



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA



JOSÉ GALDINO DA SILVA

INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO PINO DA FERRAMENTA DE SOLDAGEM
NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS EM JUNTAS DISSIMILARES AA7075-T651 E
AZ31B SOLDADAS PELO PROCESSO FSW

CAMPINA GRANDE - PB

2024

JOSÉ GALDINO DA SILVA

**INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO PINO DA FERRAMENTA DE SOLDAGEM
NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS EM JUNTAS DISSIMILARES AA7075-T651 E
AZ31B SOLDADAS PELO PROCESSO FSW**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós
graduação em Engenharia Mecânica em nível de
mestrado como requisito parcial para obtenção do
título de mestre em engenharia mecânica.

Linha de pesquisa: Processos Mecânico Metalúrgico

Orientador: Dr. Marco Antônio dos Santos

Coorientador: Dr. Raphael Henrique Falcão de Melo

CAMPINA GRANDE – PB

2024

S586i

Silva, José Galdino da.

Influência da geometria do pino da ferramenta de soldagem nas propriedades mecânicas em juntas dissimilares AA7075-T651 e AZ31B soldadas pelo processo FSW / José Galdino da Silva. – Campina Grande, 2024.

80 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2024.

"Orientação: Prof. Dr. Marco Antônio dos Santos, Prof. Dr. Raphael Henrique Falcão de Melo."

Referências.

1. *Fricition Stir Welding*. 2. Propriedade mecânicas. 3. Liga de alumínio. 4. Liga de magnésio. 5. Geometria do pino da ferramenta. I. Santos, Marco Antônio dos. II. Melo, Raphael Henrique Falcão de. III. Título.

CDU 669.018.2(043)

INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO PINO DA FERRAMENTA DE SOLDAGEM NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS EM JUNTAS DISSIMILARES AA7075-T651 E AZ31B
SOLDADAS PELO PROCESSO FSW

JOSÉ GALDINO DA SILVA

Dissertação aprovada em 31/01/2024 pela banca examinadora constituída dos seguintes
membros:



Dr. Marco Antônio dos Santos
ORIENTADOR
PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Raphael Henrique Falcão de Melo
COORIENTADOR
PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Renato Alexandre Costa de Santana
MEMBRO INTERNO
PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. João Baptista da Costa Agra de Melo
MEMBRO EXTERNO
UAEM/CCT/UFCG

DEDICATÓRIA

Em memoria

Aos meus pais Otaviano Galdino da Silva e Matilde Alves da Silva. Aos meus irmãos Franciso Galdino da Silva, Juarez Galdino da Silva e Antônio Galdino da Silva

AGRADECIMENTOS

A Deus por me dar força e perseverança para superar as grandes adversidades que surgiram no decorrer do projeto.

A toda minha família, que sempre me apoiou e sempre esteve a meu lado em todas as jornadas da minha vida, em especial a meu irmão Joaci Galdino da Silva pela grande ajuda em minha vida acadêmica e minha irmã Maria Galdino da Silva por acompanhar minha trajetória da infância aos dias atuais.

Aos meus orientadores Marco Antônio dos Santos e Raphael Henrique Falcão de Melo pelas orientações valiosas para conclusão deste trabalho.

A José Wiron Barbosa Procópio e José Wallisson de Abreu Sousa pela grande ajuda durante a execução do trabalho.

A Oclávio Coutinho dos Santos pela contribuição no desenvolvimento deste trabalho, em especial preparo das juntas soldadas.

A Cicero de Lima Santos pela ajuda e grande contribuição no desenvolvimento do trabalho.

A José Nilson Sales de Moraes (em memória) pela grande ajuda na fabricação das ferramentas e soldagem das juntas.

A Alan Vinicius de Araújo Batista pela grande ajuda na fabricação das ferramentas e grande auxílio na revisão da literatura.

Ao IFCE *campus* Cedro, pela utilização de máquinas e equipamentos no desenvolvimento do trabalho.

A Antony Gleydson Lima Bastos e Antônio Marcos da Costa Silvano, diretor geral e diretor de ensino do IFCE *campus* Cedro, pela flexibilização dos horários para viagens e execução do projeto.

Aos professores João Baptista da Costa Agra de Melo e Renato Alexandre Costa de Santana pela ajuda durante os ensaios e pelo apoio motivacional.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ) pelo financiamento da pesquisa. EDITAL N° 010/2021 - FAPESQ/PB - MCTIC/CNPq - PROGRAMA DE INFRAESTRUTURA PARA JOVENS PESQUISADORES/PROGRAMA PRIMEIROS PROJETOS - PPP - TERMO DE OUTORGA 3200/2021

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande (PPGEM-UFCG)

RESUMO

O emprego de ligas leves no setor de transporte é essencial para aumentar a eficiência e autonomia dos veículos. Neste sentido, ligas com boa resistência mecânica e pouco peso específico, como as ligas de alumínio AA7075 e de magnésio AZ31B, se destacam. No entanto, estas ligas possuem difícil soldabilidade pelos processos convencionais de soldagem, os processos não convencionais como o *friction stir welding* (FSW) surgem como uma boa alternativa a soldabilidade destas ligas. O presente trabalho tratou da avaliação da influência da geometria do pino da ferramenta na microestrutura e propriedades mecânicas em juntas de ligas dissimilares AA7075 e AZ31B soldadas pelo processo FSW, as geometrias de pino estudadas foram: cilíndrica lisa, cilíndrica rosqueada, cônica lisa e facetada hexagonal. As soldagens foram realizadas empregando uma fresadora universal automática, com rotação de 565 RPM, avanço de 75 mm/min, *offset* de 0,5 mm para o lado do magnésio, ângulo de inclinação 3° e o avanço no alumínio. Foram realizados ensaios de tração, dobramento de raiz e microdureza, também foi feita análise de microestrutura, superfície de fratura e análise química por EDS. No ensaio de tração todas as juntas romperam na região elástica, bem abaixo do limite de escoamento da liga AZ31B, todas as juntas tiveram limites de resistência à tração semelhantes. No ensaio de dobramento a maior carga suportada (717 N) foi na junta soldada com a ferramenta cilíndrica lisa. No ensaio de microdureza, na zona de mistura, as juntas soldadas tiveram resultado intermediário entre os dois metais de base. Na análise de microestrutura, a junta que apresentou mais defeitos foi a soldada com o pino de geometria cônica lisa e a que apresentou menos foi a junta soldada com pino de geometria cilíndrica rosqueada. Na análise de superfície de fratura, constatou-se que se tratou de uma fratura frágil, seguido de falha catastrófica para todas as juntas. Na análise química, constatou-se a presença de intermetálicos na junta soldada com a ferramenta cilíndrica lisa. Ficou evidente que dentre os pinos das ferramentas utilizadas, os pinos cilíndricos rosqueado e o cilíndrico liso foram os que forneceram melhores resultados, no tocante à macro e microestrutura e as propriedades mecânicas das juntas de ligas AA7075 e AZ31B soldadas pelo processo FSW.

Palavras-chave: *Friction Stir Welding*, Liga AZ31B, Liga AA7075, Propriedades Mecânicas, Geometria do Pino da Ferramenta.

ABSTRACT

The use of light alloys in the transport sector is essential to increase the efficiency and autonomy of vehicles. In this sense, alloys with good mechanical resistance and low specific weight, such as aluminum alloys AA7075 and magnesium alloys AZ31B, stand out. However, these alloys are difficult to weld using conventional welding processes, and unconventional processes such as friction stir welding (FSW) appear as a good alternative to the weldability of these alloys. The present work dealt with the evaluation of the influence of the tool pin geometry on the microstructure and mechanical properties in joints of dissimilar alloys AA7075 and AZ31B welded by the FSW process, the pin geometries studied were: smooth cylindrical, threaded cylindrical, smooth conical and hexagonal faceted. The welds were carried out using an automatic universal milling machine, with rotation of 565 RPM, advance of 75 mm/min, offset of 0.5 mm for the magnesium side, inclination angle of 3° and advance on aluminum. Tensile, root bending and microhardness tests were carried out, and microstructure analysis was also carried out. fracture surface and chemical analysis by EDS. In the tensile test, all joints failed in the elastic region, well below the yield limit of the AZ31B alloy, all joints had similar tensile strength limits. In the bending test, the highest load supported (717 N) was on the joint welded with the smooth cylindrical tool. In the microhardness test, in the mixing zone, the welded joints had an intermediate result between the two base metals. In the microstructure analysis, the joint that showed the most defects was the one welded with the smooth conical geometry pin and the one that showed the least was the joint welded with the threaded cylindrical geometry pin. In the analysis of the fracture surface, it was found that it was a brittle fracture, followed by catastrophic failure for all joints. In the chemical analysis, the presence of intermetallic compounds was found in the joint welded with the smooth cylindrical tool. It was evident that among the tool pins used, the threaded cylindrical and smooth cylindrical pins were those that provided the best results, in terms of the macro and microstructure and the mechanical properties of the AA7075 and AZ31B alloy joints welded by the FSW process.

Keywords: Friction Stir Welding, AZ31B Alloy, AA7075 Alloy, Mechanical Properties, Tool Pin Geometry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de fase Al-Mg	30
Figura 2: Representação básica do processo FSW.....	32
Figura 3: Representação das juntas.....	38
Figura 4: Ferramenta cilíndrica rosqueada.....	39
Figura 5: Ferramenta facetada hexagonal	40
Figura 6: Ferramenta cilíndrica lisa	40
Figura 7: Ferramenta cônica lisa	41
Figura 8: Suporte para soldagem FSW	42
Figura 9: Projeto das amostras dos corpos de prova	44
Figura 10: Ilustração da chapa soldada e seus respectivos corpos de prova	44
Figura 11: Indentações ensaio de dureza.....	46
Figura 12: Corpo de prova para o ensaio de tração.....	46
Figura 13: Corpo de prova ensaio de dobramento	47
Figura 14: Soldagem ferramenta cilíndrica lisa	48
Figura 15: Soldagem ferramenta cônica lisa	48
Figura 16: Soldagem ferramenta cilíndrica rosqueada.....	49
Figura 17: Soldagem ferramenta facetada hexagonal	49
Figura 18: Macro e microestrutura da junta soldada com geometria de pino cilíndrico liso ..	51
Figura 19: Macro e microestrutura da junta soldada com geometria de pino cônico liso.....	53
Figura 20: Macro e microestrutura da junta soldada com geometria de pino facetado hexagonal	54
Figura 21: Macro e microestrutura da junta soldada com geometria de pino cilíndrico rosqueado.....	56
Figura 22: Perfil de dureza junta soldada com ferramenta com os 4 pinos	58
Figura 23: Ensaio de tração das juntas soldadas com as diferentes geometrias.....	59
Figura 24: Resistência à tração do metal de base.....	60
Figura 25: Fractografia da junta soldada com pino facetado hexagonal	62
Figura 26: Fractografia da junta soldada com pino cônico liso	63
Figura 27: Fractografia da junta soldada com pino cilíndrico liso.....	64
Figura 28: Fractografia da junta soldada com pino cilíndrico rosqueado	65
Figura 29: EDS da superfície de fratura da junta soldada com pino facetado (avanço)	66
Figura 30: EDS da superfície de fratura da junta soldada com pino facetado (recuo).....	67

Figura 31: EDS da superfície de fratura da junta soldada com pino cônico (avanço)	67
Figura 32: EDS da superfície de fratura da junta soldada com pino cônico (reco).....	68
Figura 33: EDS da superfície de fratura da junta soldada com pino cilíndrico liso (avanço).	68
Figura 34: EDS da superfície de fratura da junta soldada com pino cilíndrico liso (reco) ..	69
Figura 35: EDS intermetálicos da junta soldada com pino cilíndrico (avanço).....	69
Figura 36: EDS da superfície de fratura da junta soldada com pino cilíndrico rosqueado (avanço)	70
Figura 37: EDS da superfície de fratura da junta soldada com pino cilíndrico rosqueado (reco)	70
Figura 38: EDS da superfície de fratura da junta soldada com pino cilíndrico rosqueado (avanço)	71
Figura 39: Ensaio de dobramento.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química dos materiais de base	38
Tabela 2: Parâmetros de soldagem obtidos na literatura	43
Tabela 3: Geometria da ferramenta do pino e defeitos aparentes	50
Tabela 4: Geometria da ferramenta do pino e defeitos detectados na macro e microestrutura	57
Tabela 5: Dureza média Vickers	58
Tabela 6: Eficiência das juntas em relação ao MB AZ31B.....	60
Tabela 7: Composição Química da Superfície de Fratura e do MB.....	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Classificação de ligas de alumínio	23
Quadro 2: Letras de abreviação para designação de ligas de magnésio	28
Quadro 3: Carga máxima suportada no ensaio de dobramento para as juntas soldadas	72

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

AA - *Alluminum Association*;

ASM – *American Society for Metals*;

ASTM – *American Society for Testing Materials*;

EDS – Espectroscopia por Dispersão de Energia;

FSW – *Friction Stir Welding*;

FZ – *Fusion Zone*;

GMAW- *Gas Metal Arc Welding*

GTAW - *Gas Tungsten Arc Welding*

HAZ – *Heat Affected Zone*;

HC – Estrutura Cristalina Hexagonal Compacta;

HV – *Hardness Vickers*;

IFCE – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará;

IFPB – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba;

LaMMEA – Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas;

MB – Material de Base;

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura;

MO – Microscopia Óptica;

TWI – *The Welding Institute*;

UAEM – Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica;

UFMG – Universidade Federal de Campina Grande;

ZM – Zona de Mistura;

ZTA- Zona Termicamente Afetada;

ZTMA – Zona Termomecânicamente Afetada;

LISTA DE SÍMBOLOS

Al – Alumínio

Ø – Diâmetro

Mg – Magnésio

Mn - Manganês

µm – Micrometro

σ - Desvio-padrão

Zn – Zinco

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	Justificativa.....	18
1.2	Objetivos.....	19
<i>1.2.1</i>	<i>Objetivo Geral.....</i>	<i>19</i>
<i>1.2.2</i>	<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>19</i>
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	20
2.1	Alumínio.....	20
<i>2.1.1</i>	<i>Ligas de Alumínio.....</i>	<i>21</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Soldabilidade.....</i>	<i>24</i>
2.2	Magnésio.....	26
<i>2.2.1</i>	<i>Ligas de Magnésio.....</i>	<i>27</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Diagrama Binário Alumínio-Magnésio.....</i>	<i>29</i>
<i>2.2.3</i>	<i>Soldabilidade.....</i>	<i>30</i>
2.3	Processo FSW.....	32
<i>2.3.1</i>	<i>Soldagem por Fricção de Dissimilares.....</i>	<i>34</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Ferramentas para Soldagem FSW.....</i>	<i>35</i>
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
3.1	Metal de Base.....	38
3.2	Confecção das Ferramentas.....	39
3.3	Parâmetros de Soldagem e Confecção das Juntas.....	42
3.4	Caracterização das Juntas Soldadas.....	43
<i>3.4.1</i>	<i>Preparação Metalográfica e Microscopia Óptica.....</i>	<i>45</i>
<i>3.4.2</i>	<i>Ensaio de Dureza Vickers.....</i>	<i>45</i>
<i>3.4.3</i>	<i>Ensaio Mecânico de Tração Uniaxial.....</i>	<i>46</i>
<i>3.4.4</i>	<i>Ensaio Mecânico de Dobramento de Raiz.....</i>	<i>46</i>
<i>3.4.5</i>	<i>Caracterização da Superfície de Fratura.....</i>	<i>47</i>
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
4.1	Inspeção Visual das Juntas Soldadas.....	48
4.2	Macro e Microestrutura.....	50
4.3	Dureza Vickers.....	57
4.4	Ensaio Mecânico de Tração Uniaxial.....	59
4.5	Superfície de Fratura e Análise Morfológica.....	61

4.6	Ensaio de Dobramento	71
5	CONCLUSÕES.....	73
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	73
6	REFERÊNCIAS.....	74

1. INTRODUÇÃO

O alumínio e suas ligas são amplamente utilizados na indústria devido à sua baixa densidade, alta resistência específica, boa resistência à corrosão, boa trabalhabilidade, alta condutividade térmica e elétrica. Como um metal extremamente leve, o magnésio e suas ligas têm excelente resistência específica, boa fundibilidade, formabilidade a quente, boa proteção contra interferência eletromagnética (LIU; REN; LIU, 2014).

A capacidade de unir os componentes da liga de magnésio a outros materiais de engenharia, como ligas de alumínio, permitiria uma maior flexibilidade de projeto e expansão de suas aplicações, a junção efetiva de ligas de alumínio e ligas de magnésio levaria maior economia de peso das estruturas fabricadas. Melhorar a capacidade de unir materiais diferentes com propriedades de engenharia está permitindo novas abordagens para estruturas, aprimorando métodos para produção de energia, criando produtos médicos de última geração e dispositivos de consumo. (TABASI *et al.*, 2015).

Para Yang, Wu e Shi (2020), o aumento contínuo dos custos de energia e a mudança no cenário global tem despertado considerável interesse nas estruturas leves. Estudos sobre a união de ligas de alumínio e ligas de magnésio são de grande importância para ampliar as possibilidades de aplicação de produtos leves em muitas indústrias de manufatura modernas como os setores automotivo e de aviação.

De acordo com Bai, Fang e Jiang (2022), as ligas de magnésio atraem cada vez mais atenção para diversas aplicações devido à sua alta relação resistência e densidade. Para Kumar *et al.* (2023), as ligas de magnésio estão entre os metais leves mais utilizados para fins práticos, incluindo boas características físicas e mecânicas, como melhor condutividade, alta resistência específica e resistência à vibração. Além disso, são fáceis de cortar, modelar e reciclar, além de serem econômicos. Nos últimos anos, as ligas de magnésio têm atraído considerável atenção na indústria e nos campos científicos devido às suas excelentes propriedades, como baixa densidade, alta resistência específica e boa condutividade térmica. Sendo amplamente utilizados nos campos de aeroespacial, defesa, componentes automotivos, computadores, entre outros. As ligas de magnésio são os materiais preferidos porque são leves, economizam energia e protegem o meio ambiente e têm sido usadas na indústria aeroespacial, automobilística e outras áreas (TIAN *et al.*, 2022).

A fim de superar complexidades impostas pelos processos de soldagem tradicionais, a aplicação de processo de soldagem por fricção, no estado sólido, onde a união de peças ocorre

sem fusão, tem sido utilizado de forma mais intensa, a exemplo do processo *Friction Stir Welding* (FSW) (CAPELARI e MAZZAFERRO, 2009; TEXIER *et al.*, 2018). No entanto, o processo FSW possui diversas variáveis que influenciam o desempenho da junta soldada, como velocidade de rotação da ferramenta, velocidade de soldagem, ângulo de inclinação da ferramenta, força axial, penetração do ombro da ferramenta na junta e geometria da ferramenta (SUTTON *et al.*, 2002; AVAL, 2015; JI *et al.*, 2015; AMBRÓSIO, D. *et al.*, 2023). Yaknesh, S. *et al.* (2022), estudaram o efeito da geometria do pino da ferramenta e dos parâmetros do processo na soldagem FSW de ligas dissimilares de magnésio, na pesquisa foi utilizada uma geometria de pino cônica lisa e uma cônica rosqueada, ainda variaram *offset*, velocidade de rotação e avanço.

Portanto, é necessário um estudo prospectivo para verificar a influência dos parâmetros geométricos da ferramenta e sua correlação com os parâmetros do processo FSW nas características microestruturais e mecânicas de juntas dissimilares de ligas de alumínio e ligas de magnésio soldadas, a fim de compreender o mecanismo de modificação microestrutural e a ocorrência de defeitos.

1.1 Justificativa

Segundo Singh e Dubey (2021), a união de ligas de alumínio e ligas de magnésio utilizando soldagem por fusão é um processo complexo de ser desenvolvido devido ao desenvolvimento de grãos grossos e compostos intermetálicos (IMCs) como $Al_{12}Mg_{17}$ e Al_3Mg_2 na zona de fusão. Este problema associado à soldagem por fusão pode ser superado pelo emprego do processo de *Friction Stir Welding* (FSW), devido a esta ocorrer no estado sólido, em um único passe e sem material de adição. O processo FSW tem potencial para soldar materiais diferentes, de forma eficiente devido à geração de baixa temperatura em comparação com os métodos convencionais de soldagem por fusão. (SINGH *et al.*, 2020)

Na soldagem pelo processo FSW a geometria da ferramenta é um dos parâmetros mais influentes. A ferramenta de soldagem é composta, fundamentalmente, por pino, ombro e pelo corpo da ferramenta, e tem duas funções preliminares: aquecimento localizado e promoção do fluxo do metal na zona misturada. O pino, através de uma força axial aplicada, penetra no material a ser soldado, promovendo aquecimento e severa deformação devido ao movimento de rotação. O ombro é responsável por não deixar o material misturado se espalhar. A ferramenta gira rapidamente entre duas chapas posicionadas de topo, forçando o material a fluir e destruir

a interface de separação entre elas, promovendo a união (COLAÇO, 2019; OLIVEIRA *et al.*, 2018).

O fluxo plástico dos materiais durante a soldagem é complexo e depende do projeto da ferramenta, em que a maior parte da deformação plástica ocorre pelo cisalhamento do material no seu entorno. A fim de melhorar o fluxo de material no processo é possível o desenvolvimento de diversos tipos de pinos, roscados, cônicos, triangulares, quadrados, entre outros, conforme estudado por Colaço (2019) e Mehta e Badheka (2016).

Este projeto tem relevância no âmbito da engenharia mecânica e de materiais por tratar da análise da influência da geometria do pino da ferramenta nas propriedades mecânicas e microestrutura resultante do processo FSW em juntas dissimilares de ligas AA7075 e AZ31B.

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo Geral*

Verificação da influência da geometria do pino da ferramenta na microestrutura e propriedades mecânicas em juntas de ligas dissimilares AA7075 e AZ31B soldadas pelo processo FSW.

1.2.2 *Objetivos Específicos*

- a) Correlacionar a geometria do pino das ferramentas: cilíndricas lisa, cilíndrica rosqueada, cônica lisa e facetada hexagonal com a ocorrência de defeitos superficiais e internos;
- b) Averiguar as modificações macro e microestruturais em função da geometria do pino da ferramenta;
- c) Indicar a melhor geometria do pino da ferramenta para maximizar as propriedades mecânicas de juntas soldadas dissimilares de ligas AA7075-T651 e AZ31B.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Alumínio

O alumínio, na forma de bauxita, é o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, compreendendo 8 % do solo e das rochas do planeta. Na natureza, o alumínio é encontrado apenas em compostos químicos com outros elementos, como enxofre, silício e oxigênio. O alumínio metálico puro pode ser produzido apenas a partir do óxido de alumínio. As principais características do alumínio que o tornam útil em uma ampla gama de aplicações são a leveza, resistência mecânica, não magnético e não tóxico, condução de calor e eletricidade, é facilmente trabalhável, e retém sua resistência sob frio extremo sem se tornar quebradiço. Os produtos de alumínio têm sido usados principalmente na construção, transporte, eletricidade, máquinas e equipamentos (DENG; JOHNSON; GENCER, 2022). É o segundo metal mais amplamente utilizado no mundo, o alumínio tem baixa densidade (2,7 g/cm³), alta condutividade elétrica e térmica, maleabilidade e alta resistência à corrosão (SRIVASTAVA; MESHARAM, 2023). As combinações exclusivas de propriedades fornecidas pelo alumínio e suas ligas fazem do alumínio um dos materiais metálicos mais versáteis, econômicos e atraentes para uma ampla variedade de aplicações. A baixa densidade e a alta resistência de algumas ligas de alumínio, permite o projeto e a construção de estruturas fortes e leves e se mostram vantajosas na construção de veículos espaciais e aeronaves, bem como todos os tipos de veículos terrestres e aquáticos (DAVIS, 2001).

A excelente resistência à corrosão do alumínio puro deve-se em grande parte à sua afinidade com o oxigênio o que resulta na produção de um filme de óxido muito fino, mas tenaz, que cobre a superfície assim que um pedaço de metal recém-cortado é exposto à atmosfera (SHEASBY; PINNER, 2001). Ao contrário da oxidação do ferro, o filme de óxido de alumínio não descama para expor uma superfície nova a oxidação adicional e se a camada protetora de alumínio for arranhada, ela se fechará instantaneamente (DAVIS, 2001).

Segundo Davis (2001), o alumínio não é ferromagnético, o que é uma propriedade importante nas indústrias elétrica e eletrônica, é não pirofórico, o que é importante em aplicações envolvendo exposição ou manuseio de materiais inflamáveis ou explosivos e, também, o alumínio também não é tóxico sendo usado rotineiramente em recipientes para alimentos e bebidas.

2.1.1 Ligas de Alumínio

O alumínio e suas ligas são caracterizados por seu peso leve, alta resistência, resistência à corrosão e boa soldabilidade, tornando-os adequados para uma variedade de aplicações industriais (PONNUSAMY *et al.*, 2020).

De acordo com Sheaby e Pinner (2001), duas classes de ligas podem ser consideradas. A primeira são as ligas fundidas que são obtidas pela fundição direta em suas formas desejadas, enquanto a segunda classe, as ligas forjadas, são fundidas em lingotes ou tarugos e trabalhados mecanicamente a quente e a frio por extrusão.

A *Aluminum Association* mantém um sistema de designação de ligas e têmperas para alumínio reconhecido internacionalmente, ANSI H35.1/351M. O sistema de designação para ligas de alumínio foi introduzido em 1954. Sob esse sistema, um número de quatro dígitos é atribuído a cada liga registrada na Associação. O primeiro número da liga designa o elemento primário de liga, que produz um grupo de ligas com propriedades semelhantes. A Associação atribui sequencialmente os dois últimos dígitos, o segundo dígito denota uma modificação de uma liga. (KISSELL; FERRY, 2002).

O grupo 1xxx define o alumínio comercialmente puro, pelo menos 99% de alumínio. Os principais usos para as ligas desta série são condutores elétricos e armazenamento ou processamento químico, porque as melhores propriedades das ligas desta série são a condutividade elétrica e a resistência à corrosão (KISSELL; FERRY, 2002).

No grupo 2xxx, o principal elemento de liga é o cobre, que produz alta resistência, mas reduz a resistência à corrosão. A maioria das ligas de alumínio-cobre caiu em desuso porque demonstraram resistência inadequada à corrosão quando expostas ao clima sem revestimentos protetores e são difíceis de soldar (KISSELL; FERRY, 2002).

No grupo 3xxx, o manganês é o principal elemento de liga da série, aumentando a resistência do alumínio não ligado em cerca de 20%. A resistência à corrosão e a trabalhabilidade das ligas deste grupo são boas (KISSELL; FERRY, 2002).

No grupo 4xxx, o silício é adicionado às ligas para reduzir o ponto de fusão para aplicações de soldagem e brasagem. O silício também oferece boas características de fluxo, que no caso de peças forjadas fornecem um preenchimento mais completo de formas complexas de matrizes (KISSELL; FERRY, 2002).

O grupo 5xxx é produzido pela adição de magnésio, resultando em ligas fortes, resistentes à corrosão e de alta resistência quando soldada, a resistência das ligas desta

série é diretamente proporcional ao teor de magnésio, que varia até cerca de 6% (KISSELL; FERRY, 2002).

As ligas do grupo 6xxx contêm magnésio e silício em proporções que formam o siliceto de magnésio (Mg_2Si). Essas ligas têm um bom equilíbrio entre resistência à corrosão e à tração (KISSELL; FERRY, 2002).

O principal elemento de liga do grupo 7xxx é o zinco, esta série inclui dois tipos de ligas: as ligas de alumínio-zinco-magnésio e as ligas de alumínio-zinco-magnésio-cobre. A liga 7178, por exemplo, é a que apresenta a maior resistência à tração, mínimo de 580 MPa, quando recebe um tratamento térmico do tipo T6. A resistência à corrosão das ligas da série 7xxx ligadas com cobre é menor do que as séries 1xxx, 3xxx, 5xxx e 6xxx, enquanto a resistência à corrosão das ligas 7xxx ligadas sem cobre é razoavelmente boa (KISSELL; FERRY, 2002).

O grupo 8xxx é reservado para elementos de liga diferentes daqueles usados nas séries 2xxx a 7xxx. Elementos como ferro e níquel são usados para aumentar a resistência sem perda significativa na condutividade elétrica (KISSELL; FERRY, 2002).

O grupo 9xxx não é usada atualmente. As ligas experimentais são designadas de acordo com o sistema acima, mas com o prefixo “X” até que não sejam mais experimentais (KISSELL; FERRY, 2002).

De acordo com Kissel e Ferry (2002), a resistência e outras propriedades das ligas forjadas e fundidas podem ser obtidas por meio de tratamento mecânico ou térmico. O tratamento térmico é comumente aplicado às ligas fundidas. As ligas forjadas têm o seu processo de endurecimento baseado no encruamento resultante do trabalho a frio, tratamento mecânico, e são designadas como não tratáveis termicamente. O Quadro 1 apresenta a classificação de ligas de alumínio conforme *Aluminum Association*.

Quadro 1: Classificação de ligas de alumínio

Série da <i>Aluminum Association</i>	Tipo de composição da liga	Método de endurecimento	Faixa de resistência à tração (MPa)
1xxx	Al	Trabalho a frio	70-175
2xxx	Al-Cu-Mg	Tratamento térmico	170-310
	Al-Cu-Mg-Si	Tratamento térmico	380-520
3xxx	Al-Mn-Mg	Trabalho a frio	140-280
4xxx	Al-Si	Trabalho a frio	105-350
5xxx	Al-Mg	Trabalho a frio	140-280
	Al-Mg-Mn	Trabalho a frio	280-380
6xxx	Al-Mg-Si	Tratamento térmico	150-380
7xxx	Al-Zn-Mg	Tratamento térmico	380-520
	Al-Zn-Mg-Cu	Tratamento térmico	520-620
8xxx	Al-Li-Cu-Mg	Tratamento térmico	280-560

Fonte: Adaptado de Kissel e Ferry (2002).

De acordo com Kaufman e Rooy (2004), o sistema de designação de têmpera para ligas fundidas, conforme *Aluminum Association*, utiliza letras e números para indicar os principais tipos de tratamentos térmicos aplicáveis, sendo eles:

- a) F, como fundido;
- b) O, recozido;
- c) T4, solução tratada e envelhecida;
- d) T5, endurecido por precipitação;
- e) T6, solução tratada termicamente, temperada e endurecida por precipitação;
- f) T7, solução tratada termicamente, resfriada e superenvelhecida.

A designação do método de tratamento térmico é apresentada imediatamente após a designação da liga. Outras variações de designações de têmpera são permitidas pelo sistema de designação, sendo a mais comum o uso de “P” adicionado a uma designação de têmpera padrão indicando uma variação do tratamento padrão (KAUFMAN E ROOY, 2004).

Para Sheasby e Pinner (2001), a grande vantagem do alumínio é a grande variedade de ligas com diferentes propriedades mecânicas e de proteção à corrosão, que,

juntamente com a excepcional variedade de acabamentos que podem ser usados, fazem do alumínio um material muito versátil.

Embora a adição de elementos de liga ao alumínio às vezes degrade certas características do metal puro, isso é aceitável para certas aplicações, porque outras propriedades podem ser consideravelmente aprimoradas. Aproximadamente quinze elementos de liga podem ser usados com alumínio e frequentemente são chamados de endurecedores, mas eles servem a propósitos além de aumentar a resistência à tração e podem afetar drasticamente muitas propriedades do material (HARPER, 2001).

O alumínio e suas ligas são amplamente utilizados na indústria devido à sua baixa densidade, alta resistência específica, boa resistência à corrosão, boa trabalhabilidade, alta condutividade térmica e elétrica (LIU; REN; LIU, 2014). Para Yang, Wu e Shi (2020), em um contexto de aumento contínuo dos custos de energia e mudança do ambiente global, estruturas leves têm recebido uma quantidade significativa de atenção.

Segundo Kaufman e Rooy (2004), a caracterização das propriedades físicas e mecânicas e os resultados dos testes de desempenho foram a base para desenvolvimentos contínuos de novas ligas e refinamentos no controle de composição.

2.1.2 Soldabilidade

A soldagem pode ser descrita como a união de dois componentes por uma coalescência das superfícies em contato uma com a outra. Essa coalescência pode ser obtida fundindo as duas partes, soldagem por fusão, ou juntando as duas partes sob pressão, com a aplicação de calor, para formar uma ligação metálica na interface. Isso é conhecido como união em fase sólida e é uma das mais antigas técnicas de união (MATHERS, 2002).

Para Weman (2012), a soldabilidade refere-se à aptidão do material às técnicas de soldagem mais comuns. É difícil determinar a soldabilidade das ligas de alumínio, pois a soldabilidade depende de alguns fatores, sendo eles:

- a) O tipo de liga;
- b) O método de soldagem;
- c) O material de enchimento;
- d) A forma das peças a serem soldadas;
- e) O grau de liberdade de movimento das peças durante a soldagem

A tecnologia de soldagem tornou-se um dos principais fatores para a montagem de grandes estruturas de liga de alumínio (WU *et al.*, 2022). A soldagem confiável de alumínio a metais dissimilares é de grande importância na indústria. No entanto, a soldagem de alumínio e dissimilares representa um grande desafio devido à formação de compostos intermetálicos frágeis na solda, resultando em resistência da junta extremamente fraca (LI *et al.*, 2022).

O alumínio pode ser soldado por soldagem a gás e MMA (eletrodos revestidos), mas devido a dependência do fluxo e ao baixo aporte térmico, esses métodos não são amplamente utilizados. Eles foram substituídos por soldagem a arco com proteção de gás inerte. Os processos MIG e TIG são os métodos mais utilizados atualmente (WEMAN, 2012).

Idealmente, uma soldagem deve ter as mesmas propriedades do metal original, porém uma série de problemas estão associados à soldagem do alumínio e suas ligas que dificultam a obtenção desse ideal. As características e defeitos que podem contribuir para a perda de propriedades compreendem a porosidade, inclusões de óxidos e películas de óxidos, rachaduras de solidificação, resistência reduzida na solda, zonas afetadas pelo calor, falta de fusão, reduzida resistência à corrosão e resistência elétrica reduzida (MATHERS, 2002).

A soldabilidade da liga de alumínio é ruim devido à sua alta condutividade térmica. Além disso, é inevitável que o ciclo térmico de soldagem durante o processo de soldagem leve ao amolecimento na zona de solda e na zona afetada pelo calor, que deteriora as propriedades mecânicas das chapas soldadas de alumínio (WANG *et al.*, 2022).

As propriedades mecânicas das juntas soldadas desempenham um papel decisivo na vida útil dos materiais, e as partículas da segunda fase afetam significativamente o comportamento à fratura da junta soldada (LIU *et al.*, 2022). Defeitos como trincas, porosidades e segregação de elementos ocorrem prontamente quando técnicas convencionais de soldagem por fusão são usadas para ligas de alumínio (SHAO *et al.*, 2022).

De acordo com Patil, Nagamadhu e Malyadri (2022), é difícil soldar ligas de alumínio por métodos convencionais de soldagem a arco elétrico, como os processos TIG/MIG. Juntas soldadas produzidas por soldagem TIG/MIG apresentam diversos defeitos como porosidade, trincas, distorções e tensões residuais. Esses problemas associados aos métodos de soldagem por fusão podem ser evitados usando um processo

de soldagem em estado sólido e entre essas técnicas de união de estado sólido, o método de soldagem por fricção (FSW) mostra-se proeminente na união de ligas de alumínio produzindo juntas de boa qualidade.

2.2 Magnésio

O magnésio é o sexto elemento mais abundante na crosta terrestre, representando 2,7% da crosta terrestre. Embora o magnésio não seja encontrado em sua forma elementar, compostos de magnésio podem ser encontrados em todo o mundo. Os compostos mais comuns são magnesita, dolomita, carnalita e também água do mar. O magnésio é o mais leve de todos os metais estruturais. Tem uma densidade de 1,74 g/cm³, que é aproximadamente um quarto da densidade do aço e dois terços da densidade do alumínio. Devido à sua baixa densidade e altas propriedades mecânicas específicas, os materiais à base de magnésio são amplamente utilizados (GUPTA; SHARON, 2011).

Como um metal alcalino-terroso, o magnésio é brilhante e de aparência branca prateada, também é altamente reativo e nunca foi encontrado livre na natureza com abundância. Atualmente, o magnésio é usado para aplicações de engenharia nos setores automotivo, aeroespacial e eletrônicos de consumo (TAN; RAMAKRISHNA, 2021).

O metal estrutural mais leve, o magnésio (Mg) e suas ligas têm atraído um interesse significativo nas últimas duas décadas devido às suas potenciais aplicações no setor automotivo (BIAN; HUANG; CHINO, 2020). No entanto, a baixa conformabilidade à temperatura ambiente limita as possibilidades de processamento de ligas de magnésio (SCHMIDT *et al.*, 2021).

O magnésio é um material promissor por possuir uma notável mistura de propriedades mecânicas e biomédicas que o torna adequado para uma vasta gama de aplicações. Atualmente, é usado principalmente nas indústrias automotiva, aeroespacial e médica, porém o magnésio tem seu próprio conjunto de desvantagens que a indústria e as comunidades de pesquisa estão abordando ativamente, sendo a rápida corrosão a sua desvantagem mais significativa o que impediu drasticamente o crescimento e a expansão do magnésio para outras aplicações (TAN; RAMAKRISHNA, 2021).

2.2.1 Ligas de Magnésio

A adição de elementos de liga em magnésio puro ajuda a alterar suas propriedades, o magnésio é quimicamente ativo e pode reagir com outros elementos de liga metálica para formar compostos intermetálicos. Na maioria das ligas de magnésio, pode-se observar a presença de fases intermetálicas, essas fases ajudam a influenciar a microestrutura e afetam as propriedades mecânicas da liga de magnésio. O endurecimento por solução sólida e/ou endurecimento por precipitação são os principais mecanismos para melhorar o desempenho mecânico dos materiais à base de magnésio (GUPTA; SHARON, 2011).

O magnésio e suas ligas têm uma alta relação resistência/densidade e encontraram muitas aplicações bem-sucedidas, particularmente nas indústrias automotiva e aeroespacial (DONG, 2010). Como um metal extremamente leve, o magnésio e suas ligas têm excelente resistência específica, boa fundibilidade, formabilidade a quente e boa proteção contra interferência eletromagnética (LIU; REN; LIU, 2014). Atualmente, 90% das ligas comerciais de magnésio são produzidas por fundição devido às suas excelentes propriedades de fundição (LI *et al.*, 2022).

O magnésio é o terceiro metal estrutural mais comumente usados, depois do aço e do alumínio. O magnésio oferece oportunidades significativas para aplicações leves nas indústrias automotiva, aeroespacial, de ferramentas elétricas, médica, computadores, comunicações e produtos de consumo (KUMAR; KUMAR; MUKHOPADHYAY, 2018).

É tendência de aplicação da liga de magnésio produzir peças estruturais grandes e complexas, a fim de atingir o objetivo de ser leve e atender às necessidades da indústria aeroespacial (CAI *et al.*, 2022). Além disso as ligas de magnésio também possuem muitas propriedades de usinagem atraentes, como menor força de usinagem e menor potência de usinagem necessária (DU *et al.*, 2022).

De acordo com Asgari, Delavar e Sedighi (2023), o magnésio possui boa usinabilidade em comparação com outros materiais estruturais usuais. Por outro lado um bom acabamento superficial e maior vida útil da ferramenta podem ser alcançados ao se usar ligas de magnésio.

Atualmente, a liga de magnésio AZ31 é a mais amplamente utilizada entre todas as ligas de magnésio forjado e desempenha um papel importante em aplicações de baixo peso e economia de energia (WANG *et al.*, 2023).

O sistema de designação de liga padrão da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) rotula cada liga por letras que indicam os principais elementos de liga, seguidas de números que representam as porcentagens desses elementos. A designação de uma liga de magnésio típica consiste em três partes. A primeira parte da designação é composta pelas letras de abreviação dos dois principais elementos de liga, dispostos em ordem decrescente de porcentagem (GUPTA; SHARON, 2011), conforme Quadro 2.

Quadro 2: Letras de abreviação para designação de ligas de magnésio

Elemento de liga	Letra de abreviação
Alumínio	A
Bismuto	B
Cobre	C
Cádmio	D
Metais de terras raras	E
Ferro	F
Tório	H
Zircônio	K
Lítio	L
Manganês	M
Níquel	N
Prata	Q
Cromo	R
Silício	S
Estanho	T
Ítrio	W
Antimônio	Y
Zinco	Z

Fonte: Adaptado de Gupta e Sharon (2011).

Se as porcentagens dos elementos de liga forem iguais, as letras serão organizadas alfabeticamente. Na segunda parte são indicadas as quantidades, em termos percentuais, dos dois principais elementos de liga. Consiste em dois números inteiros, que correspondem aos dois alfabetos. Já a terceira, distingue entre as diferentes ligas com as mesmas porcentagens dos dois principais elementos de liga, sendo constituída por uma letra do alfabeto atribuída à medida que as composições vão se padronizando, sendo eles (GUPTA; SHARON, 2011).

- a) A – Primeira composição registrada na ASTM;
- b) B – Segunda composição registrada na ASTM;
- c) C – Terceira composição registrada na ASTM;
- d) D – Elevada pureza;

- e) E – Elevada resistência à corrosão;
- f) X – Liga experimental ainda não registrada na ASTM.

Devido à sua baixa resistência e baixa ductilidade à temperatura ambiente, o desenvolvimento e aplicação de ligas de magnésio ainda são limitados. Assim, a pesquisa para melhorar a resistência e tenacidade das ligas de Mg é de grande importância. O refinamento do grão e a modificação da textura provaram ser formas eficazes de melhorar a ductilidade das ligas. Nas últimas décadas, a deformação plástica severa tem atraído cada vez mais atenção no campo das ligas de magnésio, porque acredita-se ser uma tecnologia prática e promissora para preparar ligas de alta resistência/tenacidade, modificando suas microestruturas e texturas (YAN *et al.*, 2020).

As aplicações industriais de ligas de magnésio aumentaram devido à presença de vários elementos de liga e propriedades do material, principalmente a alta relação resistência/peso, propriedades de usinabilidade e soldabilidade (SATHISH *et al.*, 2022).

2.2.2 Diagrama Binário Alumínio-Magnésio

Na metalurgia um material não é descrito apenas pela composição química, mas também pelas fases presentes, isso pode ser feito através de sistemas binários e ternários de forma relativamente simples, na forma de diagramas de fases. O diagrama de fases representa o estado de equilíbrio, mas não é capaz de fornecer informações sobre a forma física ou dispersão das fases ou fases que podem aparecer no processamento fora do equilíbrio. Eles são ferramentas particularmente úteis na interpretação de microestruturas, no planejamento de tratamentos térmicos, como endurecimento por envelhecimento ou tratamentos termomecânicos. (MORDIKE; LUKÁČ, 2006).

A solubilidade sólida máxima do alumínio em magnésio é razoavelmente alta em 12,9% em peso de Al (na temperatura eutética de 437°C) e a concentração de equilíbrio a 200°C é de 2,9% em peso de Al, de modo que uma grande quantidade de alumínio está disponível para precipitação. Quando o teor de alumínio excede o limite de solubilidade em magnésio, forma-se a fase intermetálica γ (CELOTTO, 2001).

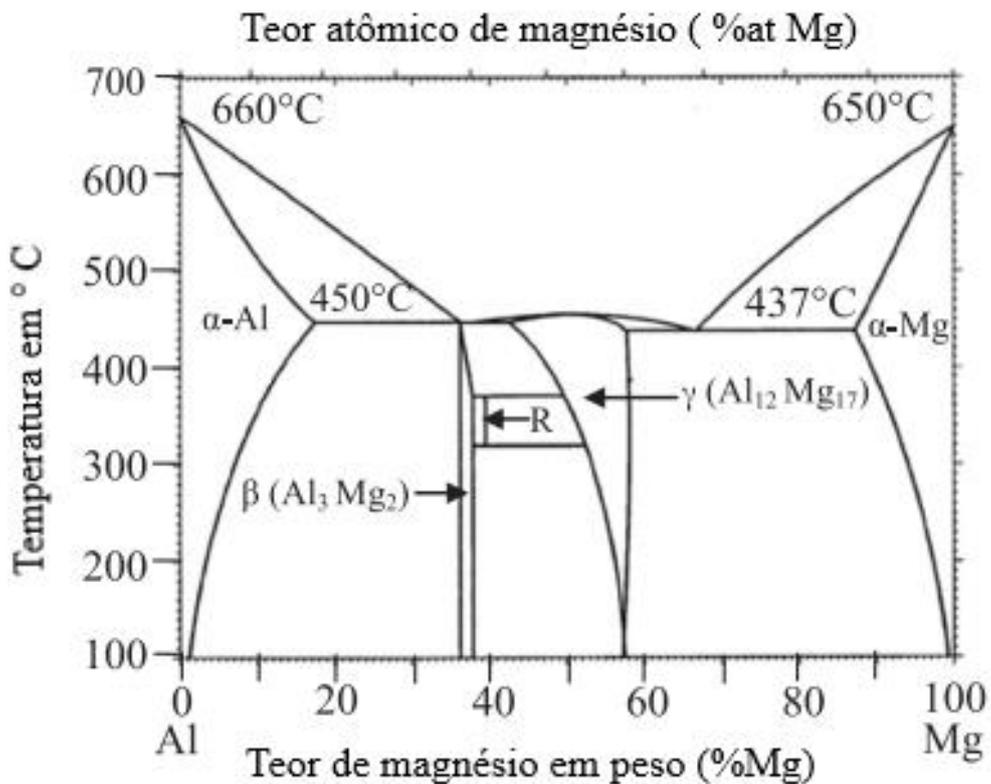
Segundo Sen e Puri (2022) o diagrama de fase binário Al-Mg inclui fases de equilíbrio sólido de Al, β (Al_3Mg_2), R, γ ($\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$) e Mg. Em todas as fases, a composição% Mg é:

- a) Fase Al (0–17,1%);
- b) Fase β (36,1–37,8%);

- c) Fase R (39%);
- d) Fase γ (42–58,0%);
- e) Fase Mg (87,1–100%).

O diagrama de fase binária Al-Mg, Figura 1, mostra claramente que o aquecimento de ligas de Al e ligas de Mg durante a mistura ou união pode reagir entre si no estado sólido para formar intermetálicos (IMCs) como Al_3Mg_2 e $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$, dependendo da temperatura local durante o processo e composição dos materiais. (SEN e PURI, 2022)

Figura 1: Diagrama de fase Al-Mg



Fonte: SEN e PURI (2022)

2.2.3 Soldabilidade

A soldagem por fusão desempenha um papel fundamental na reparação e conexão de metais devido ao seu baixo custo e bom desempenho da junta. No entanto, a soldagem por fusão de ligas de magnésio pode apresentar graves defeitos de porosidade, que deterioram o desempenho da junta (LI *et al.*, 2022).

De acordo com Zhang *et al.* (2022), os métodos comuns para unir peças de liga de magnésio são soldagem a arco, soldagem por fricção (FSW), soldagem a laser e soldagem híbrida laser-arco. No segmento de soldagem a arco, a soldagem a arco de tungstênio a gás (GTAW) e soldagem a arco de metal a gás (GMAW) são mais comumente aplicadas para unir ligas de magnésio, porém os métodos de soldagem por fusão existentes mostraram suas limitações de baixas velocidades de soldagem, grande zona afetada pelo calor (HAZ) e zona de fusão (FZ), alta contração, alta perda por evaporação de elementos de liga e alta tensão residual e distorção de soldas (ZHANG *et al.*, 2022).

A soldagem por fricção é um dos métodos de soldagem de estado sólido mais populares, que permite obter soldas em ligas de magnésio com grãos refinados livres de formação de poros, mas a eficiência da soldagem é baixa. A soldagem a arco tem vantagens de controle de processo conveniente e baixo custo, mas o engrossamento de grãos é grave devido à grande entrada de calor. A soldagem a laser possui características de alta densidade de energia e baixa entrada de calor, o que é benéfico para melhorar a qualidade da solda com zona afetada pelo calor estreita e microestrutura de solda refinada (GAO *et al.*, 2022).

A soldagem de ligas de magnésio é bastante difícil com técnicas tradicionais e muitos problemas têm sido relatados na literatura. A invenção de uma melhor técnica de soldagem para ligas de magnésio pode ser uma grande iniciativa no desenvolvimento de aplicações industriais (SINGH e SEHGAL, 2022).

A soldagem por fricção (FSW), como uma nova tecnologia de união em estado sólido, é considerada o desenvolvimento mais revolucionário no campo da soldagem de metais e tem alcançado excelente desempenho na união de dissimilares (MENG *et al.*, 2021).

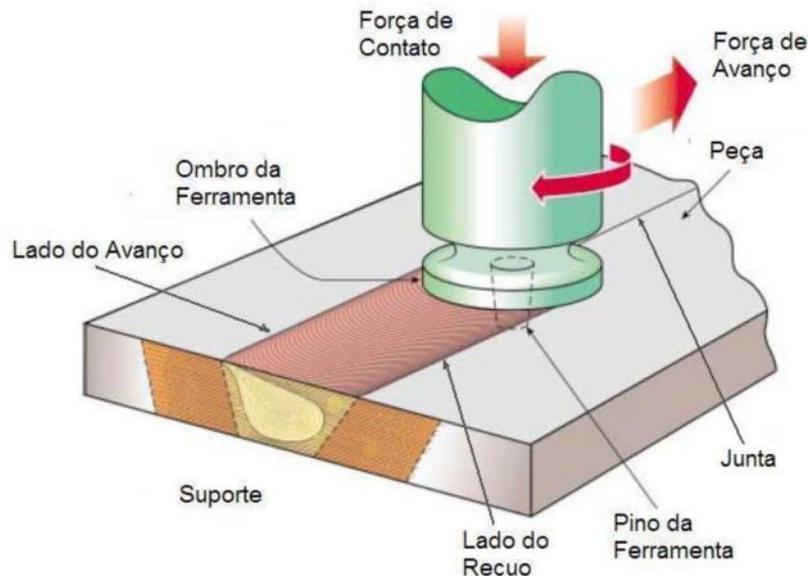
A capacidade de unir os componentes da liga de magnésio a outros materiais de engenharia, como ligas de alumínio, permitiria uma maior flexibilidade de projeto e expansão de suas aplicações, a junção efetiva de liga de alumínio e liga de magnésio levaria a mais economia de peso. Melhorar a capacidade de juntar materiais diferentes com propriedades de engenharia está permitindo novas abordagens para estruturas, aprimorando métodos para produção de energia, criando produtos médicos de última geração e dispositivos de consumo. (TABASI *et al.*, 2015).

2.3 Processo FSW

Para Zhen, Li e Wang (2022), a soldagem é um processo físico e químico complexo que envolve física do arco, transferência de calor, metalurgia e mecânica. Os fenômenos de soldagem incluem eletromagnetismo durante a soldagem, processo de transferência de calor, fusão e solidificação do metal, mudança de fase durante resfriamento, estresse e deformação na soldagem e assim por diante.

A soldagem por fricção, ao contrário dos métodos tradicionais de soldagem por fusão, é um processo de soldagem em estado sólido. O processo de soldagem por fricção (FSW) foi desenvolvido em 1991. Neste processo a soldagem é realizada sem fusão, uma junta soldada de alta qualidade pode ser obtida com ausência de trincas de solidificação, porosidade, oxidação e outros defeitos resultantes da soldagem por fusão tradicional (MANDAL, 2017).

Figura 2: Representação básica do processo FSW.



Fonte: HILLER, 2007 *apud* SILVA, 2016

Na técnica FSW, uma ferramenta com ressalto e pino perfilado é rotacionada e forçada a penetrar lentamente na linha de junção entre dois substratos rigidamente fixados em um suporte de placa de apoio. O ressalto da ferramenta está em contato firme com a superfície superior da peça de trabalho. O calor necessário para amolecimento do material é gerado por atrito e deformação plástica. O calor de fricção é gerado entre a ferramenta de soldagem, ombro e pino, e as peças de trabalho. O ombro da ferramenta sofre maiores

quantidades de calor do que a superfície do pino. No entanto, a deformação ou agitação é gerada pela rotação do pino da ferramenta, levando assim à geração de calor adicional (GIVI e ASADI, 2014).

As duas placas são mantidas firmemente na posição sem qualquer espaço entre elas e a ferramenta FSW gira e se move ao longo da linha de topo com seu ressalto esfregando contra a superfície superior da placa. A soldagem por fricção oferece várias vantagens sobre a soldagem a arco. Problemas de porosidade, inclusão de escória, entre outros são eliminados, uma vez que o FSW é um processo de estado sólido (MANDAL, 2017).

Conforme estudado por Mehta e Badheka, (2016), o fluxo plástico dos materiais durante a soldagem é complexo e depende do projeto da ferramenta, em que a maior parte da deformação plástica ocorre pelo cisalhamento do material no seu entorno. A fim de melhorar o fluxo de material no processo é possível o desenvolvimento de diversos tipos de pinos, roscados, cônicos, triangulares, quadrados, entre outros.

As principais variáveis de FSW que estão sob controle do operador incluem o projeto da ferramenta e os parâmetros de movimento da ferramenta, outros fatores como características da máquina, espessura da peça e mecanismos de controle também afetarão a qualidade da solda. Fatores como rigidez da máquina, excentricidade da ferramenta e precisão de controle variam de uma máquina para outra e na maioria da literatura publicada esses aspectos não são considerados (MISHRA; KUMAR; KUMAR, 2014)

No processo FSW possui diversas variáveis que influenciam o desempenho da junta soldada, como velocidade de rotação da ferramenta, velocidade de soldagem, ângulo de inclinação da ferramenta, força axial, entrada do ombro da ferramenta e geometria da ferramenta (SUTTON *et al.*, 2002; AVAL, 2015; JI *et al.*, 2015). Sendo a geometria da ferramenta responsável por evitar e influenciar a ocorrência de diversos defeitos de soldagem, tais como *kissing bond* e defeitos de túnel, *wormhole*, estando intimamente relacionada a qualidade de mistura do processo FSW.

Para Bag, Yaduwanshi e Pal (2014), a soldagem por fricção e agitação (FSW) ganhou atenção significativa nos últimos anos, pois o processo de união em estado sólido de principalmente alumínio e/ou ligas de alumínio agora é estendido para unir materiais e plásticos relativamente mais duros.

Os benefícios do FSW são sem dúvida os mais proeminentes quando comparados com a soldagem por fusão de alumínio, pois a maior parte da implementação de FSW

ocorreu na indústria de fabricação de alumínio, especialmente para aplicações que foram projetadas especificamente para FSW (SMITH e MISHRA, 2014).

A soldagem por fricção e agitação (FSW) expandiu-se rapidamente desde seu desenvolvimento em 1991 e encontrou aplicações em uma ampla variedade de indústrias, incluindo aeroespacial, automotiva, ferroviária e marítima. O processo teve grande sucesso quando aplicado a ligas de alumínio, e este fato foi um motor para estimular a exploração de sua aplicabilidade em outros materiais como o aço (CUNHA *et al.*, 2019).

Segundo Singh e Dubey (2021), a união de ligas de alumínio e ligas de magnésio utilizando soldagem por fusão é um processo complexo de ser desenvolvido devido ao desenvolvimento de grãos grossos e compostos intermetálicos (IMCs) como $Al_{12}Mg_{17}$ e Al_3Mg_2 na zona de fusão. Este problema associado à soldagem por fusão pode ser superado pelo processo de *Friction Stir Welding* (FSW), por ser uma nova técnica desenvolvida para soldagem de materiais com eficiência energética e sem a utilização de materiais de adição. Para Singh *et al.*, (2020), o processo FSW tem potencial para soldar materiais diferentes de forma eficiente devido à geração de baixa temperatura.

2.3.1 Soldagem por Fricção de Dissimilares

Para Yang, Wu e Shi (2020), em um contexto de aumento contínuo dos custos de energia e mudança do ambiente global, estruturas leves têm recebido uma quantidade significativa de atenção. A união de ligas de alumínio e ligas de magnésio é de grande importância para ampliar os campos de aplicação de produtos leves em muitas indústrias de manufatura modernas como os setores automotivo e de aviação.

Alumínio e magnésio, eram considerados não soldáveis pelos processos convencionais de soldagem, agora podem ser facilmente soldados pela técnica de soldagem por fricção. Muito trabalho tem sido feito na soldagem por fricção de placas de alumínio, magnésio e cobre. Vários parâmetros de soldagem, como taxa de rotação da ferramenta, velocidade de deslocamento da ferramenta, ângulo de inclinação e geometria da ferramenta, afetam a textura e as propriedades mecânicas das ligas FSW. A profundidade de penetração também afeta muito as características e a qualidade da soldagem (SHARMA *et al.*, 2022).

Um dos maiores problemas na combinação de ligas de alumínio e magnésio por meio do método FSW é a formação de compostos intermetálicos $Al_{12}Mg_{17}$ (fase γ) e Al_3Mg_2 (fase β), sendo essa uma das dificuldades tecnológicas na união de ligas de

alumínio e magnésio. Esses compostos intermetálicos afetam negativamente as características mecânicas da região soldada, podem causar baixa ductilidade e fraturas quebradiças no ponto de soldagem (BILGIN; KARABULUT; ÖZDEMIR, 2018).

2.3.2 Ferramentas para Soldagem FSW

Uma diferença significativa entre a soldagem FSW e a convencional é o fenômeno complexo envolvendo grande deformação plástica e transferência de material causada pela ferramenta rotativa, portanto, o design da ferramenta é um fator chave na realização de uma ligação metalúrgica de alta qualidade. Portanto, a geometria da ferramenta, como o diâmetro do ombro e o diâmetro do pino, desempenha um papel na determinação da entrada de calor e na qualidade da soldagem, alterando a área de fricção (XIE *et al.*, 2023).

Os materiais comumente usados para FSW de ligas de alumínio e magnésio são aços ferramenta que possuem uma combinação de resistência a altas temperaturas e tenacidade. A escolha é determinada em parte pela temperatura aproximada atingida durante a soldagem. O outro aspecto a ser considerado é o pico de força alcançado durante a penetração da ferramenta, que é uma combinação de forças de compressão e tração. Isso pode levar à quebra da ferramenta, especialmente em ferramentas de ombro côncavo que requerem uma orientação inclinada para sua operação. A escolha final, no entanto, é determinada por fatores como comprimento de execução, usinabilidade do material em relação à complexidade do projeto da ferramenta e fatores de custo (MISHRA; KUMAR; KUMAR, 2014).

De acordo com Biradar e Patil (2022), o material da ferramenta, o perfil do pino da ferramenta a seleção dos parâmetros do processo desempenham um papel significativo na obtenção de juntas de boa qualidade.

O outro fator crítico de projeto é a dimensão das características da ferramenta como diâmetro do ressalto, diâmetro do pino e comprimento do pino. Dentre as dimensões de projeto mencionadas, a escolha do comprimento do pino é a mais simples e é determinada pela espessura a ser soldada. Como regra geral, é usado um comprimento de pino de aproximadamente 0,85–0,95 da espessura da peça de trabalho (MISHRA; KUMAR; KUMAR, 2014).

Sing *et al.* (2020), em uma revisão crítica sobre o progresso das pesquisas em soldagem por fricção de ligas de alumínio-magnésio observou que uma seleção adequada do ombro da ferramenta e da geometria do pino pode melhorar o comportamento do fluxo

do material na zona de mistura, o uso de pino roscado aumenta a eficiência da junta com fluxo de material adequado. O experimento FSW é realizado em ligas de alumínio e magnésio soldadas com sucesso por parâmetros de processo variados.

Ramana *et al.* (2021), realizaram a soldagem de ligas de alumínio AA 5052 e AA 6061 por FSW utilizando ferramentas cônicas e trapezoidais, as juntas soldadas foram submetidas a ensaios para obtenção dos valores de tração e dureza. Observaram que as ferramentas de pino cônico com ponta quadrada produziram melhores propriedades mecânicas nas juntas soldadas.

Em sua pesquisa, Kesharwani *et al.* (2022), analisou e apresentou o efeito de perfis de pinos planos e roscados no processo de soldagem por fricção (FSW) da liga de alumínio 6061-T6 com reforço de partículas. observaram que a ferramenta de geometria de pino roscado melhora a mistura do material e melhora o fluxo do material no estado plástico. A dureza máxima e resistência à tração registradas nas amostras de solda de pino cônico roscado foram 130 HV_{0,2} e 200 MPa, respectivamente, enquanto na amostra de solda de pino quadrado, a dureza máxima e resistência à tração foram 80 HV_{0,2} e 175 MPa, respectivamente.

Com o objetivo de entender melhor a formação de compostos intermetálicos e como estes afetam a microestrutura de solda e as propriedades mecânicas da junta, Sen *et al.* (2022), concluíram que o design da ferramenta é essencial para distribuição uniforme de temperatura, fluxo de material e controle da formação de compostos intermetálicos.

Jamalian *et al.* (2021), realizaram um estudo, a partir de técnicas de Planejamento Experimental, para investigar a soldagem por fricção multipasse (FSW) assistida por pó de juntas AA5086-H34 com diferentes geometrias de pinos, juntamente com a análise da microestrutura e propriedades mecânicas. Foram utilizadas cinco geometrias diferentes de pinos para fabricar 140 juntas com diferentes parâmetros de processo, constatando que a ferramenta com perfil de pino quadrado gerou uma junta com a distribuição de material mais homogênea e maior resistência à tração final de 303 MPa.

Murthy *et al.* (2018), descreveram o efeito do ombro côncavo em ferramentas de geometria de pino roscado cônico na soldagem por fricção da Liga de alumínio AA6082-T6, observando em seus resultados que a forma côncava no ombro facilita a preservação do material na zona de agitação.

Para Sunnapu *et al.* (2021), a geometria das ferramentas são um dos principais parâmetros da soldagem FSW, exercendo grande influência no fluxo de material e nas propriedades mecânicas.

Asadi *et al.* (2022), estudaram o impacto do perfil do pino da ferramenta nas variáveis temperatura e tensão, força transversal, morfologia da zona de agitação, tamanho de grão, microdureza, características de tração e padrões de fluxo de material no processo FSW em ligas de magnésio, observando que: em função do número de arestas em um pino, a temperatura de pico aumenta, a zona de agitação se expande, o tamanho do grão aumenta, a força transversal aumenta, a microdureza diminui e o fluxo de material melhora; O maior alongamento e resistência à tração das amostras longitudinais foram produzidos por ferramenta hexagonal.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Metal de Base

Foram confeccionadas 4 juntas soldadas, uma para cada geometria de pino de ferramenta estudada, com uma réplica para cada condição. Os metais de base empregados foram as ligas AA7075-T651 e AZ31B.

As composições químicas das ligas são apresentadas na Tabela 1, esta composição foi determinada por análise de espectroscopia por dispersão de energia-EDS, obtidas em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) de marca Tesclan e modelo VEGA3 instalado no laboratório de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da UAEM da UFCG.

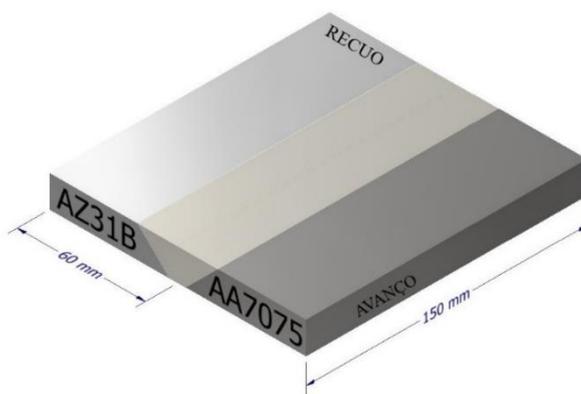
Tabela 1: Composição química dos materiais de base

	Fe	Mn	Zn	Al	Mg
AA 7075-T651	0,4	0,3	6,0	90,6	2,7
AZ31-B	0,2	0,5	1,8	1,8	95,7

Fonte: Próprio autor.

As chapas utilizadas na soldagem tinham 4 mm de espessura, preparadas com dimensões de 150 x 60mm, de forma que após os procedimentos de soldagem fosse possível retirar todas as amostras necessárias para realização dos devidos ensaios e análises. A Figura 3 ilustra a representação das juntas soldadas.

Figura 3: Representação das juntas.



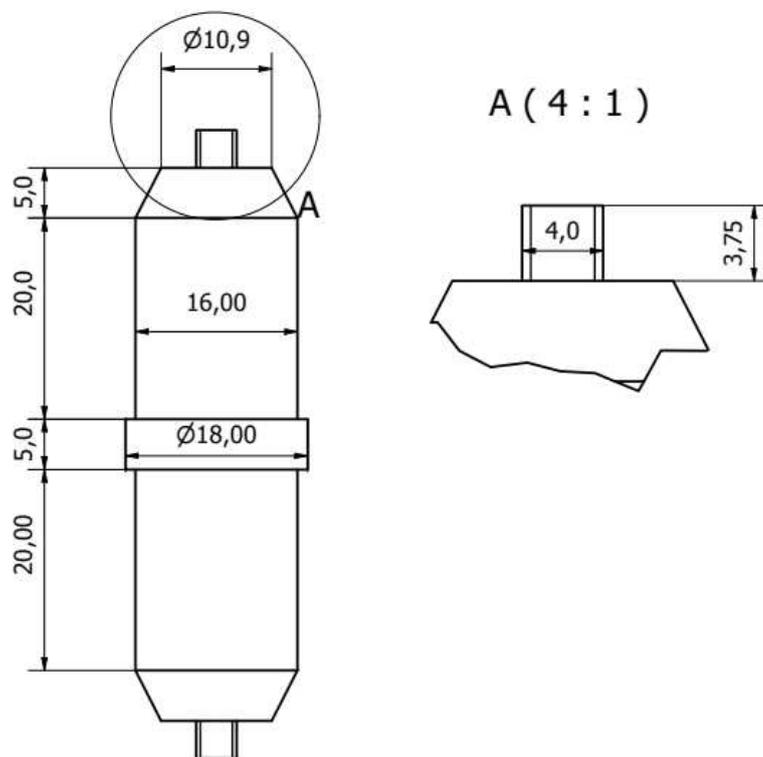
Fonte: Próprio autor.

3.2 Confeção das Ferramentas

As ferramentas de diferentes geometrias de pino foram fabricadas em aço ferramenta H13, em um torno CNC SINITRON, modelo BNC-1840, comando numérico FANUC, localizado no laboratório de usinagem CNC, do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) *campus* Cedro. Nas figuras 4, 5, 6 e 7 é possível observar o projeto das 4 geometrias dos pinos, sendo elas: cilíndrica rosqueada, facetada hexagonal, cilíndrica lisa e cônica lisa respectivamente.

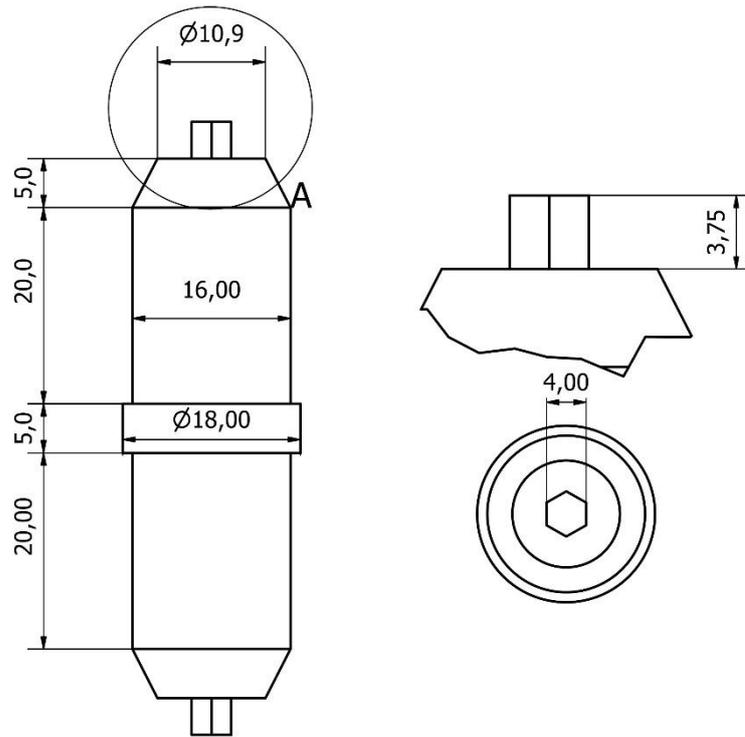
A ferramenta de geometria de pino cilíndrico rosqueado, Figura 4, possui as seguintes características: rosca métrica à mão direita; passo de rosca de 1mm e altura de filete rosca de 0,65 mm.

Figura 4: Ferramenta cilíndrica rosqueada



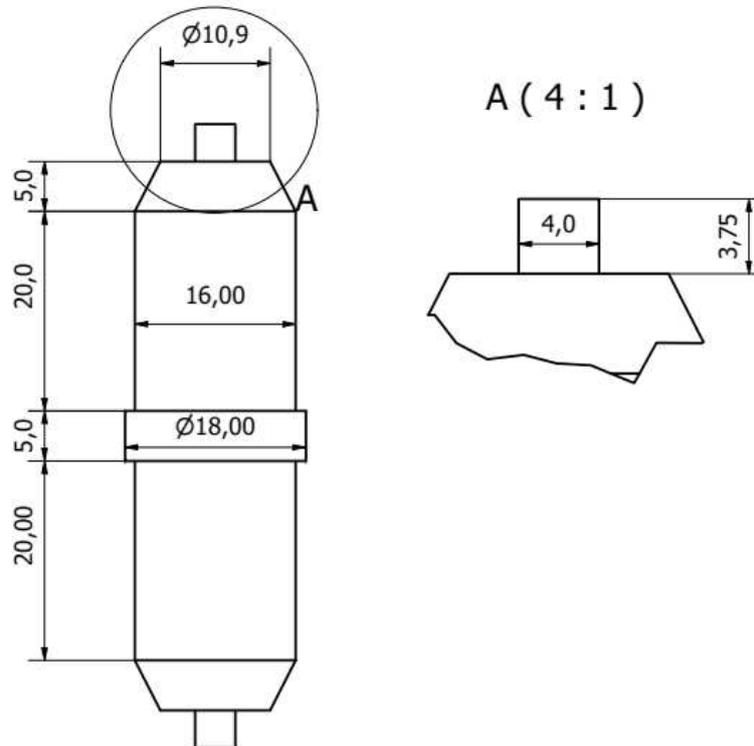
Fonte: Próprio autor.

Figura 5: Ferramenta facetada hexagonal



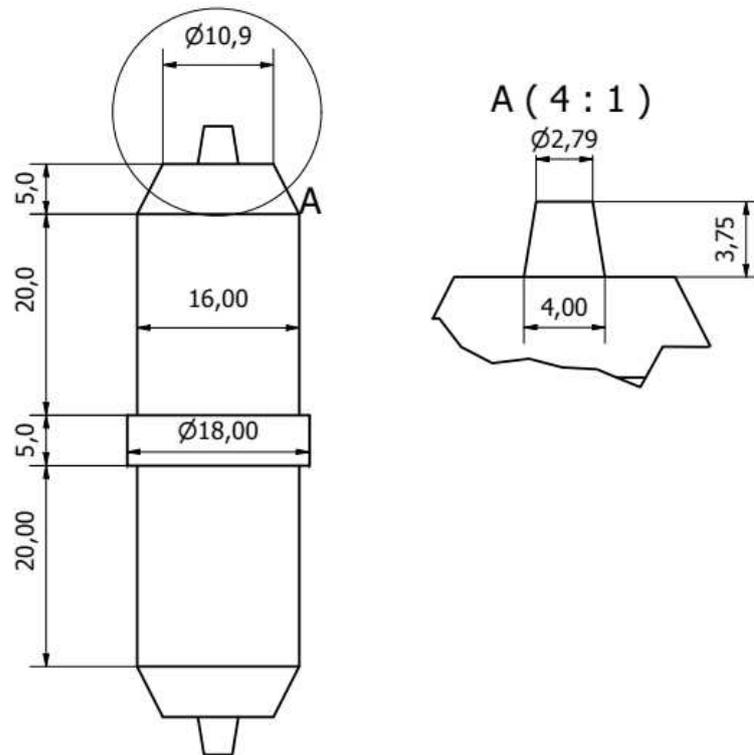
Fonte: Próprio autor

Figura 6: Ferramenta cilíndrica lisa



Fonte: Próprio autor.

Figura 7: Ferramenta cônica lisa



Fonte: Próprio autor.

Para melhores resultados de tenacidade do aço H13, recomenda-se a austenitização a 1000°C e para maior resistência ao revenimento, austenitizar a 1040°C e a têmpera pode ser realizada no resfriamento ao ar forçado (VILLARES METALS, 2021). Considerando a temperatura de austenitização (entre os 980 e 1050°C) é recomendado realizar alguns estágios durante o aquecimento, o arrefecimento ao ar ou em óleo são os mais indicados (DE ALMEIDA CUNHA, 2012).

Com o intuito de melhorar a dureza e sua resistência mecânica, a ferramenta foi submetida a um tratamento térmico de têmpera e revenimento, para isto foi utilizado um Forno Mufla EDG/SÉRIE FC, do laboratório de fundição da Universidade Federal de Campina Grande UFCG. Programado para aquecimento em rampa, sendo estabelecido no patamar inicial uma temperatura de 600° C, com tempo de duração de 25 min, e depois em um patamar final de 1050°C com um tempo de aquecimento de 30 min, ao término do aquecimento, a ferramenta foi exposta ao ar forçado, concluindo a têmpera. Após o

resfriamento total da ferramenta, esta passou por um revenimento, sendo aquecida no forno em uma temperatura de 600°C por um tempo de 25 minutos.

3.3 Parâmetros de Soldagem e Confeção das Juntas

Para garantir maior estabilidade e evitar possíveis distorções durante a soldagem, foi construído um suporte, seguindo as especificações do modelo desenvolvido por Gipiela e Martins (2015), realizando algumas alterações e adaptações ao projeto original.

O suporte foi fabricado em aço ABNT 1020, com dimensões de 300 mm x 230mm e 1” de espessura, em uma fresadora universal Stmac, modelo STF 5000V, localizada no laboratório de usinagem do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), *campus* Cedro, como pode ser visto na Figura 8.

Figura 8: Suporte para soldagem FSW



Fonte: Próprio autor.

Para a soldagem FSW das juntas foi utilizada uma fresadora universal automática Diplomat, modelo FU-360, localizada no laboratório de usinagem do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), *campus* Cedro.

Os parâmetros de soldagem foram determinados após 2 passos:

1º passo: levantamento de parâmetros empregados de acordo com a literatura, a Tabela 2 mostra os parâmetros colhidos na literatura;

Tabela 2: Parâmetros de soldagem obtidos na literatura

Velocidade de rotação (rpm)	Velocidade de avanço (mm/min)	Ângulo de inclinação	Offset (mm)	Referência
340	70	1°	0	COLAÇO (2019)
760	125	2°	0	
1.180	180	3°	0	
350	40	3°	0	RIBEIRO (2019)
610	110	3°	0,5	
870	180	3°	1	
410	48	1°	0	LIMA (2020)
912	83	2°	0	
1.415	118	3°	0	
560	41	1°	0	SOUSA (2023)
1.170	95	3°	0	

Fonte: Próprio autor.

2° passo: análise exploratória no domínio dos parâmetros levantados no 1° passo, de maneira que fossem produzidas juntas com melhor aspecto visual, isto é, sem defeitos superficiais.

Os parâmetros adotados foram: inclinação da ferramenta de soldagem foi de 3°, a rotação utilizada foi de 565 RPM, a velocidade de soldagem foi de 75 mm/min, o *offset* foi 0,5mm para a liga AZ31B e o avanço da ferramenta foi no sentido da liga AA7075-T651.

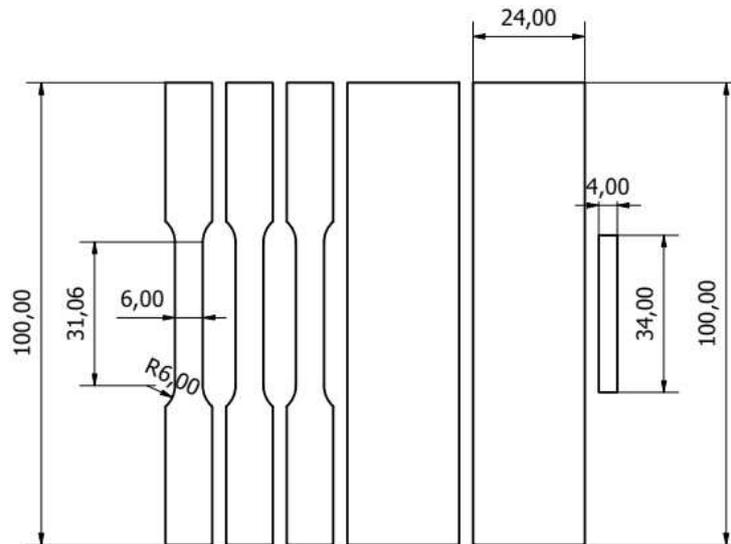
3.4 Caracterização das Juntas Soldadas

Após o término das soldagens foram usinados de cada junta 3 corpos de prova para o ensaio de tração, de acordo com a norma ASTM E8/E8M – 16A, para ensaio de dobramento foram usinados 2 corpos de prova de acordo com a norma ASTM E190-92 e para os ensaios de microestrutura e dureza foi retirado 1 corpo de prova de cada junta soldada, como pode ser visto nas figuras 9 e 10.

Os corpos de prova foram usinados em uma fresadora CNC Router G-Weike WK 3030, Cobra CNC, localizada no laboratório de usinagem CNC do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), *campus* Cedro, a Figura 9 e a Figura

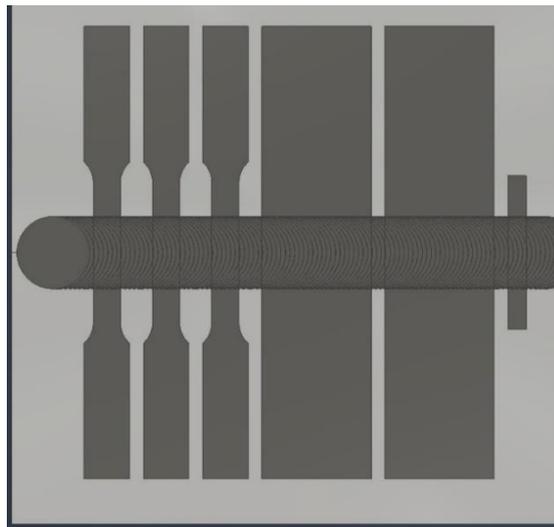
10, mostram o desenho projetivo e a ilustração das chapas para retirada dos corpos de prova.

Figura 9: Projeto das amostras dos corpos de prova



Fonte: Próprio autor.

Figura 10: Ilustração da chapa soldada e seus respectivos corpos de prova



Fonte: SOUSA (2023)

3.4.1 *Preparação Metalográfica e Microscopia Óptica*

A análise da microestrutura foi realizada em um Microscópio Óptico de marca Olympus e modelo BX51 do laboratório de propriedades mecânicas da UAEM/UFCG, seguindo a seguinte sequência:

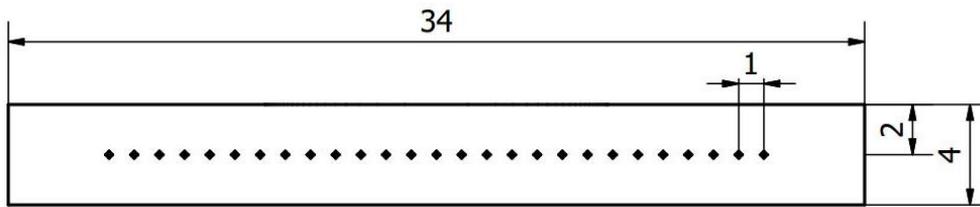
- a) Embutimento a frio foi realizado utilizando resina acrílica e catalisador que após misturados foi adicionado ao molde onde já se encontrava a amostra devidamente posicionada e, então esperado o tempo de cura da resina;
- b) Lixamento manual utilizando lixas SiC (Carbeto de Silício) de diferentes granulometrias (220, 320, 600, 800 e 1200) em ordem decrescente de tamanho de grão;
- c) Polimento mecânico manual refinado utilizando pasta de diamante de granulometrias de 1 e 0,25 μm ;
- d) Ataque químico, para atacar amostra no lado do magnésio foi utilizado o reagente áctico-picral, uma solução composta por 5 ml de ácido acético, 2.1 g de ácido pícrico, 10 ml de água destilada e 70 ml de álcool etílico absoluto. Para atacar a amostra no lado do alumínio foi utilizado um reativo de Keller: 2,5ml ácido nítrico, 1,5ml de ácido clorídrico e 1ml de ácido fluorídrico diluídos em 95ml de água destilada;
- e) Coleta das imagens micrográficas com as seguintes ampliações:50X, 100X e 200X.

3.4.2 *Ensaio de Dureza Vickers*

Com o intuito de verificar os níveis de dureza nas regiões de solda, comparando-a com a dureza do material de base, foi realizado o teste de dureza Vickers, para isso foi utilizado um Microdurômetro Vickers da Digimess[®], modelo HV 1000, do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), *campus* Cedro.

As amostras retiradas para o teste de dureza foram embutidas a frio e submetidas aos procedimentos de lixamento manual, utilizando lixas de diferentes granulometrias. Em cada amostra foram realizadas 27 indentações, ao longo de uma linha transversal a direção de soldagem com espaçamento entre elas de 1 mm, e com 2 mm abaixo da superfície superior da junta soldada, a Figura 11, destaca as especificações da amostra e do espaçamento das indentações.

Figura 11: Indentações ensaio de dureza

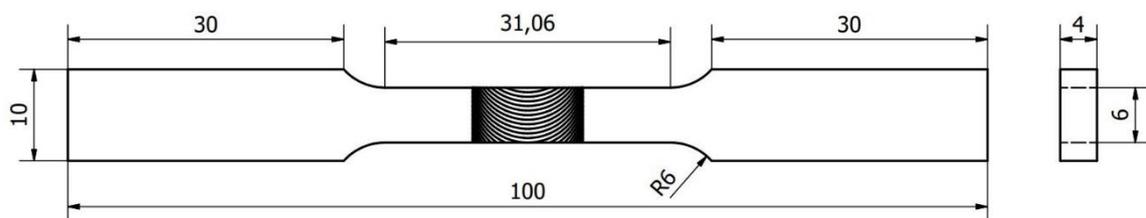


Fonte: Próprio autor.

3.4.3 Ensaio Mecânico de Tração Uniaxial

Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios da MTS, modelo 810, do laboratório de propriedades mecânicas da UAEM/UFCG, foi adotado uma taxa de deslocamento de 1 mm/min até a ruptura dos corpos de prova. A Figura 12 ilustra o corpo de prova adotado para os ensaios, seguindo a norma ASTM E8/E8M – 16A.

Figura 12: Corpo de prova para o ensaio de tração



Fonte: Próprio autor.

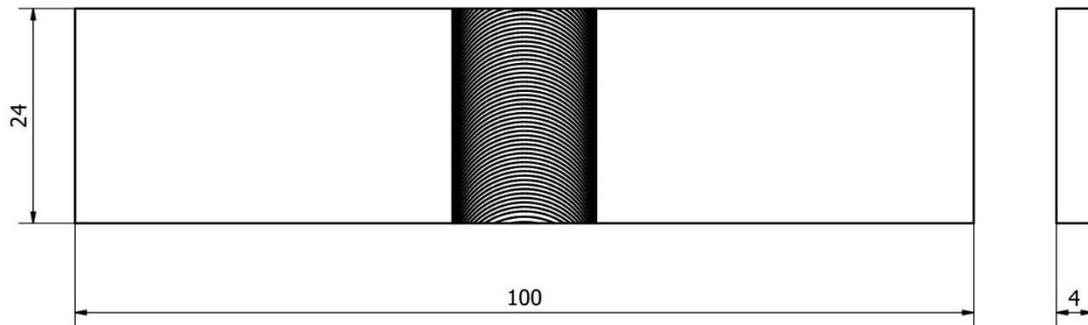
3.4.4 Ensaio Mecânico de Dobramento de Raiz

O ensaio de dobramento é uma análise qualitativa que busca avaliar a ductilidade das juntas soldadas. Este procedimento fornece dados sobre as propriedades mecânicas, sendo crucial para a compreensão da qualidade das soldas. Nesse contexto, foram coletados os valores de carga máxima suportada por cada junta, com o objetivo de obter uma resposta mais precisa em relação à qualidade da soldagem.

Os ensaios mecânicos de dobramento de raiz foram realizados com o objetivo de verificação da qualidade da solda. Foram realizados dois ensaios para cada junta soldada obtidas de cada geometria de pino. Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios da MTS, modelo 810, do laboratório de propriedades mecânicas da

UAEM/UFCG, seguindo a norma ASTM E190-92, adotando uma taxa de deslocamento de 10mm/min. A Figura 13 ilustra o corpo de prova utilizado no ensaio.

Figura 13: Corpo de prova ensaio de dobramento



Fonte: Próprio autor.

3.4.5 Caracterização da Superfície de Fratura

Para análise da superfície de fratura foi utilizado um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) de marca Tescan e modelo VEGA3, aplicando uma tensão acelerada de 20Kv, do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da UAEM/UFCG.

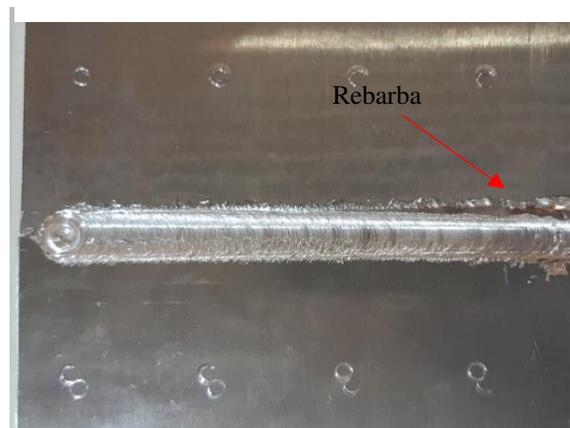
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Inspeção Visual das Juntas Soldadas

Foram realizadas inspeção visual em todas as 4 juntas soldadas com as diferentes geometrias de ferramentas e suas réplicas, a fim de verificar a ocorrência de defeitos superficiais na solda. Os defeitos superficiais podem ser: trincas, furo remanescente (*keyhole*) e excesso de rebarba (*flash*) (COLAÇO, 2019).

Na Figura 14 é possível observar o aspecto superficial da junta soldada com a ferramenta cilíndrica lisa, verificou-se a presença de rebarba e defeitos de falta de penetração foram imperceptíveis.

Figura 14: Soldagem ferramenta cilíndrica lisa



Fonte: Próprio autor.

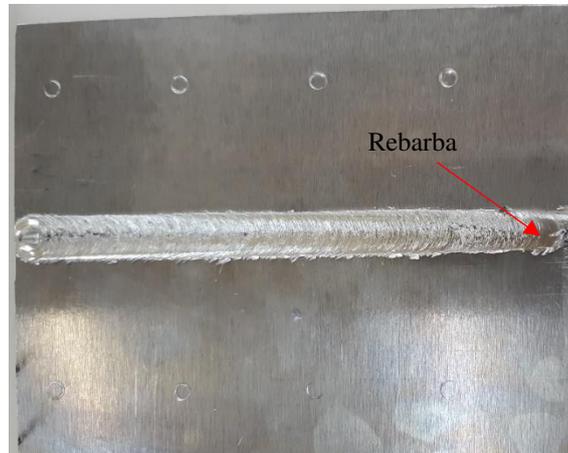
Na Figura 15 é possível observar o aspecto superficial da junta soldada com a ferramenta cônica lisa, verificou-se que a solda apresentou rebarba e defeitos de falta de penetração foram imperceptíveis.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 16 é possível observar o aspecto superficial da junta soldada com a ferramenta cilíndrica rosqueada. Nota-se presença de rebarba e o defeito de trinca por falta de mistura, próximo ao final da solda. O defeito de trinca por falta de mistura também detectado por Lima (2020).

Figura 16: Soldagem ferramenta cilíndrica rosqueada



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 17 é possível observar o aspecto superficial da junta soldada com a ferramenta facetada hexagonal. Verifica-se a presença de rebarba e defeitos como falta de penetração e trincas também foram imperceptíveis.

Figura 17: Soldagem ferramenta facetada hexagonal



Fonte: Próprio autor.

A Tabela 3 mostra os defeitos das juntas soldadas em função da geometria da ferramenta do pino, detectados na inspeção visual.

Tabela 3: Geometria da ferramenta do pino e defeitos aparentes

FERAMENTA	DEFEITO
CILÍNDRICA LISA	REBARBA
CÔNICA LISA	REBARBA
CILÍNDRICA ROSQUEADA	REBARBA
FACETADA HEXAGONAL	REBARBA

Fonte: Próprio autor.

4.2 Macro e Microestrutura

As Figura 18, Figura 19, Figura 20 e Figura 21 exibem imagens macro e micrográficas das 4 juntas soldadas com as diferentes geometrias de pino. A macroestrutura proporciona uma visão abrangente da junta soldada, enquanto a microestrutura analisa detalhadamente a Zona de Mistura (ZM) e a região de interface entre a Zona de Mistura e a Zona Termomecanicamente Afetada (ZM/ZTMA). Essas análises foram realizadas em ambos os lados, avanço e recuo, oferecendo uma compreensão abrangente do processo.

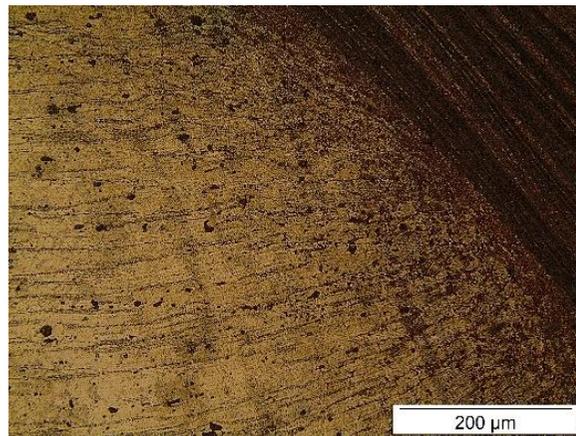
Para El-Sayed *et al.* (2021), o defeito de “*wormhole*” ocorre quando a pressão de forjamento não é suficiente, o valor da velocidade de soldagem é alto ou é utilizada uma ferramenta de ressalto plano, como a de geometria de pino cilíndrico liso.

A Figura 18 ilustra a junta soldada utilizando a ferramenta de geometria cilíndrica lisa, onde foi detectado o defeito “*wormhole*” (defeito de túnel), como observado na macrografia. Esse fenômeno é destacado no detalhe proporcionado pela micrografia. Na interface ZM/AA7075-T651, nota-se a severidade do trabalho mecânico.

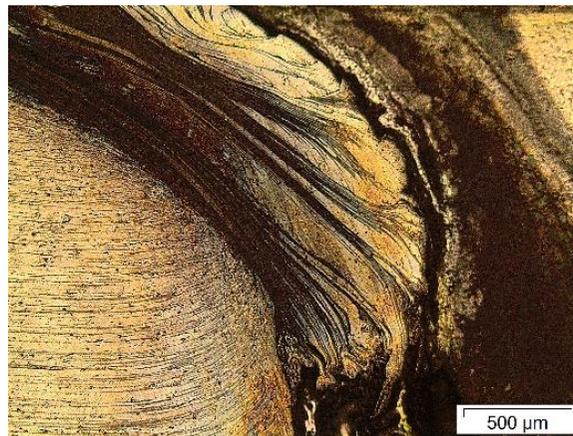
Figura 18: Macro e microestrutura da junta soldada com geometria de pino cilíndrico liso



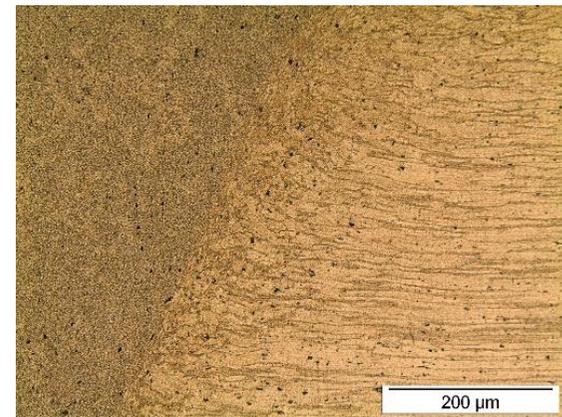
AZ31B/ZM



ZM



ZM/AA7075-T651



Fonte: Próprio autor

A soldagem por fricção e mistura (FSW) enfrenta diferentes defeitos superficiais e internos relacionados à mistura inadequada de materiais e à falta de fluxo de material por meio da geração não adequada de calor.

Para Dialami *et al.* (2020), o aparecimento de defeitos de soldagem, como o *wormhole*, está relacionado com os parâmetros de soldagem, como velocidades de avanço e rotação e o formato da ferramenta, por influenciarem diretamente no fluxo de material. Estes defeitos impedem a obtenção de juntas de alta resistência, pois influenciam a formação da solda e afetam a microestrutura e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas. O defeito de túnel se forma quando há fluxo de material inadequado para o fundo da solda (PAL *et al.*, 2015).

Majeed *et al.* (2022), aponta que a principal causa do defeito *kissing bond* é a agitação inadequada do material nas superfícies de contato. Para Ma *et al.* (2022), a penetração insuficiente do pino é a principal razão para os defeitos de união entre raízes, o que causa concentração de tensão e acelera o início e a propagação de trincas, como observado por Ni *et al.* (2022) na soldagem de chapas de AA7075-T6 pelo processo FSW.

A Figura 19 ilustra a junta soldada com pino de geometria cônica, evidenciando a presença de defeitos como falta de mistura e "*kissing bond*". Esses defeitos são identificados na macrografia e nas imagens da micrografia na ZM. Observa-se a falta de mistura e trincas, enquanto na interface AZ31B/ZM é possível notar a ausência de mistura. Já na interface AZ31B/ZM é possível identificar a possível presença de intermetálicos e na interface ZM/AA7075-T651 é possível identificar a severidade do trabalho mecânico possivelmente por este ser o lado de avanço da soldagem.

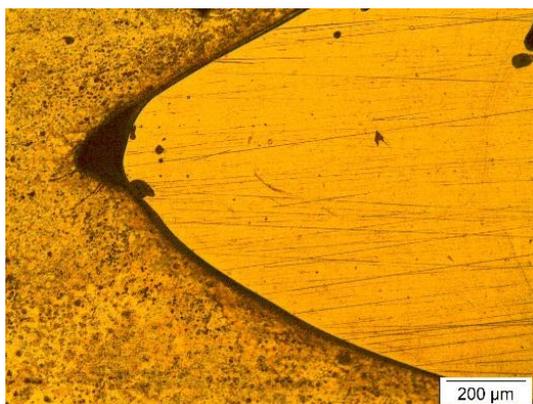
Resultados similares do defeito de "*kissing bond*" foram observados por Majeed, Siddiquee e Mehta (2022) na soldagem por fricção de ligas de chapas de AA7475-T7 e AA2024-T3 com a utilização de ferramenta de geometria de pino cônico liso.

A Figura 20 mostra a junta soldada com pino de geometria facetada hexagonal, que apresentou a presença de defeito de túnel (*wormhole*), o qual foi evidenciado na macrografia e detalhado na imagem da micrografia, imagem central (ZM). As interfaces

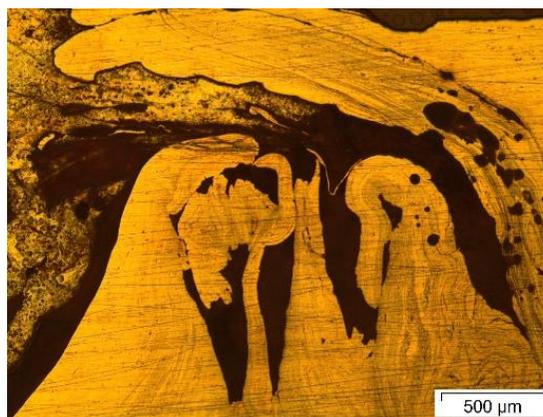
Figura 19: Macro e microestrutura da junta soldada com geometria de pino cônico liso



AZ31B/ZM



ZM



ZM/AA7075-T651

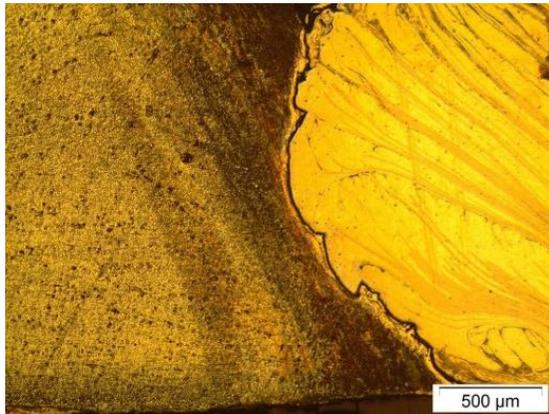


Fonte: Próprio autor

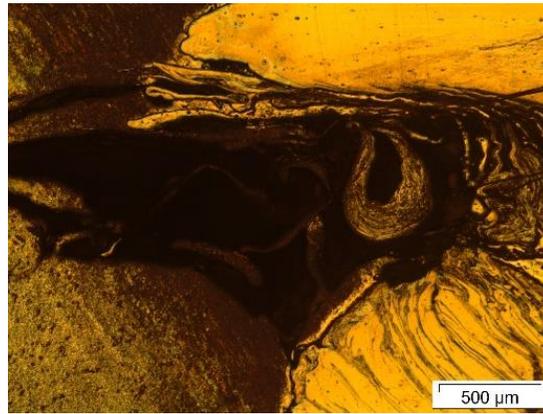
Figura 20: Macro e microestrutura da junta soldada com geometria de pino facetado hexagonal



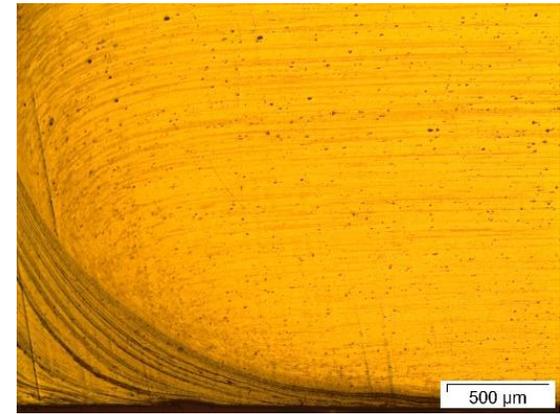
AZ31B/ZM



ZM



ZM/AA7075-T651



Fonte: Próprio autor

A Figura 21 mostra a junta soldada utilizando a ferramenta cilíndrica rosqueada, na macrografia, mostra que está isenta de defeitos. Na micrografia na imagem da ZM, há possível aparecimento de intermetálicos, o que pode ser observado também na interface AZ31B/ZM. Na interface ZM/AA7075-T651 nota-se a severidade do trabalho mecânico na região ZM/ZTMA, que conforme mencionado por Lima (2020) esta severidade pode ter interferência direta na redução da dureza do material.

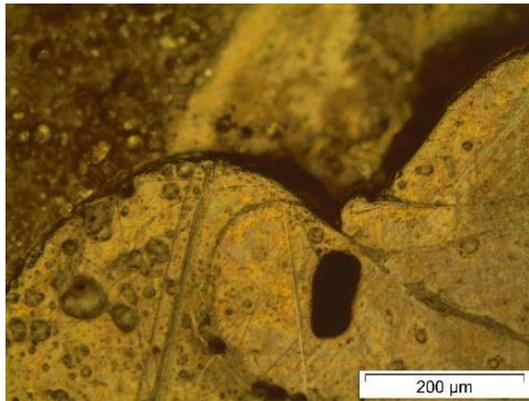
Verma *et al.* (2017) estudaram a soldagem de ligas dissimilares AZ31B e AA6061 e obtiveram resultados semelhantes com o surgimento de intermetálicos, Al_3Mg_2 na ZM e $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ na interface ZM/ AZ31B.

Saldaña-Garcés *et al.* (2020) encontraram pequenos aglomerados de compostos ricos em intermetálicos Al_3Mg_2 próximos à interface entre a liga de Mg e a zona de agitação.

Figura 21: Macro e microestrutura da junta soldada com geometria de pino cilíndrico rosqueado



AZ31B/ZM



ZM



ZM/AA7075-T651



Fonte: Próprio autor

A Tabela 4 mostra a relação de defeitos encontrados na macrografia e micrografia nas amostras das juntas soldadas pelas 4 geometrias de pino.

Tabela 4: Geometria da ferramenta do pino e defeitos detectados na macro e microestrutura

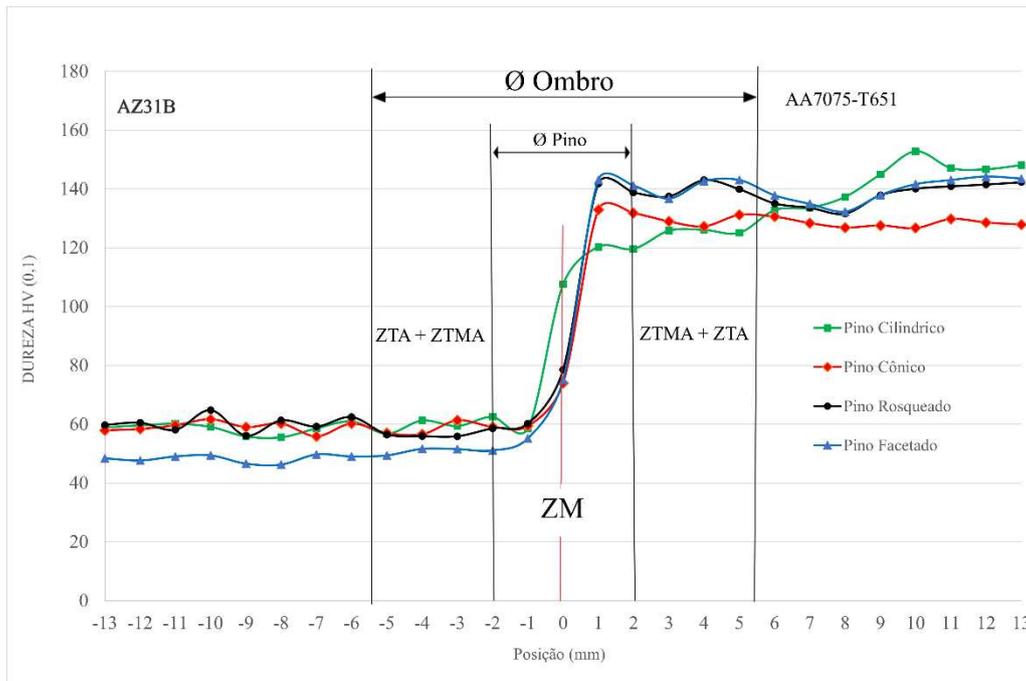
FERRAMENTA	DEFEITO
Cilíndrica lisa	<i>Wormhole</i>
Cônica lisa	Falta de mistura e <i>kissing bond</i>
Cilíndrica rosqueada	Sem defeitos aparentes na macrografia, presença provavelmente de intermetálicos na ZM e na interface AZ31B/ZM
Facetada hexagonal	<i>Wormhole</i>

Fonte: Próprio autor.

4.3 Dureza Vickers

Na Figura 22 é possível observar os perfis de dureza nas 4 juntas soldadas em função da geometria do pino da ferramenta. As maiores médias de durezas observadas na ZM foram obtidas nas juntas soldadas com as ferramentas de geometria de pino cilíndrico rosqueado e cilíndrico liso, enquanto a junta soldada com a ferramenta de geometria de pino facetado hexagonal obteve uma dureza intermediária e a junta soldada com a ferramenta de geometria de pino cônico liso obteve a menor dureza. A dureza obtida na ZM foi intermediária entre os dois metais de base. No centro da solda houve um aumento na dureza em relação ao início da ZM do lado do recuo. A junta soldada com a ferramenta com geometria de pino cilíndrica lisa obteve o maior resultado, aproximando de 110 HV.

Figura 22: Perfil de dureza da junta soldada com ferramenta com os 4 pinos



Fonte: Próprio autor.

A Tabela 5 apresenta os valores médios da dureza para junta soldada com cada geometria de pino e seus respectivos desvios padrão. Deve-se ressaltar que os valores elevados de desvio padrão na ZM são em virtude da variação do valor da dureza dos 2 metais de base.

Tabela 5: Dureza média Vickers

GEOMETRIA DO PINO	ZTA+ZTMA RECUO (HV)	DESVIO-PADRÃO (σ)	ZM (HV)	DESVIO-PADRÃO (σ)	ZTMA + ZTA-AVANÇO (HV)	DESVIO-PADRÃO (σ)
PINO ROSQUEADO	56,74	1,27	95,60	41,57	139,80	2,35
PINO CÔNICO	58,49	2,18	91,50	37,84	129,80	2,07
PINO CILINDRICO	60,03	2,50	93,74	30,70	124,15	3,06
PINO FACETADO	50,89	1,03	93,10	45,64	140,85	2,89

Fonte: Próprio autor.

Sousa (2023) em seu experimento, com a liga AZ31B, obteve resultados semelhantes aos obtidos na região da ZTMA e ZTA no recuo, com valores entre 55,1 e 63,5 HV, já na ZM os valores ficaram entre 56,8 e 73,3 HV, bem abaixo dos valores encontrados, quase 20 HV menor, o que pode ser justificado pela inclusão da liga AA7075-T651 na ZM.

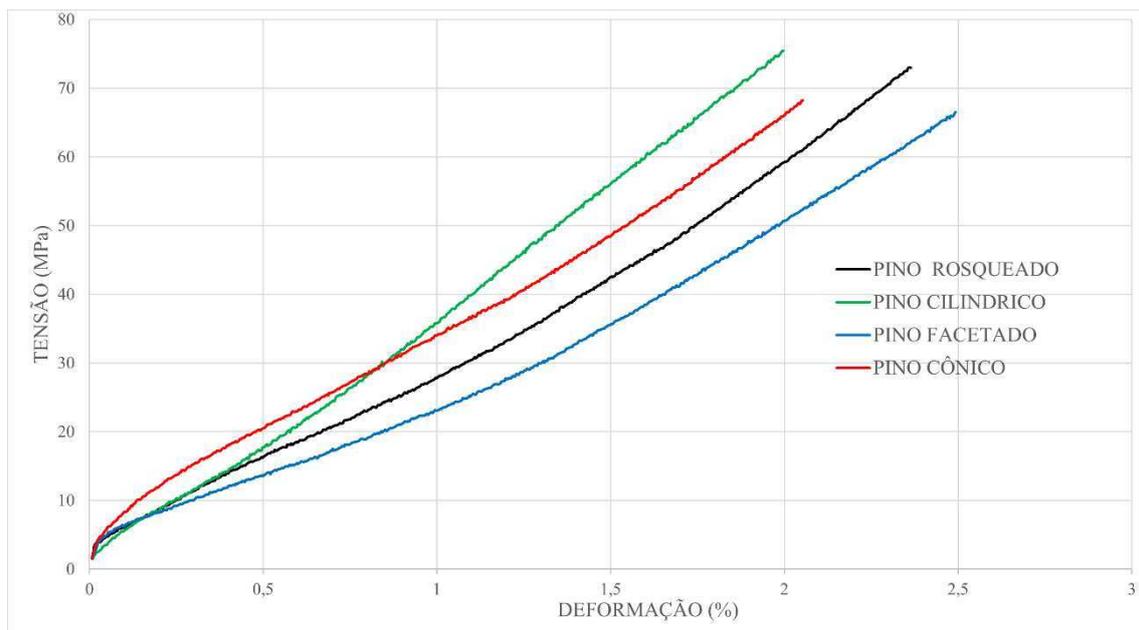
Para Mishra *et al.* (2019) na soldagem de ligas à base de alumínio e magnésio geralmente ocorre uma mudança sistemática na resistência ou dureza quando é observado no processamento dos parâmetros, como taxa de rotação da ferramenta e velocidades de deslocamento da ferramenta são modificados.

Para Lima (2020) o aquecimento e a severidade do trabalho mecânico que o ombro da ferramenta exerce sobre o material soldado nas regiões adjacentes, ZTMA e ZTA, provavelmente provoca variações na dureza em relação à ZM e ao MB.

4.4 Ensaio Mecânico de Tração Uniaxial

Na Figura 23 é possível observar a curva tensão versus deformação das 4 juntas soldadas, confeccionadas com diferentes geometrias de pinos. De maneira geral as juntas romperam na região elástica, bem abaixo do limite de escoamento da liga AZ31B, que é de aproximadamente 180 MPa. Além disso todas as juntas possuem resistência mecânica semelhantes.

Figura 23: Ensaio de tração das juntas soldadas com as diferentes geometrias



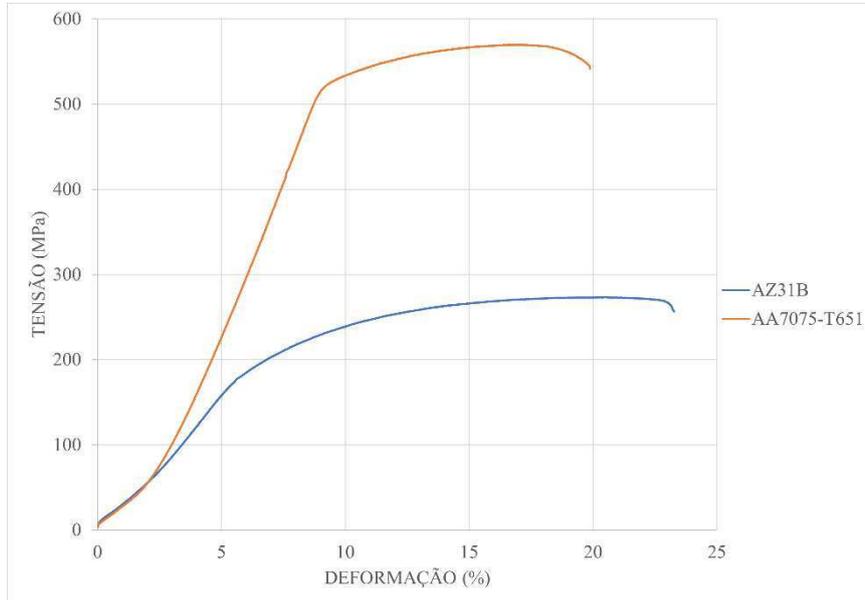
Fonte: próprio autor.

Defeitos como *kissing bond* e *wormhole* foram detectados na macro e micrografia das juntas soldadas com as ferramentas de geometrias de pinos cilíndrico liso, cônico liso e facetado hexagonal, os quais comprometem a resistência à tração. A junta soldada com

a ferramenta de geometria de pino cilíndrico rosqueado, em sua macrografia, não apresentou defeitos como *kissing bond* e *wormhole*, no entanto pode haver a presença de intermetálicos, conforme visualizado em sua micrografia.

A Figura 24 mostra os limites de resistência à tração dos metais de base.

Figura 24: Resistência à tração do metal de base



Fonte: Próprio autor.

A Tabela 6 mostra a eficiência das juntas referente ao limite de resistência à tração (LRT) em relação ao metal de base AZ31B.

Tabela 6: Eficiência das juntas em relação ao MB AZ31B

GEOMETRIA DO PINO	LRT DA JUNTA (MPa)	DESVIO-PADRÃO (σ)	LRT AZ31B (MPa)	EFICIÊNCIA DA JUNTA (%)
CILINDRICAROSQUEADA	73	3,13	270	27,03
CILINDRICA LISA	75	3,46	270	27,78
CÔNICA LISA	68	7,17	270	25,18
FACETADA HEXAGOAL	66	3,61	270	24,44

Fonte: próprio autor.

Sousa (2023) soldando similares AZ31B, obteve resultados de LRT variando entre 155 e 197 MPa e a eficiência das juntas entre 57 e 73%, o que mostra que a eficiência das juntas com as 4 geometrias de ferramentas ficou bem abaixo.

Santos (2023) soldando AA7075-T651, em seus resultados de LRT encontrou valores de 176,2 a 353,6 Mpa. Com referência a eficiência da junta os resultados foram entre 29,5 e 60%. O menor resultado de eficiência foi maior que os obtidos para as 4 juntas examinadas.

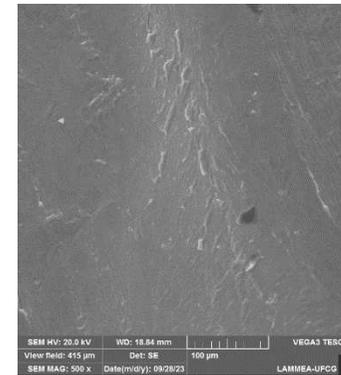
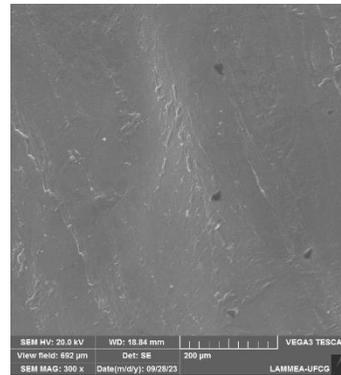
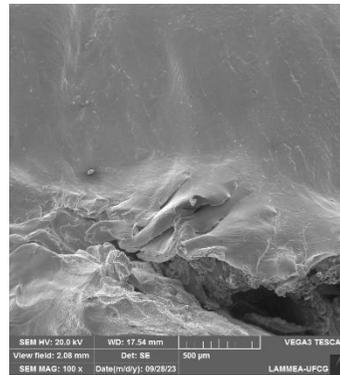
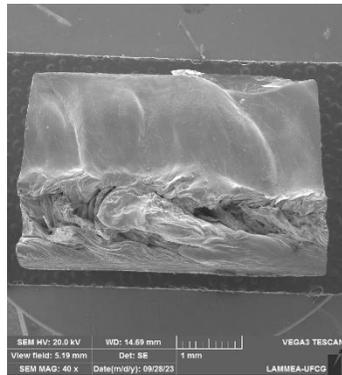
4.5 Superfície de Fratura e Análise Morfológica

As Figura 25, Figura 26, Figura 27 e Figura 28, mostram a superfície de fratura das juntas soldadas utilizando as ferramentas de soldagem com as geometrias de pino em estudo, dispostas por ampliação e pela amostra em estudo. As amostras do lado do avanço (liga AA7075-T651) e do lado do recuo (liga AZ31B). São apresentadas as imagens obtidas no MEV e em seguida são expostos os gráficos do EDS.

As fraturas das superfícies apresentaram o aspecto frágil, seguido de falha catastrófica, para as juntas soldadas com geometrias de pino facetado hexagonal, cônico liso e cilíndrico liso. A superfície da junta soldada utilizando a ferramenta com geometria de pino cilíndrico rosqueado, aparenta não ter tido adesão, e em aumentos maiores se apresentou na forma plana, o que leva a supor que também se trata de fratura frágil.

Figura 25: Fractografia da junta soldada com pino facetado hexagonal

AA7075-T651



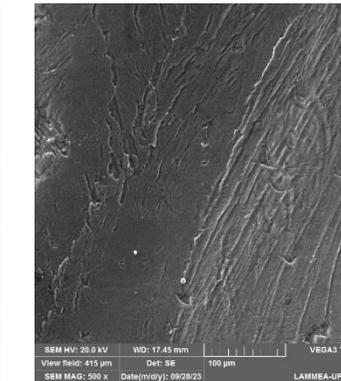
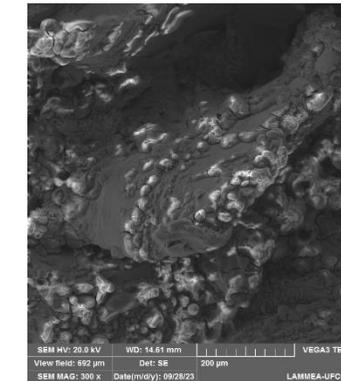
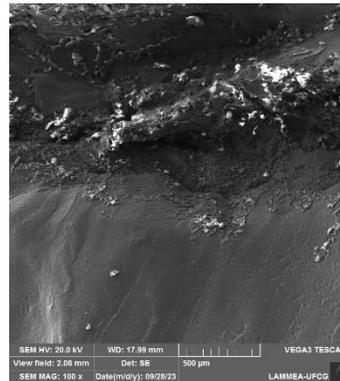
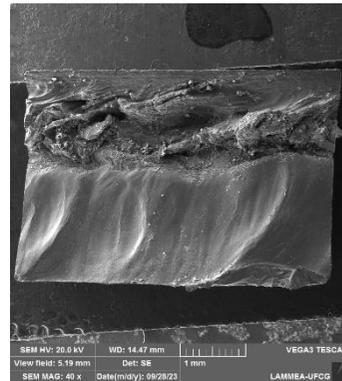
40x

100x

300x

500x

AZ31B

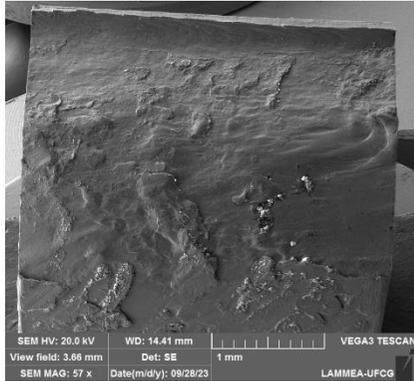


Fonte: Próprio autor

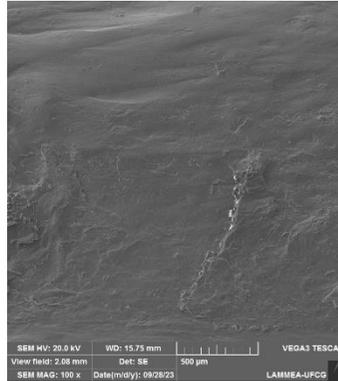
Figura 26: Fractografia da junta soldada com pino cônico liso

AA7075-T651

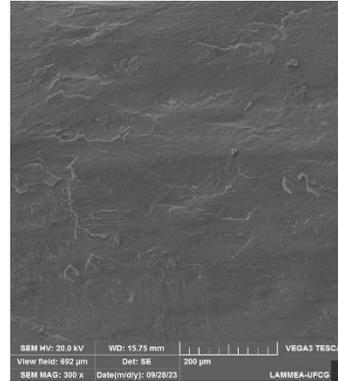
57x



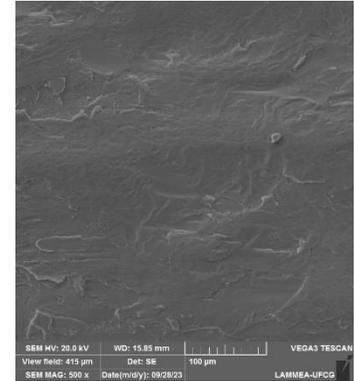
100x



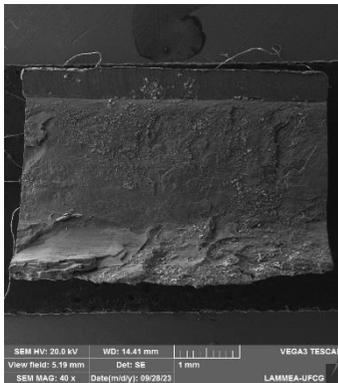
300x



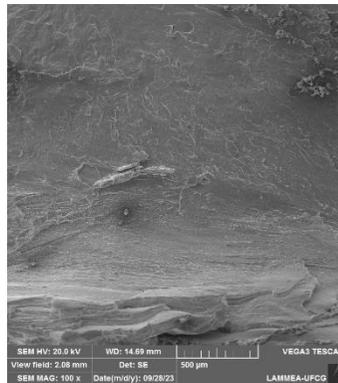
500x



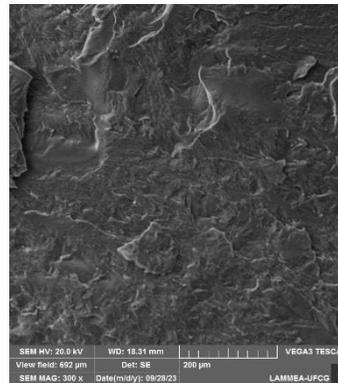
40x



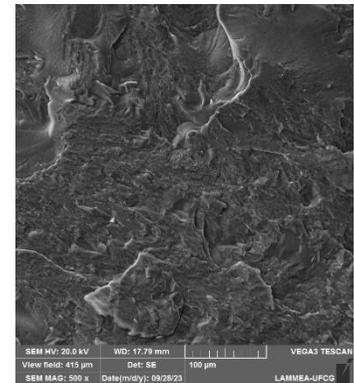
100x



300x



500x



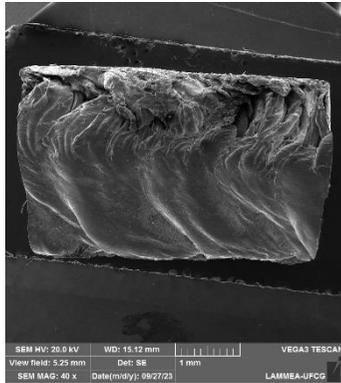
AZ31B

Fonte: Próprio autor

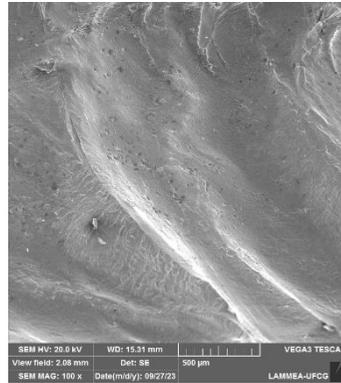
Figura 27: Fractografia da junta soldada com pino cilíndrico liso

AA7075-T651

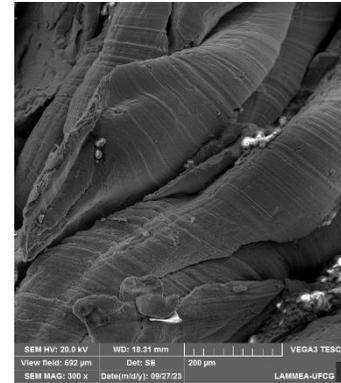
40x



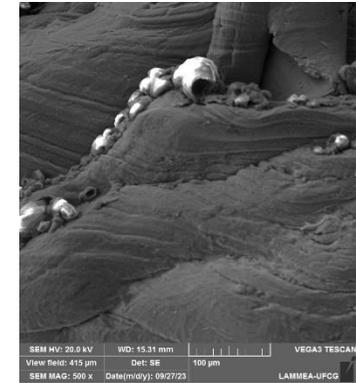
100x



300x

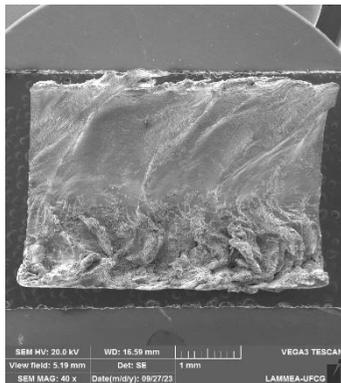


500x

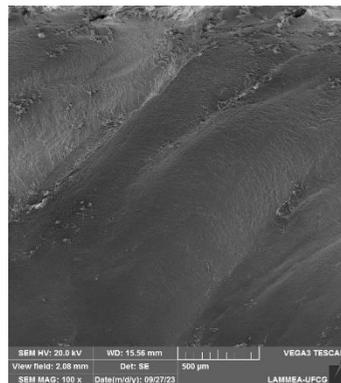


AZ31B

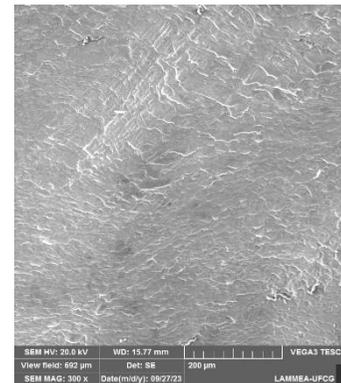
40x



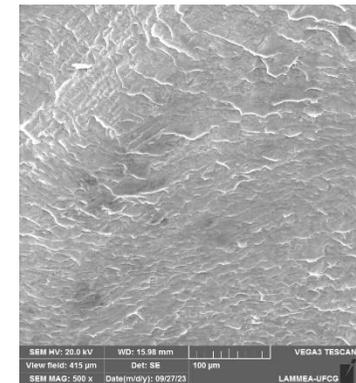
100x



300x



500x

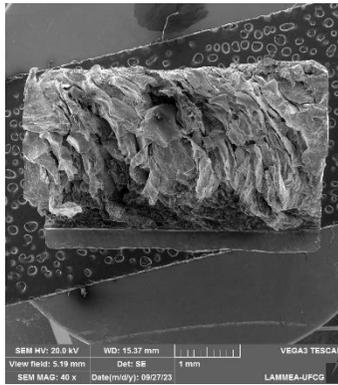


Fonte: Próprio autor

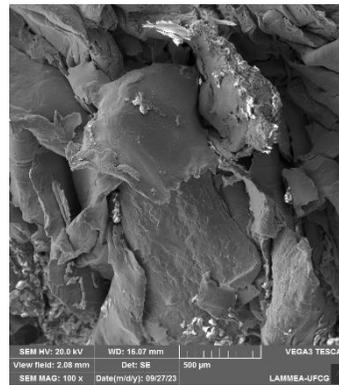
Figura 28: Fractografia da junta soldada com pino cilíndrico rosqueado

AA7075-T651

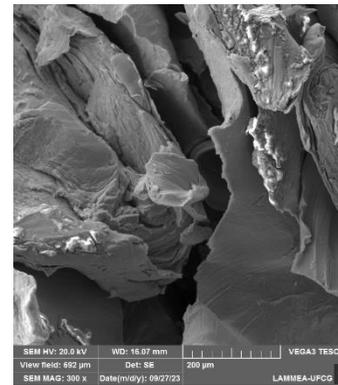
40x



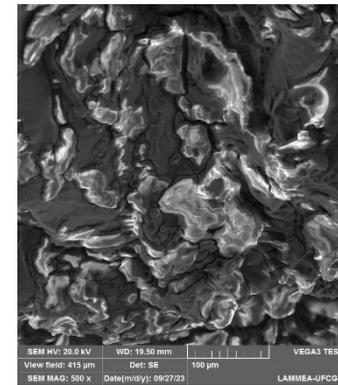
100x



300x

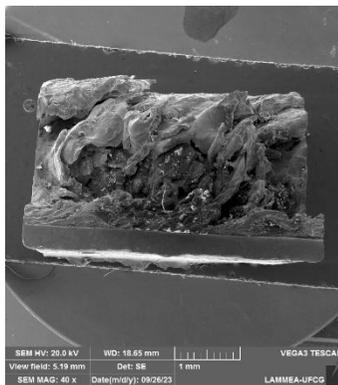


500x

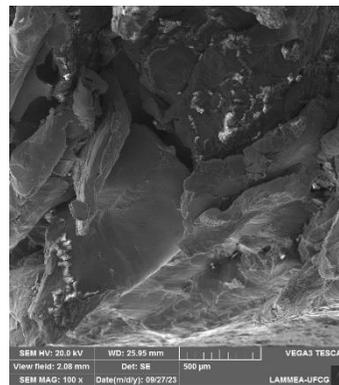


AZ31B

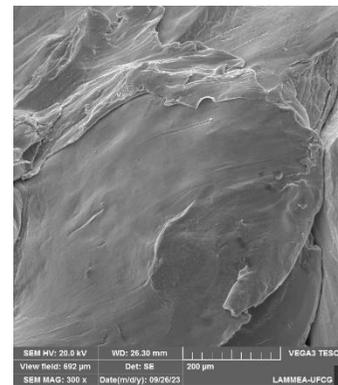
40x



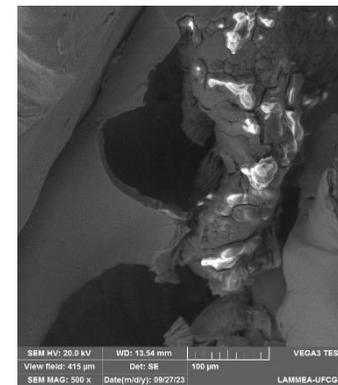
100x



300x



500x



Fonte: Próprio autor

A Tabela 7 mostra que houve uma mistura considerável dos 2 metais de base, deve-se ressaltar que a junta soldada com a ferramenta de geometria cilíndrica rosqueada houve predominância de magnésio, no avanço (Al), o que se pode supor que o rompimento ocorreu totalmente sobre magnésio.

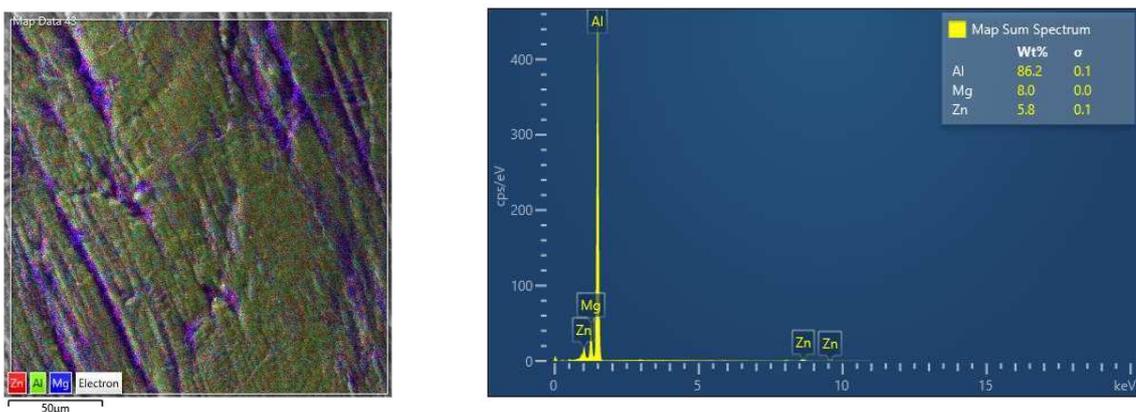
Tabela 7: Composição Química da Superfície de Fratura e do MB

Geometria da Ferramenta		Al (%)	Mg (%)	Zn (%)
Facetada Hexagonal	Avanço	86,2	8,0	5,8
	Recuo	10,7	83,3	6,0
Cônica Lisa	Avanço	63,9	27,0	9,1
	Recuo	15,5	80,0	4,5
Cilíndrica Lisa	Avanço	79,9	15,0	5,1
	Recuo	9,8	86,5	3,8
Cilíndrica Rosqueada	Avanço	14,2	83,8	2,0
	Recuo	3,0	95,8	1,2
Composição Química do Metal de Base				
Metal de Base		Al (%)	Mg (%)	Zn (%)
AA7075-T651		90,6	2,7	6,0
AZ31B		1,8	95,7	1,8

Fonte: Próprio autor

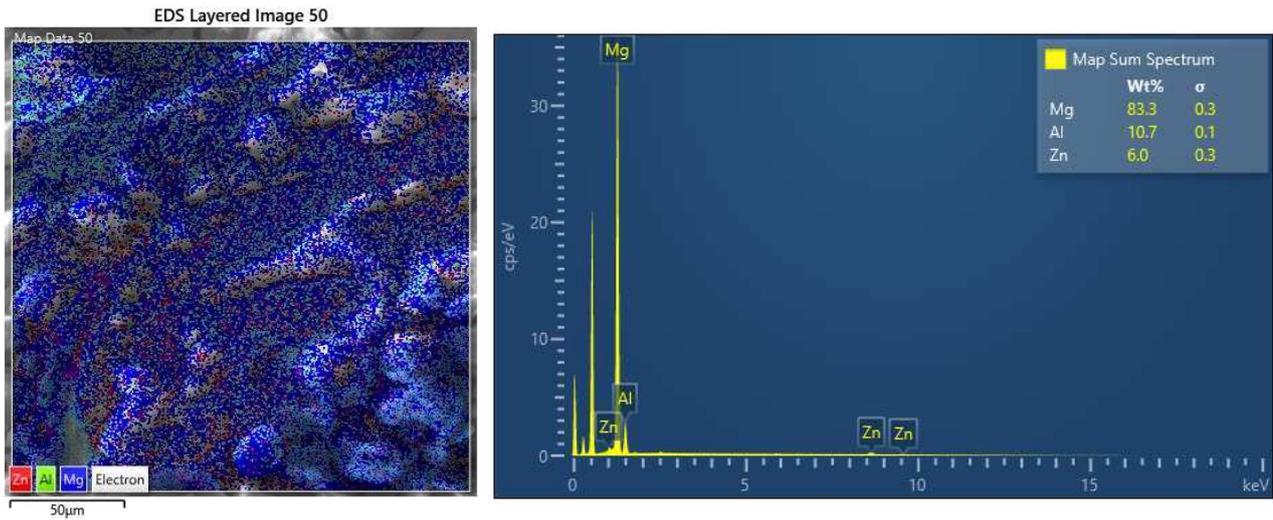
As Figura 29 e Figura 30, mostram a análise da composição química feita no EDS da superfície de fratura da junta soldada com pino de geometria facetado hexagonal, onde nota-se para as 2 amostras, avanço e recuo, houve mistura de material com predominância do metal de base no lado da amostra e aparentemente sem presença de intermetálicos.

Figura 29: EDS da superfície de fratura da junta soldada com pino facetado (avanço)



Fonte: Próprio autor

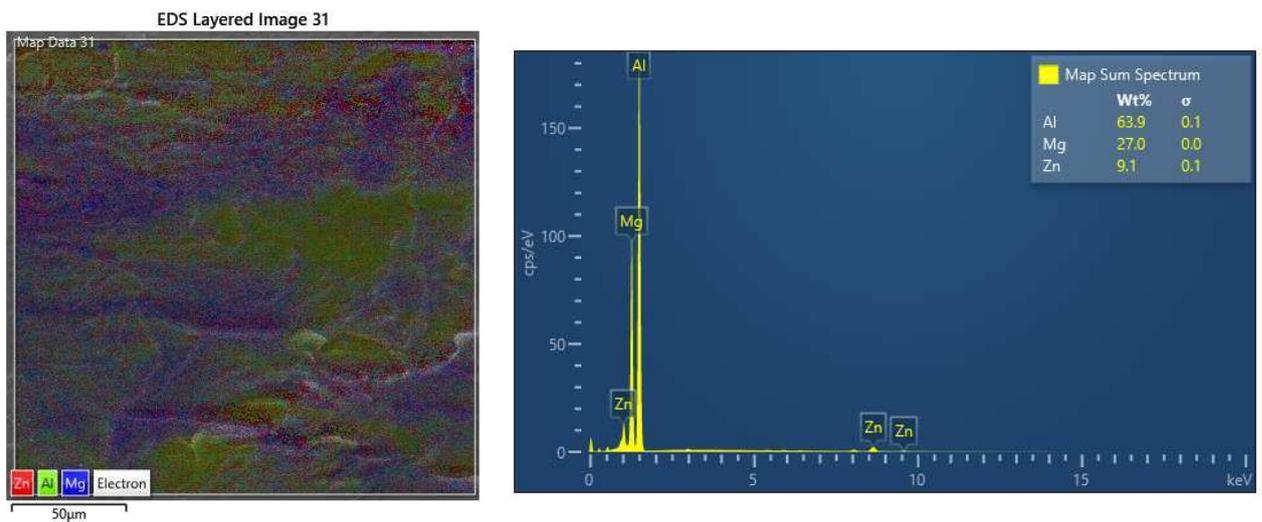
Figura 30: EDS da superfície de fratura da junta soldada com pino facetado (recuo)



Fonte: Próprio autor

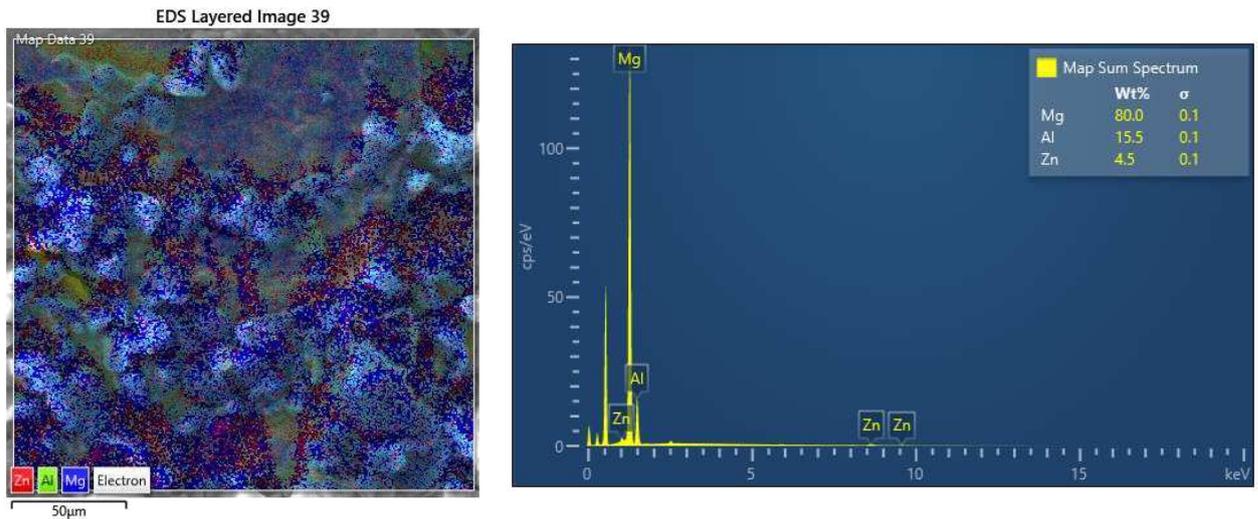
As Figura 31 e Figura 32, mostram a análise da composição química feita no EDS da superfície de fratura da junta soldada com pino de geometria cônico liso, onde nota-se para as 2 amostras, avanço e recuo, houve mistura de material com predominância do metal de base no lado da amostra e aparentemente sem presença de intermetálicos.

Figura 31: EDS da superfície de fratura da junta soldada com pino cônico (avanço)



Fonte: Próprio autor

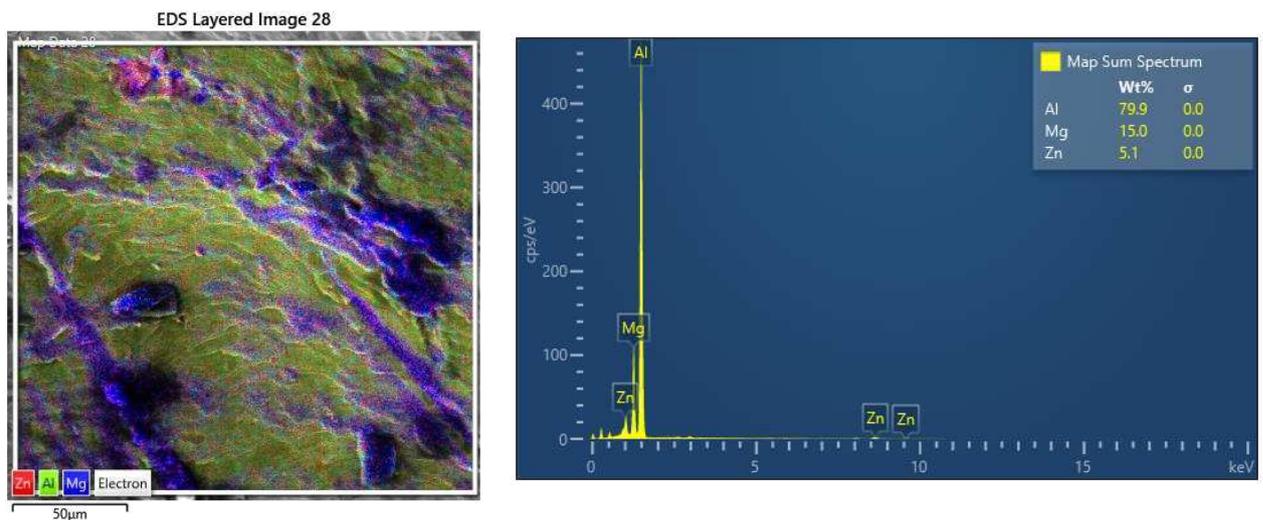
Figura 32: EDS da superfície de fratura da junta soldada com pino cônico (reco))



Fonte: Próprio autor

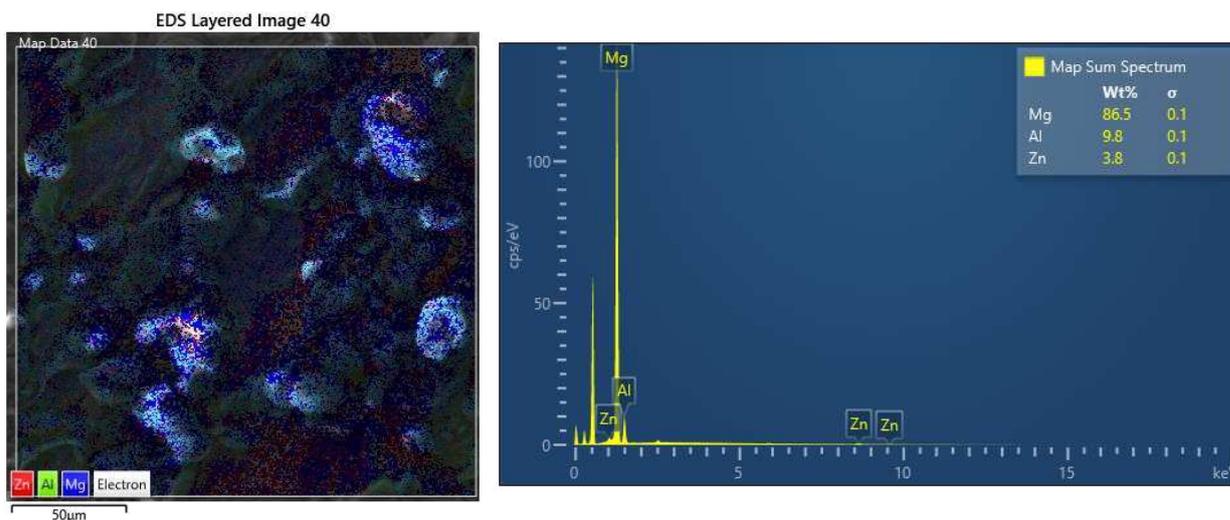
As Figura 33 e Figura 34, mostram a análise da composição química feita no EDS da superfície de fratura da junta soldada com pino de geometria cilíndrico liso, onde nota-se para as 2 amostras, avanço e reco, houve mistura de material com predominância do metal de base no lado da amostra e aparentemente sem presença de intermetálicos.

Figura 33: EDS da superfície de fratura da junta soldada com pino cilíndrico liso (avanço)



Fonte: Próprio autor

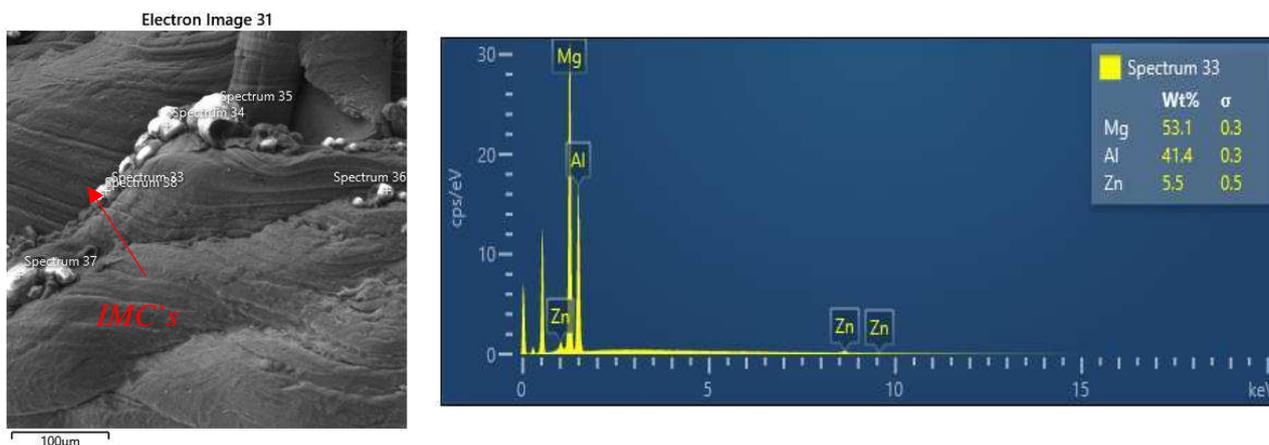
Figura 34: EDS da superfície de fratura da junta soldada com pino cilíndrico liso (recuo)



Fonte: Próprio autor

A Figura 35, mostra a presença de intermetálicos na superfície de fratura da junta soldada com pino de geometria cilíndrico liso na amostra do lado do avanço e a sua composição química. Durante o processo de soldagem, o principal desafio é reduzir a formação de componentes intermetálicos duros e quebradiços na zona de agitação. O desenvolvimento dos IMC's começa como resultado da entrada de calor durante a soldagem, o que também reduz a resistência da junta. A mistura incompleta de materiais ocorre devido à entrada inadequada de calor, levando à formação de IMC's. O design da ferramenta desempenha um papel significativo na distribuição uniforme de temperatura, fluxo de material e qualidade da camada IMCs (SEN e PURI, 2022).

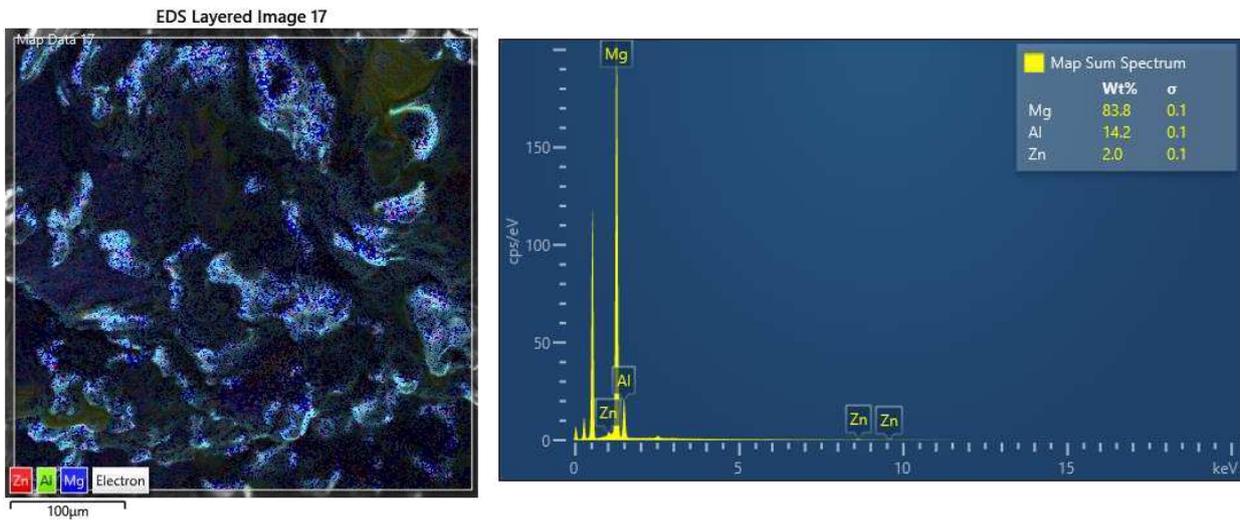
Figura 35: EDS intermetálicos da junta soldada com pino cilíndrico (avanço)



Fonte: Próprio autor

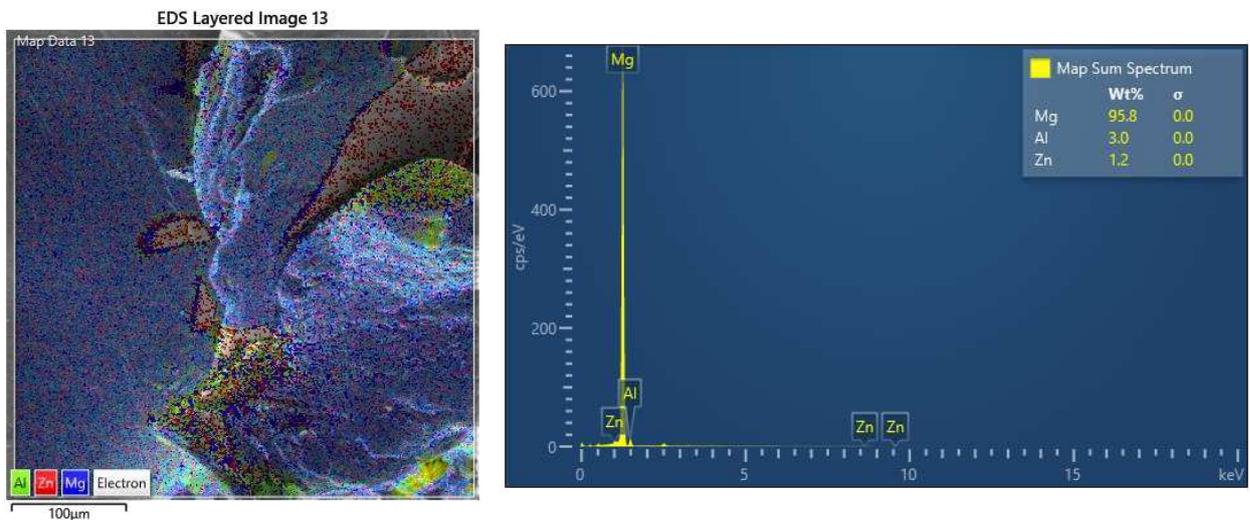
As Figura 36 e Figura 37, mostram a análise da composição química feita no EDS da superfície de fratura da junta soldada com pino de geometria cilíndrico rosqueado, onde nota-se para as 2 amostras, avanço e recuo, predominância de magnésio, o que pode-se supor que o rompimento ocorreu totalmente no lado do magnésio, pois mesmo numa análise pontual, em um provável intermetálico, a presença de magnésio foi predominante, o que pode ser notado na Figura 38

Figura 36: EDS da superfície de fratura da junta soldada com pino cilíndrico rosqueado (avanço)



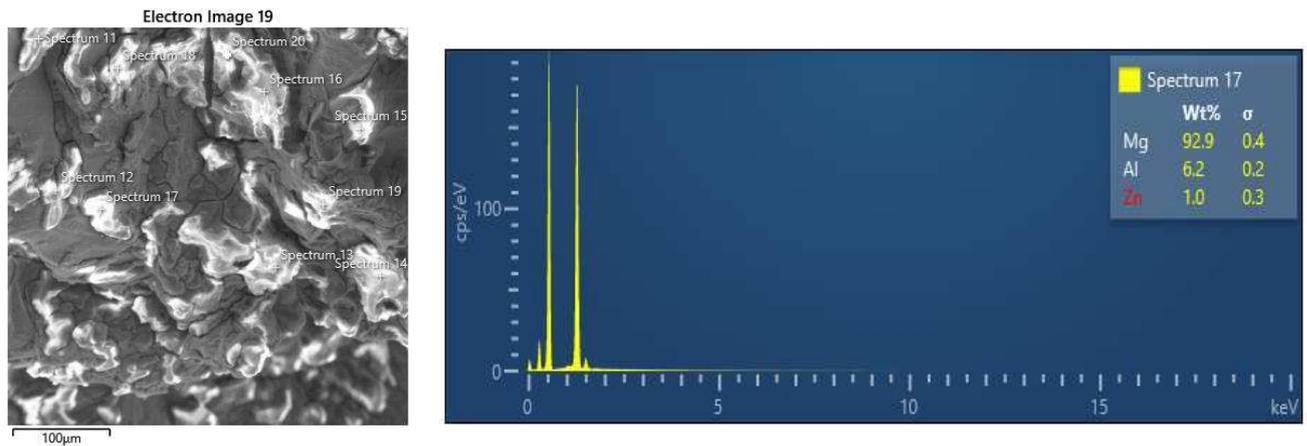
Fonte: Próprio autor

Figura 37: EDS da superfície de fratura da junta soldada com pino cilíndrico rosqueado (recuo)



Fonte: Próprio autor

Figura 38: EDS da superfície de fratura da junta soldada com pino cilíndrico rosqueado (avanço)



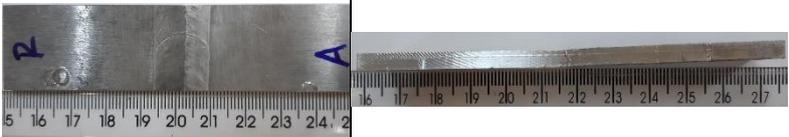
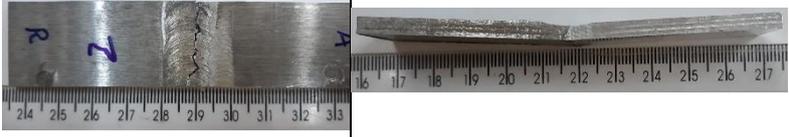
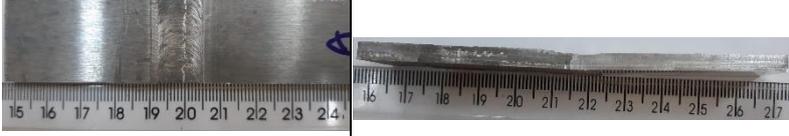
Fonte: Próprio autor

4.6 Ensaio de Dobramento

Foram realizados ensaio de dobramento de raiz, o qual foi verificado a carga máxima suportada e extensão dos corpos de prova. Constatou-se que todas as juntas romperam na raiz, não suportaram cargas elevada, todos os corpos de prova obtiveram uma extensão menor que 2 mm e o rompimento foi sem que houvesse um ângulo significativo de dobragem. A junta que obteve resultado mais satisfatório foi a soldada com pino cilíndrico liso e a junta com pior resultado foi a junta soldada com o pino cônico liso, resultados semelhantes também foram evidenciados no ensaio de tração, Figura 23, e ensaio de dureza, Figura 22.

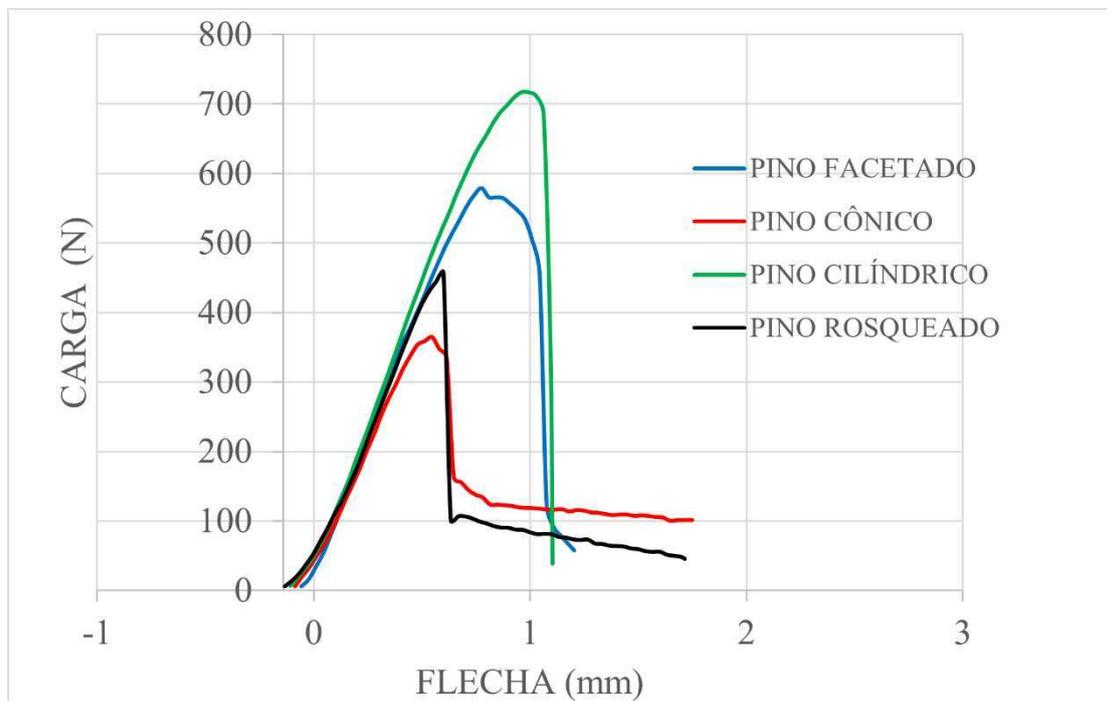
No Quadro 3 e na Figura 39 é possível observar a carga máxima suportada por todas as juntas soldadas e o rompimento catastrófico destas no centro da solda. A falha catastrófica fica evidente na pequena flecha suportada pelas juntas soldadas de pino cilíndrico rosqueado e cônico, da ordem de 0,5 mm e da ordem de 1 mm para a ferramenta cilíndrica lisa. A ferramenta facetada hexagonal teve desempenho intermediário entre os dois grupos. Observou-se também que o rompimento ocorreu mais para o lado avanço (Al), exceto a junta soldada com o pino de geometria cilíndrica rosqueada, onde o rompimento aconteceu aproximadamente no centro da solda, que se pode supor ocorrer pelo alumínio está no lado do avanço e sofrer um maior trabalho mecânico.

Quadro 3: Carga máxima suportada no ensaio de dobramento para as juntas soldadas

GEOMETRIA DO PINO DA FERRAMENTA	CP APÓS ENSAIO	CARGA MÁXIMA SUPOTADA (N)
Facetada hexagonal		579
Cônica lisa		365
Cilíndrica lisa		717
Cilíndrica Rosqueada		457

Fonte: Próprio autor.

Figura 39: Ensaio de dobramento



Fonte: Próprio autor.

5 CONCLUSÕES

As juntas soldadas apresentaram bom aspecto superficial, visto que, com exceção da junta soldada com o pino cilíndrico rosqueado (que apresentou um defeito de trinca por falta de mistura), todas as juntas apresentaram apenas defeitos de rebarba;

A macro e microestrutura revelaram que as que as juntas soldadas com: a ferramenta de geometria de pino cônico liso apresentou defeitos do tipo *kissing bond* e falta de mistura; a ferramenta de geometria de pino cilíndrico liso apresentou defeito do tipo *worm hole*, a ferramenta facetada hexagonal apresentou defeito do tipo *worm hole*, a junta soldada com a ferramenta cilíndrica rosqueada não apresentou defeitos na macrografia, porém apresentou intermetálicos na ZM e na interface com o magnésio, o que provavelmente propiciou um valor de limite de resistência à tração similar ao das outras juntas.

O ensaio de dureza mostrou para as 4 juntas uma dureza intermediária entre os 2 metais de base na ZM.

O ensaio de tração mostrou limite resistência à tração semelhante para as 4 juntas soldadas com os diferentes tipos de geometrias de pinos de ferramentas.

A fractografia mostrou uma fratura de natureza frágil para as juntas, na análise de composição química por EDS foi constatado a presença de intermetálicos comprometendo a qualidade da junta.

Após análise de todos os ensaios ficou evidenciado que as juntas tiveram desempenho similar e abaixo do esperado para uma soldagem de alta qualidade. As juntas soldadas com os pinos cilíndrico liso e cilíndrico rosqueado foram as que apresentaram resultado mais satisfatório. E seguindo a literatura, sugere-se que a geometria de pino cilíndrica rosqueada deve ser considerada como a ferramenta que obteve melhor desempenho.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Para a ferramenta com geometria de pino cilíndrica rosqueada na soldagem dissimilar das ligas AA7075-T651 e AZ31B, sugere-se:

- a. variar parâmetros como velocidade de rotação, velocidade de avanço, mudar o lado de avanço para o lado do magnésio;
- b. estudar o ciclo térmico e avaliar e avaliar as tensões residuais das juntas;

6 REFERÊNCIAS

AMBRÓSIO, D. et al. Fluxo de material na soldagem por fricção: uma revisão. **Jornal de Tecnologia de Processamento de Materiais**, p. 118116, 2023.

ASADI, Parviz; MIRZAEI, MohammadHosein; AKBARI, Mostafa. Modeling of pin shape effects in bobbin tool FSW. **International Journal of Lightweight Materials and Manufacture**, v. 5, n. 2, p. 162-177, 2022.

ASGARI, A.; DELAVAR, H.; SEDIGHI, M. Microstructure and surface integrity of machined AZ91 magnesium alloy. **Journal Of Materials Research And Technology**, [S.L.], v. 22, p. 735-746, jan. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.164>.

AVAL, Hamed Jamshidi. Microstructure and residual stress distributions in friction stir welding of dissimilar aluminium alloys. **Materials & Design**, [S.L.], v. 87, p. 405-413, dez. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.050>.

BAG, S.; YADUWANSHI, D.; PAL, S. Heat transfer and material flow in friction stir welding. **Advances In Friction-Stir Welding And Processing**, [S.L.], p. 21-63, 2014. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1533/9780857094551.21>.

BAI, Shengwen; FANG, Gang; JIANG, Bin. An extrusion-welding criterion of magnesium alloy considering interfacial void shrinkage driven by plastic deformation and atomic diffusion. **Materials & Design**, [S.L.], v. 222, p. 111107, out. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111107>.

BIAN, Mingzhe; HUANG, Xinsheng; CHINO, Yasumasa. Microstructures and Mechanical Properties of Precipitation-Hardenable Magnesium–Silver–Calcium Alloy Sheets. **Metals**, [S.L.], v. 10, n. 12, p. 1632, 4 dez. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/met10121632>.

BILGIN, Musa; KARABULUT, Şener; ÖZDEMİR, Ahmet. Study on the mechanical properties of dissimilar friction stir welding of AA 7075 T6 and AZ31B Alloys. In: **2018 9th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE)**. IEEE, 2018. p. 467-471.

CAI, Xiaoyu *et al.* Microstructure and mechanical properties of GTA-based wire arc additive manufactured AZ91D magnesium alloy. **Journal Of Magnesium And Alloys**, [S.L.], p. 1, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jma.2022.11.018>.

CAPELARI, Tiago Valdameri; MAZZAFERRO, José Antônio Esmerio. Avaliação da geometria de ferramenta e parâmetros do processo FSW na soldagem da liga de alumínio AA 5052. **Soldagem & Inspeção**, [S.L.], v. 14, n. 3, p. 215-227, set. 2009. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-92242009000300005>.

CELOTTO, S. Study of precipitation in aged binary Mg–Al and ternary Mg–Al–Zn alloys using ²⁷Al NMR spectroscopy. **Acta Materialia**, [S.L.], v. 49, n. 1, p. 41-51, jan. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1359-6454\(00\)00305-0](http://dx.doi.org/10.1016/s1359-6454(00)00305-0).

COLAÇO, Déborah Brito. Caracterização e avaliação das tensões residuais em juntas da liga de alumínio AA 5083-0 soldadas pelo processo FSW. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – **Universidade Federal de Campina Grande**, Centro de Ciências e Tecnologia – Campina Grande, 2019.

CUNHA, Pedro Henrique Costa Pereira da *et al.* Effect of welding speed on friction stir welds of GL E36 shipbuilding steel. **Journal Of Materials Research And Technology**, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 1041-1051, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.07.014>.

DAVIS, J.R. **Alloying: understanding the basics**. Novelty: Asm International, 2001.

DE ALMEIDA CUNHA, André Eduardo. **Estudo do tratamento térmico de um aço ferramenta obtido por fundição**. 2012.

DENG, Lingyan; JOHNSON, Sydney; GENCER, Emre. Environmental-Techno-Economic analysis of decarbonization strategies for the Indian aluminum industry. **Energy Conversion And Management**, [S.L.], v. 274, p. 116455, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116455>.

DONG, Hanshan. **Surface engineering of light alloys: aluminium, magnesium and titanium alloys**. Boca Raton: Crc Press, 2010.

DU, Hanheng *et al.* Generating micro/nanostructures on magnesium alloy surface using ultraprecision diamond surface texturing process. **Journal Of Magnesium And Alloys**, [S.L.], p. 1, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jma.2022.07.018>.

GAO, Yongkang *et al.* Microstructure homogeneity and mechanical properties of laser-arc hybrid welded AZ31B magnesium alloy. **Journal Of Magnesium And Alloys**, [S.L.], p. 1, out. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jma.2022.09.034>.

GIPIELA, Manolo Lutero; MARTINS, Fábio. Influência dos parâmetros de processo na soldagem da liga de alumínio 5052 pelo processo FSW. In: **8º Congresso Brasileiro de Engenharia De Fabricação, Salvador-BA ABCM**, 2015. p. 18-22.

GIVI, M.K. Besharati; ASADI, P. General introduction. **Advances In Friction-Stir Welding And Processing**, [S.L.], p. 1-19, 2014. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1533/9780857094551.1>.

GUPTA, Manoj; SHARON, Nai Mui Ling. **Magnesium, magnesium alloys, and magnesium composites**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.

HARPER, Charles A. **Handbook of materials and product design**. New York: McGraw-Hill, 2001.

ILANGOVAN, M.; BOOPATHY, S. Rajendra; BALASUBRAMANIAN, V. Effect of tool pin profile on microstructure and tensile properties of friction stir welded dissimilar AA 6061–AA 5086 aluminium alloy joints. **Defence Technology**, v. 11, n. 2, p. 174-184, 2015.

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

JOUN, M.s. *et al.* Characterization of AZ31B, AZ61A and AZ80A magnesium alloys with an emphasis on temperature compensation for their application to a hot forging. **Journal Of Manufacturing Processes**, [S.L.], v. 84, p. 764-785, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.10.054>.

KAUFMAN, J. Gilbert; ROOY, Elwin L. **Aluminum Alloy Castings: properties, processes, and applications**. Novelty: Asm International, 2004.

KISSELL, J. Randolph; FERRY, Robert L. **Aluminum structures: a guide to their specifications and design**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2002.

KUMAR, Anil; KUMAR, Santosh; MUKHOPADHYAY, N.K. Introduction to magnesium alloy processing technology and development of low-cost stir casting process for magnesium alloy and its composites. **Journal Of Magnesium And Alloys**, [S.L.], v. 6, n. 3, p. 245-254, set. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jma.2018.05.006>.

KUMAR, L. Govind Sanjeev *et al.* An overview of recent trends and challenges of post treatments on magnesium alloys. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], n. 1, p. 1, jan. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.071>.

LI, Mingfeng *et al.* Joining aluminum to steel dissimilar metals using novel resistance spot welding process. **Materials Letters**, [S.L.], v. 318, p. 132215, jul. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132215>.

LIMA, J. S. Caracterização microestrutural e avaliação das propriedades mecânicas em juntas soldadas de alumínio 7075-T651 utilizando o processo FSW - **Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciência e Tecnologia** - 95 f. Campina Grande, 2020.

LIU, Liming; REN, Daxin; LIU, Fei. A Review of Dissimilar Welding Techniques for Magnesium Alloys to Aluminum Alloys. **Materials**, [S.L.], v. 7, n. 5, p. 3735-3757, 8 maio 2014. MDPI AG.

LIU, Xu *et al.* Influence of the second phase on relative fracture behavior of friction stir welded 7A52 aluminum alloy. **Materials Today Communications**, [S.L.], v. 33, p. 104215, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104215>.

MANDAL, Nisith R. **Ship Construction and Welding**. Singapore: Springer, 2017.

MAROOFI, A.; SAFA, N. Navab; GHOMI, H. Atmospheric air plasma jet for improvement of paint adhesion to aluminium surface in industrial applications. **International Journal Of Adhesion And Adhesives**, [S.L.], v. 98, p. 102554, abr. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2020.102554>.

MENG, Xiangchen *et al.* Recent progress on control strategies for inherent issues in friction stir welding. **Progress In Materials Science**, [S.L.], v. 115, p. 100706, jan. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100706>.

MISHRA, Debashis; NANDA, Alok Kumar. Experimental investigation on mechanical properties of stir casted aluminum SiC metal matrix composites. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], p. 1, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.412>.

MISHRA, Rajiv Sharan; KUMAR, Partha Sarathi de Nilesh; KUMAR, Nilesh. **Friction Stir Welding and Processing**. Cham: Springer, 2014.

MORDIKE, B. L.; LUKÁČ, P. Physical Metallurgy. In: **Magnesium Technology: Metallurgy, Design Data, Applications**. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. p. 63–107.

OLIVEIRA, E. B. S.; LIMA, J. S.; COLAÇO, D. B.; RIBEIRO, M. A.; MACIEL, T. M.; MELO, R. H. F. Influência da geometria do pino da ferramenta de soldagem nas propriedades mecânicas e tensões residuais de juntas soldadas de ligas de alumínio 5052-O pelo processo FSW. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, [S.L.], v. 37, n. 2, p. 69, 21 jul. 2018. SBV Sociedade Brasileira de Vácuo.

PATIL, Sachinkumar; NAGAMADHU, M.; MALYADRI, T. A critical review on microstructure and hardness of aluminum alloy 6061 joints obtained by friction stir welding-past, present, and its prospects. **Materials Today: Proceedings**, 2022.

PONNUSAMY, Panneer *et al.* Mechanical Properties of SLM-Printed Aluminium Alloys: a review. **Materials**, [S.L.], v. 13, n. 19, p. 4301, 26 set. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma13194301>.

RIBEIRO, Matheus Apolinário. Avaliação de Tensões Residuais e das Propriedades Mecânicas em Juntas Soldadas de Ligas de Alumínio Dissimilares Utilizando o Processo FSW. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – **Universidade Federal de Campina Grande**, Centro de Ciências e Tecnologia – Campina Grande, 2019.

RIEDEL, E. *et al.* Industrial suitable and digitally recordable application of ultrasound for the environmentally friendly degassing of aluminium melts before tilt casting. **Procedia Cirp**, [S.L.], v. 98, p. 589-594, 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.159>.

SATHISH, S. *et al.* Strain hardening behaviour of friction stir welded magnesium alloy. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 74, p. 34-39, 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.217>.

SEN, Meghnath; PURI, Asit Baran. Formation of intermetallic compounds (IMCs) in FSW of aluminum and magnesium alloys (Al/Mg alloys) – A review. **Materials Today Communications**, v. 33, p. 105017, 2022.

SALDAÑA-GARCÉS, Rocio *et al.* Friction stir welding of dissimilar AA6061-T6 to AZ31B-H24 alloys. **Soldagem & Inspeção**, v. 25, 2020.

SANTOS, O.C. **Avaliação dos ciclos térmicos de soldagem e sua influência nos defeitos, microestrutura e propriedades mecânicas de juntas de alumínio AA7075-T651 soldadas pelo processo FSW**. 2023. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2023.

SILVA, P. A. O. **Efeitos dos parâmetros de soldagem por atrito linear (FSW) nas tensões residuais, microdureza e microestrutura em juntas dissimilares de ligas AA2014-T3 e AA7475-T761**. 2016.

SINGH, Umesh Kumar; DUBEY, Avanish Kumar. Study on the weldability and mechanical performance of dissimilar AA7075-AZ31 alloys in friction stir welding. **Materials Today: Proceedings**, 2021.

SINGH, Virendra Pratap; PATEL, Surendra Kumar; RANJAN, Alok; KURIACHEN, Basil. Recent research progress in solid state friction-stir welding of aluminium–magnesium alloys: a critical review. **Journal Of Materials Research and Technology**, [S.L.], v. 9, n. 3, p. 6217-6256, maio 2020. Elsevier BV.

SHAO, Minghao *et al.* Microstructure and corrosion behavior of bobbin tool friction stir welded 2219 aluminum alloy. **Materials Characterization**, [S.L.], v. 192, p. 112178, out. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2022.112178>.

SINGH, Kulwant; SEHGAL, Anuj Kumar. Evaluation of characteristics of friction stir welded Mg-Al-Zn magnesium alloy. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], p. 1, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.251>.

SHARMA, Ashish *et al.* A short review of the effect of plunge depth on friction stir welding of aluminium pipes. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 64, p. 1504-1506, 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.257>.

SHEASBY, P.G.; PINNER, R. **The Surface Treatment and Finishing of Aluminum and Its Alloys**. Novelty: Asm International, 2001.

SINGH, Umesh Kumar; DUBEY, Avanish Kumar. Study on the weldability and mechanical performance of dissimilar AA7075-AZ31 alloys in friction stir welding. **Materials Today: Proceedings**, 2021.

SINGH, Virendra Pratap; PATEL, Surendra Kumar; RANJAN, Alok; KURIACHEN, Basil. Recent research progress in solid state friction-stir welding of aluminium–magnesium alloys: a critical review. **Journal Of Materials Research and Technology**, [S.L.], v. 9, n. 3, p. 6217-6256, maio 2020. Elsevier BV.

SHI, Lei *et al.* Effect of splat cooling on microstructures and mechanical properties of friction stir welded 2195 Al–Li alloy. **Materials Science And Engineering: A**, [S.L.], p. 144169, out. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2022.144169>.

SCHMIDT, Jonas *et al.* Adjustment of the Mechanical Properties of Mg2Nd and Mg2Yb by Optimizing Their Microstructures. **Metals**, [S.L.], v. 11, n. 3, p. 377, 25 fev. 2021.

MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/met11030377>.

SOUSA, J. W. A. **Caracterização, avaliação e otimização das propriedades mecânicas de juntas de liga de magnésio AZ31 soldadas pelo processo FSW**. 2023. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2023.

SRIVASTAVA, Ankur; MESHRAM, Arunabh. On trending technologies of aluminium dross recycling: a review. **Process Safety And Environmental Protection**, [S.L.], v. 171, p. 38-54, mar. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2023.01.010>.

SUTTON, M. A.; REYNOLDS, A. P.; WANG, D.; HUBBARD, C. R. A Study of Residual Stresses and Microstructure in 2024-T3 **Aluminum Friction Stir Butt Welds**., v. 124, n. April, 2002.

TABASI, M.; FARAHANI, M.; GIVI, M. K. Besharati; FARZAMI, M.; MOHARAMI, A. Dissimilar friction stir welding of 7075 aluminum alloy to AZ31 magnesium alloy using SiC nanoparticles. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [S.L.], v. 86, n. 1-4, p. 705-715, 23 dez. 2015. Springer Science and Business Media LLC.

TAN, Jovan; RAMAKRISHNA, Seeram. Applications of Magnesium and Its Alloys: a review. **Applied Sciences**, [S.L.], v. 11, n. 15, p. 6861, 26 jul. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/app11156861>.

TEXIER, D.; ATMANI, F.; BOCHER, P.; NADEAU, F.; CHEN, J.; ZEDAN, Y.; VANDERESSE, N.; DEMERS, V. Fatigue performances of FSW and GMAW aluminum alloys welded joints: Competition between microstructural and structural-contact-fretting crack initiation. **International Journal of Fatigue**, v. 116, n. June, p. 220–233, 2018.

TIAN, Ye *et al.* An extrusion–shear–expanding process for manufacturing AZ31 magnesium alloy tube. **Transactions Of Nonferrous Metals Society Of China**, [S.L.], v. 32, n. 8, p. 2569-2577, ago. 2022. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1003-6326\(22\)65966-1](http://dx.doi.org/10.1016/s1003-6326(22)65966-1).

TIAN, Ye *et al.* An extrusion–shear–expanding process for manufacturing AZ31 magnesium alloy tube. **Transactions Of Nonferrous Metals Society Of China**, [S.L.], v. 32, n. 8, p. 2569-2577, ago. 2022. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1003-6326\(22\)65966-1](http://dx.doi.org/10.1016/s1003-6326(22)65966-1).

VERMA, Jagesvar *et al.* Evaluation of microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of friction stir-welded aluminum and magnesium dissimilar alloys. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 26, p. 4738-4747, 2017.

VILLARES METALS S/A. **Aço para trabalho a quente**. 2021. Disponível em: <https://www.villaresmetals.com.br/content/download/28452/288036/file/VH13IM-pt.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2024.

WANG, Jianing *et al.* Effect of preheat & post-weld heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 6061-T6 aluminum alloy welded sheets. **Materials Science**

And Engineering: A, [S.L.], v. 841, p. 143081, abr. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2022.143081>.

WEMAN, Klas. **Welding processes handbook**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012.

WU, Lijian *et al.* The study of high-speed MIG welding assisted by compound external magnetic fields for 6N01-T6 aluminum alloy. **Journal Of Manufacturing Processes**, [S.L.], v. 83, p. 576-589, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.09.028>

XIE, Liangwen *et al.* Influence mechanism of pin thread in friction stir welding of magnesium alloys based on the relationship between microstructure and mechanical properties. **Journal Of Materials Processing Technology**, [S.L.], v. 312, p. 117870, mar. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.117870>.

XU, Shuangxi *et al.* Fatigue strength evaluation of 5059 aluminum alloy welded joints Considering welding deformation and residual stress. **International Journal Of Fatigue**, [S.L.], v. 162, p. 106988, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106988>.

YAKNESH, S.; SAMPATHKUMAR, K.; SEVELL, P. Effect of tool pin geometry and process parameters during FSW of dissimilar alloys of Mg. **Materials Research**, v. 25, p. e20210508, 2022.

YANG, Chunliang; WU, Chuansong; SHI, Lei. Modeling the dissimilar material flow and mixing in friction stir welding of aluminum to magnesium alloys. **Journal Of Alloys And Compounds**, [S.L.], v. 843, p. 156021, nov. 2020. Elsevier BV.

YI, Hao; WANG, Qiao; CAO, Huajun. Wire-arc directed energy deposition of magnesium alloys: microstructure, properties and quality optimization strategies. **Journal Of Materials Research And Technology**, [S.L.], v. 20, p. 627-649, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.083>.

ZHANG, Mingjun *et al.* Impact of power modulation on weld appearance and mechanical properties during laser welding of AZ31B magnesium alloy. **Optics & Laser Technology**, [S.L.], v. 156, p. 108490, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108490>.

ZHEN, Wen; LI, Huanhuan; WANG, Qing. Simulation of residual stress in aluminum alloy welding seam based on computer numerical simulation. **Optik**, [S.L.], v. 258, p. 168785, maio 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.168785>.