem=4VS.jpg](http://www.donimaq.com.br/popup_imagem.php?imagem=4VS.jpg). Acesso em: 11 jun. 2021.

FONDA, R. W.; BINGERT, J. F.; COLLIGAN, K. J. Developmente of grain structure during friction stir welding. *Scripta Materialia* v. 51, p. 243-248, 2004.

GESELLA, G.; CZECHOWSKI, M. The Application of Friction Stir Welding (FSW) of Aluminium Alloys in Shipbuilding and Railway Industry. *Journal of kones Powertrain and Transport*. v. 24, 2017.

GEVENOIS, C.; DENQUIN, A.; DOISNEAU-COTTIGNIES, B. Quantitative Investigation of Precipitation and Mechanical behaviour for AA2024 Friction Stir Welds. *Acta Materialia*, v. 53, p. 2447–2458, 2005.

GUIA Prático: Aços e Metais. 1. ed. São Paulo: GGD Metals, 2015.

HATCH, J.E. *Aluminum: Properties and Physical Metallurgy*. Ohio, USA: Aluminum Association Inc. e ASM International (American Society for Metals), 1984.

HILLER, D. J. *Estudo de parâmetros e percursos no processo de soldagem de mistura por atrito (FSW) da liga de alumínio 5052*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2007

INFANTE, V; VIDA, C. *Tool and welding design*. Elsevier Limited. Lisboa, 2014.

KASPARY, T. B. *Preenchimento do furo remanescente em soldas por fricção com mistura mecânica de reparo em alumínio 6056-T4*. 2005. 1 v. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

MATWeb. Material Property Data. Disponível em:<  
<http://www.matweb.com/search/datasheetText.aspx?bassnum=MA1050>> . Acesso em: 26 out. 2021.

MISHRA, R. S; MA, Z. Y. Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering*. v. 50, 78, 2005.

NANDAN, R; DEBROY, T. Recent advances in Friction Stir Welding – process, weldment structure and properties. *Progress in Materials Science*. 53, p. 980-1023, 2008.

POTOMATI, F. *Avaliação da qualidade final de juntas dissimilares de ligas de alumínio 2024-6056 e 7075-6056 Soldadas por FSW – Friction Stir Welding*. 2006. 113f. Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas e da Terra) - Curso de Engenharia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

SEGATTI, F. *Soldagem por fricção e mistura mecânica: Avaliação dos parâmetros de processo através da análise do perfil de temperatura ao longo da solda, microestrutura e propriedades mecânicas de uma liga de alumínio*. (Trabalho de Final de Curso) - Departamento de Engenharias e Ciência da Computação, A Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Erechim, 2011.

- SOUZA, R. C.; SILVA, E. S.; JORGE, A. M.; CABRERA, J. M.; BALANCIN, O. Dynamic recovery and dynamic recrystallization competition on a Nb- and N-bearing austenitic stainless steel biomaterial: Influence of strain rate and temperature. *Materials Science and Engineering*, v. 582, p. 96–107, 2013.
- THOMAS, W. M; NICHOLAS, E. D, NEEDHAM, J.C.; CHURCH, M.G., TEMPLESMITH P.; DAWES, C.J. International Patent Application No. PCT/GB92/02203 and GB *Patent Application* No. 9125978.8.
- THOMAS, W. M; NICHOLAS, E. D. Friction Stir Welding for the Transportation Industries. *Materials & Design*, v. 18, p. 269-73, 1997.
- THREADGILL, P.L; LEONARD, A.J; SHERCLIFF, H.R; WITHERS, PJ. Friction stir welding of aluminium alloys. *International Materials Reviews*, v. 54, p. 49-93, 2009.
- TWI. *System Elements and Concepts for Portable Friction Stir Welding Equipment*. 2007. Disponível em: < <https://www.twi-global.com/what-we-do/research-and-technology/research-reports/industrial-member-reports/system-elements-and-concepts-for-portable-friction-stir-welding-equipment-877-2007>. Acesso em: 30 mar. 2020.
- WEFERS, K. Properties and Characterization of Surface Oxides on Aluminum Alloys. Aluminium. *Journal of Laser Applications*, v. 57, p. 722–726, 1981.
- WEY, L. Y.; NELSON, T.W. Correlation of microstructures and process variables in FSW HSLA-65 steel. *Welding Journal*, v.90, p.95-101, 2011.
- WORLD HONDA. *Honda develops new technology to weld together steel and aluminum and achieves world's first application to the frame of a mass-production vehicle*. Disponível em: <https://global.honda/newsroom/news/2012/4120906beng.html>. Acesso em: 13 jun. 2021.

APÊNDICE A – Trabalho apresentado no ENMC 2019

## CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DA LIGA AA2024 CONFORMADA POR SPRAY

*Maria Vittoria Moraschini Reis*<sup>1</sup> – vittoriareis@hotmail.com

*Gabriel Hitoshi Asato*<sup>2</sup> – asato.hitoshi@gmail.com

*Luis César Rodríguez Aliaga*<sup>3</sup> – aliaga@iprj.uerj.br

<sup>1</sup> Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, Instituto Politécnico – Nova Friburgo, RJ, Brasil

<sup>2</sup> Universidade Federal de São Carlos – Departamento de Engenharia de Materiais, São Carlos, SP, Brasil

<sup>3</sup> Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico – Nova Friburgo, RJ, Brasil

**Resumo.** *Este trabalho teve como objetivo caracterizar a microestrutura da liga AA2024 conformada por spray e compará-la com aquela da liga como recebida, comercial. A liga foi refundida e processada por spray para se obter uma amostra em formato de disco, onde, posteriormente, foi cortado e extraído diversas amostras para serem analisadas através de microscopia óptica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios-X (DRX). Da análise dos resultados observa-se que as microestruturas das amostras comercial e de spray apresentam diferenças significativas. O depósito obtido por spray apresentou grãos equiaxiais com tamanho médio de 50 µm, elementos de liga mais solubilizados que a liga original e uma fração significativa de porosidade. A análise química das amostras em estudo evidenciou uma composição química quantitativa dentro do padrão permitido pelo ASTM. Os difratogramas de DRX evidenciaram uma diminuição da fração de segundas fases em comparação com a liga comercial. A influência do processamento por spray, quanto a corrosão e propriedades mecânicas do material, não foram avaliadas neste trabalho, dando ênfase ao estudo do comportamento microestrutural da liga antes e após a conformação.*

**Palavras chave:** *Microestrutura, Conformação por spray, AA2024*

### 1. INTRODUÇÃO

A liga de alumínio AA2024 tem em sua composição química o cobre e o magnésio como principais elementos de liga, conferindo excelentes propriedades mecânicas e baixa densidade. Essas propriedades conduzem a um cenário favorável para diversas aplicações tecnológicas como na fabricação de asas e outros componentes no setor aeronáutico, e de engrenagens, eixos, pinos, blocos e componentes de válvulas no setor automobilístico (Emadi & Mahfoud, 2010). Para alcançar a forma final, conforme a aplicação, essa liga é usinada, tendo grande parte do

material transformado em cavaco que é destinado como sucata, sendo revendido como liga de baixo valor agregado para a indústria de fundição. Contudo, apesar do processo de fundição permitir conformar peças de diversas geometrias, as propriedades mecânicas são seriamente afetadas, sofrendo deterioração a respeito da liga comercial. Uma das opções de reaproveitamento é a rota de fusão e conformação por spray seguida de processamento termomecânico para obter um material denso e homogêneo (Bereta, 2007; Godinho, 2014; Lavernia, 1989; Sharma, 2008).

Devido à baixa solubilidade do alumínio com os principais elementos de liga, os processos convencionais de solidificação não permitem obter as propriedades originais do material. A conformação por spray é um processo de manufatura de tarugos onde ocorre a atomização de uma carga de metal líquido dando origem a um spray composto de partículas com diâmetros que variam de 10 a 500  $\mu\text{m}$ , que atingem um substrato com velocidades entre 100 - 200  $\text{ms}^{-1}$  com uma distribuição de partículas em estado sólido, líquido ou semissólido (Grant, 1995 & Zepon, 2015). A solidificação se mantém na zona de deposição quando essas partículas são depositadas no substrato originando um depósito sólido e homogêneo (Lavernia, 1989). A microestrutura típica de uma liga conformada por spray constitui-se de grãos equiaxiais/poligonais com diâmetro que varia entre 20-50  $\mu\text{m}$ , sem a presença de morfologias dendrítica/colunar, homogêneas e baixos níveis de microsegregação independentemente da posição no depósito (Grant, 2007). A porosidade, porém, é um problema inerente a esse tipo de processamento. Processos termomecânicos posteriores são utilizados para realizar o fechamento da porosidade através da redução da seção transversal de um tarugo e para promover o refinamento microestrutural (Abdulstaar et al., 2014; Wan et al. 2017; Bribean Guerra et al., 2014; Kocich et al., 2016).

O objetivo principal deste trabalho consiste na caracterização da microestrutura do depósito obtido pelo processo de spray da liga de alumínio 2024 em comparação com a microestrutura de amostras de ligas comerciais da mesma composição.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Material

O disco da liga de alumínio 2024, utilizado como base para a realização deste trabalho, foi fornecido pelo Departamento de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, tanto no formato de liga comercial quanto processado pela técnica de conformação por spray. O disco produzido por spray foi cortado em duas partes como se observa na fotografia da Figura 1, que apresenta uma das metades do disco. Dessa peça foi, primeiramente, extraída uma fatia de 143,5 mm de comprimento e 10 mm de espessura, e, novamente, esta fatia foi cortada em outras quatro partes, a fim de facilitar o processo de caracterização do material e verificação das características microestruturais ao longo da peça.



Figura 1- Disco da liga AA2024 conformado por spray, e amostras extraídas para sua posterior caracterização microestrutural.

A composição química da liga AA2024, conforme a ASTM B221-14, é apresentada na Tabela 1, onde observa-se que os principais elementos de liga são Cu, Mg e Mn.

Tabela 1- Composição química da liga AA2024 segundo ASTM B221-14

Elemento	Composição química (% em peso)	
	Mínimo	Máximo
Si	-	0,5
Fe	-	0,5
Cu	3,8	4,9
Mn	0,3	0,9
Mg	1,2	1,8
Cr	-	0,1
Zn	-	0,25
V	-	0,02
Outros	-	0,15
Al	Balanço	

A técnica de processamento de conformação por spray divide-se em duas etapas: atomização e deposição. Na atomização um fluxo contínuo de metal líquido aquecido a uma temperatura acima do ponto de fusão sofre aceleração através de um gás pressurizado e inerte, produzindo partículas de diversos tamanhos que percorrem uma determinada distância de voo. Já na etapa de deposição ocorre a interrupção da trajetória das partículas por um substrato que realiza a coleta e forma um depósito (Grant, 1995). A Figura 2 representa esquematicamente estes processos.

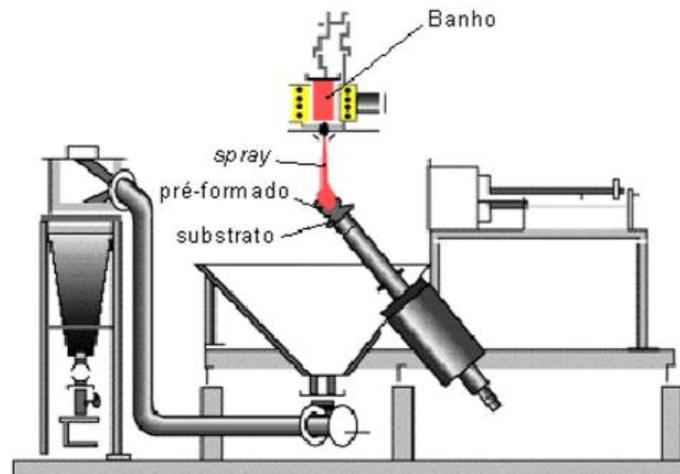


Figura 2 - Representação esquemática do processo de conformação por spray (Jesus, 2004).

Durante a primeira etapa, o gás atomizador envolvido no processo gera uma aceleração no fluxo de material líquido, onde atinge-se velocidades entre 50 e 100 m/s juntamente a aplicação de uma elevada taxa de resfriamento da ordem de  $10^2$  a  $10^6$  K/s (Grant, 1995).

O tamanho das partículas formadas varia, podendo chegar ao substrato no estado sólido, líquido ou mesmo semissólido, sendo que as partículas líquidas tendem a preencher o espaço vazio entre as partículas sólidas e semissólidas no depósito. Conforme as partículas são depositadas no substrato, a solidificação continua na zona de deposição até a formação do depósito final. As principais características envolvidas neste processamento são a formação de grãos equiaxiais entre 10 a 50  $\mu\text{m}$ , com completa ausência de morfologias

dendríticas/columnares, alto nível de homogeneização microestrutural e livre de microsegregação. Segundas fases refinadas, assim como a sua distribuição homogênea na microestrutura também são aspectos importantes deste método. A porosidade presente na estrutura é uma desvantagem, sendo necessário realizar processos mecânicos posteriores para seu fechamento, além de perdas da carga inicial, pois nem toda partícula termina no substrato ou na zona de deposição, essas partículas são chamadas de overspray e podem ser utilizadas para caracterização ou outras aplicações (Grant, 1995; Mazzer, 2013; Otani, 2017; Zepon et al., 2015).

## 2.2 Métodos

Para todas as técnicas de caracterização utilizou-se o mesmo preparação de amostras que realizou-se através das etapas: lixamento, polimento e ataque. As lixas foram empregadas na seguinte ordem de granulometria: 150, 200, 320, 400, 600 e 1200. Em seguida foi executado o polimento com alumina de granulometria de  $1\mu$  e  $0,3\mu$ . Após cada lixamento e polimento final, as amostras eram lavadas em banho ultrassônico, durante cinco minutos, e, em seguida, secadas em jato de ar quente. O processo de ataque químico foi somente realizado para preparação da microscopia óptica.

A composição química da liga AA2024 conformada por spray foi determinada através da técnica de fluorescência de raios-X por dispersão de comprimentos de onda, sendo submetido à análise um ponto de cada amostra, a fim de verificar se a liga obtida pelo método de conformação por spray continha as composições especificadas. Para este procedimento foi adotado voltagem de 10 kV e amperagem de  $40\mu\text{A}$ , sendo cada análise realizada durante dez minutos. Para a determinação das composições das fases foi utilizada a técnica de espectroscopia por dispersão de energia (EDS).

O ataque metalográfico Keller (100 ml de  $\text{HNO}_3$ , 50 ML DE  $\text{HCl}$  E 1,5 ml de  $\text{HF}$ ) foi utilizado para revelar os grãos, de forma que fosse possível a visualização dos mesmos pela microscopia óptica, no microscópio Olympus CX31. A solução de ataque foi aplicada durante 25 segundos, e, logo após, as amostras foram lavadas em água destilada e secadas em jato de ar. A Figura 3 apresenta as fotografias das amostras após o ataque. Observa-se que as superfícies das amostras apresentam tonalidades de cinza diferentes.



Figura 3 - Amostras atacadas com reagente Keller.

As imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram obtidas através dos equipamento Philips XL-30 FEG com detector EDS acoplado. A tensão de aceleração empregada para a obtenção das imagens foi de 40 keV.

A DRX foi realizada no equipamento Siemens D5005, utilizando a radiação  $K\alpha$  do cobre, tendo como parâmetro o passo de  $2^\circ/\text{min}$ , no intervalo de  $5-90^\circ$ . As fases foram identificadas pela comparação dos picos dos padrões de DRX obtidos com os padrões de difração da base de dados ICSD, respectivamente (ICSD, 2019).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figura 4(a) e Figura 4(b) apresentam micrografias ópticas da amostra da liga de alumínio 2024, comercial, aplicadas na indústria metalmeccânica. Pode-se observar, através destas imagens, que existe uma distribuição não homogênea nos tamanhos dos grãos. Entretanto, estimou-se que o tamanho médio dos grãos é de aproximadamente 100  $\mu\text{m}$ . Além disso, verifica-se a existência de pelo menos duas fases distintas, uma fase em cor clara e uma fase escura, além de regiões totalmente escuras que estariam associadas à porosidade.

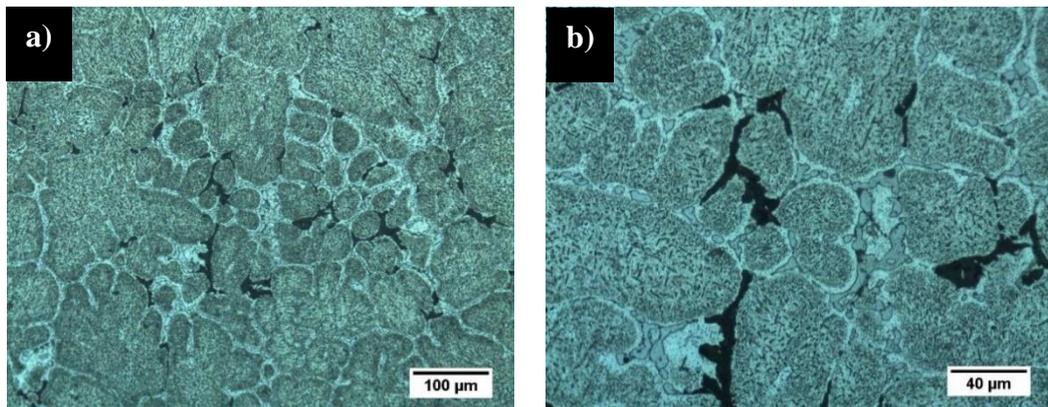


Figura 4 (a) e (b) - as análises de MO da liga AA2024 utilizada comercialmente.

Para melhor compreensão microestrutural do material, as amostras foram submetidas a análise por MEV. Sabe-se que esta análise pode ser realizada através do contraste topológico, via o modo de elétrons secundários (SE), ou pelo contraste químico via modo de elétrons retroespalhados (BSE), sendo que ambos os modos tem maior capacidade em revelar detalhes microestruturais das amostras que não são capazes de ser vistos na análise de MO.

A Figura 5(a) apresenta a micrografia por MEV no modo BSE. Pode-se observar a existência de duas fases bem definidas, uma fase branca com morfologia alongada nos contornos de grão e uma fase na cor cinza, além das pequenas agulhas da fase clara, com comprimento médio em torno de 10  $\mu\text{m}$ , distribuídas na matriz cinza. A análise de EDS foi realizada, apontando a presença de Fe e Si, sendo possível sugerir que essa fase seja um intermetálico rico em Fe que possam prejudicar a resistência da liga, fases claras dos contornos de grão. Devido à espessura da amostra, porém, apenas uma análise qualitativa foi realizada. A Figura 5(b) apresenta uma micrografia MEV em modo SE, onde observa-se três diferentes fases localizadas nos contornos de grão identificadas por espectroscopia de EDS como sendo: 1-  $\text{Al}_2\text{Cu}$ , 2-  $\text{Al}_2\text{CuMg}$  e 3-  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ , respectivamente.

É importante destacar, que as análises apresentadas anteriormente foram realizadas somente para fins comparativos com as amostras obtidas via spray. Como apresentado anteriormente, as amostras obtidas por spray foram analisadas em diversas regiões, entretanto, constatou-se por microscopia óptica, que o comportamento microestrutural não apresentou variações significativas ao longo da vertical da amostra em estudo.

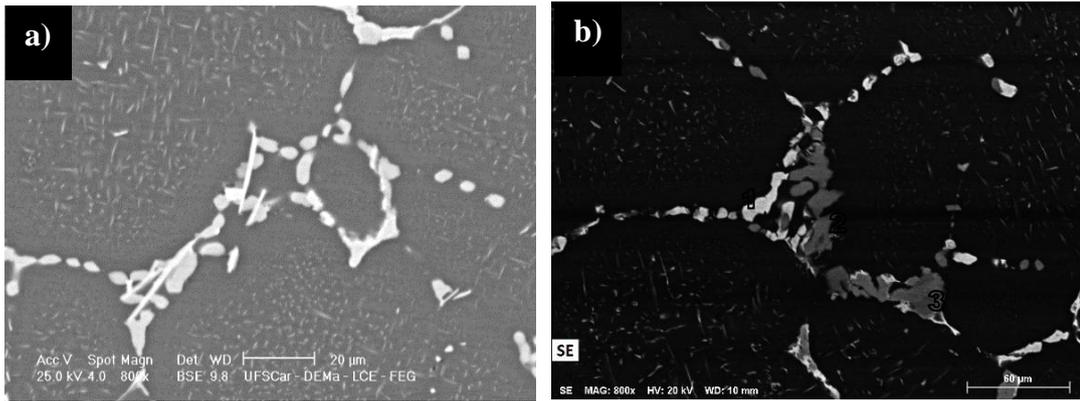


Figura 5 (a)- análise por MEV, fase de morfologia alongada nos contornos de grão. (b) Mostra as três segundas fases mais presentes na liga, 1-  $\text{Al}_2\text{Cu}$ , 2-  $\text{Al}_2\text{CuMg}$  e 3-  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ .

A Figura 6 apresenta as micrografias obtidas por MO em três pontos distintos do depósito obtido por spray, ao longo da vertical, onde a micrografia (a) representa a região superior da amostra, a micrografia (b) a região central, e a micrografia (c) representa a região inferior. Pequenos poros com tamanhos entre  $5\ \mu\text{m}$  e  $10\ \mu\text{m}$  são identificados, assim como o tamanho de grão médio de aproximadamente  $50\ \mu\text{m}$ , contornado por uma fase secundária.

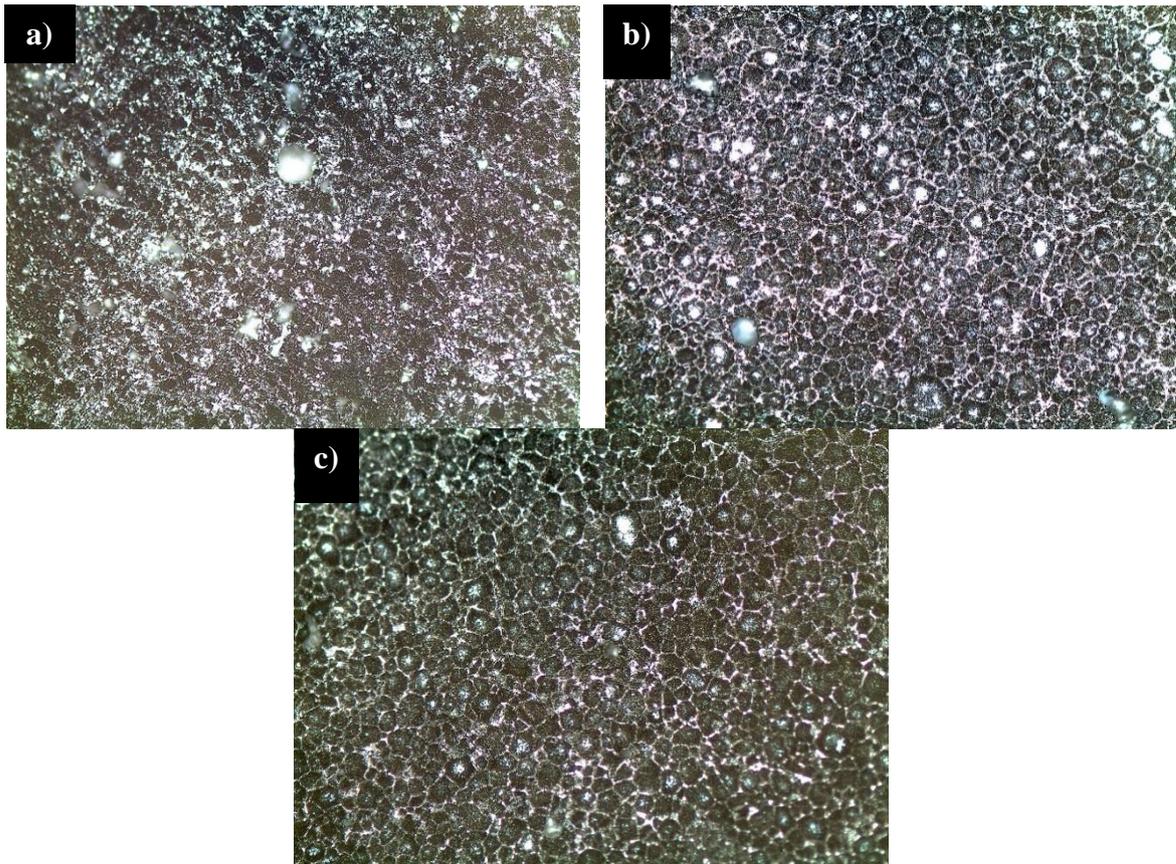


Figura 6 - MO da amostra AA2024 conformado por spray. (a) região superior; (b) região central e (c) região inferior. Todas as imagens com aumento de 100X. Ataque químico com solução Keller.

A fim de determinar a composição química geral das amostras, o método de fluorescência de raios-X foi empregado. Importante mencionar que o equipamento utilizado fornece somente a composição química de forma qualitativa e não quantitativa. Entretanto, foi feito um comparativo entre os elementos encontrados nas amostras do material AA2024 conformado por spray e a composição química da liga segundo a norma ASTM B221-14. A composição química obtida para as amostras encontra-se dentro da faixa composicional esperada, segundo os dados apresentados na Tabela 1. Os componentes encontrados foram alumínio, cobre, magnésio, cromo, manganês, zinco e titânio. O ferro é considerado uma impureza, devido à formação de segundas fases que são prejudiciais à resistência mecânica do material (Ma *et al.*, 2008; Puncreobutr *et al.*, 2014), assim como silício, cromo, zinco, vanádio e outros elementos. O ferro está presente nas ligas de alumínio como impureza que, em teores elevados, normalmente acima de 1,0% em peso, leva à formação de partículas grosseiras da fase  $\text{AlFeSi}$ , afetando negativamente as propriedades mecânicas (Hatch, 1984).

A Figura 7(a) apresenta a micrografia por MEV no modo BSE, correspondente ao centro da amostra. Verificou-se uma distribuição homogênea dos grãos, com tamanho médio aproximado de 50  $\mu\text{m}$ , e a formação de uma fase secundária alocada nos contornos de grão, que foi identificada pela análise de EDS como a fase  $\text{Al}_2\text{Cu}$  de coloração branca. Além disso, foi identificada uma fase secundária que contém um teor de Fe significativo, de coloração mais acinzentada como se observa na Figura 7(b), respectivamente.

Por outro lado, constatou-se que a porosidade do primeiro tipo, apresentada na Figura 7(b), é rara e é possível dizer que ocorre devido à falta de líquido para preencher os vazios quando há contração do sólido. O fechamento dessa porosidade por processos mecânicos tende a ser mais fácil quando comparado com a porosidade proveniente de aprisionamento de gases, pois o fechamento deste é dificultado já que não há escape para os gases internos.

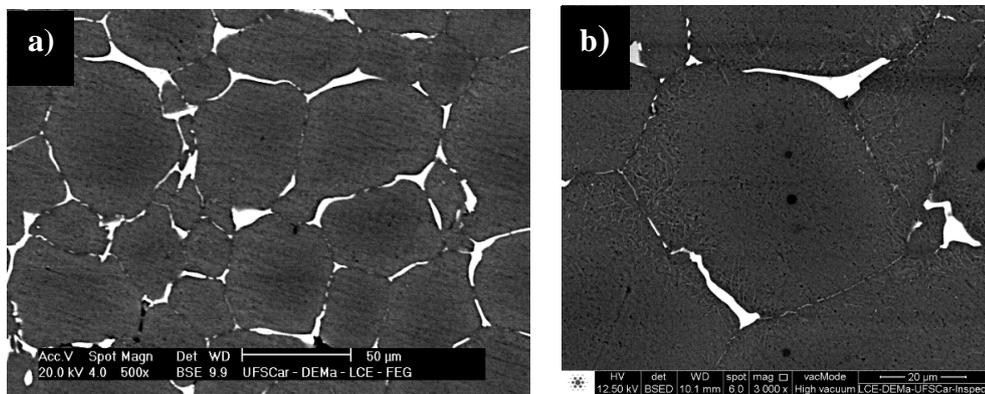


Figura 7 - a) MEV-BSE da amostra AA2024 conformado por spray; b) Imagem ampliada para a observação de fases secundárias e pequenos poros, localizados no interior do grão.

Através do EDS, proveniente das imagens por MEV, obtidos via elétrons retroespalhados, verificou-se que boa parte das segundas fases são compostas por  $\theta\text{-Al}_2\text{Cu}$ ,  $\text{S-Al}_2\text{CuMg}$  e fases que contêm ferro. Através dos difratogramas da liga (a) original e (b) após conformação por spray, Figura 8, verificou-se os picos da fase  $\text{Al}_2\text{CuMg}$  na amostra original. Após o processo de conformação por spray, nota-se que nesse mesmo intervalo não há formação de picos, apontando que os elementos que compõem a fase S estão presentes em solução sólida. Poucos picos de Fe são observados, apontando que este elemento apresenta-se de forma dispersa.

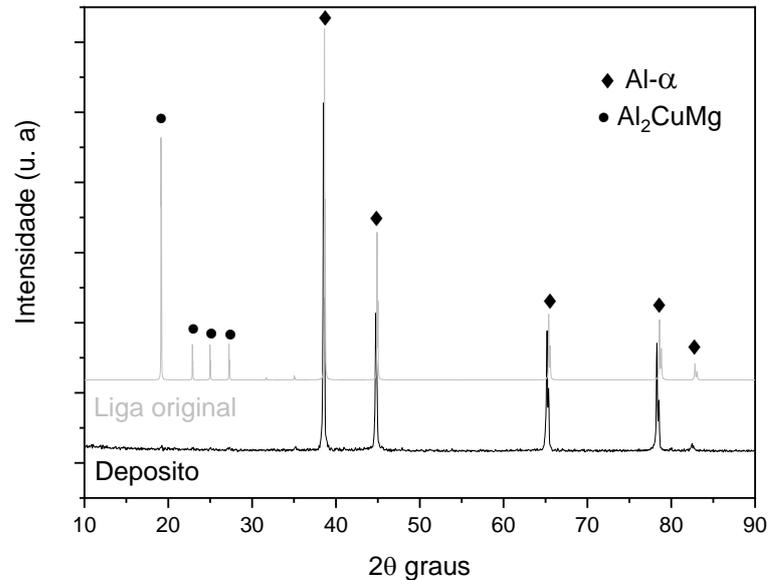


Figura 8 - Difratogramas da liga A2024 (a) original e (b) após conformação por spray.

#### 4. CONCLUSÕES

Foram caracterizadas e comparadas as microestruturas de amostras processadas provenientes de processos distintos. Referente à composição química, ambas as amostras apresentam composições similares significando que o processo de spray não modificou fortemente a composição química da liga original. O depósito obtido por spray apresentou uma distribuição homogênea dos grãos com tamanho médio de 50  $\mu\text{m}$  e maior porosidade do que a liga comercial. Grande parte da porosidade é proveniente da retração do sólido e não do aprisionamento de gases. A distribuição do tamanho de grãos na liga original é mais heterogênea, também como a distribuição das fases secundárias, que de forma geral, localizam-se nos contornos de grão. O depósito mostrou distribuição homogênea das fases secundárias, além disso, melhor distribuição dos elementos de liga foi verificado. A fase intermetálica Al<sub>2</sub>CuMg não foi evidenciada no depósito por spray.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem aos fundos brasileiros de apoio à pesquisa CNPq e CAPES, pelas bolsas concedidas.

#### REFERÊNCIAS

ABDULSTAAR, M. et al. Corrosion behaviour of Al 1050 severely deformed by rotary swaging. *Journal of Materials and Design*, v. 57, p. 325–329, 2014.

BERETA, L. A. et al. Microstructure and mechanical properties of spray deposited and extruded/heat treated hypoeutectic Al-Si alloy. *Journal of Materials Science and Engineering A*, v. 449–451, p. 850–853, 2007

BRIBEAN GUERRA, A. P. de et al. Microstructure of a recycled AA7050 alloy processed by spray forming followed by hot extrusion and rotary swaging. *Journal of Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, v. 45, p. 568–573, 2014.

CABIBBO, M.; et al. *Double side friction stir welding of AA6082 sheets*: Microstructure and nanoindentation characterization, *Mat. Sci. and Eng. A*, v. 590, p. 209–217, 2014.

GEROLD, V.; HABERKORN, H. On the critical resolved shear stress of solid solutions containing coherent precipitates. *Journal of Physica Status Solidi (b)*, v. 16, p. 675–684, 1966.

GODINHO, H. A. et al. Microstructure and mechanical properties of a spray formed and extruded AA7050 recycled alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 586, p. 139–142, 2014.

GRANT, P. S. Spray forming. *Journal of Progress in Materials Science*, v. 39, p. 497–545, 1995.

GRANT, P. S. Solidification in spray forming. *Journal of Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, v. 38, p. 1520–1529, 2007.

GUERRA, A. P. “*Caracterização microestrutural e mecânica da liga AA7050 reciclada por conformação por Spray extrusão e forjamento rotativo*”. 2014, 113f. Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas e da Terra) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

HATCH, J.E. *Aluminum: Properties And Physical Metallurgy*. Ohio, USA: Aluminum Association Inc. e ASM International (American Society for Metals), 1984.

Inorganic Crystal Structure Database – ICSD. Leibniz Institute for Information Infrastructure. Disponível em: <https://icsd.fiz-karlsruhe.de/search/basic.xhtml>. Acesso em: 1 ago. 2019.

JESUS, E.R.B. *Ferramentas de usinagem em aço rápido AISI M2 obtido por conformação por “spray”*. 2004. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear - Minerais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares da Universidade de São Paulo, 2004.

KOCICH, R. et al. Deformation behavior of multilayered Al-Cu clad composite during cold-swaging. *Journal of Materials and Design*, v. 90, p. 379–388, 2016.

LAVERNIA, E. J. The evolution of microstructure during spray atomization and deposition. *International Journal of Rapid Solidification*, v. 5, p. 47–85, 1989.

MA, Z. et al. A study of tensile properties in Al-Si-Cu and Al-Si-Mg alloys: Effect of  $\beta$ -iron intermetallics and porosity. *Journal of Materials Science and Engineering A*, v. 490, p. 36–51, 2008.

MAHFOUD, M.; EMADI, D. (2010), Aluminum recycling – challenges and opportunities. *Journal of Advanced Materials Research*, v. 83, p. 571-578, 2010.

MAZZER, E. M. *AA7050 Reciclada Por Conformação Por Spray E Extrusão*. 2013. 134f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

OTANI, L. B. *Solidificação da liga de alumínio 319 conformada por spray*. 2017. 108f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.

PUNCREOBUTR, C. et al. Influence of Fe-rich intermetallics on solidification defects” in Al-Si-Cu alloys. *Journal of Acta Materialia*, v. 68, p. 42–51 2014.

SHARMA, M. M. Microstructural and mechanical characterization of various modified 7XXX series spray formed alloys. *Journal of Materials Characterization*, v. 59, p. 91–99, 2008.

WAN, B. et al. “Review of solid state recycling of aluminum chips. *Journal of Resources, Conservation and Recycling*”, v. 125, p. 37–47, 2017.

ZEPON, G. et al. Solidification Sequence of Spray-Formed Steels. *Journal of Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 47, p. 842–851, 2015.

## MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION OF SPRAY CONFORMED AA2024 ALLOY

**Abstract.** *This work aimed to characterize the microstructure of AA2024 spray forming alloy and compare it with that of alloy as received, commercial. The alloy was resmelted and spray processed to obtain a disk sample, where, later, it was cut and extracted several samples to be analyzed by optical microscopy (MO), scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD). From the analysis of the results it can be observed that the microstructures of the commercial and spray samples exhibit significant differences. The deposit obtained by spray presented equiaxed grains with average size of 50  $\mu\text{m}$ , alloying elements more solubilized than as the original alloy and a significant fraction of porosity. The chemical analysis of the samples under study showed a quantitative chemical composition within the standard allowed by ASTM. The diffractograms indicated a decrease in the second phase fraction compared to the original alloy. The influence of spray processing, for corrosion and mechanical properties of the material, were not evaluated in this work, emphasizing the study of alloy microstructural behavior before and after forming.*

**Keywords:** *Microstructure, Spray Forming, AA2024 alloy*

ANEXO A – Quadro resumo de modelos de pinos para soldagem FSW

<u>FORMATO CILÍNDRICO</u>														
<u>FORMATO CILÍNDRICO</u>	 CILÍNDRICO LISO	 CILÍNDRICO SULCADO	 CILÍNDRICO COM PLANOS	 CILÍNDRICO ROSQUEADO	 CILÍNDRICO ROSQUEADO E SULCADO	 CILÍNDRICO ROSQUEADO E PLANO								
<u>SUPERFÍCIE ENTRE A EXTREMIDADE E O PINO</u>	 CIRCULAR	 TRÊS LADOS	 QUATRO LADOS	 TRIÂNGULAR	 QUADRADO	 PENTAGONAL	 HEXAGONAL	 CIRCULAR	 TRÊS LADOS	 QUATRO LADOS	 TRIÂNGULAR	 QUADRADO	 PENTAGONAL	 HEXAGONAL
<u>FORMATO CÔNICO</u>	 LISO	 SULCADO	 CÔNICO COM PLANOS	 ROSQUEADO	 ROSQUEADO E SULCADO	 ROSQUEADO E PLANO								
<u>SUPERFÍCIE ENTRE A EXTREMIDADE E O PINO</u>	 CIRCULAR	 TRÊS LADOS	 QUATRO LADOS	 TRIÂNGULAR	 QUADRADO	 PENTAGONAL	 HEXAGONAL	 CIRCULAR	 TRÊS LADOS	 QUATRO LADOS	 TRIÂNGULAR	 QUADRADO	 PENTAGONAL	 HEXAGONAL

Fonte: Adaptado de CAO; WANJARA E LAROSE, 2012.