



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



JOSÉ WALLISSON DE ABREU SOUSA

**CARACTERIZAÇÃO, AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE JUNTAS DE LIGA DE MAGNÉSIO AZ31 SOLDADAS PELO
PROCESSO FSW**

CAMPINA GRANDE – PB

2023

JOSÉ WALLISSON DE ABREU SOUSA

Caracterização, avaliação e otimização das propriedades mecânicas de juntas de liga de magnésio AZ31 soldadas pelo processo FSW

Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande como requisito parcial para obtenção do título de mestre em engenharia mecânica.

Área de concentração: Sistemas Termomecânicos

Linha de pesquisa: Processos Mecânico Metalúrgico

Orientador: Prof. Dr. Raphael Henrique Falcão de Melo

Coorientador: Prof. Dr. Marco Antonio dos Santos

CAMPINA GRANDE – PB

2023

S725c

Sousa, José Wallisson de Abreu.

Caracterização, avaliação e otimização das propriedades mecânicas de juntas de liga de magnésio AZ31 soldadas pelo processo FSW / José Wallisson de Abreu Sousa – Campina Grande, 2024.

109 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2023.

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

Referências.

1. Friction Stir Welding. 2. Liga de Magnésio AZ31. 3. Propriedades Mecânicas. 4. Sistemas Termomecânicos. 5. Planejamento Experimental. 6. Microestrutura. I. Melo, Raphael Henrique Falcão de. II. Santos, Marco Antonio dos. III. Título.

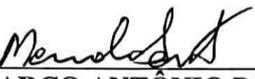
CDU 621.791(043)

**CARACTERIZAÇÃO, AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE
MECÂNICAS DE JUNTAS DE LIGA DE MAGNÉSIO AZ31 SOLDADAS PELO PROCESSO
FSW**

JOSÉ WALLISSON DE ABREU SOUSA

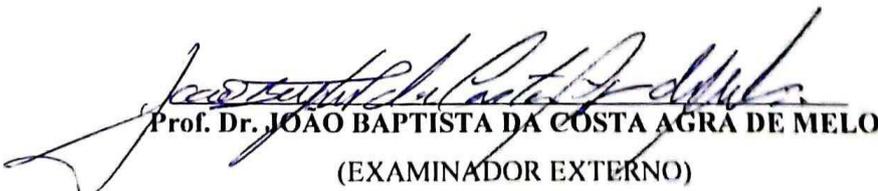
Dissertação Aprovada em 19/12/2023 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes membros:

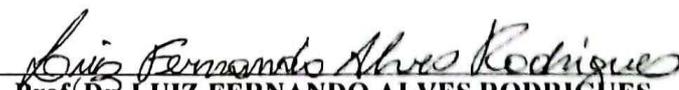

Prof. Dr. RAPHAEL HENRIQUE FALCÃO DE MELO
(ORIENTADOR)


Prof. Dr. MARCO ANTÔNIO DOS SANTOS
(CO-ORIENTADOR)


Prof. Dr. RENATO ALEXANDRE COSTA DE SANTANA
(EXAMINADOR INTERNO)


Prof. Dr. THEOPHILO MOURA MACIEL
(EXAMINADOR INTERNO)


Prof. Dr. JOÃO BAPTISTA DA COSTA AGRA DE MELO
(EXAMINADOR EXTERNO)


Prof. Dr. LUIZ FERNANDO ALVES RODRIGUES
(EXAMINADOR EXTERNO)

Aos meus pais Francisca e Roseno e ao meu
irmão José Willame.

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida e por ter me dado forças para suportar todos os obstáculos vivenciados durante esta árdua caminhada de muitos desafios. Termino este ciclo com a certeza de que não adquiri apenas conhecimento acadêmico, mas sobretudo, aprendizado de vida.

Aos meus pais Roseno Gregório e Francisca Maria por todo amor, carinho e incentivo. Sempre me dando suporte e acreditando na minha jornada. Essa conquista não seria possível sem o auxílio deles.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Raphael Henrique Falcão de Melo pela orientação, por partilhar parte de seu vasto conhecimento acadêmico/científico e acreditar na minha capacidade.

Aos Prof. Dr. Renato, Luiz Fernando e Theophilo pelas contribuições. Em especial gostaria de expressar os meus agradecimentos aos Prof. Dr. Marco Antonio e João Baptista por sempre se fizeram presentes e auxiliando nos momentos de dúvida, bem como pela disponibilização de laboratórios.

À minha grande amiga Maria Lindinêz por todo apoio e incentivo em todos os momentos, fazendo-me acreditar sempre no meu potencial. Serei sempre grato pela força e conselhos a mim dirigidos, que sem dúvidas foram valiosos.

Ao técnico de laboratório e da oficina mecânica Cícero de Lima Santos por sempre se dispor a ajudar-me, auxiliando e fornecendo mecanismos para que as atividades laboratoriais fossem realizadas, além de orientações valiosas. Muito mais que um exímio servidor, Cícero é um grande ser humano, o qual tive a grata satisfação de conhecer e tornarmos grandes amigos.

À técnica do Microscópio Eletrônico de Varredura, Daniella Cibelle, pela presteza em atender minha demanda de imagens fractográficas.

Ao técnico do laboratório de eletroquímica, Arthur Filgueira, por toda paciência e dedicação em atender as solicitações de produção de reagente.

Aos bons momentos de vivência ao lado dos técnicos/amigos Cícero, Daniella, Seu Fernando, Arthur e Gil. Lembrarei com carinho das “reuniões” descontraídas e alegres, que sem dúvidas, foram de grande importância para mim.

À meu primo e colega de mestrado Francisco Mendes pelos incentivos e apoio, no qual estendo os agradecimentos aos demais colegas de mestrado Oclávio, José Wiron e José Galdino pela parceria e ajuda mútua, formando não só um grupo de pesquisa, mas de amigos.

Ao Prof. Me. e amigo, Alan Vinícius, pela presteza na ajuda e apoio no laboratório do IFCE, onde foi possível realizar a soldagem e toda a preparação de seus respectivos corpos de prova para ensaio.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB) e do Ceará (IFCE) por disporem de seus espaços físicos e equipamentos para que parte do desenvolvimento da pesquisa fosse realizado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ) pelo fomento à pesquisa por meio do EDITAL Nº 010/2021 - FAPESQ/PB - MCTIC/CNPq - PROGRAMA DE INFRAESTRUTURA PARA JOVENS PESQUISADORES / PROGRAMA PRIMEIROS PROJETOS - PPP - TERMO DE OUTORGA 3200/2021 e a bolsa de fomento à pesquisa e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de incentivo à pesquisa.

Por fim, gostaria de agradecer a todos que de alguma forma vibraram e torceram nesse período por esta realização. Meu muito obrigado.

SOUSA, J. W. A. **Caracterização, avaliação e otimização das propriedades mecânicas de juntas de liga de magnésio AZ31 soldadas pelo processo FSW**. 109p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 2023.

RESUMO

Em meio ao mundo moderno em que estamos inseridos atualmente, a busca por materiais que conciliem uma relação resistência/peso satisfatória tem sido palco de interesse mundial do setor industrial, em especial o de transporte. Neste contexto, as ligas de magnésio ganham protagonismo ao serem empregadas em componentes de automóveis para melhoria de sua eficiência. Entretanto, um dos desafios a aplicação destes materiais é a obtenção de uniões soldadas, já que este tipo de material tem apresentado limitações ao serem submetidas aos processos convencionais por fusão ao arco elétrico. Neste sentido, o processo de soldagem em estado sólido friction stir welding surge como boa alternativa para união destas ligas. Portanto, este trabalho tem por objetivo avaliar a influência que os parâmetros de soldagem desempenham na microestrutura e propriedades mecânicas de juntas soldadas da liga de magnésio AZ31. As juntas foram produzidas a partir de diferentes condições definidas através do planejamento experimental empregando uma fresadora universal de três eixos. Foram realizadas caracterização microestrutural e mecânica das juntas soldadas, conforme microscopia ótica e ensaios de tração uniaxial e de microdureza Vickers, respectivamente, bem como análise fractográfica das superfícies de fratura via microscópio eletrônico de varredura. Os resultados demonstraram um bom aspecto visual das juntas ao constatar-se a ausência de trincas e falta de preenchimento. Diferentes níveis de resistência mecânica foram obtidos, chegando a atingir 197 MPa. Os tamanhos médios de grão da zona de mistura foram menores do que os do material de base, apresentando reduções que chegaram a 74%. Resultando na obtenção de maiores níveis de microdureza nos casos de menor tamanho de grão. As imagens fractográficas mostraram considerável presença de dimples, caracterizando fratura dúctil das juntas soldadas. Diante disso, os variados níveis de temperatura resultante das diferentes condições de parâmetros de soldagem impostas foram determinantes para o comportamento microestrutural, o que consequentemente veio a influenciar no comportamento mecânico.

Palavras-chave: Friction Stir Welding, liga de Magnésio AZ31, Propriedades mecânicas, Microestrutura, Planejamento experimental.

SOUSA, J. W. A. Characterization, evaluation and optimization of the mechanical properties of AZ31 magnesium alloy joints welded by the FSW process. 109p. Master's Dissertation – Postgraduate Program in Mechanical Engineering, Federal University of Campina Grande, Campina Grande – PB, 2023.

ABSTRACT

In the midst of the modern world in which we currently live, the search for materials that combine a satisfactory resistance/weight ratio has been a stage of worldwide interest in the industrial sector, especially the transport sector. In this context, magnesium alloys gain prominence when used in automobile components to improve their efficiency. However, one of the challenges in applying these materials is obtaining welded joints, as this type of material has presented limitations when subjected to conventional processes by electric arc fusion. In this sense, the solid-state friction stir welding process appears as a good alternative for joining these alloys. Therefore, this work aims to evaluate the influence that welding parameters have on the microstructure and mechanical properties of welded joints made of AZ31 magnesium alloy. The joints were produced based on different conditions defined through experimental planning using a three-axis universal milling machine. Microstructural and mechanical characterization of the welded joints were carried out, according to optical microscopy and uniaxial tensile and Vickers microhardness tests, respectively, as well as fractographic analysis of the fracture surfaces via scanning electron microscope. The results demonstrated a good visual appearance of the joints, showing the absence of cracks and lack of filling. Different levels of mechanical resistance were obtained, reaching 197 MPa. The average grain sizes of the mixing zone were smaller than those of the base material, showing reductions of up to 74%. Resulting in obtaining higher levels of microhardness in cases of smaller grain size. The fractographic images showed a considerable presence of dimples, characterizing ductile fracture of the welded joints. Therefore, the varied temperature levels resulting from the different welding parameter conditions imposed were decisive for the microstructural behavior, which consequently influenced the mechanical behavior.

Keywords: Friction Stir Welding, AZ31 Magnesium alloy, Mechanical property, Microstructure, Experimental planning.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Produção mundial do Mg ao longo dos anos.	18
Figura 2: Principais setores industriais que aplicam a tecnologia FSW.	19
Figura 3: a) Diagrama de fase do sistema binário Mg-Al e b) diagrama rico em magnésio.	28
Figura 4: Diagrama de equilíbrio Mg-Zn.	29
Figura 5: a) Diagrama de fase Mg-Mn b) modelo termodinâmico do diagrama de fases do sistema Mg-Al-Zn-Mn em uma região rica em magnésio.	29
Figura 6: Ilustração esquemática das posições atômicas da estrutura hexagonal compacta.	31
Figura 7: Sistemas de plano de deslizamento em materiais com estrutura HC.	32
Figura 8: Evolução dos processos de soldagem ao longo dos últimos séculos.	33
Figura 9: Classificação conforme a natureza da união.	35
Figura 10: Representação esquemática do processo FSW.	37
Figura 11: Ilustração esquemática do uso de recursos e parâmetros do FSW.	40
Figura 12: Ilustração esquemática da inclinação da ferramenta FSW.	43
Figura 13: Ilustração de diferentes geometrias do ombro da ferramenta vistas a partir da parte inferior.	45
Figura 14: Ilustração esquemática de diferentes geometrias de perfis do pino da ferramenta FSW com dimensões em mm.	46
Figura 15: Identificação de diferentes zonas microestruturais.	48
Figura 16: Evolução microestrutural das diferentes regiões oriundas do processo FSW.	49
Figura 17: a) Padrão de fluxo de material e b) Vista superior a baixo do ombro mostrando por meio de linhas vermelhas (lado de avanço) e verdes (lado de recuo) o fluxo de material ao redor do pino.	51
Figura 18: Fluxograma geral das atividades desenvolvidas no decorrer da pesquisa.	52
Figura 19: Suporte pronto representando como as chapas ficaram dispostas no momento da soldagem.	55
Figura 20: Desenho esquemático da ferramenta FSW.	56
Figura 21: Ferramenta FSW utilizada no processo.	56
Figura 22: Figura esquematizando a penetração do pino (momento da soldagem).	58
Figura 23: Ilustração da chapa soldada e seus respectivos corpos de prova.	59
Figura 24: Corpo de prova de tração.	60
Figura 25: Corpo de prova de dobramento de raiz a 60°.	60

Figura 26: Configuração de posicionamento dos corpos de prova: a) tração e b) dobramento.	61
Figura 27: Microdurômetro utilizado.	61
Figura 28: Ilustração esquemática do posicionamento das indentações.....	62
Figura 29: Microscópio ótico.	63
Figura 30: Análise em EDS da composição química do material AZ31.....	65
Figura 31: Micrografias do MB em ampliações de (a) 200x, (b) 500x e (c) 1000x.....	66
Figura 32: Análise em EDS da composição de um precipitado representativo no material AZ31.	67
Figura 33: Diagrama de Pareto dos fatores individuais e de interação.	76
Figura 34: Relação entre os valores previstos e observados.	76
Figura 35: Influência das velocidades de rotação e de avanço na resposta de resistência à tração das juntas soldadas pelo processo FSW.	77
Figura 36: Influência da velocidade de rotação e inclinação da ferramenta na resposta de resistência à tração das juntas soldadas pelo processo FSW.	78
Figura 37: Influência da velocidade de rotação e penetração da ferramenta na resposta de resistência à tração das juntas soldadas pelo processo FSW.	78
Figura 38: Junta 1 revelando a) macroestrutura e b) e c) ampliações dos locais de defeitos. ..	79
Figura 39: Macroestrutura das juntas a) 2 e b) 6.	80
Figura 40: Junta 7 revelando a) macroestrutura e b) e c) ampliações dos locais de defeitos. ..	80
Figura 41: Junta 6 Micrografia em ampliação de 500x nas regiões de a) MB, b) ZTMA avanço, c) ZM e d) ZTMA recuo.....	81
Figura 42: JUNTA 1 com ampliação de 500x em a) MB b) ZTMA AVANÇO c) ZM/ZTMA AVANÇO d) ZM e) ZM/ZTMA RECUO e f) ZTMA RECUO.	82
Figura 43: JUNTA 2 com ampliação de 500X em a) MB b) ZTMA AVANÇO c) ZM/ZTMA AVANÇO d) ZM e) ZM/ZTMA RECUO e f) ZTMA RECUO.	83
Figura 44: JUNTA 7 com ampliação de 500X em a) MB b) ZTMA c) ZM/ZTMA avanço d) ZM e) ZM/ZTMA recuo e f) ZTMA recuo.	84
Figura 45: Curvas de tração x deformação geral (juntas e MB).....	88
Figura 46: Curvas tensão x deformação de juntas com resistência semelhante.	90
Figura 47: Fractografias MEV em ampliação de 1000x para as juntas a) 1, b) 2, c) 6 e d) 7. .	93
Figura 48: Perfis de microdureza Vickers ao longo da seção transversal das juntas.	94
Figura 49: Perfis de microdureza Vickers das 4 juntas analisadas em maior detalhe em microestrutura e tração.	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Matéria prima e sua respectiva fórmula molecular.	22
Tabela 2: Algumas propriedades do magnésio.....	23
Tabela 3: Principais elementos de liga adicionados ao magnésio.	26
Tabela 4: Nomenclatura dos processos de fabricação e tratamentos.....	27
Tabela 5: Características cristalográficas dos sistemas de deslizamento em metais com estrutura HC.....	32
Tabela 6: Intervalo de uso dos níveis dos parâmetros analisados.	53
Tabela 7: Matriz de planejamento experimental fatorial fracionário.	54
Tabela 8: Composição química e propriedades mecânicas do metal de base.	57
Tabela 9: Propriedades mecânicas do MB.	68
Tabela 10: Matriz de planejamento e variável resposta obtida.	73
Tabela 11: Níveis de significância das variáveis individuais e de interação sobre a variável resposta.	74
Tabela 12: Análise de variância (ANOVA) para a resposta de resistência à tração.	75
Tabela 13: Efeitos estimados para resposta de resistência à tração.....	75
Tabela 14: Tamanho médio de grão.	86
Tabela 15: Valores médios de resistência a tração para cada junta soldada.....	89
Tabela 16: Valores médios de microdureza HV em diferentes regiões da junta.....	96

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Juntas soldadas com suas respectivas condições de soldagem e defeitos observados.	69
Quadro 2: Imagens dos CP's ensaiados e valores de carga máxima suportada por cada junta no ensaio de dobramento.	71
Quadro 3: Amostras fraturadas e suas respectivas localizações de fratura.	92

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

ASM – American Society for Metals;

ASTM – American Society for Testing Materials;

EDS – Espectroscopia por Dispersão de Energia;

FEA – Fator de Empacotamento Atmico

FSW – Friction Stir Welding;

HAZ – Zona Termicamente Afetada;

HC – Estrutura Cristalina Hexagonal Compacta;

HV – Hardness Vickers;

IFCE – Instituto Federal de Educao, Ciência e Tecnologia do Ceará;

IFPB – Instituto Federal de Educao, Ciência e Tecnologia da Paraíba;

LaMMEA – Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas;

MB – Material de Base;

MEV – Microscopia Eletrnica de Varredura;

MO – Microscopia ptica;

SiC – Carbetto de Silício;

TWI – The Welding Institute;

ZM – Zona de Mistura;

ZTMA – Zona Termomecnicamente Afetada;

μm – Micrometro.

LISTA DE SÍMBOLOS

a – Aresta da célula unitária

Al – Alumínio

c – Altura da aresta

Mg – Magnésio

Mn - Manganês

Zn – Zinco

T – Temperatura de pico na ZM

T_M – Temperatura de fusão

V – Velocidade de soldagem

W - Taxa de rotação da ferramenta

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	JUSTIFICATIVA	19
1.2	OBJETIVO	20
1.2.1	Objetivo Geral	20
1.2.2	Objetivos Específicos	20
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	21
2.1	MAGNÉSIO E SUAS LIGAS	21
2.2	SISTEMA Mg-Al-Zn-Mn / LIGAS AZ31.....	27
2.3	METALURGIA FÍSICA E MECANISMOS DE DEFORMAÇÃO.....	30
2.4	SOLDAGEM	32
2.4.1	História e evolução das técnicas de soldagem	33
2.4.2	Soldagem do magnésio.....	35
2.5	PROCESSO <i>FRICITION STIR WELDING</i>	36
2.5.1	Parâmetros do FSW.....	39
2.5.2	Microestrutura	47
2.5.3	Mecanismos de união e fluxo de material.....	50
3	MATERIAIS E METÓDOS	52
3.1	PLANEJAMENTO FATORIAL	53
3.2	CONFEÇÃO DE PROTÓTIPO DE FIXAÇÃO.....	54
3.3	PROJETO E FABRICAÇÃO DA FERRAMENTA FSW	55
3.4	SOLDAGEM DAS CHAPAS	57
3.5	OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	58
3.6	ENSAIOS MECÂNICOS E FRACTOGRÁFIA.....	60
3.7	ANÁLISE MICROESTRUTURAL	62
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
4.1	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E METALURGICA DO MATERIAL DE BASE	65

4.1.1 Composição química	65
4.1.2 Microestrutura	66
4.1.3 Propriedades mecânicas	68
4.2 ANÁLISE VISUAL.....	68
4.3 ENSAIO DE DOBRAMENTO	70
4.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL FATORIAL (Fracionário)	72
4.4.1 Influência dos parâmetros de soldagem na resistência à tração	77
4.5 MICROESTRUTURA.....	79
4.6 ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL	88
4.7 FRACTOGRAFIA.....	92
4.8 MICRODUREZA VICKERS	94
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	97
5.1 CONCLUSÕES	97
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	98
6 REFERÊNCIAS	99
APÊNDICE A – Tabela com os dados de obtenção do tamanho médio de grão do MB.....	105
APÊNDICE B – Tabela com os dados de obtenção do tamanho médio de grão da junta 1 ..	105
APÊNDICE C – Tabela com os dados de obtenção do tamanho médio de grão da junta 2 ..	106
APÊNDICE D – Tabela com os dados de obtenção do tamanho médio de grão da junta 3 ..	106
APÊNDICE E – Tabela com os dados de obtenção do tamanho médio de grão da junta 4...	107
APÊNDICE F – Tabela com os dados de obtenção do tamanho médio de grão da junta 5 ...	107
APÊNDICE G – Tabela com os dados de obtenção do tamanho médio de grão da junta 6. .	108
APÊNDICE H – Tabela com os dados de obtenção do tamanho médio de grão da junta 7. .	108
APÊNDICE I – Tabela com os dados de obtenção do tamanho médio de grão da junta 8....	109

1 INTRODUÇÃO

Diante do cenário atual vivenciado pelo setor industrial, em especial o de transporte, em atingir as exigências do mercado global, no que tange os esforços por produtos que apresentem reciclabilidade e boas propriedades mecânicas aliada a baixa densidade proporcionando excelente relação resistência/peso, tem-se desencadeado um grande potencial aplicacional em torno das ligas de magnésio por justamente possuírem essas características bem interessantes que despontam este tipo de material em relação aos mais utilizados: alumínio (Al) e aço, tornando essa liga cada vez mais importante e presente perante a sociedade moderna (GUPTA; SHARON, 2011a; JAYASATHYAKAWIN et al., 2020; MOOSBRUGGER, 2017).

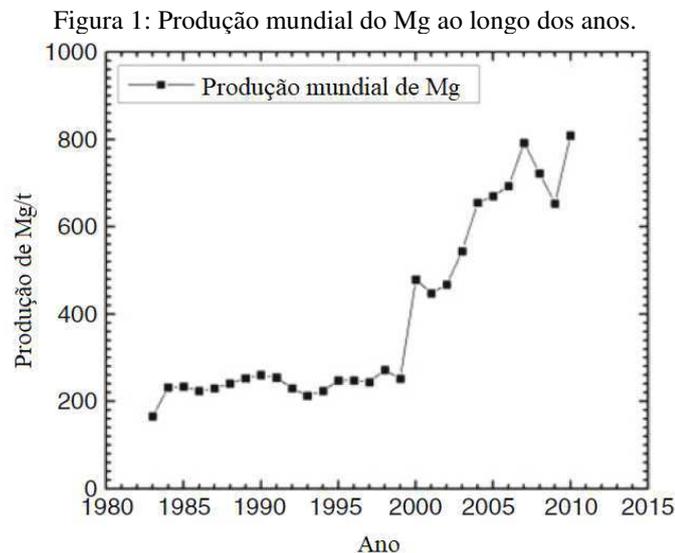
O maior número de estudos envolvendo este material tem se caracterizado justamente no desenvolvimento de novas ligas, visando melhorar cada vez mais suas propriedades mecânicas por meio da adição de elementos ligantes. Poucos estudos sobre o comportamento metalúrgico dessas ligas em relação ao Al e o aço, principalmente com relação à sua soldabilidade tem feito com que sua aplicação seja pouco expressiva quando comparado a esses materiais (Al e aço), mesmo diante dos avanços nos últimos anos mediante procura por redução de peso de componentes industriais e/ou pesquisas desenvolvidas.(CAMPANELLI, 2012; CATORCENO, 2013; WESTENGEN; AUNE, 2006).

A produção de Mg experimentou um aumento expressivo a partir dos anos 2000 até ter uma interrupção deste ciclo entre 2005 e 2010 com uma queda significativa, se recuperando logo em seguida, conforme Figura 1, sendo o aumento causado principalmente pela injeção de componentes a base do Mg em diversos setores da indústria, em especial a de transporte com a automobilística despontando na frente. Somado a isso, tem sido utilizado para finalidades diversas como elemento de liga em ligas de alumínio (Al) e componentes eletroeletrônicos (MISHRA; DE; KUMAR, 2014a).

Diante do constante aumento e procura do Mg e suas ligas surge consigo a necessidade do desenvolvimento de novas técnicas eficientes de soldagem que superem as limitações atribuídas aos processos convencionais que envolvem fusão ao arco elétrico devido ao aparecimento de defeitos oriundos da solidificação como porosidade e trincas, que acarretam em juntas soldadas de baixa qualidade.

Neste sentido, a união dessas ligas por métodos de soldagem no estado sólido, sem ocorrência de fusão, como o processo *Friction Stir Welding* (FSW), tem apresentado melhores propriedades mecânicas e maior resistência a corrosão (TEMPLEMAN; MESHI; BEN HEMU, 2017). A utilização do processo FSW proporciona uma temperatura de soldagem em torno de

80 a 95% da temperatura de fusão (T_m) do material a ser soldado, o que elimina consideravelmente o aparecimento de defeitos oriundos do processo de solidificação como porosidade e trincas (SHAH et al., 2019).

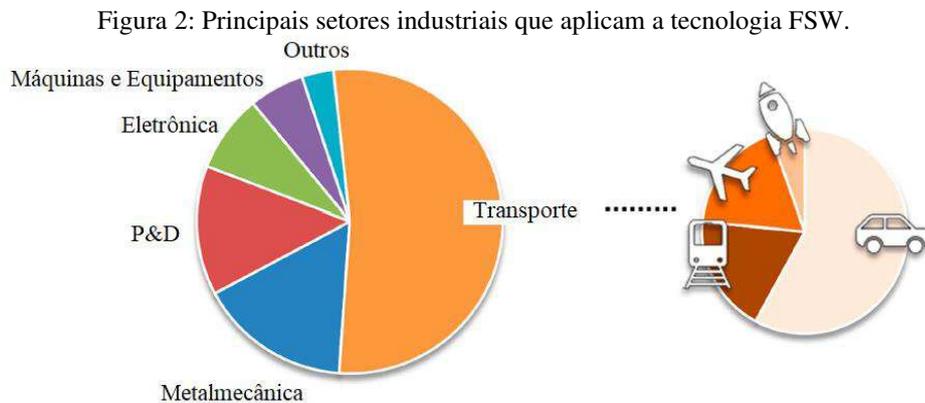


Fonte: Adaptado de (MISHRA; DE; KUMAR, 2014a).

Desta forma, o processo FSW tem apresentado boas perspectivas de aplicação no que diz respeito a união de metais leves, em decorrência das várias vantagens a qual lhe estão associadas, (CHOUDHARY; JAIN, 2021; K YADAV; KHURANA, 2021; NING et al., 2014; SINGH; DUBEY, 2021). As suas aplicações são mais focadas na indústria de transporte, com maior ênfase em aplicações em automóveis, sendo esse o principal usuário desta tecnologia, seguida pelo setor metalmecânica, P&D e na fabricação de eletrônicos e máquinas e equipamentos, conforme ilustrado na Figura 2. O FSW tem sido palco de intensa pesquisa principalmente na Ásia (MAGALHÃES; LEITÃO; RODRIGUES, 2017). Em contrapartida, no Brasil é considerado ainda escasso o número de pesquisas na área. Muito provavelmente em decorrência de altos investimentos com equipamentos.

Neste sentido, vários pesquisadores tem buscado desmistificar a complexidade em torno do comportamento das juntas produzidas por este processo em termos de variações na microestrutura e consequente efeito nas propriedades mecânicas por meio de estudos envolvendo a relação das condições de soldagem impostas (KADIGITHALA; VANITHA, 2020; LIU et al., 2019a, 2019c; SERINDAG; KIRAL, 2017; SUCHARITHA; RAVI SANKAR; UMAMAHESWARAO, 2021; WANG et al., 2020), assim como a influência de técnicas de resfriamento rápido para evitar e/ou ter uma estrutura da junta com menores variações microestruturais e mecânicas ao longo da região de solda (DANIEL;

LAKSHMINARAYANAN, 2021; LIU et al., 2019b; ROUHI; MOSTAFAPOUR; ASHJARI, 2016; XU et al., 2021).



Fonte: Adaptado de (MAGALHÃES; LEITÃO; RODRIGUES, 2017).

Assim, dado o interesse em estudos prospectivos de soldagem de ligas de magnésio por processos de soldagem por atrito, como o FSW, este trabalho tem como objetivo o estudo da soldabilidade e otimização das propriedades mecânicas de juntas de magnésio soldadas pelo processo FSW, visando fornecer informações quanto ao comportamento mecânico e metalúrgico envolvido nas juntas através deste processo a partir de distintas condições aplicadas.

1.1 JUSTIFICATIVA

Diante da incessante procura por meios e/ou soluções que mitiguem o aumento do consumo de energia empregada no setor de transporte e, conseqüentemente, promova a redução da emissão de gases poluentes, minimizando os efeitos danosos ao meio ambiente, poluindo-o menos, as ligas de magnésio tem se mostrado um material promissor devido a otimização da relação peso/potência e redução do consumo de combustíveis e veículos cada vez mais leves.

No entanto, as ligas de magnésio apresentam baixa soldabilidade, principalmente por métodos convencionais de união. Para superar tais dificuldades 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, como o Friction Stir Welding (FSW) (CAPELARI; MAZZAFERRO, 2009; TEXIER et al., 2018). No entanto, o processo FSW possui diversas variáveis que influenciam o desempenho da junta soldada como é o caso da velocidade de rotação da ferramenta, velocidade de soldagem, ângulo de inclinação da ferramenta e entrada do ombro da ferramenta que serão alvo do presente estudo,

além de outros como geometria da ferramenta e força axial (AVAL, 2015; JI et al., 2015; SUTTON et al., 2002).

Com base nisso, se faz necessário um estudo em relação a caracterização e avaliação das propriedades mecânicas de juntas de magnésio soldadas pelo processo FSW com utilização de parâmetros adequados, com o objetivo de garantir boas propriedades mecânicas, procurando viabilizar a sua aplicação no setor de transporte, visando não só a diminuição do uso de energias pelo setor de transporte, mas também a segurança dos que utilizarão.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliação e otimização dos parâmetros de soldagem para obtenção de boas propriedades mecânicas em juntas de magnésio AZ31 soldadas pelo processo FSW.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Correlacionar as propriedades mecânicas, aferidas por ensaio de tração, com os parâmetros de soldagem (velocidades de rotação e avanço, inclinação da ferramenta e penetração do ombro da ferramenta) por meio da técnica do planejamento experimental fatorial;
- Averiguar a microestrutura resultante das juntas soldadas por meio de microscopia ótica (MO) e correlacionar textura e/ou tamanho de grão com propriedades mecânicas de resistência à tração e microdureza Vickers;
- Avaliar as superfícies de fratura dos corpos de prova por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

2 REVISÃO DA LITERATURA

O transcorrer de um bom trabalho exige conhecer com determinada profundidade o assunto ao qual propõe-se a realizar para que se tenha noções básicas do que está sendo abordado, o que não foi diferente neste trabalho, onde buscou-se apoio na literatura principalmente por meio de artigos científicos, permitindo coletar o máximo de informações possíveis, ou seja, montando um arcabouço acerca do assunto. Sendo de essencial necessidade e, realizado no decorrer de todo o processo de estudo do presente trabalho.

2.1 MAGNÉSIO E SUAS LIGAS

O magnésio corresponde a um dos metais de classificação não ferrosa pertencente ao grupo dos alcalino-terrosos. Este metal tem ganhado espaço em aplicações de escala industrial como em componentes de automóveis e eletrônicos, nos últimos anos por exigirem principalmente estruturas leves. Em decorrência de sua baixa densidade, atingindo necessidades atuais, assim como suas ligas, tem se tornado cada vez mais importante e presente perante a sociedade moderna.

Assim como ocorre com outros metais, o magnésio apresenta um processo característico de oxidação da sua superfície que acaba ocasionando problemas característicos, influenciando em comportamento quando da sua aplicação. Em seu estado fundido, é altamente reativo, ou seja, possui facilidade em reagir ao entrar em contato com o oxigênio e, em menores proporções, com o hidrogênio, formando assim, um óxido (MgO) e um hidróxido na superfície do material, respectivamente (AVEDESIAN; BAKER, 1999). A densidade do óxido acaba sendo maior que do próprio magnésio fundido (metal líquido), o que acaba provocando a presença de precipitados (formação de inclusões) influenciando conseqüentemente nas características de soldabilidade (CAO et al., 2006).

O magnésio corresponde a um dos diversos materiais existentes que compõem a superfície da terra (litosfera) e/ou que se tenha conhecimento, podendo ser encontrado abundantemente de forma praticamente ilimitada. Sendo considerado o sexto mais abundante com aproximadamente 2,5% do seu total e/ou composição e o terceiro mais abundante identificado na composição da água (hidrosfera) do mar com aproximadamente 0,14% do seu total (BAILEY; TAN; SHIN, 2015). Fazendo com que corresponda ao único metal estrutural a ser extraído desses meios simultaneamente (GUNN, 2014).

Embora se apresente em grande abundância, o magnésio não é encontrado em sua forma pura (metálica), pois são adquiridos a partir de diversas fontes minerais, ou seja, de matérias-primas naturais, conforme especificado na Tabela 1, sendo necessário submetê-los a uma extração e conseqüente separação (FRIEDRICH; MORDIKE, 2006; GUNN, 2014).

Tabela 1: Matéria prima e sua respectiva fórmula molecular.

Minerais	Formula molecular
Dolomita	CaCO ₃ .MgCO ₃
Magnesita	MgCO ₃
Sulfato de magnésio	MgSO ₄ .7H ₂ O
Carnalita	KCl. MgCl ₂ .6H ₂ O
Serpentina	3MgO. 2SiO ₂ . 2H ₂ O

Fonte: (GUNN, 2014).

Essas diversas fontes possíveis proporciona uma conseqüente necessidade e interesse na existência de algumas alternativas e/ou métodos para extração do magnésio, a partir dos minerais mencionados anteriormente. Desta forma, para se obter o magnésio metálico em sua forma mais pura possível, as tecnologias de produção podem ser divididas em dois métodos principais, que são: métodos eletroquímicos (eletrolise) e de redução térmica (redução térmica) (FRIEDRICH; MORDIKE, 2006). Nisso, o magnésio primário (não ligado, que normalmente é comercializado) pode ser obtido em níveis que vão da ordem de 99,87 a 99,98% de pureza (ERICKSON; VASS, 1990).

Possuindo propriedades e características específicas, o magnésio tem como carro chefe (vantagem) sua baixa densidade, cuja massa específica é da ordem de 1,74 g/cm³ correspondendo o equivalente a $\frac{2}{3}$ e $\frac{1}{4}$ da densidade do alumínio e do aço, ou seja, 33 e 80% menor, respectivamente, fazendo deste o metal estrutural mais leve. Além disso, este material é relativamente maleável e mole, possuindo uma estrutura cristalina hexagonal compacta, dando a esse material juntamente com suas ligas, propriedades específicas distintas. Na Tabela 2, encontram-se especificadas as diversas propriedades físico-químicas do magnésio puro acompanhados de seus respectivos valores, nomenclatura e unidade.

Como qualquer liga metálica, as ligas de magnésio foram desenvolvidas para permitir um aprimoramento das propriedades do metal puro, em que cada elemento de liga adicionado cumpre um determinado papel, visando atender solicitações aplicacionais específicas conforme ação requerida pelo projeto, onde cada uma delas possui suas particularidades, ou seja, diferentes modos de obtenção e/ou trabalho, composição química, tratamento termomecânico e

consequente comportamento e desempenho mecânico. Permitindo assim, o emprego dessas ligas em diferentes e/ou diversas aplicações de engenharia.

Tabela 2: Algumas propriedades do magnésio.

Propriedades	Valor	Unidade
Peso atômico	24.31	
Ponto de fusão	650	°C
Dureza Mohs	2.5	
Calor específico	1.025	KJ/Kg · K
Condutividade térmica (20 °C)	418	W/m · K
Resistividade elétrica (20 °C)	44.5	nΩ · m
Modulo elástico (20 °C)	44	GPa

Fonte: (ERICKSON; VASS, 1990; GUNN, 2014).

Atualmente existem várias ligas de magnésio formadas a partir de misturas com diversos elementos de liga, sendo o alumínio o principal deles, aplicado para aprimorar a resistência mecânica. Portanto, o alumínio é o elemento de liga que mais se sobressai em relação aos outros quando se é adicionado ao magnésio. As ligas $Mg - Al$ são as que apresentam melhores propriedades mecânicas e tem sido bem aceitas por sua boa relação resistência/peso. Grande parte das ligas de magnésio compõe um sistema ternário desenvolvido para obtenção de propriedades específicas. As principais ligas ternárias são as ligas AM (Mg – Al – Mn) e ligas AZ (Mg – Al – Zn). Sendo que dentro da série AZ a liga AZ31 foi empregada na pesquisa do presente trabalho.

Conforme explanado anteriormente, as ligas de magnésio possuem alguns elementos de liga principais que são adicionados. Nisso, cada uma delas exerce suas funções características no desempenho das ligas. Desta forma, pode-se destacar os seguintes elementos: (FRIEDRICH; MORDIKE, 2006; HOUSH; MIKUCKI; STEVENSON, 1990).

O Alumínio que traz consigo o fato de ser o metal de maior uso em produção de ligas de magnésio e que proporciona uma grande melhoria na resistência da liga. A solubilidade deste elemento de liga no magnésio puro decai (diminui) a medida que a temperatura diminui. Solubilidade máxima de 11,5% (12,7 % em massa/peso a 437 °C). Quantidade maior que 6% em massa faz com que as ligas possam ser tratadas termicamente.

O Lítio é dentre os elementos ligantes, o que se apresenta como o único a baixar a densidade da liga quando comparado ao magnésio. Possui solubilidade de até 17%. Reduz a resistência, mas proporciona ductilidade maior e, um pouco de melhoria nas constantes elásticas.

O **Manganês** em ligas que possuem alumínio e zinco, o manganês é eficaz na melhoria da resistência à corrosão. Usado também para controlar o teor de ferro. Tem solubilidade inferior a 1% em peso a 482 °C. Proporciona uma melhora na resistência ao escoamento. A quantidade máxima é de 1,5 a 2% em massa.

As **Terras raras** são geralmente adicionados como Mischmetal (possuindo uma combinação de elementos como cério, lantânio e neodímio). A adição destes tipos de elemento supera as deficiências encontradas em ligas que apresentam susceptibilidade a trincas e microporosidades a quente e naquelas menos soldáveis. Melhora a resistência a fluência e, quando adicionado juntamente com o tório melhora a resistência a altas temperaturas. Sua presença faz com que ligas que o contenham não sejam sensíveis a corrosão sob tensão, além de geralmente não ser necessário recorrer ao alívio de tensão pós soldagem.

O **Silício** atua na melhora da fluidez de ligas fundidas. Utilizado em poucas ligas.

O **Tório** atua no aumento da resistência a alta temperatura quando adicionado juntamente com a prata. A adição deste tipo de elemento supera as deficiências encontradas em ligas que apresentam susceptibilidade a trincas e microporosidades a quente e naquelas menos soldáveis. É conferido resistência a fluência até 350 °C com a adição deste elemento.

O **Zinco** é o segundo elemento mais utilizado. Sendo utilizado em conjunto com o alumínio. Um maior teor de zinco proporciona um aumento da resistência.

O **Zircônio** atua como um agente refinador de grãos, mas desde que seja zircônio dissolvido.

Sabendo que o magnésio corresponde ao metal estrutural mais leve e, aliado às propriedades específicas proporcionadas por meio do desenvolvimento de suas ligas tem sido conferido a elas excelente relação resistência/peso, com propriedades que se equiparam as ligas de alumínio e, bem superior à dos aços inoxidáveis austeníticos de alta resistência mecânica e baixa liga. Permitindo assumir posição de destaque em aplicações do setor industrial, em especial o de transporte, por possibilitar expressivamente a redução de peso de componentes e/ou partes estruturais e consequente mitigação do consumo de combustíveis e aumentando a eficiência energética. Competindo diretamente com o aço e, principalmente com o alumínio, permitindo se destacar e consequentemente substituí-los em diversas aplicações desses setores, fazendo com que o magnésio se caracterize como o terceiro metal estrutural mais utilizado.

O magnésio, juntamente com sua variedade de ligas desenvolvidas tem um variado número de aplicações, que podem ser divididas em estruturais e não estruturais, assim temos:

Aplicações estruturais: incluem equipamentos industriais (presente em máquinas têxteis e de impulsão), manuseio de materiais (incluído em pás de grãos, transportadores por

gravidade e docas), comerciais (corresponde a caixa de computadores, escadas e ferramentas manuais), automotivo e aeroespaciais (estrutura de bloco de motor, de chassi e de fechamento e rodas) (HOUSH; MIKUCKI; STEVENSON, 1990).

Não estrutural: Quando é utilizado como elemento de liga em metais não ferrosos. Pode ser encontrado em algum momento em produtos pirotécnicos, como agente redutor de metal e dessulfurador, dentre outras aplicações.

Embora as ligas de magnésio se apresentem com grande potencial de aplicação atualmente, o uso delas ainda é considerado baixo quando comparado a utilização das ligas convencionais de alumínio e aço. Essa baixa utilização é resultado da escassez de estudos e dados sobre fabricação, processamento e propriedades de estruturas à base de Mg (SILVA, 2016).

As ligas de magnésio podem ser classificadas segundo a forma de fabricação, sendo a partir disso, subdivididas conforme suas composições e aplicações. Podendo ainda serem separadas em ligas de fundição (fundição em areia e molde permanente, sob pressão) e ligas forjadas (barras, perfis, chapas, forjados, arames e tarugo), sendo estas subdivididas em ligas extrudadas, forjadas e laminadas, para o caso de aplicações estruturais (HOUSH; MIKUCKI; STEVENSON, 1990).

Visto isso, os diferentes sistemas de ligas de magnésio podem estar dispostos da seguinte forma (HOUSH; MIKUCKI; STEVENSON, 1990):

Como fundidos em alta pressão – existem três sistemas comercialmente utilizados: AZ, AM e AS.

Como fundido em areia e molde permanente – possui um número maior de sistemas disponíveis: AM e AZ; ZK, ZE e EZ; QE e QH; HK, HZ e ZH; WE; ZC; K.

Como extrudados – Alguns sistemas possuem a característica de serem extrudáveis: AZ, HM, M, ZC e ZK.

Como laminado – está presente nos seguintes sistemas de ligas: AZ, HK e HM.

A subdivisão das ligas de magnésio vem detalhar um sistema de nomenclatura padrão adotado pela ASTM que se encontra especificado em quatro partes, algo semelhante ao que ocorre com a classificação das ligas de alumínio. Essa padronização funciona como uma espécie de codificação por meio de caracteres alfanuméricos que incluem informações conforme a composição química e sua ordem de padronização e tratamento termomecânico utilizado na produção da liga (GUPTA; SHARON, 2011b; HOUSH; MIKUCKI; STEVENSON, 1990; MOOSBRUGGER, 2017).

Sendo assim, utilizando a liga AZ31B como exemplo, temos que: as duas primeiras letras (1ª parte) corresponde aos dois principais elementos de liga conforme composição, respectivamente. Conforme Tabela 3 encontra-se especificado os principais elementos de liga juntamente com suas respectivas letras. (GUPTA; SHARON, 2011b; HOUSH; MIKUCKI; STEVENSON, 1990; MOOSBRUGGER, 2017). Somado a isso, os dois números (2ª parte) subsequentes correspondem a porcentagem/peso (%p) em número inteiro mais próximo da composição dos principais elementos de liga, respectivamente. A letra B (3ª parte) corresponde a segunda liga padronizada de mesmo teor composicional. (HOUSH; MIKUCKI; STEVENSON, 1990; MOOSBRUGGER, 2017).

Tabela 3: Principais elementos de liga adicionados ao magnésio.

Letra	Liga	Letra	Liga
Z	Zinco	K	Zircônio
A	Alumínio	E	Terras raras
C	Cobre	H	Tório
M	Manganês	L	Lítio
S	Silício		

Fonte: (FRIEDRICH; MORDIKE, 2006).

Finalmente, separado por um hífen quando especificado, vem os caracteres finais correspondendo a 4ª parte, apresentando uma letra seguida de uma numeração, de maneira que represente o tipo e/ou condição de tratamento termomecânico submetido pela liga. Essa parte codificada ainda possui uma divisão de acordo com os detalhes de fabricação, conforme especificado pela Tabela 4. (AVEDESIAN; BAKER, 1999; HOUSH; MIKUCKI; STEVENSON, 1990; MOOSBRUGGER, 2017).

Ligas com significativa resistência a temperatura ambiente e elevada, são produzidas quando manganês, zircônio, alumínio, zinco, tório ou terras raras são adicionadas em pequenas quantidades. Capacidade de amortecimento, excelente usinabilidade, trabalháveis e estáveis em várias atmosferas são características das ligas (ERICKSON; VASS, 1990).

O magnésio puro é largamente utilizado como elemento ligante em ligas de alumínio, tendo em vista a alta produção de tais ligas, fazendo com que grande parte do Mg se destine a esse tipo de aplicação, cujo adição tem como o objetivo conferir rigidez às ligas. (ELIEZER; AGHION; FROES, 1998; NEELAMEGGHAM; BROWN, 2014).

As ligas AZ tem se destacado devido as suas boas propriedades, dentre elas, boa resistência mecânica e alta resistência a corrosão, sendo uma das mais utilizadas atualmente, onde o zinco é o segundo elemento de liga mais utilizado na composição das ligas de magnésio.

Essas ligas apresentam uma estrutura cristalina hexagonal, sendo mais usual realizar a soldagem pelo processo FSW, pois este método proporciona refinamento dos grãos tornando o material mais resistente, além de não gerar defeitos característicos dos processos de soldagem por fusão (MIRONOV et al., 2015; TEMPLEMAN; BEN HAMU; MESH, 2017).

Tabela 4: Nomenclatura dos processos de fabricação e tratamentos.

Designação	Tratamento e/ou trabalho submetido
F	Conforme fabricado
O	Recozido, recristalizado (ligas para conformação)
H1	Levemente encruado
H2	Encruado e depois parcialmente recozida
H3	Encruado e estabilizado
W	Solubilizado (têmpera instável)
T1	Recozido e envelhecido naturalmente
T2	Recozido (produtos fundidos)
T3	Solução tratada termicamente e depois trabalhada a frio
T4	Solução tratada termicamente
T5	Resfriado e envelhecido artificialmente
T6	Solução tratada termicamente e envelhecida
T7	Solubilizado e estabilizado
T8	Solubilizado, trabalhado a frio e envelhecido artificial
T9	Solubilizado, envelhecido artificialmente e trabalhado a frio
T10	Resfriado, envelhecido artificialmente e trabalhado a frio

Fonte: (FRIEDRICH; MORDIKE, 2006).

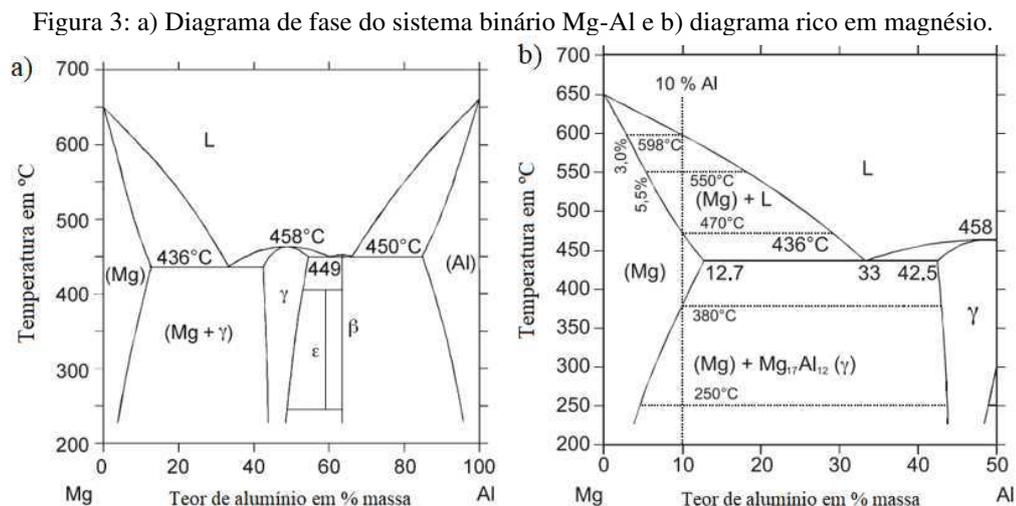
2.2 SISTEMA Mg-Al-Zn-Mn / LIGAS AZ31

Pertencente ao grupo das ligas AZ, a liga AZ31 conta com a adição de alumínio, zinco e manganês como principais elementos em sua composição seguindo a ordem mencionada. Sendo o alumínio aquele em que se sobressai em relação aos outros em efeitos favoráveis. Assim como as demais ligas do grupo, esta liga se configura como uma das mais utilizadas no mercado. Visto que seus principais elementos foram os primeiros a serem aplicados na produção de ligas de magnésio, além de suas boas características e propriedades mecânicas.

Teores de alumínio de 6% permite aliar uma perfeita combinação de ductilidade e resistência. (AVEDESIAN; BAKER, 1999). O alumínio está presente de duas formas diferentes na matriz da liga: uma parte se encontra em solução sólida e outra em forma de precipitados de composição $Mg_{17}Al_{12}$ em uma rede ao longo dos limites dos grãos como uma fase contínua preferenciais no interior do contorno localizados paralelamente aos planos basais, bem como fases descontínuas a partir dos contornos de grãos em forma lamelar (AVEDESIAN; BAKER, 1999; BRASZCZYŃSKA-MALIK, 2009; LI et al., 2012). Somado a isso, essa fase também é

conhecida como fase γ , sendo formada quando o teor de alumínio excede o limite de solubilidade sólida no magnésio (CELOTTO, 2001).

Diagramas de fases binários e ternários são essenciais para tomar ciência das mudanças que ocorrem nas fases do material e/ou liga submetido a variações de temperatura em situações de equilíbrio, ou seja, resfriamento e aquecimento lento e gradual. Portanto, tendo outro tipo de comportamento dentro de situações que não seja a de equilíbrio. Nesse sentido, com base no sistema binário Mg-Al presente na Figura 3 constata-se que além do limite de solubilidade do Al ser de 12% (temperatura eutética) massa, são formadas fases intermetálicas de $Mg_{17}Al_{12}$ ao ultrapassar os limites de solubilidade do Al [(MORDIKE; LUKÁČ, 2006)]. Somado a isso, embora a liga AZ31B se apresente como uma solução sólida homogênea, precipitados eutéticos podem ser observados e/ou formados sob condições específicas de solidificação e resfriamento (WESTENGEN; AUNE, 2006). A fase intermetálica $Mg_{17}Al_{12}$ exerce papel dominante na determinação das propriedades mecânicas (MORDIKE; LUKÁČ, 2006).

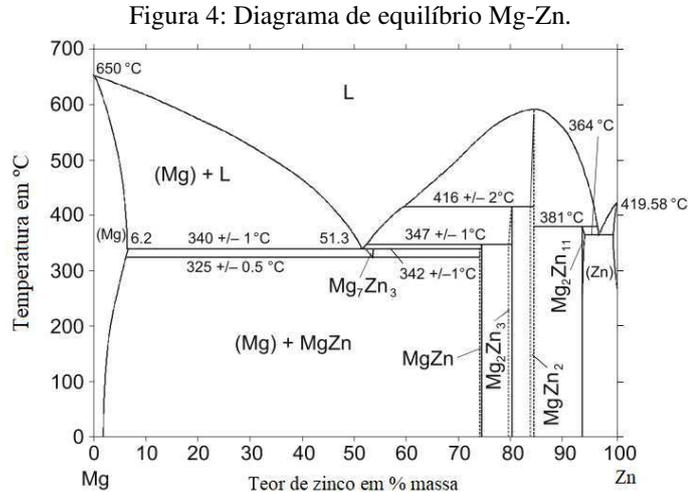


Fonte: (MORDIKE; LUKÁČ, 2006).

A máxima solubilidade de 6,2% do zinco no magnésio ocorre em temperatura eutética de 340 °C, formando com o Mg uma fase MgZn, diminuindo para 1,4% em temperatura de 150 °C [(MORDIKE; LUKÁČ, 2006)]. Na Figura 4 é possível observar o diagrama de equilíbrio binário do Mg-Zn.

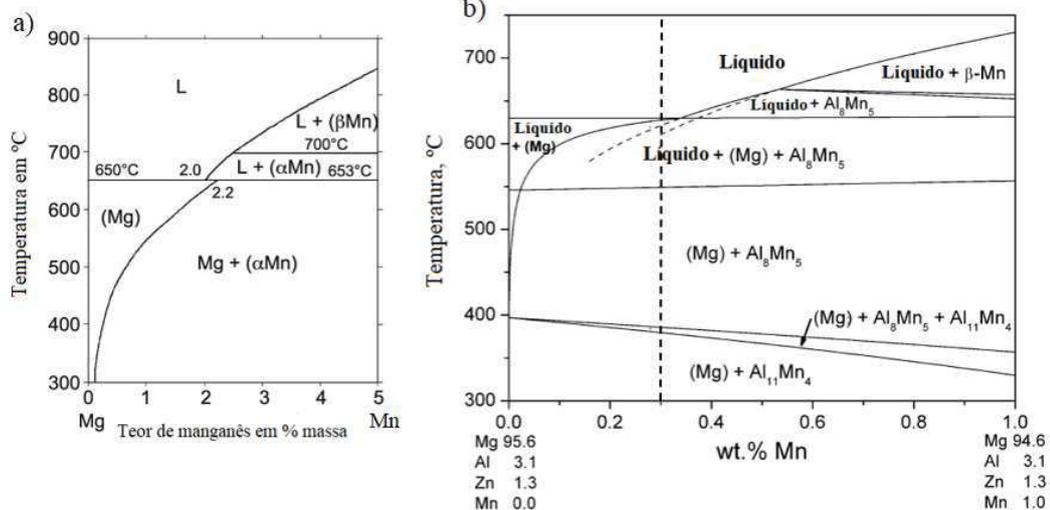
Observando o diagrama binário de Mg-Mn presente na Figura 5a nota-se características incomuns como a solubilidade máxima do Mn ser maior no magnésio sólido do que no líquido. Menores níveis de temperatura provocam um decréscimo na capacidade de solubilização do Mn. Somado a isso, vários precipitados são formados com os elementos de ligas (Al, Zn) e as impurezas presentes sob baixos teores de Mn. Ainda no diagrama se observa que duas fases

binárias de precipitados são formados simultaneamente/coexistem em uma mesma faixa de temperatura estreita (MORDIKE; LUKÁČ, 2006).



Fonte: (MORDIKE; LUKÁČ, 2006).

Figura 5: a) Diagrama de fase Mg-Mn b) modelo termodinâmico do diagrama de fases do sistema Mg-Al-Zn-Mn em uma região rica em magnésio.



Fonte: Adaptado de (MORDIKE; LUKÁČ, 2006) e (LASER et al., 2006).

O manganês se apresenta com o objetivo principal de melhorar a resistência à água salgada das ligas de Mg-Al e Mg-Al-Zn, removendo o ferro e outros metais pesados dos compostos intermetálicos. A solubilidade sólida desse elemento é em torno de 0,3% quando se tem a presença de Al. O manganês tem sido apontado com um ótimo potencial no refinamento de liga desta série, uma vez que forma-se diferentes fases binárias de Al-Mn durante a cristalização com nucleações heterogêneas (LASER et al., 2006), conforme observa-se na Figura 5b.

O zinco desempenha funções em termo de eficácia próximos ao do Al (AVEDESIAN; BAKER, 1999). Quando os limites de impureza dos elementos cobre, ferro e níquel ultrapassam os limites máximos de aceitabilidade na liga AZ31, há o comprometimento da resistência a corrosão (HOUSH; MIKUCKI; STEVENSON, 1990).

As ligas AZ31 são comumente utilizadas para extrusão e forjamento de barras, chapas, tarugos, seções estruturais e tubos de propriedades mecânicas moderadas e elevado alongamento. Podendo ser utilizadas conforme fabricadas (F), e submetidas a tratamentos termomecânicos de recozimento (O) e encruado e parcialmente recozido (H24). Especificamente a liga AZ31B possui chapas com boa conformabilidade e resistência mecânica, boa soldabilidade e resistência a corrosão elevada (HOUSH; MIKUCKI; STEVENSON, 1990).

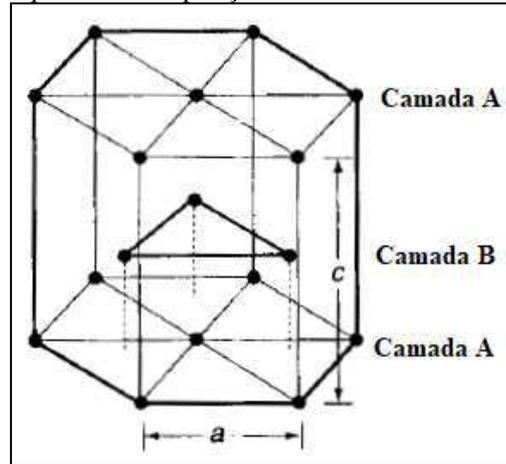
2.3 METALURGIA FÍSICA E MECANISMOS DE DEFORMAÇÃO

O magnésio pertence ao grupo dos metais que apresentam uma estrutura cristalina hexagonal compacta (HC). Desta forma, esse tipo de estrutura é formado por dois hexágonos (formado por átomos) sobrepostos com um átomo em cada um de seus seis vértices, e um outro no centro, sendo denominado de camada A com uma camada B intermediária – entre duas camadas A – composta por três átomos. Onde o número de coordenação corresponde a dose, ou seja, cada átomo tangencia e/ou possui dose átomos vizinhos mais próximos ou em contato. Sendo a célula unitária do HC composta efetivamente por seis átomos, conforme encontra-se ilustrado na Figura 6. Podendo ser possível observar que as camadas se alternam na sequência ABAB. Com isso, o parâmetro de rede a – aresta da célula unitária – é diferente do parâmetro c – altura. Possuindo ainda um FEA (fator de empacotamento atômico) igual a 0,74, ou seja, 74% da célula unitária HC está ocupada e os outros 26% estão vazios (AVEDESIAN; BAKER, 1999; GUPTA; SHARON, 2011a).

Além disso, essa estrutura HC do Mg puro possui parâmetros de rede $c = 0,521\text{nm}$ e $a = 0,3209\text{nm}$, apresentando uma relação $c/a = 1,6236$ sob pressão atmosférica a $25\text{ }^\circ\text{C}$ (temperatura ambiente), o que corresponde a um empacotamento quase ideal, levando em consideração que o valor ideal corresponderia a $c/a = 1,633$. Se caracterizando como um material de estrutura rígida, ou seja, estando considerado quase perfeitamente embalado e/ou fechado, o que por consequência dar-se-á o nome de estrutura hexagonal compacta (AVEDESIAN; BAKER, 1999; FRIEDRICH; MORDIKE, 2006). Diante desses fatores tem-se que à temperatura ambiente os sistemas de deslizamentos de discordâncias primário ocorre

preferencialmente por meio do plano basal (0001) ao longo da direção $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ mais compacta deste plano. Enquanto isso, o deslizamento secundário ocorre nos planos de face vertical $\{10\bar{1}0\}$ ao longo da direção $\langle 11\bar{2}0 \rangle$. Já quando é proporcionado um aumento da temperatura, o deslizamento também ocorre seguindo a direção $\langle 11\bar{2}0 \rangle$, mas sendo nos planos piramidais $\{10\bar{1}1\}$. (AVEDESIAN; BAKER, 1999).

Figura 6: Ilustração esquemática das posições atômicas da estrutura hexagonal compacta.



Fonte: (AVEDESIAN; BAKER, 1999).

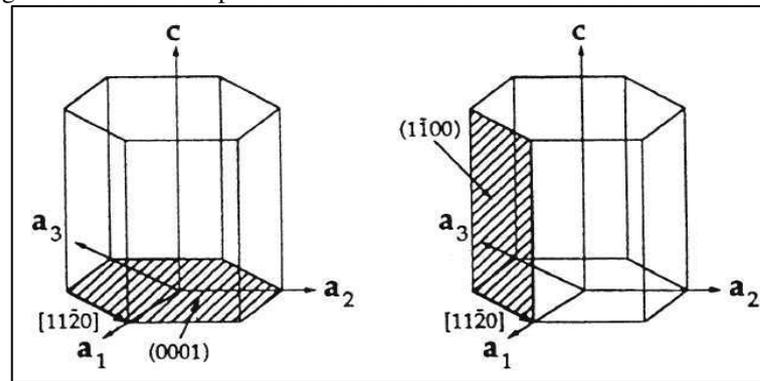
Essas características permitem destacar que ocorrem mudanças consideráveis na relação dos parâmetros de rede e conseqüentemente nos sistemas de deslizamentos dos planos cristalográficos da estrutura do Mg a medida que enfrenta variações na temperatura, algo comum de observar nos materiais metálicos. Desta forma, devido o mecanismo de deformação de materiais HC ocorrer predominantemente por meio de escorregamento basal à temperatura ambiente e, assim tendo apenas dois sistemas de deslizamento independentes, acaba não atendendo ao critério de Von Mises, o qual determina que para que ocorra uma deformação plástica de forma homogênea ou uniforme com adequada acomodação dos grãos sem ocorrência de falhas e/ou fratura em qualquer deformação de materiais policristalinos, é necessário ao menos cinco sistemas de deslizamento independentes (FRIEDRICH; MORDIKE, 2006). Sendo atingido esse critério em temperaturas elevadas quando novos planos são ativados e conseqüentemente surgem novos sistemas independentes de deslizamento. Como já mencionado, a estrutura HC do magnésio apresenta alguns planos e direções de escorregamento preferenciais conforme temperatura a que esteja sujeito o material. Dito isso, na Tabela 5 e Figura 7 se observa as características cristalográficas e planos dos sistemas de deslizamento de metais com estrutura HC, respectivamente.

Tabela 5: Características cristalográficas dos sistemas de deslizamento em metais com estrutura HC.

Plano de deslizamento	Vetor de Burgers	Descrição cristalográfica	Número de planos independentes
Basal	$\langle a \rangle$	$\{0001\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$	2
Prismático	$\langle a \rangle$	$\{1\bar{1}00\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$	2
Piramidal (tipo 1)	$\langle a \rangle$	$\{1\bar{1}01\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$	4
Piramidal (tipo 2)	$\langle c+a \rangle$	$\{11\bar{2}2\} \langle 11\bar{2}3 \rangle$	5

(ZARANDI et al., 2007) apud (CATORCENO, 2013).

Figura 7: Sistemas de plano de deslizamento em materiais com estrutura HC.



Fonte: (FRIEDRICH; MORDIKE, 2006)

Diante disso, os materiais com esse tipo de estrutura cristalográfica acabam apresentando determinadas limitações em seu comportamento mecânico, uma vez que a deformação se torna mais difícil - não acomodando-se adequadamente nos reduzidos sistemas de deslizamento - em temperatura ambiente, fazendo com que o magnésio não tenha aplicação industrial considerável neste sentido. Apresentando melhores condições de plasticidade em temperatura mais elevada (DUTTA, 2011).

2.4 SOLDAGEM

Soldagem compreende a um dos distintos processos de fabricação mecânica existentes, cujo princípio consiste em unir materiais similares, bem como dissimilares. Diferentes definições têm sido dadas a esse processo tão importante, não só para o setor industrial, mas também em relação a outros tipos de atividades que necessitam de sua aplicação, tornando-se uma técnica indispensável no cotidiano da população mundial.

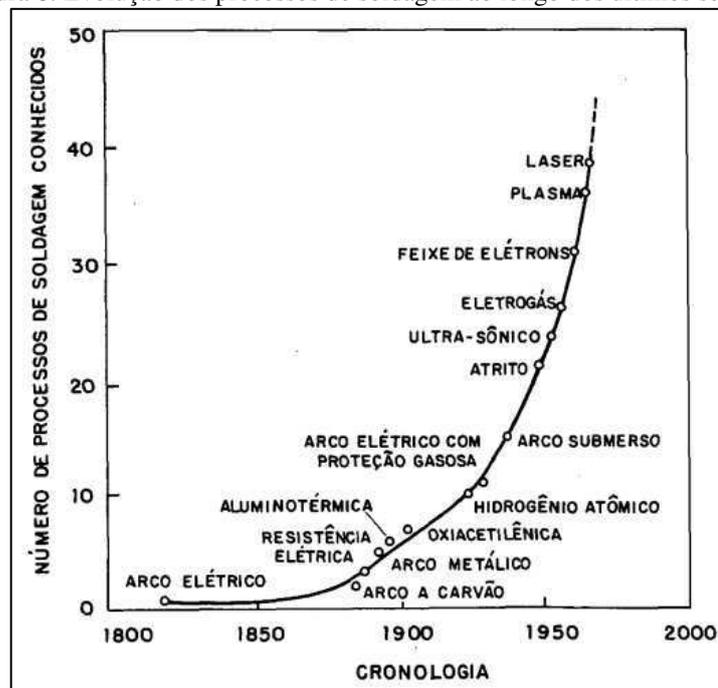
De acordo com (CHIAVERINI, 1986), o processo de soldagem consiste em um mecanismo de juntar peças metálicas por meio de contato íntimo e aquecimento entre suas superfícies de contato de maneira que leve-as a um estado de fusão ou de plasticidade. Dando

ao resultado dessa operação o nome de solda. Enquanto que (WAINER; BRAND; MELLO, 1992) definem soldagem como um processo de união entre duas superfícies metálicas, utilizando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão.

2.4.1 História e evolução das técnicas de soldagem

O mundo/sociedade apresenta constante evolução e/ou desenvolvimento, sendo essas mudanças perceptíveis no transcorrer de décadas ou mesmo séculos. Diante disso, e não distinto dos demais acontecimentos e inovações, a soldagem vem evoluindo desde a sua concepção que data de milhares de anos. Desta forma, pode-se observar na Figura 8 o processo evolutivo desta técnica tão importante e necessária para diversas áreas a partir de sua modernização com a descoberta do arco elétrico em meados de 1800. Assim como o surgimento da alternativa em estado sólido que ocorreu em torno da década de cinquenta (1950) através do uso da soldagem por atrito. Grupo do qual faz parte a técnica de união utilizada neste estudo.

Figura 8: Evolução dos processos de soldagem ao longo dos últimos séculos.



Fonte: (WAINER; BRAND; MELLO, 1992).

Conforme exposto por (WAINER; BRAND; MELLO, 1992) o processo de soldagem recebeu grande impulso durante o período em que ocorreram as duas grandes Guerras Mundiais, especialmente no decorrer da Segunda, no início do século passado, consolidando-as como principais responsáveis pelo aumento no número de novas metodologias adotadas. Tendo em

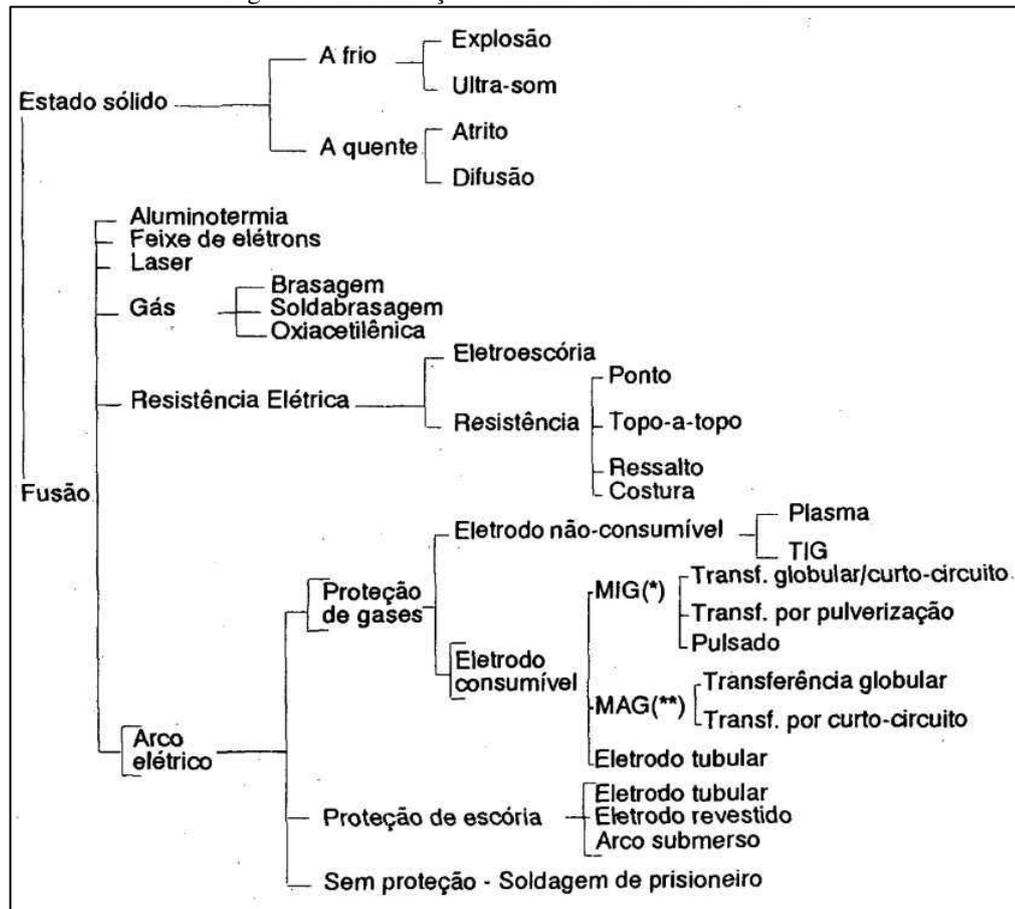
vista a necessidade de fabricação de aviões e navios soldados. Sendo ainda amplamente utilizado, independente do contexto mencionado para fabricar veículos marítimos e ferroviários, gasodutos, plataformas marítimas, eletrodomésticos e demais produtos.

Processos de soldagem com características diferentes dos convencionais, em que não ocorre fusão durante o processo, pois trata-se de uma união em estado sólido, começaram a surgir. Portanto, em meados de 1950 a soldagem por atrito (*Friction Welding*) foi desenvolvida. Sendo caracterizada por utilizar altas velocidades de rotação e pressão, para fornecer calor por meio de ação de fricção (WAINER; BRAND; MELLO, 1992). A partir dela deu-se origem a outras técnicas em estado sólido como é o caso da soldagem por fricção e mistura mecânica (FSW), que será discutida posteriormente, se caracterizando atualmente como um dos mais utilizados no estado sólido.

Diante dos constantes desenvolvimentos de novos materiais, os processos de soldagem acabam experimentando ajustes evolutivos continuamente, de modo que esses materiais alcancem adequada soldabilidade. Embora se apresente como um processo relativamente simples, o que não o isenta de medidas assertivas, é importante ter em mente que para colocar a soldagem em prática exige-se alinhar o projeto partindo de uma série de conhecimentos necessários, definindo: a complexidade da estrutura a ser soldada, seu material e sua espessura; a aplicação; o tipo de ferramenta ou metal de adição; os parâmetros; procedimentos de inspeção e controle de qualidade (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2018).

No que se observa a evolução dos mais diversos processos de soldagem ao longo dos últimos séculos, é importante destacar que eles podem ser divididos conforme: a **fonte de energia** imposta, uma vez que todo e qualquer processo de soldagem necessita de meios de energia, sejam elas mecânicas, químicas, elétricas ou radiante para a materialização do resultado esperado; a **natureza da união** em que várias formas e/ou mecanismos são utilizados. Tendo esse entendimento, a soldagem conforme a natureza da união pode ser inicialmente classificada segundo dois grupos distintos: soldagem em estado sólido em que a união ocorre por meio de ação mecânica sem ocorrência de fusão da zona de solda; soldagem por fusão em que os materiais por meio de fusão e solidificação na linha de solda utilizando ou não metal de adição. A partir disso sendo todos subdivididos conforme suas atribuições e competências pertinentes. Essas classificações podem ser melhor entendida por meio da Figura 9.

Figura 9: Classificação conforme a natureza da união.



Fonte: (WAINER; BRAND; MELLO, 1992).

2.4.2 Soldagem do magnésio

Apesar de ser um processo relativamente simples ou de variadas aplicações, alguns materiais possuem características que devem ser melhor analisadas e/ou consideradas antes de coloca-las em prática. Diante disso, o desenvolvimento de novas metodologias de união tem surgido como alternativa aos processos convencionais em meio a crescente demanda por projetos de aplicações leves, como a utilização do Mg em partes estruturais de aeronaves e automóveis.

Isso tem ocorrido em meio a algumas características atreladas a soldabilidade deste tipo de material, uma vez que suas propriedades físicas implicam em determinados desafios a soldagem por fusão como é o caso da temperatura de vaporização do Mg que está em torno de 1100 °C, pois acaba sendo um problema na relação com o aporte de calor introduzido no metal de adição, podendo resultar na ocorrência de excessivos respingos durante a soldagem por fusão. Outro fator associado a baixa soldabilidade por processos convencionais diz respeito ao alto coeficiente de expansão térmica do Mg, provocando o surgimento de distorções e tensões

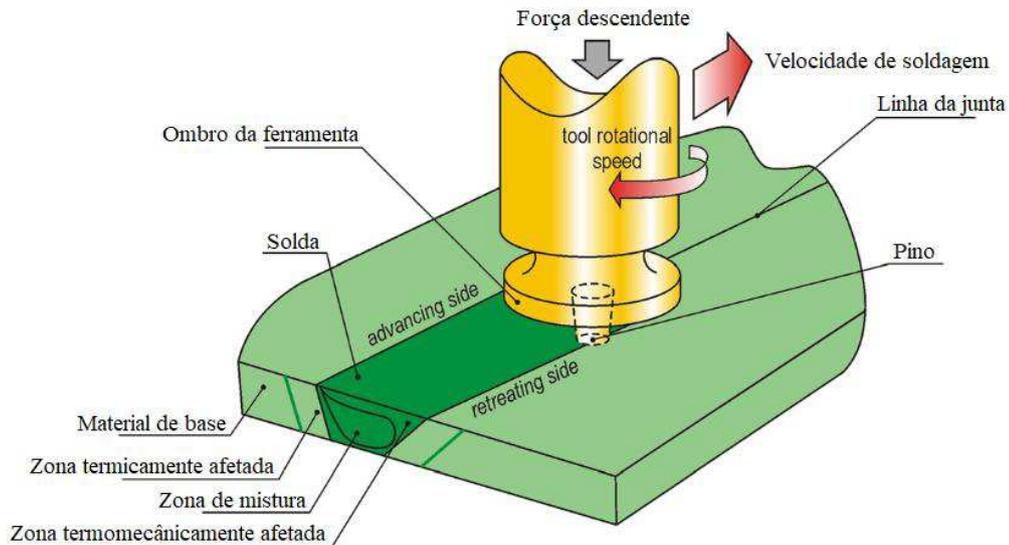
residuais (GALIYEV; KAIBYSHEV; GOTTSTEIN, 2001; GARCÍA, 2009) apud (SILVA, 2016).

2.5 PROCESSO *FRICTION STIR WELDING*

Pertencente ao grupo dos processos de soldagem em estado sólido, o *Friction Stir Welding* (Soldagem por Fricção e Mistura), corresponde a uma técnica derivada da união em estado sólido convencional – Soldagem por Atrito –, tendo sido desenvolvido e patenteado pelo *The Welding Institute* (TWI) na Inglaterra - Reino Unido, no ano de 1991, portanto, há três décadas, o que faz dessa técnica um processo considerado recente e de conceito básico relativamente simples. A partir de então tem sido modificado alguns comportamentos, paradigmas e realidades que envolviam a união de determinados metais e conseqüentemente abraçado por diversos setores industriais.

Esta técnica tem como princípio de funcionamento a conversão da energia mecânica em térmica pela ação de atrito entre a ferramenta de trabalho e o material a ser soldado (KOUADRI-HENNI; BARRALLIER; BADJI, 2016). Partindo desse princípio, no processo FSW uma ferramenta rotativa não consumível de diferentes configurações é inserida entre duas chapas a serem unidas até que o ombro toque a superfície do material a ser unido e avança continuamente ao longo da linha de junção pretendida (linha de solda). No que a ferramenta rotaciona em contato com o material a ser unido, gera-se calor localizado em decorrência do atrito (fricção) entre as partes envolvidas. Isso faz com que o material – peça de trabalho – seja amolecido e, então, pela ação mecânica de rotação do pino, ocorre um fluxo de material por ação de agitação em seu entorno (pino). Desta forma, o material das duas peças (chapas) de trabalho são misturados e transportados da frente para trás do pino sem necessidade de metal de adição à medida que a ferramenta avança continuamente produzindo a junta soldada em estado sólido (MISHRA, R. S.; MA, 2005). Na Figura 10 é possível observar uma representação ilustrativa de como se processa este método que tem ganhado interesse desde a sua concepção.

Figura 10: Representação esquemática do processo FSW.



Advancing side: Lado de avanço; **Retreating side:** Lado de recuo; **Tool rotational speed:** Velocidade rotacional da ferramenta.

Fonte: (KALEMBA-REC et al., 2018).

Inicialmente desenvolvido para unir ligas de alumínio, esta técnica passou também a ser amplamente utilizada posteriormente em ligas de magnésio, tendo em vista sua alta capacidade de superar características e/ou problemas nutridos de desafios atrelados aos processos convencionais quando da aplicação em ligas leves. Sendo altamente adequado e de grande potencial sua utilização e/ou aplicação para unir Al e Mg. Uma vez que o emprego deste tipo de soldagem atinge apenas um estado “pastoso” do material, ou seja, não ocorre fusão do material, chegando a aproximadamente 85% da temperatura de fusão ($0,8 T_f$) evitando situações e/ou características indesejáveis de comprometimento da junta soldada e consequente melhores propriedades e eficiência (SHAH et al., 2019).

Diante disso, ao ser empregado a técnica FSW são evitadas distorções, trincas, porosidades na solda, fragilização, redistribuição de soluto e demais características indesejáveis que estão associadas a re-solidificação dos métodos convencionais. Havendo também diminuição dos níveis de tensões residuais observados na junta soldada. Além disso, é possível obter juntas com propriedades e eficiência próxima do material de base (MB) (KUMAR RAJAK et al., 2020). Isso tem feito com que o FSW apresente um grande potencial promissor de inserção no setor industrial, em que vem abrangendo largamente o seu campo de atendimento (aplicacional) em todo o mundo, onde novas pesquisas têm sido desenvolvidas utilizando aços, metal de maior ponto de fusão e resistência.

Desta forma, o FSW revolucionou o campo da união de metais tidos como difíceis de serem soldados por métodos convencionais de forma relativamente simples e eficaz, em

especial o alumínio e suas ligas, considerados os principais protagonistas do desenvolvimento dessa recente técnica, incluindo outros metais não ferrosos, mas não se limitando ao magnésio, cobre e titânio. Estendendo-se recentemente a metais com temperatura e resistência altos como é o caso do titânio e do aço e suas ligas. Grande atenção também tem sido dada a união de metais e ligas dissimilares, uma vez que essa configuração tem relevância comercial e, era tida como uma união impossível (DAVIM, 2021).

Em meio a essas características, o FSW tem sido considerado dentro do campo da união de metais um desenvolvimento de significativa importância, sendo denominado de “tecnologia verde” devido ser energeticamente eficiente, ambientalmente amigável e versátil. Permitindo ainda consumir consideravelmente menos energia quando comparado aos processos convencionais (MISHRA; MA, 2005). Um outro fator interessante do FSW é que ele requer menos elementos para controlar, uma vez que nos métodos convencionais é requerido o controle de alguns parâmetros e/ou configurações como arame de alimentação, gás de proteção e fluxo, tensão e amperagem, gás de purga, abertura do arco elétrico, velocidade de deslocamento. Enquanto que no FSW requer apenas o controle da velocidade de soldagem, velocidade de rotação e pressão, sendo facilmente controlados e, claro, em menor quantidade (SINGH, 2012).

Como em qualquer processo e/ou atividade de desenvolvimento diverso existem os fatores que justificam (vantagens) a utilização de determinado mecanismo e os fatores que implicam e/ou limitam (desvantagens). Não sendo diferente, o FSW apresenta diversas vantagens que se sobressaem largamente em relação a algumas de suas desvantagens, que por se tratar de uma união em estado sólido já lhe garante automaticamente melhores condições em relação aos métodos convencionais quando se considera tanto a microestrutura da solda quanto o desempenho da junta, o que conseqüentemente proporcionou sua forte ascensão pela indústria.

Vantagens (DAVIM, 2021; KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2018):

- Excelentes propriedades mecânicas e metalúrgicas;
- Menor/baixa distorção contração e tensão residual (baixa entrada de calor);
- Eficiente energeticamente;
- Eficiência conjunta (relação junta soldada + metal de base);
- Pode ser empregado/operar em todas as posições (vertical, horizontal, etc.);
- Aumento/boa da vida em fadiga;
- Seguro e respeito(so) com o meio ambiente;

- Pode soldar materiais dissimilares;
- Utilização de ferramenta não consumível;
- Ausência de metal de adição;
- Excelente qualidade da solda.

Desvantagens (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2018; SINGH, 2012):

- Existência de orifício de saída e/ou de ejeção;
- Baixa flexibilidade;
- Velocidade de deslocamento/soldagem lento;
- Alto investimento inicial;
- Fixação rígida das peças de trabalho.

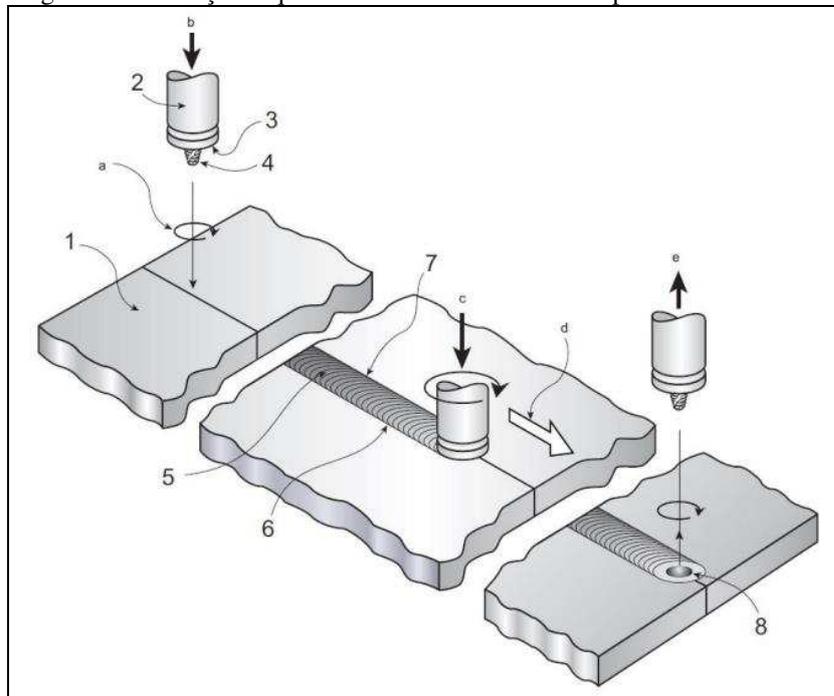
Tendo em vista os princípios básicos até aqui apresentados, a partir da próxima seção (parâmetros) será dado destaque aos mais diversos fatores e características que envolvem a execução prática e influência nos resultados obtidos por meio desta técnica. Desta forma, será dado ênfase aos principais parâmetros e mecanismos utilizados para tal. Junto a isso, um estudo do estado da arte se fará presente nas discussões da literatura. Sendo relatado as variadas formas em que se dispõe esses fatores, dando origem a algum tipo de resposta na microestrutura e consequentemente nas propriedades mecânicas da junta.

2.5.1 Parâmetros do FSW

Quando se fala em processo de soldagem FSW é interessante e importante que se tenha conhecimento dos parâmetros e de seu correto procedimento. Algo comum aos processos de soldagem compreende aos mais diversos parâmetros que possuem, fornecendo mecanismos necessários para o pleno desempenho e/ou execução da técnica. Não sendo diferente, no processo FSW são envolvidos alguns parâmetros particulares inerentes a solda que desempenham essencial importância. Exigindo-se conhecimento prévio para a adequada utilização, de maneira a proporcionar uma solda de boa qualidade. Tendo em vista o envolvimento de movimentos complexos de material e deformação plástica. Portanto, o resultado obtido representa uma combinação de interações envolvendo diferentes parâmetros, o que não se limita a fatos isolados (DAVIM, 2021).

Juntos os parâmetros exercem efeito no fluxo de material e na distribuição de temperatura contribuindo conseqüentemente na evolução microestrutural, e assim, definindo as características estruturais e mecânicas. A Figura 11 ilustra de maneira “realista” a utilização de determinados recursos e parâmetros, permitindo compreendê-los adequadamente. Estando descritos da seguinte forma: 1) peça de trabalho, 2) ferramenta FSW, 3) ombro, 4) pino, 5) face de solda, 6) lado de recuo da solda, 7) lado de avanço de solda, 8) orifício de saída, a) Direção de rotação da ferramenta, b) Movimento descendente da ferramenta, c) Força axial, d) Direção da soldagem, e) Movimento ascendente da ferramenta.

Figura 11: Ilustração esquemática do uso de recursos e parâmetros do FSW.



Fonte: (ERAMUS, 2017).

2.5.1.1 Velocidade de rotação

Responsável por grande parte da distribuição de temperatura, a velocidade de rotação desempenha significativa importância na entrada de calor, uma vez que alimentando a ferramenta FSW por meio do eixo da máquina ao injetar maior rpm, a junta a ser soldada vai experimentando maior intensidade de calor em decorrência do maior poder de atrito com o material a ser soldado. Mas não devendo se eximir da complexidade que envolve a relação com os outros parâmetros, pois o quão rápido o giro da ferramenta é submetido não significa necessariamente que proporcionou maior entrada de calor sem levar em consideração a

disposição dos outros parâmetros, principalmente a velocidade de soldagem e, o próprio contato da ferramenta com a superfície do material a ser soldado (DAVIM, 2021).

Quando se analisa a velocidade de rotação da ferramenta deve-se levar em consideração o conhecimento de algumas implicações a ela pertinente, a saber: em primeiro lugar, o aquecimento provocado pelo contato do ombro da ferramenta com a superfície do material a ser soldado é consideravelmente influenciado; em segundo lugar, a rotação da ferramenta tem efeito direto na agitação e mistura do material amolecido. Além de influenciar na propagação da Zona Termicamente Afetada (ZTA), este parâmetro depende do tipo de material e da espessura da chapa a ser soldada (DAVIM, 2021). No que acontece o contato friccional entre a ferramenta e a peça de trabalho, gerando-se calor, a velocidade de rotação afeta significativamente a deformação plástica, seguindo do fluxo do material e finalizando com a estrutura do grão do material na zona de solda (KUMAR RAJAK et al., 2020).

Corroborando com os conceitos literários, ao soldarem chapas de ligas de magnésio (KADIGITHALA; VANITHA, 2020; LIU et al., 2019a, 2019c; SERINDAG; KIRAL, 2017; SUCHARITHA; RAVI SANKAR; UMAMAHESWARAO, 2021; SUN et al., 2017) estudaram a influência das velocidades de soldagem e rotação e observaram que esses parâmetros desencadeiam uma grande significância na geração de calor, onde em maiores e menores velocidades de soldagem acabam diminuindo e aumentando a concentração de calor, respectivamente. Enquanto isso, maiores e menores velocidades de rotação concentram maior e menor calor, respectivamente, influenciando diretamente nos tamanhos de grão (microestrutura), formação ou não de defeitos e, conseqüentemente nas propriedades da junta. Em consequência do efeito que cada um em específico acaba proporcionando. Destacando ainda que em relação ao design e geometria da ferramenta, observa-se não só a influência na geração de calor, mas também no grande papel desempenhado na deformação e mistura do material, resultando em aquecimento localizado e fluxo de material como as suas duas principais funções.

2.5.1.2 Velocidade de soldagem

Este parâmetro desempenha assim como a velocidade de rotação um papel fundamental para a plena execução do processo. Apresentando características similares em relação a temperatura, mas neste caso em específico a influência é inversamente proporcional. Desta forma, os graus de deslocamento e rotação andam juntos na determinação do aporte térmico.

Mesmo diante desses pontos há a necessidade de se compreender eventualmente suas interações com os demais parâmetros.

Conforme a própria nomenclatura deste parâmetro já sugere (auto explicativo), o tempo necessário para finalização (transcorrer a linha de junção) das juntas soldadas irá depender do nível de velocidade aplicado. Nisso, a medida que aumenta-se ou diminui essa velocidade, o tempo de execução é menor e maior, respectivamente. Alta velocidade combinada com baixa entrada de calor – com baixo amolecimento de material – poderá causar o comprometimento da vida útil da ferramenta em decorrência da necessidade de grande esforço.

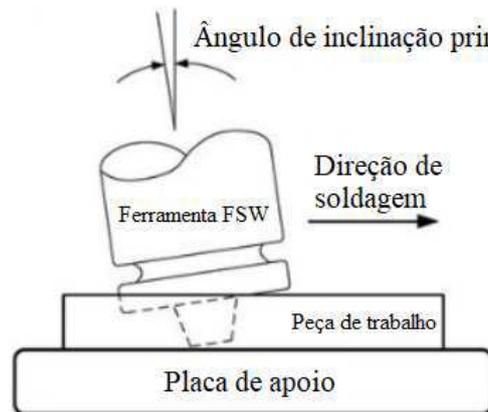
Como uma de suas principais funções, o deslocamento da ferramenta é responsável por realizar o movimento do material agitado da frente (borda de ataque) para trás (borda de fuga) do pino, ou seja, é responsável por acomodar o material (MISHRA; MA, 2005). Para que o deslocamento da ferramenta ao longo da linha de solda ocorra de maneira “confortável” é necessário que se dê condições favoráveis a temperatura do material para o adequado amolecimento do material (ERAMUS, 2017). Essas condições são permitidas através das velocidades de soldagem e rotação da ferramenta, garantindo mecanismos favoráveis para o fluxo do material, redução de forças atuando na ferramenta, bem como o bom desenvolvimento das propriedades metalúrgicas e mecânicas desejadas (DAVIM, 2021).

2.5.1.3 Inclinação da ferramenta

Exercendo significativa importância e influência nas características da junta soldada, o ângulo de inclinação da ferramenta compreende ao espaço formado pela linha central da ferramenta em relação a da superfície da chapa a soldar, resultando em uma inclinação para trás (sentido inverso ao de soldagem) da ferramenta, conforme é possível observar na Figura 12 uma ilustração esquemática da projeção inclinada da ferramenta no momento de soldagem.

Para situações de ombros da ferramenta sem características (superfície de ombro lisa), a inclinação para trás faz com que se crie maior espaçamento na linha de frente da ferramenta e, pelo pressionamento seja promovido um forjamento do material na parte de trás do ombro por trás do pino, permitindo que seguramente o material agitado seja contido pelo ombro a partir de uma inclinação adequada. Um maior pressionamento provoca o aumento de força axial e calor gerado o que conseqüentemente influencia na plastificação e mistura mais adequada. Enquanto o menor resulta em juntas com defeitos ao longo da linha de solda (DAVIM, 2021).

Figura 12: Ilustração esquemática da inclinação da ferramenta FSW.



Fonte: Adaptado de (ERAMUS, 2017).

2.5.1.4 Profundidade de mergulho

A profundidade de mergulho também conhecida por profundidade de inserção ou mesmo penetração da ferramenta exerce considerável importância na formação da junta soldada, uma vez que este parâmetro acaba influenciando na intensidade de força axial introduzida no processo. Este parâmetro consiste no quanto o ombro da ferramenta penetra no material a ser soldado em relação a sua superfície de contato com o ombro. Um fator importante a ser destacado e/ou observado neste caso, refere-se a não permitir que esse mergulho faça com que o pino da ferramenta ultrapasse a superfície inferior da peça de trabalho, pois do contrário acabará soldando junto a base de apoio das chapas.

Uma força vertical suficiente para garantir a geração de calor é proporcionado pela profundidade de mergulho (DAVIM, 2021). Ao promover uma maior penetração, a pressão abaixo da superfície da ferramenta aumenta, isso permite que uma penetração suficientemente adequada garanta adequado forjamento do material na parte traseira da ferramenta, quanto para que o pino penetre completamente na solda (SINGH, 2012). Além disso o que se observa são dois casos extremos importantes de conhecer com consequentes características: o primeiro caso refere-se a baixa penetração e/ou insuficiente, fazendo com que o ombro da ferramenta não atinja a superfície da chapa suficientemente, de modo que, auxilie na movimentação do material, gerando soldas com defeitos como canal interno ou sulco de superfície (aspectos irregulares); o segundo caso refere-se ao mergulho excessivo que nesta condição promove um afundamento significativo da linha de solda em relação ao material de trabalho. Além disso, em caso de ombros de ferramenta suaves, a profundidade de mergulho é importante para produzir

soldas sólidas (MISHRA; MA, 2005). Isso demonstra a necessidade de realizar um ajuste correto da penetração no anseio de obter soldas com ausência de defeitos tipo vazio.

2.5.1.5 Força axial

Este parâmetro é mais um que se encontra junto daqueles de relevante importância, exercendo esse papel juntamente com a profundidade de mergulho. Consistindo na força que é exercida sobre a superfície superior do material de trabalho por meio do eixo da ferramenta rotacional. (ALMEIDA, 2015) relataram que não só o aumento na pressão é promovido, mas que a força axial também torna o contato do ombro da ferramenta com o material a soldar melhor.

Diante da relevante influência, a força axial atinge características importantes da junta soldada, o que é o caso da formação de imperfeições, tamanho de grão na zona de solda e na dureza da solda na zona de mistura (ZM) (KUMAR RAJAK et al., 2020). Uma outra característica importante é a sua relação com a profundidade de mergulho, uma vez que são diretamente proporcionais. Desta forma, ao aumentar essa força terá um maior aprofundamento do ombro da ferramenta (DAVIM, 2021). Nisso, as complicações descritas na seção da profundidade de mergulho em relação ao contato inadequado, se enquadra também neste caso, onde uma força insuficiente origina distribuições inadequadas de material com presença de defeitos e, por consequência, má qualidade da solda.

2.5.1.6 Projeto da ferramenta

Diante da significativa importância desempenhada por este parâmetro, a literatura acaba na maioria das vezes abordando-a de maneira separada dos outros devido a magnitude de abrangência e alto grau de influência, assim descrevendo-os melhor. Já que consiste em um conjunto de características associadas à ferramenta, indo desde os perfis de pino ao ombro, formando o que se chama de geometria e design da ferramenta. Baseado nisso, esses “aspectos” são algo que estão intrínsecos ao processo FSW, sendo grande responsável por manter a qualidade da solda.

Algo importante de ser mencionado antes de tudo, é a garantia que o desenho atribuído a ferramenta se confirmará a partir de seu desenvolvimento, uma vez que é esse projeto que irá determinar a quantidade de solda que será realizada com apenas uma ferramenta, isto é, sem necessidade de troca por desgaste ou mesmo rompimento. O projeto da ferramenta é

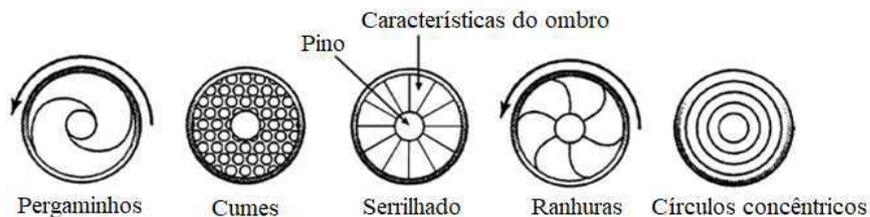
responsável por assegurar a uniformidade da microestrutura e consequentes propriedades, como também as cargas envolvidas no processo (MISHRA; MA, 2005).

Características como geração de calor, fluxo de material, ação cisalhante por ação do pino e, consequentes mudanças nas propriedades em decorrência da mistura proporcionada pelo pino são influenciados (KALEMBA-REC et al., 2018). Diante disso, será realizado uma breve abordagem acerca das geometrias do ombro e do pino da ferramenta que juntos desempenham papéis fundamentais e, correspondem aos parâmetros associados a ferramenta. Neste sentido, características como superfície e diâmetro do ombro, a forma, o tamanho, a natureza da superfície da ferramenta e a geometria do pino atuam na qualidade da solda (DAVIM, 2021).

2.4.1.6.1 Geometria do ombro

O ombro da ferramenta exerce grande influência na geração de calor, uma vez que corresponde a parte que acaba entrando em contato direto com a peça a soldar. Portanto, atuando significativamente em sua superfície e imediações. Existem diversas formas de superfície de ombro, conforme se observa na Figura 13. Dentre essas formas, o ombro de superfície plana apresenta certa inferioridade por não conseguir reter o material plastificado dentro da zona de solda em relação aos demais criando condições para formação excessiva de rebarba do material. Fazendo com que seja adotado determinada inclinação da ferramenta para melhor controle do material em casos de superfície plana (DAVIM, 2021). Diante de seu alto nível de influência, do total de calor produzido na junta, cerca de 80 a 90 % é de contribuição do ombro (DAVIM, 2021).

Figura 13: Ilustração de diferentes geometrias do ombro da ferramenta vistas a partir da parte inferior.



Fonte: Adaptado de (ZHANG et al., 2012).

Em vista disso o seu diâmetro exerce um relevante grau de importância, pois é responsável por manter e gerar maior parte do calor. Atuando no controle do campo de fluxo de material ao está em contato com materiais plastificados (KUMAR RAJAK et al., 2020). Um outro fator interessante em torno do diâmetro do ombro é que ele é determinado conforme

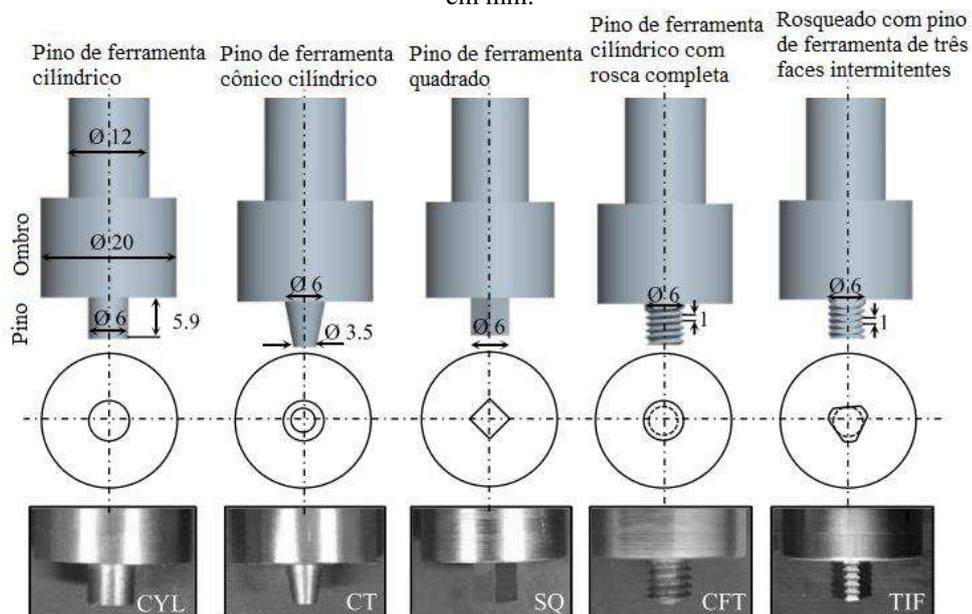
espessura do material a ser soldado, uma vez que, por exemplo, maior diâmetro aumenta a área de atrito. Tendo em vista que, maior espessura vem a necessidade de maior calor, visando o amolecimento adequado do material (DAVIM, 2021).

2.5.1.6.2 Geometria do pino

Corresponde a uma característica fundamental da ferramenta, bem como do processo como um todo. Uma característica importante de ser destacada é que o pino não só tem início partindo do ombro da ferramenta, como possui comprimento ligeiramente menor que a espessura total da peça de trabalho. Assim como ocorre no caso do ombro, diferentes configurações de pino podem ser utilizadas, conforme se observa na Figura 14.

Tendo o ombro como principal contribuinte na geração de calor, no caso o pino corresponde a um percentual de 10 a 20% aproximadamente. Conforme mencionado, o seu comprimento é menor em relação a espessura da chapa. Um fator para tal justificativa corresponde ao fato de o amolecimento do material ocorrer até determinado ponto além da ponta do pino. Além disso, possui relações proporcionais ao ombro, onde se considera que o diâmetro do pino deve possuir $\frac{1}{3}$ do diâmetro do ombro (DAVIM, 2021). A parte integrante desta geometria localiza a geração de calor e por efeito de agitação governa o fluxo de material (KUMAR RAJAK et al., 2020).

Figura 14: Ilustração esquemática de diferentes geometrias de perfis do pino da ferramenta FSW com dimensões em mm.



Fonte: Adaptado de (GARG; RATURI; BHATTACHARYA, 2019).

Para produzir uma solda de boa qualidade é necessário que a temperatura do material envolvendo a ferramenta esteja em condições adequadas para correto fluxo e mistura do material a soldar. Do contrário, uma temperatura inadequada com níveis abaixo do esperado pode contribuir para o surgimento de vazios ou outras falhas na zona de agitação da junta, bem como em casos mais extremos, a ferramenta pode vir a romper. Uma vez que será exigido maior esforço de atuação da ferramenta e conseqüente comprometimento de sua vida útil. Analisando pelo outro extremo, as propriedades finais da junta também podem ser comprometidas pelo calor excessivo. Tendo em vista essas características, dentro desse range há uma faixa de parâmetros que produzirá soldas de boa qualidade, em que será gerado calor suficiente para adequada plasticidade do material (SINGH, 2012). Assim sendo, não existe uma predeterminação das velocidades de soldagem e rotação ideais a ser utilizado, tendo em vista que uma série de fatores estão envolvidos.

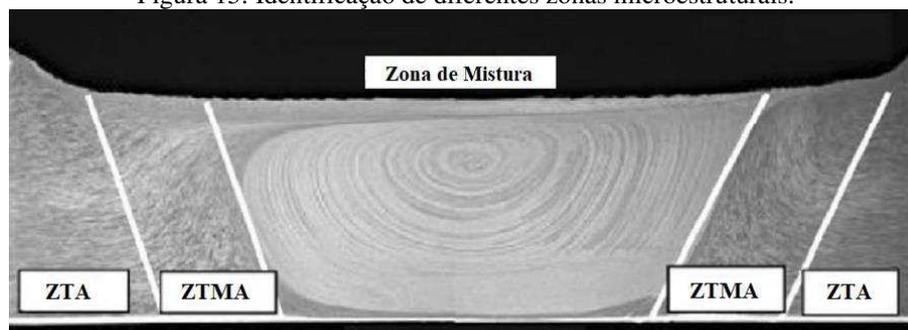
2.5.2 Microestrutura

A formação microestrutural dar-se-á mediante diferentes trabalhos mecânicos e térmicos, no qual a soldagem FSW está inserida ao trabalhar com distintos níveis de ação mecânica e temperatura capazes de desenvolver comportamentos específicos na junta soldada. Como conseqüência de suas atribuições (parâmetros), principalmente a velocidade de rotação e avanço e geometria da ferramenta, o processo FSW possui características específicas em relação a sua microestrutura, tendo como resultado uma formação microestrutural não homogênea, ou seja, as ações mecânicas e térmicas no transcorrer do processo acabam resultando em distintas formações microestruturais. Tendo isso como base, diferentes zonas são identificadas, que são, do centro da solda ao material de base conhecidas da seguinte maneira: Zona Misturada (ZM), Zona Termomecanicamente Afetada (ZTMA), Zona Termicamente Afetada (ZTA) e por fim o Metal de Base (MB). Na Figura 15 é possível observar a formação dessas regiões formadas no processo FSW.

A Zona de Mistura especificada simplesmente por ZM, corresponde a região central da solda e, como a própria nomenclatura já dá esse entendimento, é nela que ocorre a plena mistura do material plastificado. Com isso, a ZM sofre influência direta do pino da ferramenta, ocorrendo um intenso fluxo de agitação combinado com alta temperatura experimentada, proporcionando que essa região sofra um processo de recristalização completamente dinâmica, permitindo um grande refinamento dos grãos, o que conseqüentemente exercerá forte atuação nas propriedades da junta. Tem sido observado por diferentes autores que a ZM apresenta

modificações distintas conforme os graus de temperatura experimentados pela junta. Nesse contexto, relatam que em menores níveis de aporte térmico o a ZM se constitui com aspecto semelhante ao perfil do pino da ferramenta de trabalho, enquanto isso, tem sido observado um alargamento desta região em condições de temperatura mais elevada. Somado a isso, significativo poder de refinamento tem sido observado nessa região (MIRONOV; SATO; KOKAWA, 2019; QIN; LI; ZHENG, 2020; ZHANG et al., 2020a).

Figura 15: Identificação de diferentes zonas microestruturais.



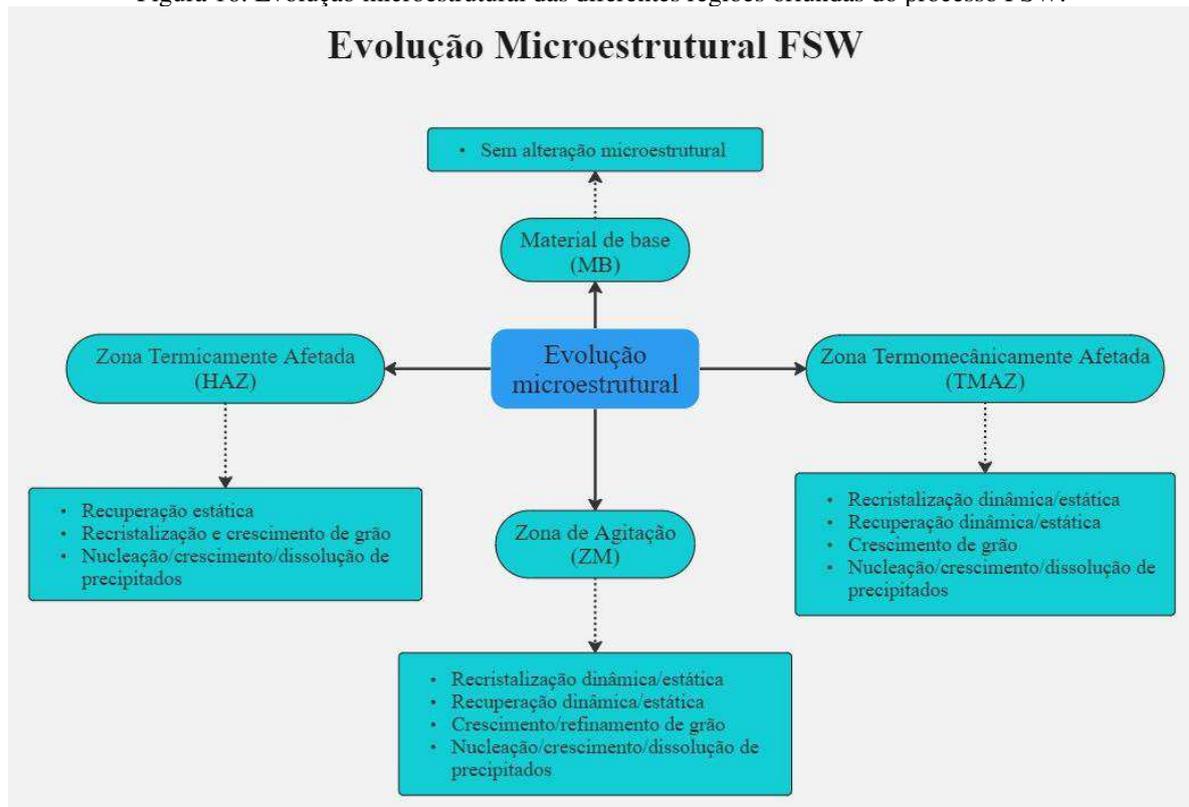
Fonte: Adaptado de (ERAMUS, 2017).

A Zona Termomecanicamente Afetada está situada nas extremidades da ZM, possuindo uma região e/ou área bem estreita. Diferentemente do que ocorre na ZM, esta zona tem a característica de apresentar grãos um pouco maiores e alongados, pois a intensidade de ação mecânica e térmica são menores, o que acaba impossibilitando uma ação completa de recristalização dinâmica. O alongamento experimentado por esta região segue a mesma direção do sentido de orientação do giro da ferramenta (pino).

A Zona Termicamente Afetada corresponde a aquela em que se observa a ausência de ação mecânica e, apenas se experimenta efeito térmico, o que conseqüentemente acaba proporcionando um ligeiro crescimento dos grãos, comprometendo as propriedades. Tendo a característica de também ser uma região estreita.

Dentro dessas perspectivas microestruturais identitárias cabe destacar que a interface ZM/ZTMA possui características particulares em ambos os lados da junta ocorrendo uma variação considerável. Com base nisso, essa região se apresenta de forma bem nítida no lado de avanço, enquanto isso, é exibida de forma difusa no lado de recuo da junta. Isso ocorre devido a formação microestrutural da ZM para ZTMA se distinguir com mudança momentânea na região do lado de avanço, enquanto isso no lado de recuo a mudança tem microestrutura variada (ERAMUS, 2017; MISHRA; MA, 2005). Na Figura 16 encontra-se exemplificado o que acontece em cada região em termos de microestrutura da junta.

Figura 16: Evolução microestrutural das diferentes regiões oriundas do processo FSW.



Fonte: Adaptado de (MISHRA; DE; KUMAR, 2014b).

O Material de base fica na parte mais distante do cordão de solda, correspondendo a região não atingida pelos efeitos da soldagem. Embora apresente variações em níveis de temperatura, isso por si só não é capaz de modificar a microestrutura e propriedades mecânicas. Portanto, as características originais do material permanecem preservadas.

Tendo em vista que essas modificações na microestrutura implicam no comportamento mecânico, as propriedades da junta sofrerão influência como consequência das características vinculadas a cada região em termos de tensão residual, distribuição e tamanho dos precipitados e tamanhos de grão (SINGH; SINGH; SINGH, 2018).

No intuito de estudar o comportamento e desenvolver técnicas que possibilitem a mitigação dessas diferenças microestruturais vivenciadas na formação de junta FSW (DANIEL; LAKSHMINARAYANAN, 2021; LIU et al., 2019b; ROUHI; MOSTAFAPOUR; ASHJARI, 2016) submeteram alguns tipos de liga de Mg ao FSW submerso em água sob temperatura ambiente e aquecida – 15 a 75 °C – de forma que obtivessem uma resposta em relação ao FSW convencional. Nesse contexto, foi observado grãos menores no primeiro caso, uma vez que foi proporcionado um maior controle sobre a taxa de resfriamento, significando limitar o tempo necessário para o grão crescer, consequentemente mitigando o crescimento dos grãos, enquanto

no segundo caso observou-se maiores tamanhos de grão devido a taxa de resfriamento mais lenta.

A junta soldada proveniente do processo FSW é separada em dois lados distintos. Portanto, o lado de avanço é aquele em que o giro da ferramenta segue o mesmo sentido de avanço e que marca o início do deslocamento do material plastificado, enquanto que o lado de recuo corresponde a aquele em que a rotação da ferramenta é contrária ao sentido de avanço, sendo também o local em que o material é depositado, conforme ilustrado anteriormente na Figura 10.

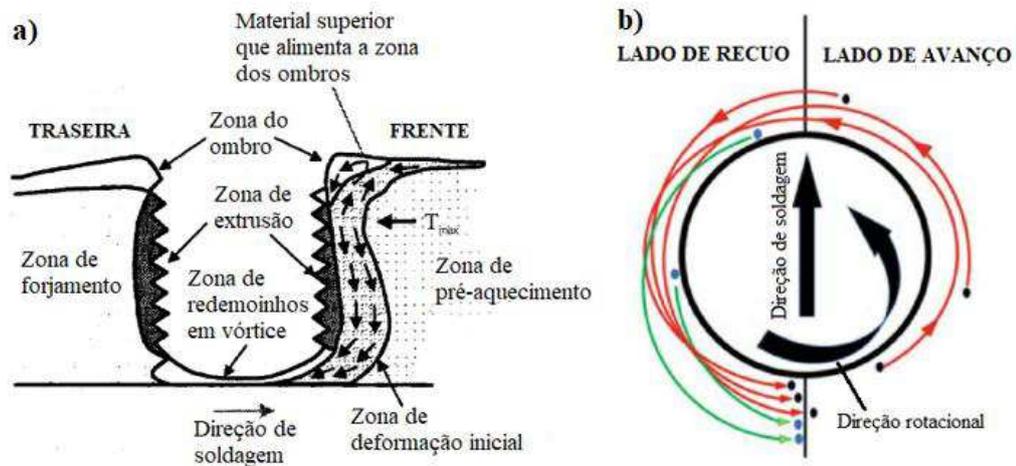
2.5.3 Mecanismos de união e fluxo de material

O fluxo de material é caracterizado por um fenômeno de união plástica de material no processo FSW que apresenta significativa complexidade na compreensão de suas características, sendo pertinente buscar o entendimento dos diversos fatores que o influenciam. Nesse contexto, o fluxo de material depende fortemente de condições impostas ao processo. Com base em análise de vários estudos sobre este fenômeno no processo FSW, (MISHRA; MA, 2005) relatam que este fenômeno no processo FSW não é simples e, de compreensão limitada em termos de deformação, uma vez que diversos fatores influenciam o fluxo de material durante o FSW, sendo eles: projeto da ferramenta, tipo de material utilizado e condições termomecânicas experimentadas e parâmetros do processo (BAG; YADUWANSI; PAL, 2014).

Através de uma ilustração esquemática apresentada na Figura 17a é possível compreender melhor o que está por trás do que acontece durante a movimentação do material plastificado na região de solda. Nela, se observa que, seguindo a direção de soldagem, inicialmente o material sofre um pré-aquecimento promovido pelo atrito com a ferramenta que avança, somado a isso, uma temperatura crítica é atingida pelo material formando uma região de deformação inicial, permitindo que o fluxo de material aconteça, sendo forçado tanto para a parte superior na região do ombro da ferramenta quanto para baixo na região de extrusão. Uma pequena quantidade desse material é posto logo a baixo do pino na região em que redemoinhos em vórtices acontecem. Imediato à região de deformação tem-se uma pequena zona de extrusão em que o material se desloca ao redor do pino da frente para trás. Em seguida localiza-se a região de forjamento, cujo material foi deslocado da frente da ferramenta para ocupar a cavidade deixada pelo pino em movimento, sendo restringido pelo ombro, o qual também aplica uma força de forjamento descendente. O material localizado na região do ombro se desloca do

lado que recua para o avanço. Finalizando tem-se a região de pós aquecimento e/ou resfriamento, em que o material esfria naturalmente ou de maneira forçada. Portanto, o processo FSW pode ser dividido em cinco regiões, a saber: zona de pré-aquecimento, zona de deformação inicial, zona de extrusão, zona de forjamento e zona de pós aquecimento (MISHRA; MA, 2005).

Figura 17: a) Padrão de fluxo de material e b) Vista superior a baixo do ombro mostrando por meio de linhas vermelhas (lado de avanço) e verdes (lado de recuo) o fluxo de material ao redor do pino.



Fonte: Adaptado de (MISHRA; MA, 2005) e (CHOUDHARY; JAIN, 2021).

Na Figura 17b é possível observar uma ilustração esquemática demonstrando o fluxo de material por meio de linhas rotacionais ao redor do pino. Portanto, grande parte do material agitado em torno do pino é oriundo da região de avanço e, juntando-se com o material do lado de recuo que é arrastado pelo pino, é depositado atrás do pino seguindo a direção da região de recuo, preenchendo o espaço deixado pelo deslocamento para frente da ferramenta enquanto faz um movimento circular em forma de arco (CHOUDHARY; JAIN, 2021).

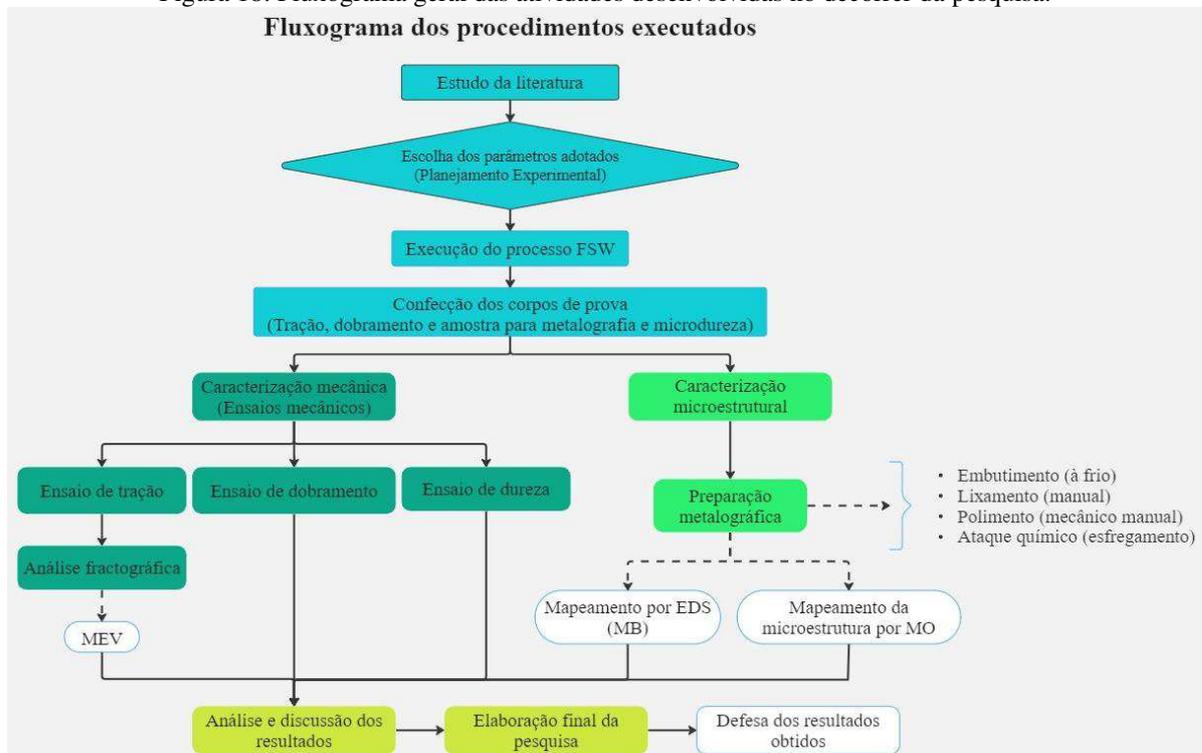
Desta forma, o fluxo de material acontece sob efeito combinado de movimento relativo entre a ferramenta e a peça de trabalho, fluxo de material plastificado ao redor da ferramenta e movimentação do pino, onde o material o acompanha e/ou é arrastado (BAG; YADUWANSHI; PAL, 2014). As características de fluxo de material mencionadas são comuns durante o processo independentemente da estrutura cristalina do metal considerado (KUMAR; SU; MISHRA, 2011). Tendo em vista a esquematização e exemplificação de como o material se comporta durante a passagem da ferramenta no momento da soldagem, demonstra que o material agitado é transferido principalmente ao longo do lado de recuo.

3 MATERIAIS E METÓDOS

Tendo em vista a necessidade de se construir um arcabouço da literatura no que tange o assunto específico da dissertação, foi realizada uma revisão bibliográfica acerca do processo FSW com ligas de magnésio, que serviu como fundamentação de parte da escrita da dissertação.

Dito isso, se buscou percorrer um caminho e/ou método direcionado nos procedimentos adequados a serem trabalhados, com foco no melhor desenvolvimento possível de todo o andamento da pesquisa que será descrito no decorrer deste trabalho. Esses procedimentos e/ou percurso consistiram em levantamento bibliográfico acerca do próprio material em si e do processo de estudo do presente trabalho, como descrito anteriormente. Após o levantamento da literatura realizou-se toda a parte experimental envolvida (soldagem, confecção de corpos de prova, análise e discussão dos resultados obtidos), ou seja, o passo a passo desde a concepção dos dados bibliográficos até o resultado final das juntas soldadas. Sendo descrito em maior riqueza de detalhe ainda dentro desta seção as atividades acadêmico/científico. Através da ilustração na Figura 18 são demonstradas as etapas realizadas por meio de um fluxograma.

Figura 18: Fluxograma geral das atividades desenvolvidas no decorrer da pesquisa.



Fonte: Autoria própria.

3.1 PLANEJAMENTO FATORIAL

Com base no levantamento feito a partir da literatura, foi possível realizar um dimensionamento das condições impostas – parâmetros – ao processo juntamente com seus níveis adotados, ou seja, envolveu uma análise exploratória da literatura. Onde, conforme a observância desses níveis, adotou-se uma determinada faixa – range – de uso dos parâmetros aqui determinados para análise do estudo, conforme é possível observar na Tabela 6. Procurou-se adotar valores fora dos extremos máximos e mínimos observado, ou seja, a escolha dos parâmetros se deu em uma região central daquele range observado na literatura, viabilizando, desta forma, as condições necessárias para desenvolvimento do planejamento experimental a ser adotado, como parte dos métodos de interesse da pesquisa. A velocidade de rotação e de soldagem, o ângulo de inclinação da ferramenta e a penetração do ombro da ferramenta foram os parâmetros adotados para análise do estudo, por serem de influência considerável no processo, principalmente os dois primeiros mencionados.

Tabela 6: Intervalo de uso dos níveis dos parâmetros analisados.

Parâmetros	Unidade	Níveis	
		(-)	(+)
Velocidade de rotação	rpm	560	1170
Velocidade de soldagem	mm/min	41	95
Ângulo de inclinação da ferramenta	(°)	1	3
Penetração do ombro da ferramenta	mm	0.1	0.3

Fonte: Autoria própria.

Onde:

(-) – Nível mínimo adotado dentro do intervalo de uso;

(+) – Nível máximo adotado dentro do intervalo de uso; e,

Como o número de parâmetros utilizados e/ou estudados corresponde a um total de 4 variáveis, seria necessário um número de experimentos bem superior ao executado em condições de 2 ou 3 parâmetros por exemplo e, assim demandando também uma maior quantidade de material. Devido a isso, optou-se por um planejamento experimental fatorial fracionário, conforme observa-se na Tabela 7. Portanto, o planejamento fracionário foi utilizado devido a possibilidade de conseguir obter ótimos resultados diminuindo o número de experimentos sem a necessidade de diminuir a quantidade de variáveis.

Tabela 7: Matriz de planejamento experimental fatorial fracionário.

Matriz de Planejamento								
Experimentos	Variável 1	Variável 2	Variável 3	Variável 4				
1	(-)	560	(-)	41	(-)	1	(-)	0.1
2	(+)	1170	(-)	41	(-)	1	(+)	0.3
3	(-)	560	(+)	95	(-)	1	(+)	0.3
4	(+)	1170	(+)	95	(-)	1	(-)	0.1
5	(-)	560	(-)	41	(+)	3	(+)	0.3
6	(+)	1170	(-)	41	(+)	3	(-)	0.1
7	(-)	560	(+)	95	(+)	3	(-)	0.1
8	(+)	1170	(+)	95	(+)	3	(+)	0.3

Fonte: Autoria própria.

Sendo:

Variáveis = Parâmetros;

Variável 1 – Velocidade de rotação da ferramenta (rpm);

Variável 2 – Velocidade de soldagem (mm/min);

Variável 3 – Ângulo de inclinação da ferramenta (°); e,

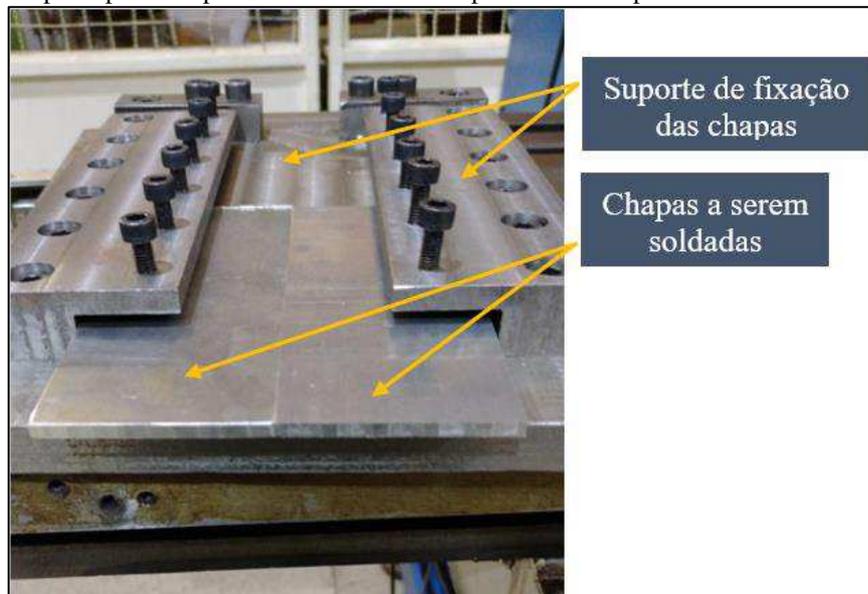
Variável 4 – Penetração do ombro da ferramenta (mm). Os níveis (+ e -) desta variável corresponde a interação dos níveis das outras três variáveis, ou seja, variável 4 = 123, ou seja, não corresponde a interação das outras três variáveis, mas sim, a interação de seus níveis. Desta forma, ao extrair o experimento 1 como exemplo, tem-se que, a interação do nível negativo da variável 1 com o nível negativo da variável 2 corresponde a um sinal positivo, mas esse sinal positivo quando interagido com a variável 3 negativa resulta em um sinal negativo. Portanto, ficando a quarta variável com sinal negativo.

3.2 CONFECÇÃO DE PROTÓTIPO DE FIXAÇÃO

Partindo do princípio no que diz respeito a parte prática em si da pesquisa, se buscou um método de melhor fixação das chapas na máquina em que foram realizadas a soldagem. Para isso, foi desenvolvido um protótipo de fixação a partir de uma adaptação de (GIPIELA; MARTINS, 2015) para que essas chapas não se desprendam no momento do passe de soldagem em que a ferramenta é introduzida entre uma chapa e outra, evitando assim, que haja um desprendimento em decorrência desse esforço exercido entre ambas. Portanto, o dispositivo foi confeccionado a partir de um aço 1020 por meio de processo de usinagem, utilizando uma fresadora universal de marca Stmac e modelo STF 5000V, localizada no laboratório de

usinagem e tornearia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Campus Cedro, conforme é possível observar na Figura 19.

Figura 19: Suporte pronto representando como as chapas ficaram dispostas no momento da soldagem.

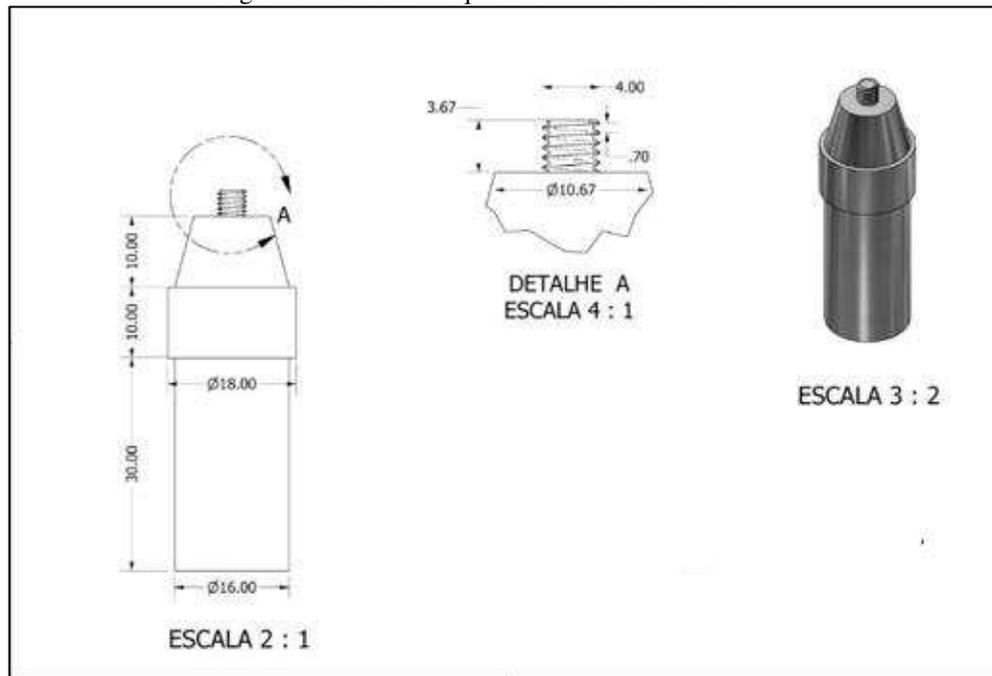


Fonte: Autoria própria.

3.3 PROJETO E FABRICAÇÃO DA FERRAMENTA FSW

Em relação a ferramenta FSW, mecanismo de suma importância para o desenvolvimento do processo de soldagem por fricção, foi realizado o seu desenho técnico para posterior confecção, conforme se observa na Figura 20. A mesma, foi confeccionada por meio de processo de usinagem em um torno CNC de marca Sinitron, localizado no laboratório do IFCE, Campus Cedro. Na Figura 21 é possível observar a imagem da ferramenta produzida a partir de aço H13 após usinada. A configuração de geometria do perfil da ferramenta corresponde a um pino de ferramenta cilíndrico rosqueado.

Figura 20: Desenho esquemático da ferramenta FSW.



Fonte: Autoria própria.

Figura 21: Ferramenta FSW utilizada no processo.



Fonte: Autoria própria.

Após isso, mesmo com todos os procedimentos anteriormente mencionados estando ajustados, um processo complementar de significativa importância foi realizado para adquirir melhor resistência e consequente durabilidade do aço ferramenta H13. O procedimento

consistiu em um tratamento térmico de têmpera em forno de atmosfera controlada, chegando a atingir uma temperatura em torno de 1050 °C em duas etapas realizando-se um pré-aquecimento até uma temperatura de 800, sendo na sequência aquecida até a temperatura final e posteriormente resfriada. Após o tratamento de têmpera a peça foi submetida a um revenimento até temperatura em torno de 600 °C. Tanto a têmpera quanto o revenimento foram realizados ao ar forçado.

3.4 SOLDAGEM DAS CHAPAS

O material de base envolvido neste trabalho corresponde a uma liga de magnésio de classificação AZ31B. Sua composição química nominal juntamente com alguns valores de propriedades mecânicas encontra-se especificadas resumidamente na Tabela 8, segundo o metals handbook (HOUSH; MIKUCKI; STEVENSON, 1990).

Tabela 8: Composição química e propriedades mecânicas do metal de base.

Composição química										
Material	Al	Zn	Mn	Fe	Cu	Ni	Si	Ca	Outros	Mg
AZ31B	2.5-3.5	0.6-1.4	0.2 min	0.005 máx	0.05 máx	0.005 máx	0.1 máx	0.04 máx	0.3 máx	Balance
Propriedades mecânicas			TS		YS		El			
			270 MPa		180 MPa		15%			

Fonte: (HOUSH; MIKUCKI; STEVENSON, 1990).

As chapas foram preparadas – cortadas – em uma máquina serralheira, localizada também no laboratório do IFCE – Campus Cedro. As chapas foram cortadas formando dimensões equivalentes a 60 x 150 x 4 mm, ficando com 120 x 150 x 4 mm com a junção das duas para procedimento de soldagem (formação da junta soldada).

Antes de descrever a execução da soldagem propriamente dita, foi realizado um sorteio aleatório para definir a sequência dos experimentos a serem executados, ou seja, para seguir uma sequência que não necessariamente seria aquela descrita indiretamente pelo planejamento experimental (Ex. 1, 2, 3...) ou utilizando o máximo de experimentos com parâmetros o mais semelhante possível. Desta forma, os experimentos de soldagem seguiram a seguinte sequência: 3, 8, 6, 2, 7, 4, 5 e 1, conforme número correspondente do experimento descrito na matriz de planejamento experimental na Tabela 7.

Finalizados todos os pré-requisitos ou procedimentos necessários (análise da literatura, cortes de chapa e preparação da ferramenta) a execução da soldagem FSW foi então colocada

em prática, com conseqüente formação de juntas com diferentes configurações, conforme descrito anteriormente ao longo desta seção. Para isso foi utilizado uma máquina fresadora universal de três eixos de marca Diplomat e de modelo FU 360, localizada no laboratório supracitado do IFCE – Campus Cedro. Na Figura 22 está apresentado como se realizou o processo de soldagem. Podendo ser observado as chapas devidamente fixadas e a ferramenta passando ao longo da linha de solda realizando a soldagem.

Figura 22: Figura esquematizando a penetração do pino (momento da soldagem).



Fonte: Autoria própria.

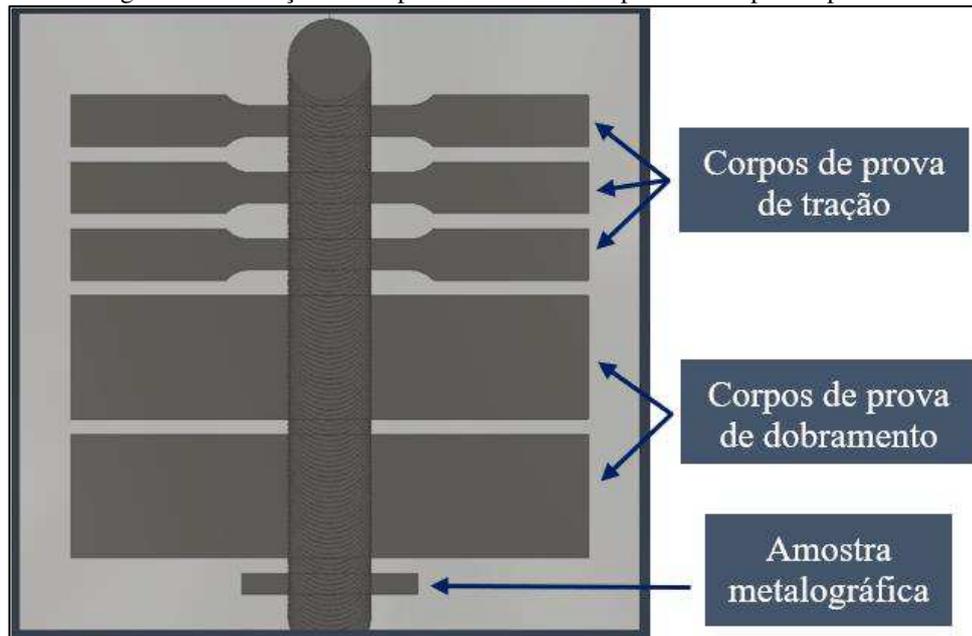
A medida em que a soldagem era executada, as juntas iam sendo devidamente identificadas e registradas, com o número do experimento correspondente ao planejamento experimental e, indicando o lado de avanço e recuo. Em seguida as regiões da solda passaram por um faceamento para retirada do excesso de flash (rebarbas) oriunda do processo em decorrência do calor e penetração da ferramenta.

3.5 OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Após conclusão da soldagem deu-se início ao processo de confecção dos corpos de prova (CP's) a partir das juntas soldadas, extraíndo delas (juntas) corpos de prova de tração, de dobramento e amostra para análise metalográfica, conforme será descrito com maior riqueza de detalhes posteriormente ao longo desta seção. Para a retirada desses espécimes por usinagem

utilizou-se uma máquina de Controle Numérico Computadorizado (CNC) de marca Romi e modelo Discovery 400. O modelo ilustrativo dos CP's encontra-se representados na Figura 23. As dimensões devidamente registradas dos (CP's), conforme especificações determinadas pela norma aplicável, encontram-se apresentadas em ilustrações individuais nas Figuras 24 e 25. Sendo então submetidos a ensaios e análises pertinentes.

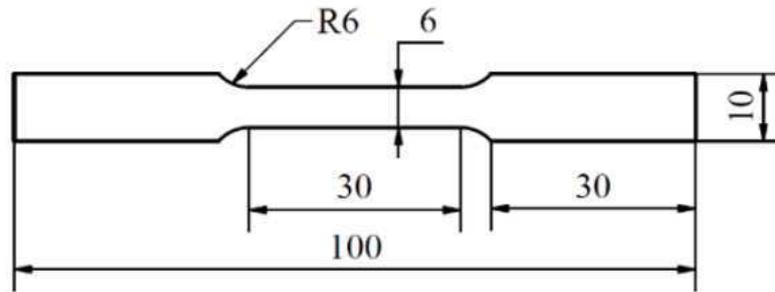
Figura 23: Ilustração da chapa soldada e seus respectivos corpos de prova.



Fonte: Autoria própria.

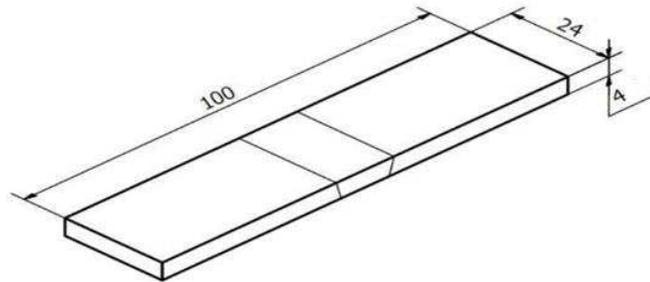
Após a obtenção dos corpos de prova obtidos para realização de ensaios e análises pertinentes, esses espécimes foram submetidos a seus respectivos procedimentos (ensaios). Os CP's de tração utilizados neste estudo correspondem a um modelo subsize por se tratar de um espécime de tamanho reduzido, conforme especificação da norma ASTM E8/E8M que assegura que em casos de impossibilidade de tamanhos maiores, os modelos subsize são devidamente respeitados e recomendados. A Figura 24 apresenta a geometria dos corpos de prova e suas respectivas dimensões. A Figura 25 apresenta as dimensões representativas do corpo de prova para o ensaio de dobramento seguindo a norma ASM E290. A unidade de medida das ilustrações estão em mm.

Figura 24: Corpo de prova de tração.



Fonte: Autoria própria.

Figura 25: Corpo de prova de dobramento de raiz a 60°.



Fonte: Autoria própria.

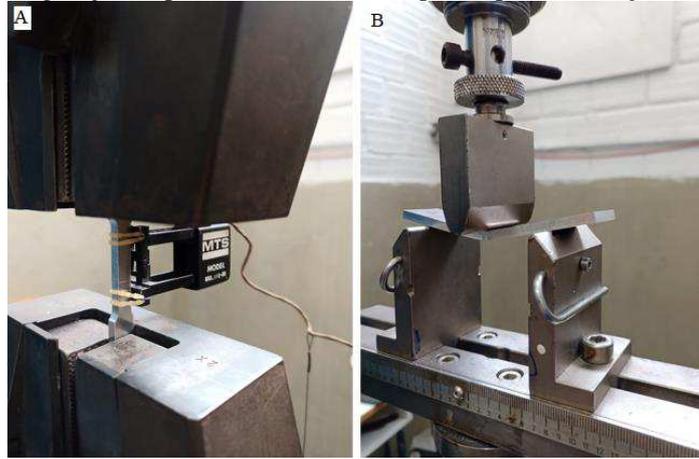
3.6 ENSAIOS MECÂNICOS E FRACTOGRÁFIA

O ensaio de tração teve o intuito de averiguar a qualidade da solda em termos de propriedades mecânicas, pois é por meio desse ensaio que são determinadas as propriedades de maior relevância para projeto mecânico e nesse caso em especial, possibilitar um dimensionamento das condições da junta soldada e sua eficiência.

Diante a isso, deu-se início aos ensaios mecânicos de tração uniaxial e de dobramento. Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios (MTS) de modelo 810, localizado no Laboratório de Propriedades Mecânicas da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM) da UFCG. Por se tratar de uma máquina universal, foi realizada uma modificação e/ou adaptação em sua configuração permitindo a correta execução dos processos, tendo em vista a diferença entre as duas (tração e dobramento) maneiras de ensaiar. Desta forma, durante o procedimento do ensaio de tração, os corpos de prova eram presos por uma garra em suas extremidades (cabeça do corpo de prova), e então, submetidos a uma força de tração com deslocamento de 1 mm/min. No caso do dobramento, o espécime era colocado sobre uma base em cada um dos seus lados, ou seja, apoiado entre as duas extremidades da amostra, enquanto uma força era aplicada em sentido contrário a base de apoio no centro do espécime

com deslocamento de 10 mm/min. A Figura 26 mostra o posicionamento do corpo de prova na máquina no momento de realização do ensaio.

Figura 26: Configuração de posicionamento dos corpos de prova: a) tração e b) dobramento.



Fonte: Autoria própria.

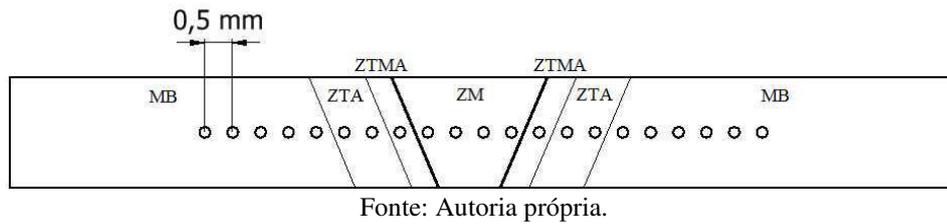
Por fim, foi realizado o ensaio mecânico de microdureza Vickers. Para isso foi utilizado um microdurômetro da Future Tech de modelo FM700, conforme apresentado em Figura 27, aplicando uma carga de 100 gf por 15s ao longo da superfície transversal da junta soldada em um intervalo de 0,5 mm entre cada indentação, conforme ilustrado na Figura 28.

Figura 27: Microdurômetro utilizado.



Fonte: Autoria própria.

Figura 28: Ilustração esquemática do posicionamento das indentações.



Para avaliação fractográfica utilizou-se um Microscópio eletrônico de Varredura (MEV) de marca Tescan e modelo VEGA3, aplicando uma tensão acelerada de 20Kv, localizado no Laboratório de Caracterização de Materiais vinculado ao Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA) da UAEM/UFMG. Por meio dele foi possível extrair diferentes imagens de localidades específicas e/ou distintas da região de fratura do corpo de prova fraturado em ensaio mecânico de tração.

3.7 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

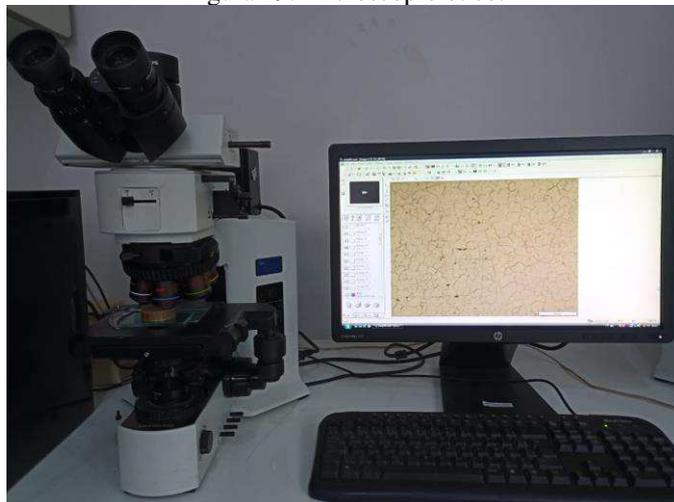
Dando seguimento ao procedimento laboratorial, para análise microestrutural seguiu-se um padrão metodológico minucioso no intuito de melhor obtenção dos resultados das amostras a serem analisadas. Em ordem de execução, as seguintes etapas foram postas em prática: **Embutimento a frio**, realizado utilizando 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; **Lixamento** manual foi realizado utilizando lixas SiC (Carbeto de Silício) de diferentes granulometrias (220, 320, 600, 800 e 1200) em ordem decrescente de tamanho de grão adicionando uma quantidade de água suficiente para manter uma película líquida entre a lixa e a amostra. A cada troca de lixa o sentido de lixamento foi rotacionado em 90°. Este tipo de lixamento foi adotado visando evitar possível formação de novos planos e riscos profundos que acabaria dificultando o processo posterior de polimento, uma vez que o magnésio se trata de um material de ductilidade considerável; **Polimento** mecânico manual refinado utilizando pasta de diamante de granulometrias de 1 e 0,25 µm, seguindo do maior para o menor tamanho de grão, adicionando água como lubrificante. Em cada troca de granulometria de pasta, o pano foi devidamente lavado para eliminar partículas mais grosseiras do polimento anterior. Para este procedimento foi utilizado um pano marrom para polimento metalográfico ideal para manuseio com as pastas de diamante supracitadas; **Ataque químico**, 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 (etanol) formou o reagente (solução) ácido-pícol para atacar o material com conseqüente revelação estrutural da junta, conforme especificação do ASM International (CLARK; CORP, 1985). Cabendo destacar que a quantidade dos ácidos utilizados nesta solução corresponde a 50% do especificado no Handbook, enquanto que a água e o etanol foram mantidos integralmente.

Para que ocorresse a revelação microestrutural foram realizadas diversas tentativas até chegar a um método de melhor obtenção desse resultado. Um pouco diferente do que o Metals Handbook recomenda, a técnica utilizada para atacar o material consistiu em molhar bem um pedaço de algodão com o reagente e passa-lo suavemente algumas vezes sobre a superfície da amostra, após isso, o ataque era neutralizado com aplicação de jato de álcool etílico absoluto (99,5% PA) e em seguida secado com jato de ar quente seco. Como ocorria de o algodão ir secando e criando uma camada grossa a medida que iam ocorrendo os passes sobre a amostra, o ataque era interrompido e refeito novamente ou trocado, molhado e passado novamente o algodão até chegar ao ataque adequado no intuito de produzir a menor quantidade possível de riscos, uma vez que o material de trabalho é bem maleável, possuindo uma resistência ao risco baixa quando comparado a outros tipos de materiais como alumínio e aço.

Após realizado todo o processo metalográfico as amostras foram levadas ao Microscópio Óptico de marca Olympus e modelo BX51 disposto em laboratório de Metalografia da UAEM/UFCG, afim de observar e avaliar a estrutura microestrutural resultante após a soldagem. A Figura 29 apresenta o equipamento utilizado. Por meio deste foi possível extrair as imagens micrográficas mostrando a formação granular das diferentes regiões resultantes do FSW, bem como do MB.

Figura 29: Microscópio óptico.



Fonte: Autoria própria.

Finalizado esse procedimento, a partir de imagem selecionada de cada uma das juntas foi realizado a análise microestrutural quantitativa no intuito de dimensionar com maior clareza possível o tamanho médio dos grãos. Esse procedimento foi possível por meio de um programa identificado como ImageJ aplicando a técnica de Heyn, que consiste em um método de interceptação (linha que se cruza sobre um grão) linear dos grãos, conforme norma específica ASTM E112. Definido o tamanho de reta, seu valor foi dividido pela soma de todas as interceptações e pontos triplos ao longo do seguimento de reta sobrepondo a microestrutura. As tabelas contendo todos os dados pertinentes a extração desses dados se encontra em Apêndice.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

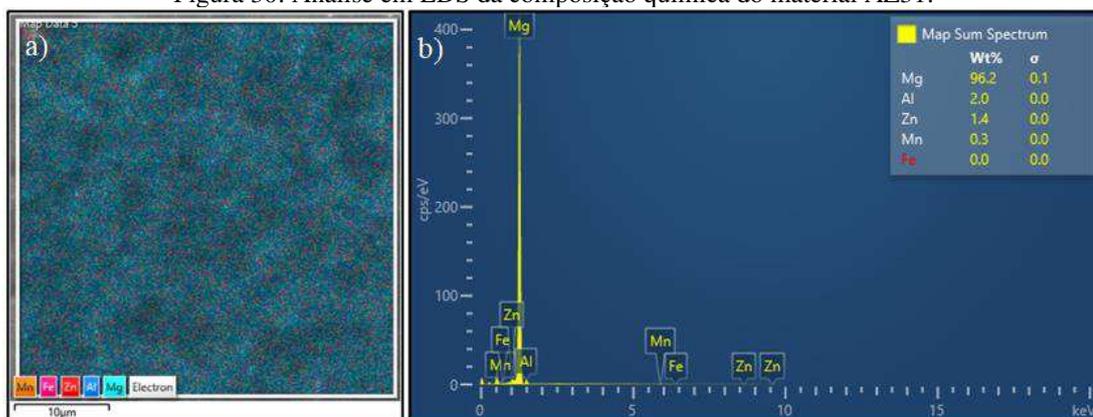
4.1 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E METALÚRGICA DO MATERIAL DE BASE

Nesta seção será dado ênfase aos resultados encontrados no material de trabalho no que diz respeito a composição química mais próxima da realidade, trazendo os principais elementos metalúrgicos básicos presentes. Junto a isso apresentar a análise microestrutural e os principais valores de propriedades mecânicas obtidos a partir do material de base.

4.1.1 Composição química

A composição química presente no material de trabalho consistiu em cinco elementos principais detectados a partir de análise por Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) realizado no material como recebido, conforme apresentado na Figura 30. Nela é possível observar que os elementos apresentados se encontram dentro das especificações delimitadas pela ASM International (HOUSH; MIKUCKI; STEVENSON, 1990) com exceção do teor de alumínio, considerado o principal elemento ligante da liga AZ31B. Uma outra consideração é o fato do ferro está presente entre os principais elementos, mas não ter apresentado nenhum valor em porcentagem, isso deve-se ao fato do EDS reconhecer a partir de 0.1%, omitindo teores que estejam fora da primeira casa decimal.

Figura 30: Análise em EDS da composição química do material AZ31.



Fonte: Autoria própria.

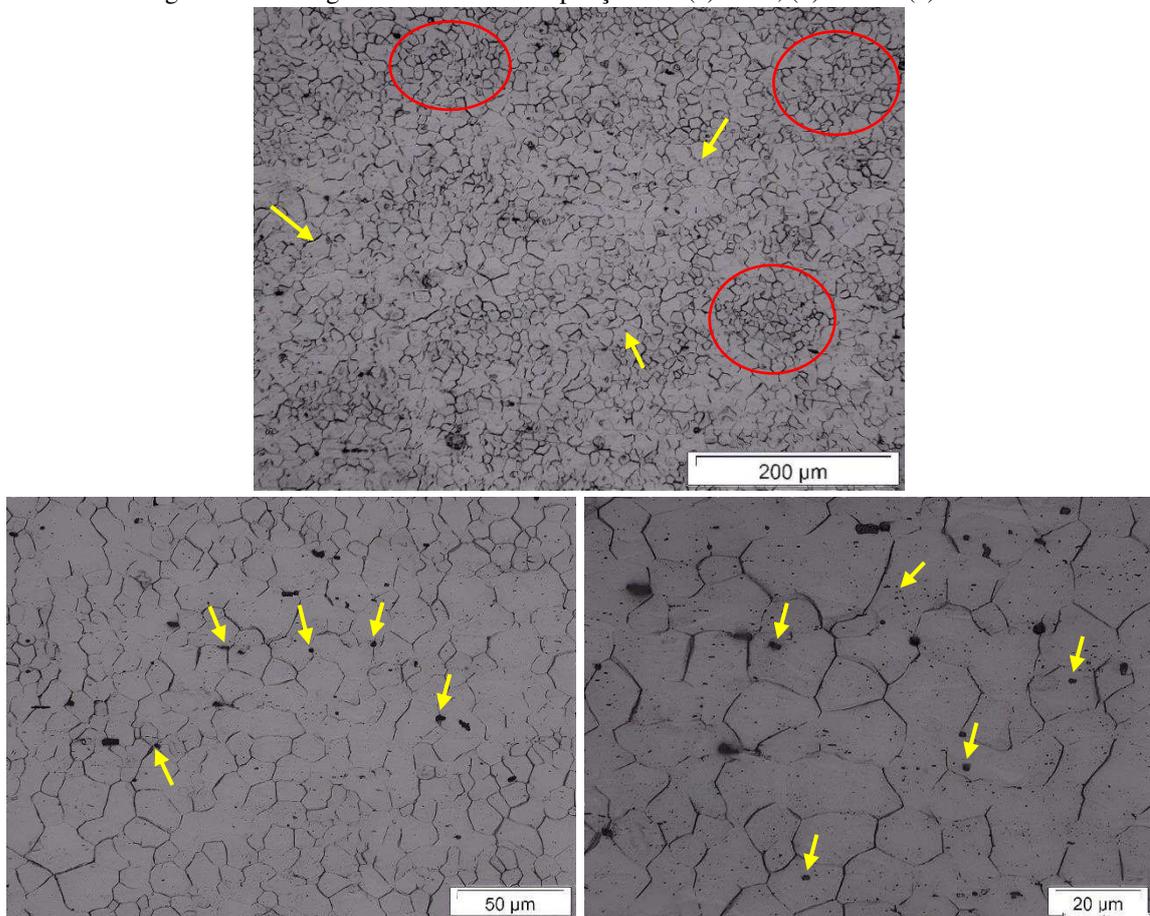
Como observado, o alumínio apresentou composição em proporção abaixo do especificado pela literatura que é de 2,5 a 3,5. A razão disso pode ter sido o seu baixo poder de solubilidade no magnésio e, conseqüentemente, se concentrando em maiores teores no interior

dos precipitados juntamente com o zinco e o manganês. Quando adicionado juntamente com o alumínio, o manganês tem seu poder de solubilização na liga com o magnésio reduzido, ficando o teor em peso em torno de 0,3% (MOOSBRUGGER, 2017). Porcentagem compatível com o que foi detectado no material.

4.1.2 Microestrutura

O material de base correspondente ao recebido é composto por uma formação microestrutural característica apresentando grãos equiaxiais finos. Possuindo uma morfologia não homogênea e/ou parcialmente homogênea, ou seja, parte da estrutura possui grãos mais grosseiros (setas amarelas) com distribuição mais homogênea, enquanto outra parte possui grãos mais finos (círculos vermelhos) (Figura 31a). Somado a isso, considerável presença de precipitados e/ou constituintes foram observados em cor preta entre os contornos e interior dos grãos, apontados com setas amarelas (Figura 31 b e c, respectivamente).

Figura 31: Micrografias do MB em ampliações de (a) 200x, (b) 500x e (c) 1000x.

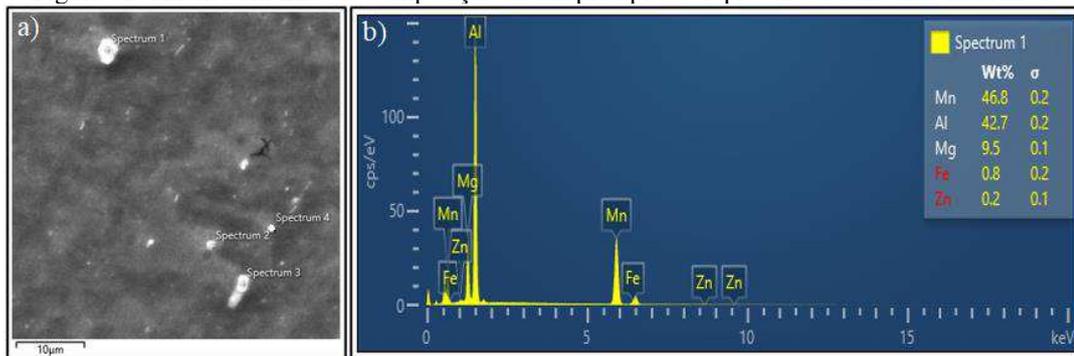


Fonte: Autoria própria.

Os precipitados observados entre os contornos de grão correspondem a fase γ - $Mg_{17}Al_{12}$. O alumínio encontra-se presente na liga ao longo dos limites dos grãos e em forma de estrutura lamelar de duas diferentes formas, que são, em parte como solução sólida e outra parte precipitado na forma de $Mg_{17}Al_{12}$ (SONG; ATRENS, 1999). A partir desta revelação estrutural o tamanho médio dos grãos foi obtido, chegando a um resultado de 12,7 μm . Ficando evidente o quão refinado é a microestrutura desta liga.

Além disso, após o material ser devidamente polido, submeteu-o a técnica do EDS onde foi possível observar a presença de diversos precipitados constituídos a partir da formação do material, conforme encontram-se destacados em cor branca na Figura 32. Observando diversos pontos, foram detectadas concentrações consideráveis de alumínio, manganês e zinco nesses constituintes.

Figura 32: Análise em EDS da composição de um precipitado representativo no material AZ31.



Fonte: Autoria própria.

Com base nos diagramas de fase Mg-Al, Mg-Zn e Mg-Mn descritos na revisão da literatura através das Figuras 3, 4 e 5, respectivamente, na seção 2.2, é possível perceber que existe uma maior possibilidade de formar fases com o Mn nesta liga de trabalho. Em meio a isso, diferentes autores têm apontado para a formação de diferentes fases binárias de Al-Mn a partir da adição de Mn, sendo elas, Al_8Mn_5 , Al_9Mn_{11} , $Al_{11}Mn_4$ (CAO; STJOHN; QIAN, 2005; LASER et al., 2006; REDDY et al., 2021). Al_6Mn (MADHAVAN et al., 2017). Somado a isso, a literatura também tem apontado para a formação de outros diferentes precipitados em ligas da série AZ a partir da aplicação de seus principais elementos Al, Zn e Mn, o que irá depender da quantidade de cada elemento adicionado. Desta forma, os precipitados são Mg_2Al_3 , Mg_5Al_8 , $MgZn_2$, Mg_2Zn_3 , (SONG; ATRENS, 1999). Além disso, com a facilidade que alguns elementos possuem em reagir com o oxigênio, os seguintes precipitados podem ser observados: MgO, Al_2O_3 , $MgAl_2O_4$ (COELHO et al., 2008). Portanto, a liga AZ31 está passível de ter em sua composição microestrutural os precipitados recorrentemente encontrados na literatura.

4.1.3 Propriedades mecânicas

A fim de comprovar as características mecânicas em termos de propriedades conforme especificações do fornecedor, mas principalmente do ASM Handbook (HOUSH; MIKUCKI; STEVENSON, 1990) por se tratar de referência especializada, o material de base foi submetido a ensaios de tração e microdureza Vickers. Neste sentido, os resultados obtidos encontram-se detalhados na Tabela 9. Assim, como esperado, não houve modificações significativas em relação ao que é apresentado amplamente na literatura. Portanto, somados esses dados aos aspectos microestruturais e de composição química, ficou evidente que a liga condiz com as características a ela designada.

Tabela 9: Propriedades mecânicas do MB.

Propriedades mecânicas		
Limite de resistência a tração	Deformação	Microdureza
271 MPa	21.8 %	58,4 ± 2,5 HV

Fonte: Autoria própria.

4.2 ANÁLISE VISUAL

Antes de executar qualquer procedimento posterior à soldagem realizada como os ensaios mecânicos que correspondem a ensaios destrutivos, se buscou inspecionar visualmente todas as juntas soldadas de modo que se obtivesse uma perspectiva das condições superficiais de cada junta e, conseqüentemente a depender dos níveis de defeitos ter uma dimensão do que possivelmente estaria e/ou aconteceu na união das juntas.

Analisando de uma maneira geral, o que se percebe em meio às imagens das oito juntas soldadas apresentadas no Quadro 1 é o não surgimento e/ou formação de defeitos aparentes significativos na superfície das juntas, ou seja, defeitos superficiais macroscópicos, ou sinais explícitos de falta de união, exceto os defeitos flash (rebarbas) formados em praticamente todas elas. É possível observar no Quadro 1 que apenas a junta 7 apresentou ausência de defeitos tipo flash. Poucas rebarbas foram produzidas nas juntas 1, 3 e 4. Enquanto isso as juntas 2, 5, 6 e 8 continham significativa formação de rebarbas. Essas rebarbas deveriam fazer parte do material soldado, mas por motivos diversos acabam sendo expulsos da região de solda, formando esses defeitos superficiais ao longo das adjacências da região soldada após passagem da ferramenta FSW.

Quadro 1: Juntas soldadas com suas respectivas condições de soldagem e defeitos observados.

Ordem planejamento	Ordem aleatória	Juntas soldadas	Variáveis	Defeitos visualizados
1	3		VR: 560 rpm VS: 95 mm/min Ângulo: 1° Penetração: 0.3 mm	Rebarba
2	8		VR: 1170 rpm VS: 95 mm/min Ângulo: 3° Penetração: 0.3 mm	Rebarba em quantidade excessiva
3	6		VR: 1170 VS: 41 Ângulo: 3° Penetração: 0.1 mm	Rebarba em quantidade excessiva
4	2		VR: 1170 rpm VS: 41 mm/min Ângulo: 1° Penetração: 0.3 mm	Rebarba em quantidade excessiva
5	7		VR: 560 rpm VS: 95 mm/min Ângulo: 3° Penetração: 0.1 mm	-
6	4		VR: 1170 rpm VS: 95 mm/min Ângulo: 1° Penetração: 0.1 mm	Rebarba
7	5		VR: 560 rpm VS: 41 mm/min Ângulo: 3° Penetração: 0.3 mm	Rebarba em quantidade excessiva

Continua na página de texto

Continuação

8	1		VR: 560 rpm VS: 41 mm/min Ângulo: 1° Penetração: 0.1 mm	Rebarba
---	---	---	--	---------

Fonte: Autoria própria.

Embora não contenham grandes defeitos, o fato da maioria das juntas soldadas conter rebarbas e em alguns casos bem significativos acaba indicando um sinal de possível falta de união como o defeito túnel, significando uma perda de material na região de solda, ou seja, não tendo ocorrido uma união uniforme. O que conseqüentemente pode interferir nas propriedades mecânicas da junta. Mas um outro fator muito importante de ser destacado é que nesse estudo em específico se utilizou dois níveis de penetração da ferramenta, podendo ter sido este o fator de maior influência pelos excessos de rebarbas na linha de solda.

Em meio aos fatos relatados alguns possíveis defeitos como trincas externas e falta de união aparente comuns de aparecerem na soldagem FSW não foram observados, tendo apenas uma falta de união no início da solda, circunstância já prevista e esperado neste tipo de processo, o que acaba sendo em parte uma boa característica devido a ausência de defeitos oriundos da falta de preenchimento e/ou mistura adequada. Podendo-se inferir que a execução da soldagem foi satisfatória. Os poucos defeitos observados nas juntas e aqui mencionados são característicos e/ou específicos deste tipo de processo de soldagem.

Diante das observações visuais pode-se inferir que as rebarbas estiveram atreladas não só a um maior poder de geração de calor na junta pela combinação de parâmetros, mas também influenciada pela força axial (direção z) experimentada, uma vez que foram utilizadas variações de penetração que por sua vez influenciam proporcionalmente nas forças exercidas e suas conseqüências.

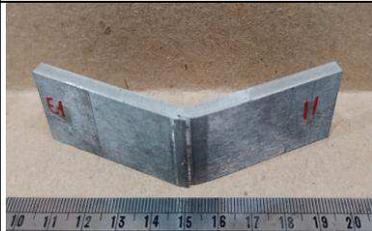
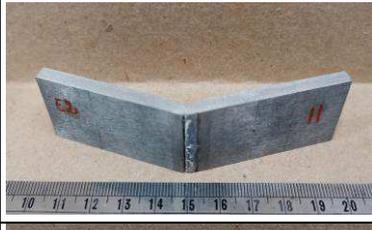
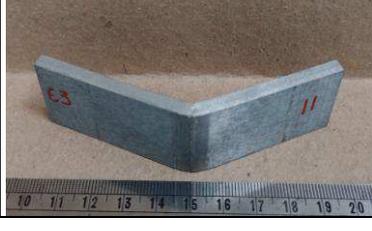
4.3 ENSAIO DE DOBRAMENTO

Este ensaio mecânico de procedimento relativamente simples consiste, assim como a inspeção visual, em uma análise qualitativa, mas com o diferencial de ser uma técnica destrutiva e, a depender de como seja realizado, obter dados quanto a carga máxima suportada, realizada para investigar o comportamento à deformação plástica, ou seja, à ductilidade do material.

Com base no ensaio de dobramento realizado com corpos de prova das oito juntas soldadas foi possível observar que em todas elas houve o rompimento na raiz de solda antes de atingir o ângulo de 60° proposto para o ensaio. Cabe destacar também que essas fraturas ocorreram de maneira retilínea e com início no lado de recuo.

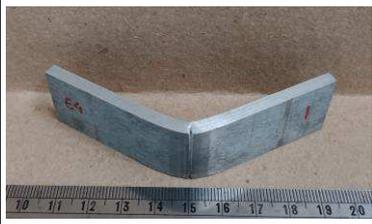
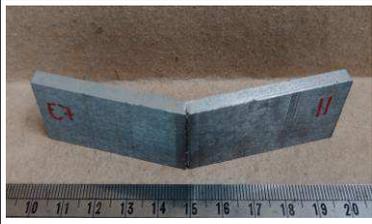
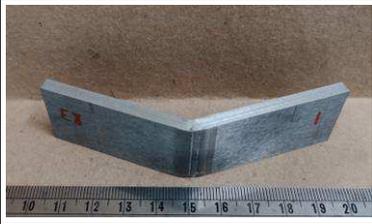
Embora se trate de um método qualitativo, o ensaio de dobramento pode nos fornecer alguns dados em relação a características mecânicas. Pensando nisso, os valores de carga máxima suportada por cada junta foram colhidas no intuito de obter-se uma resposta mais concreta, no que diz respeito a qualidade da solda. Desta forma, no Quadro 2 é possível observar esses valores obtidos para cada junta soldada. Com isso, tem-se que a menor carga suportada correspondeu a junta soldada 2 obtida com velocidade de rotação e soldagem, ângulo de inclinação e penetração do ombro da ferramenta de 1170 rpm, 41 mm/min, 1° e 0.3 mm, respectivamente, em contrapartida a junta soldada 4 obtida com velocidade de rotação e soldagem, ângulo de inclinação e penetração do ombro da ferramenta de 1170 rpm, 95 mm/min, 1° e 0.1 mm, respectivamente, obteve a maior carga suportada.

Quadro 2: Imagens dos CP's ensaiados e valores de carga máxima suportada por cada junta no ensaio de dobramento.

Experimentos	CP ensaiado	Local rompido	Carga máxima suportada (N)
Junta 1		Raiz de solda	1055,937
Junta 2		Raiz de solda	829,675
Junta 3		Raiz de solda	1177,209

Continua na página de texto

Continuação

Junta 4		Raiz de solda	1266,379
Junta 5		Raiz de solda	1264,343
Junta 6		Raiz de solda	1240,859
Junta 7		Raiz de solda	916,522
Junta 8		Raiz de solda	1003,458

Fonte: Autoria própria.

4.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL FATORIAL (Fracionário)

Planejamento experimental é uma técnica que permite variar uma grande quantidade de condições simultaneamente sem repeti-los. Com base nisso, as velocidades de rotação e de soldagem e a inclinação e penetração da ferramenta foram as variáveis de entrada independentes aplicadas e variadas durante o experimento. A partir disso, a variável resposta dependente corresponde aos valores de resistência à tração (R_1, R_2, R_3) que foram inseridas na matriz de planejamento, conforme se observa na Tabela 10.

Tabela 10: Matriz de planejamento e variável resposta obtida.

Experimentos	Rotação	Avanço	Inclinação	Penetração	R_1	R_2	R_3	Média
	rpm	mm/min	(°)	mm	MPa	MPa	MPa	MPa
Junta 1	560	41	1	0.1	197	192	202	197
Junta 2	1170	41	1	0.3	175	169	161	168
Junta 3	560	95	1	0.3	203	191	195	196
Junta 4	1170	95	1	0.1	184	201	204	196
Junta 5	560	41	3	0.3	197	180	197	191
Junta 6	1170	41	3	0.1	186	180	185	184
Junta 7	560	95	3	0.1	161	159	146	155
Junta 8	1170	95	3	0.3	193	198	196	196

Fonte: Autoria própria.

Ainda na Tabela 10 é possível perceber que os resultados da resistência à tração não tiveram variações significativas, exceto para a condição 7 que apresentou um valor mais distante em relação ao restante que mantiveram resultados considerados próximos.

De posse desses dados, o planejamento tipo fracionário permitiu realizar uma análise em relação aos parâmetros aplicados e seus níveis de significância perante as respostas apresentadas. Para isso, foi considerado um nível de confiabilidade do processo de 95%, ou seja, correspondendo a uma probabilidade de significância de 0,05. Significando que valores de $P \leq 0,05$ são considerados estatisticamente significativos. Portanto, implicando que os efeitos das variáveis e suas interações dentro deste intervalo influenciam na variável resposta do processo.

Segundo Melo (MELO, 2013), alguns efeitos não “estatisticamente significativos” não podem ser ignorados tendo em vista sua proximidade com os valores estatisticamente significativos ou pela variável ser considerada e/ou manterem-se dentro do processo como importante. Desta forma, na Tabela 11 é possível observar os valores de P para cada variável utilizada e suas interações. Sendo que os valores apresentados em negrito correspondem ao estatisticamente significativo, já o valor considerado significativo por sua influência física no processo está sublinhado. Portanto, as variáveis de entrada das interações e individuais de inclinação e penetração tem efeito significativo na variável resposta. Tendo a interação da rotação com avanço como fator mais significativo, uma vez que o valor de p é o menor.

Tabela 11: Níveis de significância das variáveis individuais e de interação sobre a variável resposta.

Fatores	Valor de P
Média	0,000000
R	0,735859
VS	0,778499
I	0,014345
P	<u>0,116551</u>
R*VS	0,000006
R*I	0,000077
R*P	0,000442
R ²	0,86313
Adj	0,80325

R: Rotação; **VS:** Velocidade de soldagem; **I:** Inclinação; **P:** Penetração; **R*VS, R*I e R*P:** Interação entre variáveis

Fonte: Autoria própria.

A partir do tratamento dos dados da análise estatística apresentando com base na análise de significância dos efeitos vistos na Tabela 11, pôde-se determinar o modelo matemático estatístico com seus respectivos parâmetros revelando a influência das variáveis independentes na resposta de resistência à tração, conforme expressa pela Equação 1. Nela, tanto os valores significativos estatisticamente (considerados distante do erro), como aquele em que considerou-se ter um nível de influência física próximo foram inseridos dentro do modelo linear estatístico, uma vez que no modelo entra apenas os valores oriundos dos efeitos significativos.

$$LRT = 185,5 - 4 * I + 2,417 * P + 9,583 * R * VS + 7,667 * R * I - 6,417 * R * P \quad (1)$$

Com os dados dos efeitos apresentados, uma análise de variância (ANOVA) foi realizada em busca de atestar a significância estatística das variáveis de entrada no processo sobre as variáveis de respostas obtidas, conforme apresentado na Tabela 12, sendo determinado por meio do teste F. Desta forma, o modelo se mostrou significativo e preditivo, uma vez que o $F_{\text{Calculado}} = 22,7$ para a regressão foi quatro vezes maior que o $F_{\text{Tabelado}} = 2,8$, embora alguns efeitos tenham apresentado $p > 0,05$, implicando que é adequado considerar alguns fatores por manterem influência próxima ao estatisticamente significativo. Enquanto isso, o F_{Tabelado} não é quatro vezes maior que o $F_{\text{Calculado}}$. Portanto, o modelo é apenas ajustado.

Tabela 12: Análise de variância (ANOVA) para a resposta de resistência à tração.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Quadrado da Média	Teste F	F Tabelado
Regressão	5137,335	6 – 1 = 5	1027,467	22,7	2,8
Resíduos	814,667	24 – 6 = 18	45,259	1	
Falta de Ajuste	763,75	8 – 6 = 2	381,875	8,44	3,555
Erro Puro	50,917	24 – 8 = 16	3,182	0,07	
Total	5952	24 – 1 = 23			

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 13 se observa os efeitos estimados para os fatores individuais e de interação de entrada em relação a resposta, dentro do processo experimental executado. Constando a estimativa do erro e os coeficientes do modelo. Lembrando que todos os coeficientes apresentados na tabela não foram colocados no modelo (equação 1) em decorrência do modelo ser composto pelos coeficientes daqueles efeitos significativos, além da média.

Tabela 13: Efeitos estimados para resposta de resistência à tração.

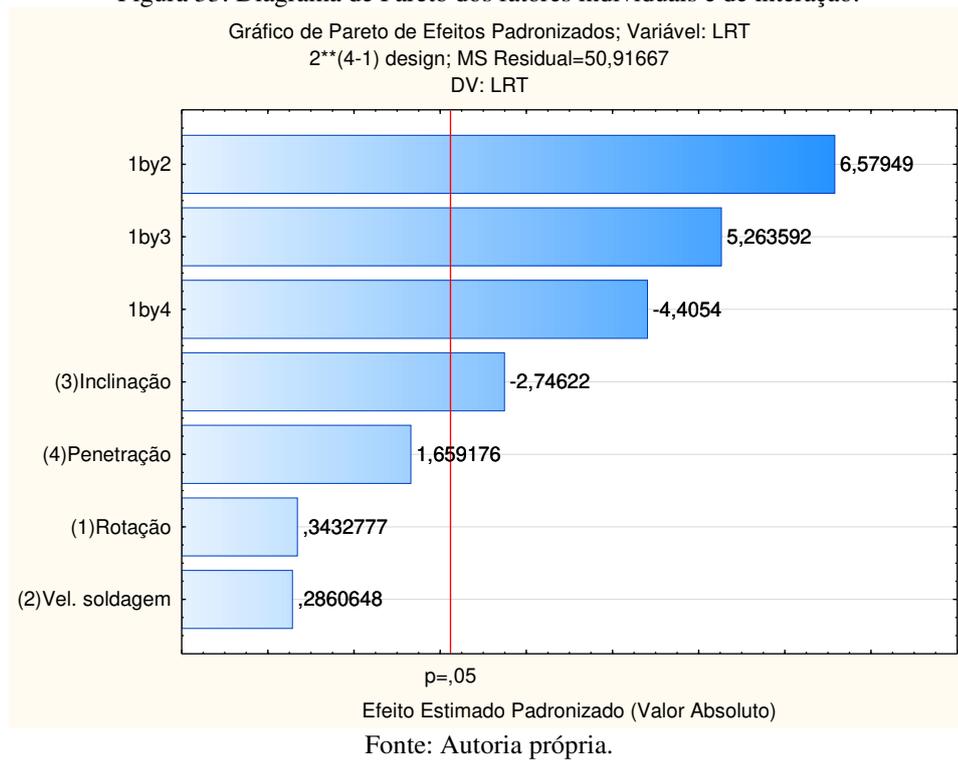
Efeitos estimados				
Fatores	Efeito	Erro padrão	Coefficiente	Erro padrão dos coeficientes
Média/Interação	185,5000	1,456547	185,5000	1,456547
R	1,0000	2,913093	0,5000	1,456547
VS	0,8333	2,913093	0,4167	1,456547
I	-8,0000	2,913093	-4,0000	1,456547
P	4,8333	2,913093	2,4167	1,456547
R*VS	19,1667	2,913093	9,5833	1,456547
R*I	15,3333	2,913093	7,6667	1,456547
R*P	-12,8333	2,913093	-6,4167	1,456547

Fonte: Autoria própria.

A relação entre os efeitos estimados e o desvio padrão expresso através do gráfico de Pareto traz uma estimativa dos efeitos estimados padronizados, conforme dado na Figura 33. No gráfico é possível observar que existe uma linha vermelha indicando que à direita corresponde aos fatores que se encontram dentro da região de aceitação, ou seja, os que são considerados significativos na avaliação de resposta. Enquanto à esquerda se encontra os que não fazem parte da região de aceitação do processo.

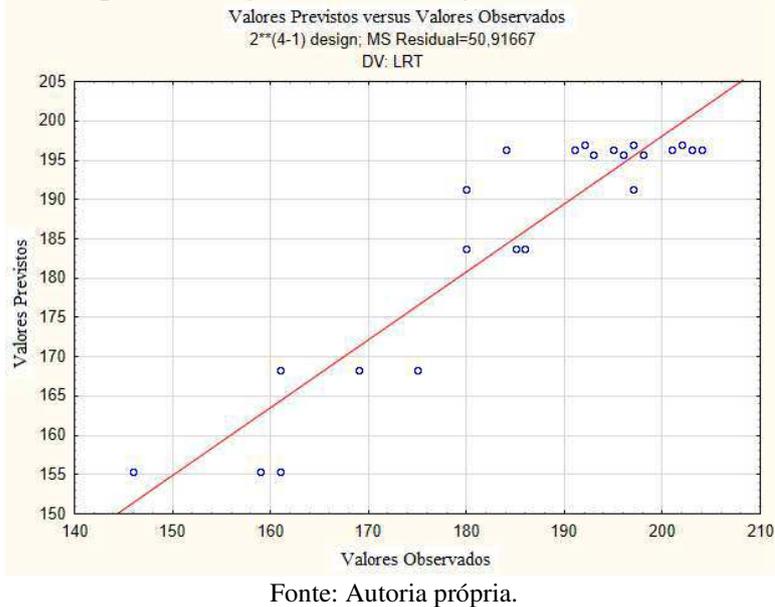
Neste sentido, os valores que ultrapassaram o limite de aceitação de 0,05 confirma a significância dos fatores de interação e do fator inclinação. Tendo a interação de rotação com avanço como o fator de maior significância no processo. Cabendo destacar que o fator penetração considerado como significativo esteve realmente próximo do limite de aceitação.

Figura 33: Diagrama de Pareto dos fatores individuais e de interação.



Através da Figura 34 pode-se ver os dados que estavam sendo previsto pelo modelo e os dados que foram observados com os experimentos. Portanto, a linha vermelha indica os dados que o modelo previu, enquanto isso, os pontos azuis indicam os dados que estavam sendo observados pelo modelo. Desta forma, parte dos dados estiveram próximo ao previsto, significando boa regressão nesses casos.

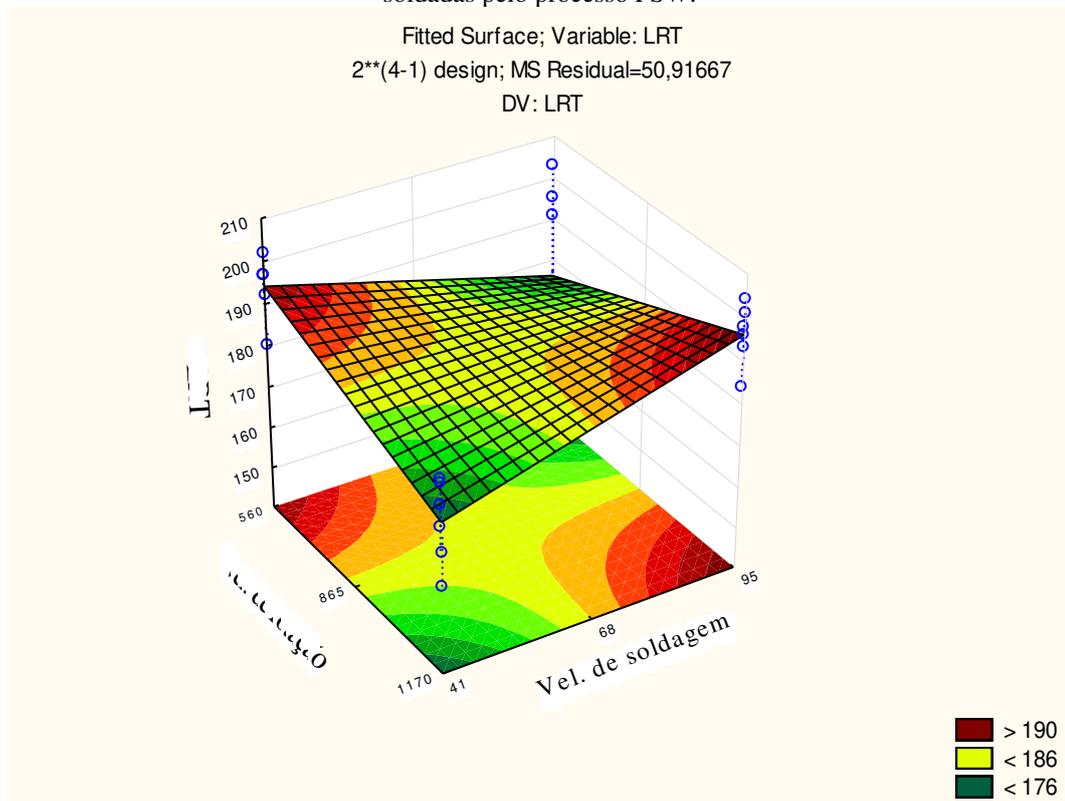
Figura 34: Relação entre os valores previstos e observados.



4.4.1 Influência dos parâmetros de soldagem na resistência à tração

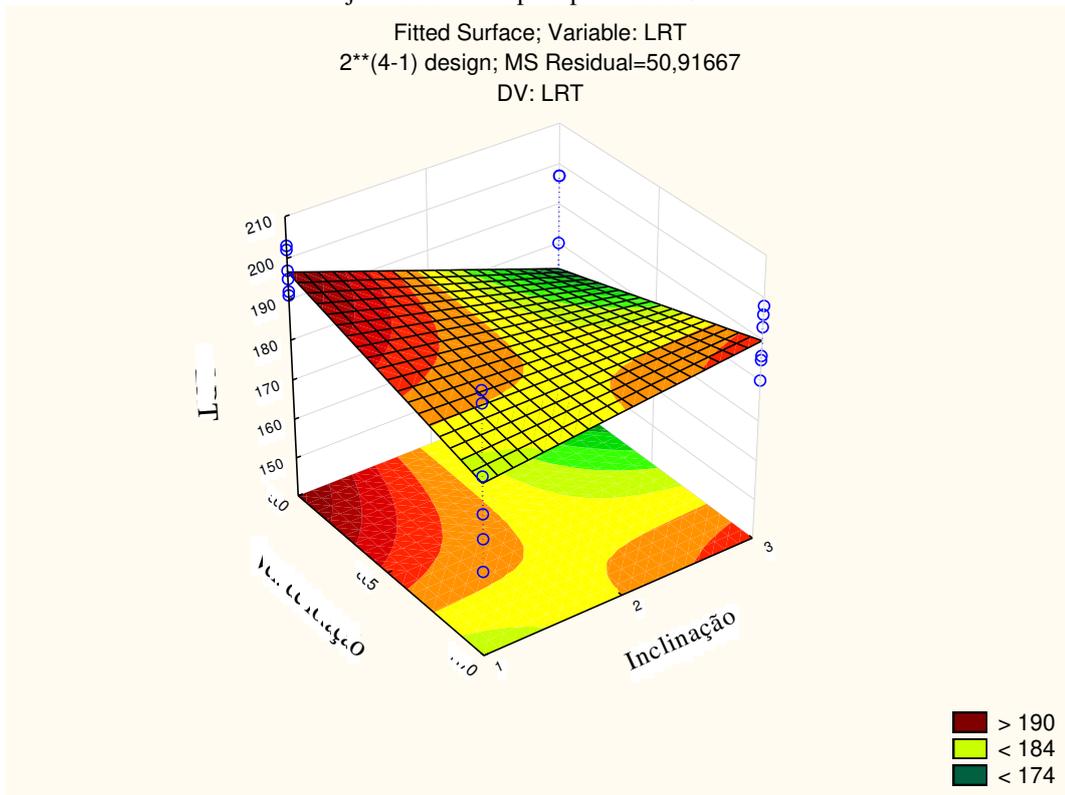
De acordo com o que foi apresentado anteriormente alguns fatores de controle tiveram e/ou exerceram influência significativa na variável resposta, conforme observado na Tabela 11 (níveis de significância p). Desta forma, nas Figuras 35 a 37 é possível visualizar estas influências por meio da superfície de resposta de três dimensões, demonstrando o comportamento dos níveis ótimos nas curva de nível de controle exercida em função dos fatores codificados na resposta à tração. Portanto, revelando os pontos de operação que se sobressaíram perante outros.

Figura 35: Influência das velocidades de rotação e de avanço na resposta de resistência à tração das juntas soldadas pelo processo FSW.



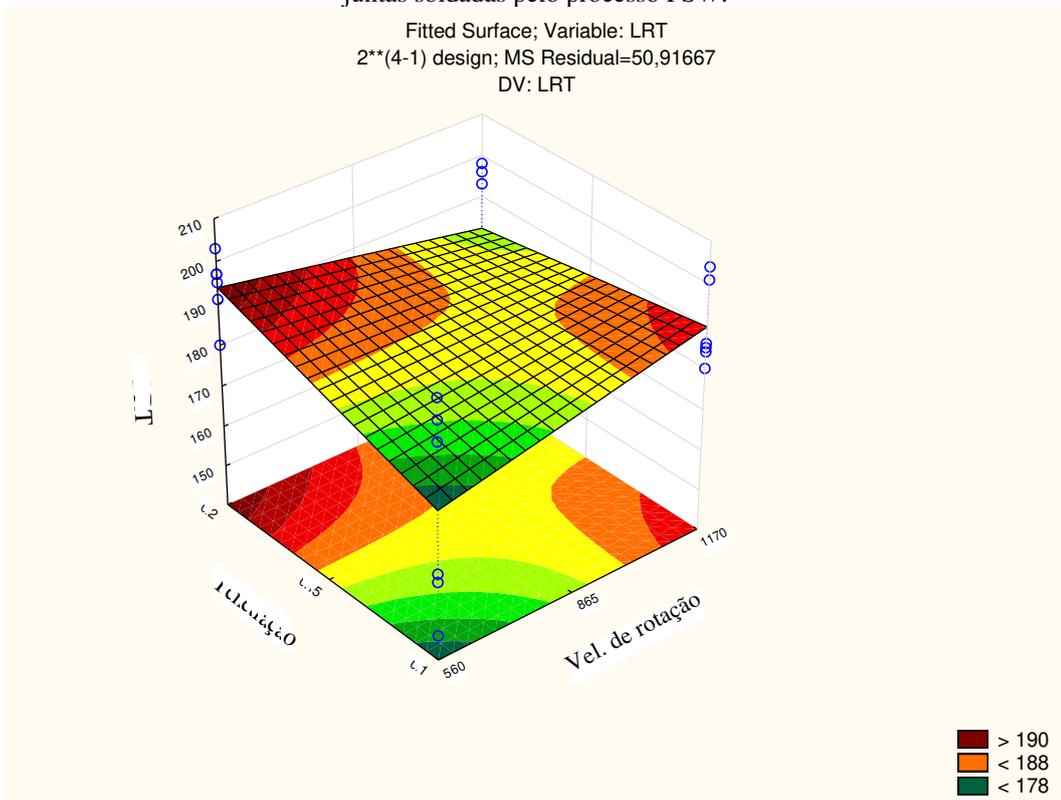
Fonte: Autoria própria.

Figura 36: Influência da velocidade de rotação e inclinação da ferramenta na resposta de resistência à tração das juntas soldadas pelo processo FSW.



Fonte: Autoria própria.

Figura 37: Influência da velocidade de rotação e penetração da ferramenta na resposta de resistência à tração das juntas soldadas pelo processo FSW.

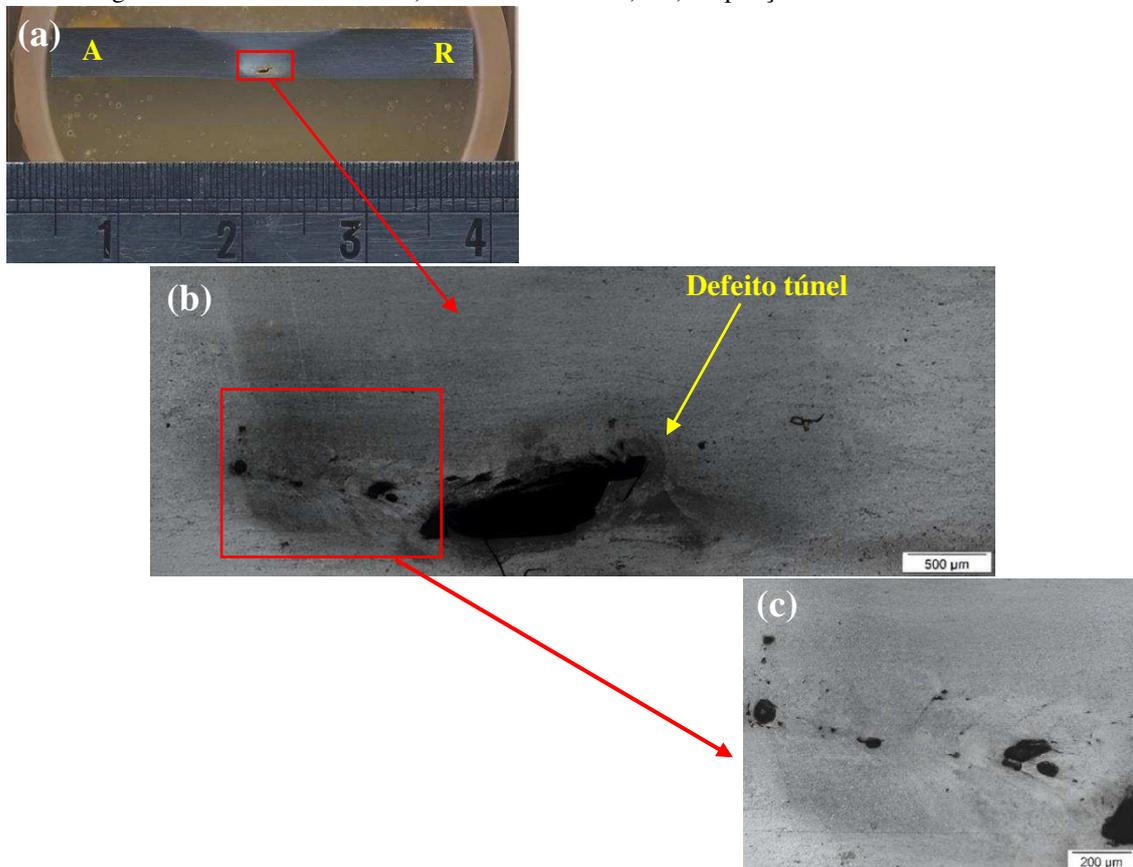


Fonte: Autoria própria.

4.5 MICROESTRUTURA

Com o objetivo de identificar a microestrutura em termos de tamanho médio de grãos, formação, presença de defeitos, maclas e/ou geminação, dentre outras características pertinentes e característicos da junta soldada, diversas imagens foram extraídas da junta e posteriormente analisadas. Neste sentido, nas Figuras 38 a 44 são apresentadas as imagens macro e micrográficas das juntas 1, 2, 6 e 7 em decorrência de terem sido as que apresentaram maiores divergências entre si nos resultados de resistência mecânica (ensaio de tração). Nelas estão expostas o seguinte: a macroestrutura, dando uma visão geral de como ficou a junta soldada e, em termos mais específicos por meio da microestrutura foi analisado a zona de mistura (ZM) a zona termomecânicamente afetada (ZTMA) e região de interface (ZM/ZTMA). Tanto do lado de avanço quanto de recuo das duas últimas regiões mencionadas e para todas as zonas, as imagens foram extraídas a partir da região central, ou seja, da linha central da seção transversal da junta. Somado a isso, alguns pontos foram destacados mostrando a formação de alguns defeitos observados em parte dessas juntas.

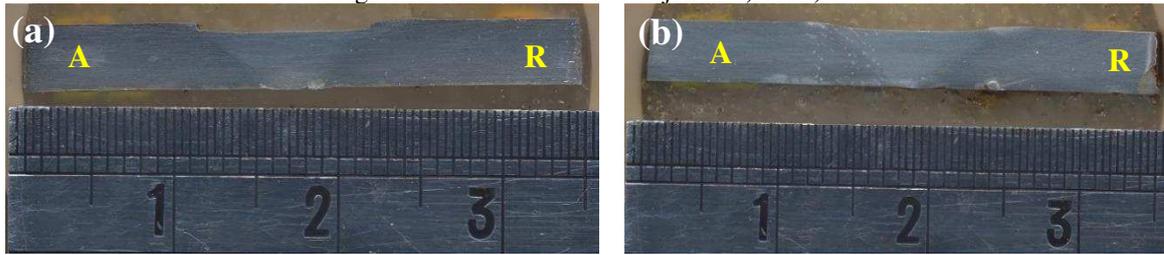
Figura 38: Junta 1 revelando a) macroestrutura e b) e c) ampliações dos locais de defeitos.



A: Avanço; R: Recuo.

Fonte: Autoria própria.

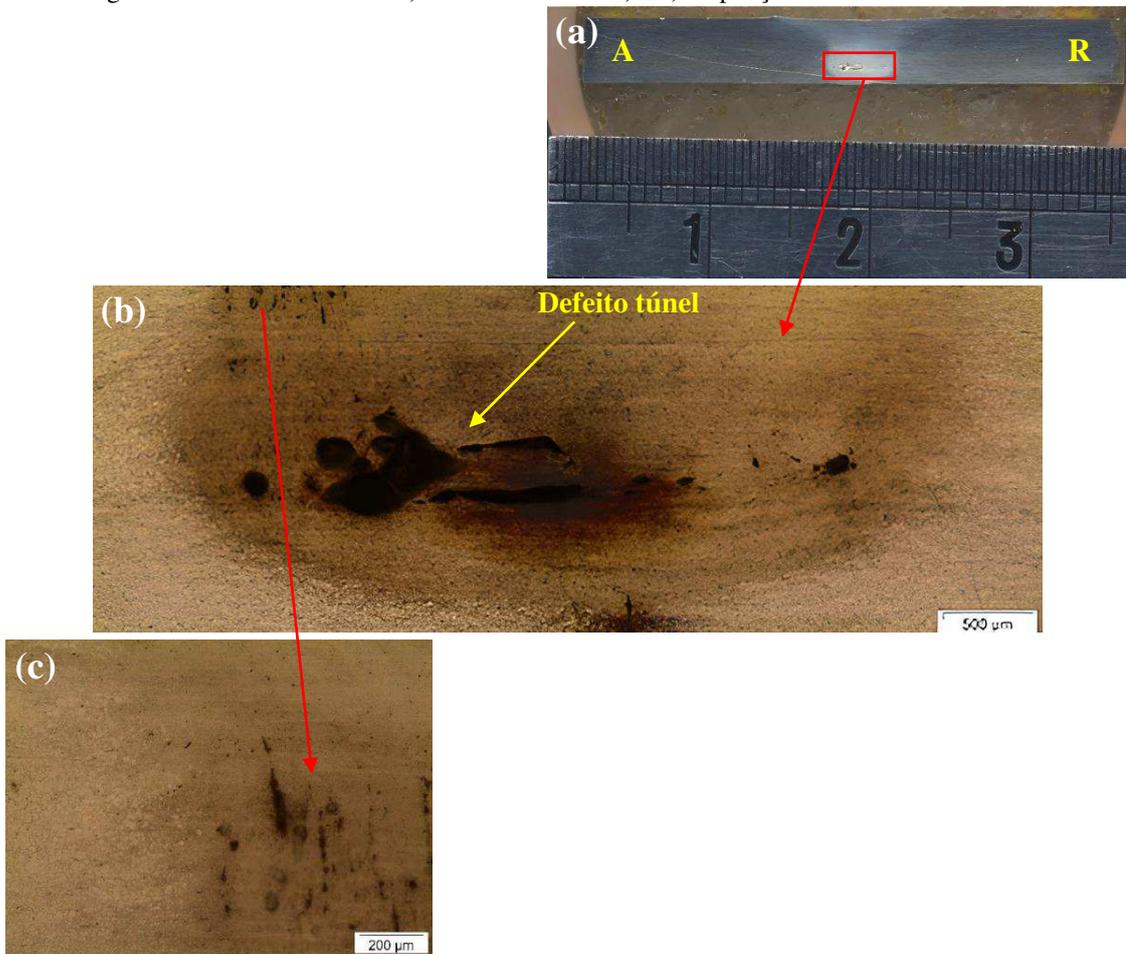
Figura 39: Macroestrutura das juntas a) 2 e b) 6.



A: Avanço; R: Recuo.

Fonte: Autoria própria.

Figura 40: Junta 7 revelando a) macroestrutura e b) e c) ampliações dos locais de defeitos.



A: Avanço; R: Recuo.

Fonte: Autoria própria.

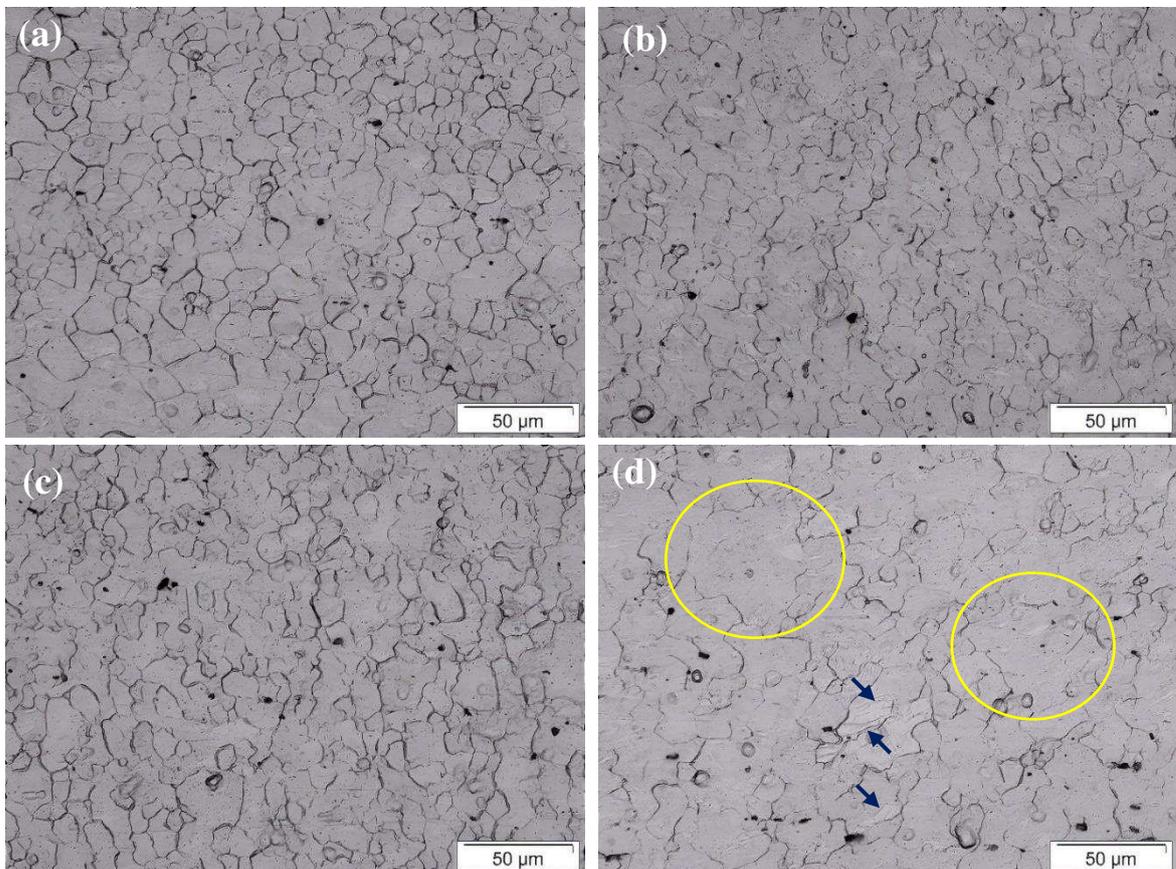
A combinação de variáveis de processo como velocidade de avanço e rotação da ferramenta e profundidade de mergulho com ação de forjamento e extrusão durante a soldagem são responsáveis pela formação microestrutural das juntas soldadas pelo processo FSW (GULATI et al., 2020)

De modo geral as macrografias apresenta aspectos homogêneo ao longo da seção transversal podendo ser visualizado o contraste que ocorre entre o MB e a região de solda que

sofreu deformação mecânica. Em algumas delas é possível visualizar a presença de poucos defeitos característicos desse processo. Neste sentido, as juntas 1 e 7 apresentaram defeito de tunelamento na região inferior da solda, conforme Figura 38 e 40, respectivamente, podendo ser visualizado em maior ampliação nas Figuras 38**(b e c)** e 40 **(b e c)**, respectivamente. Além dessa região mais ao centro da região inferior, um pouco mais acima dela no lado de avanço observa-se a presença de pequenos pontos de vazio seguindo uma direção de fluxo do material. Já em relação as micrografias se percebe que esse contraste se reflete na diferença granulométrica associada a cada região oriunda da soldagem.

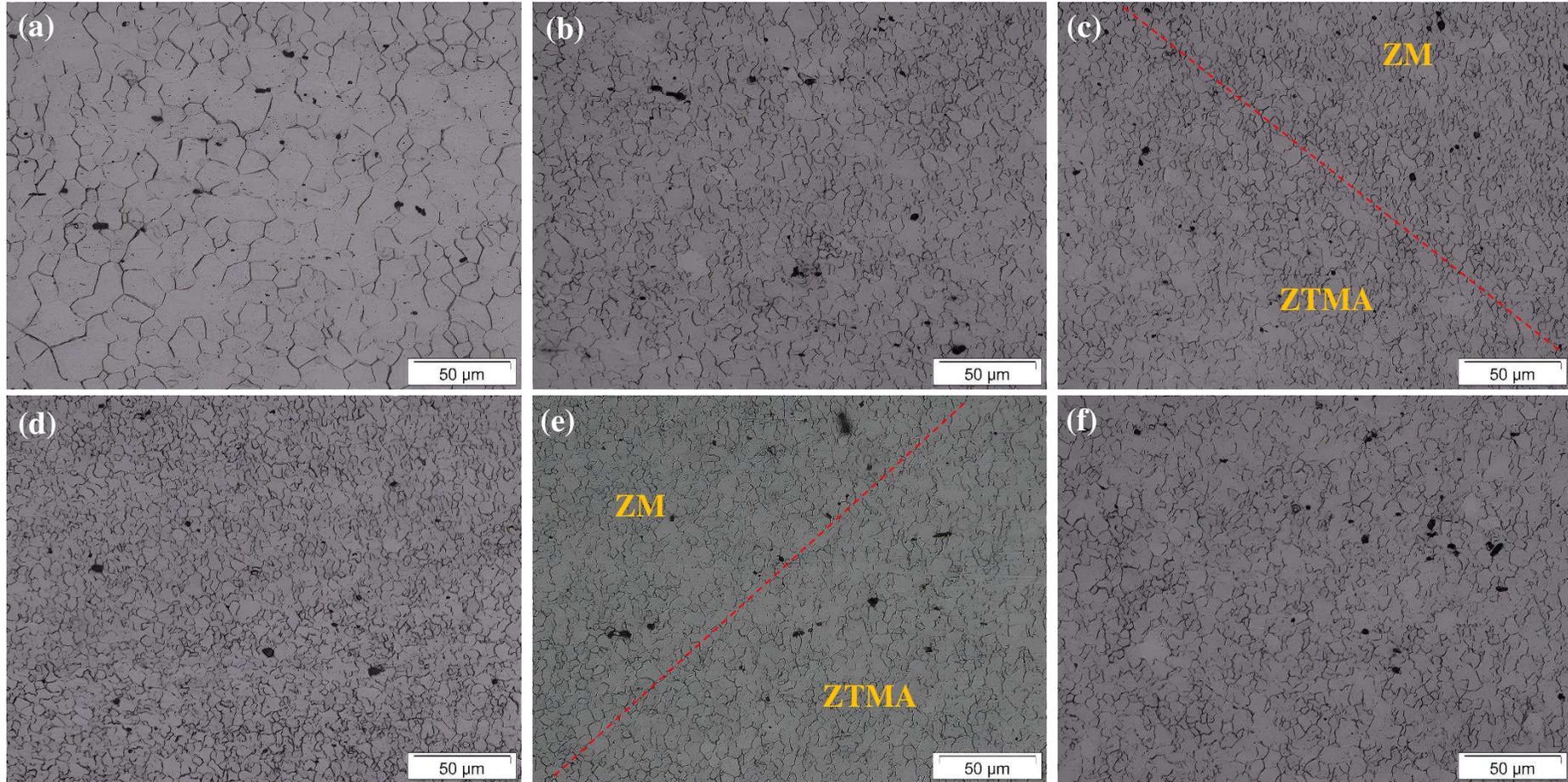
Nas micrografias se percebe um padrão na granulometria das regiões, onde se tem tamanhos de grãos que se distinguem a medida que atravessa a região de solda desde o MB. Sendo assim, nas juntas 2 (Figura 43) e 6 (Figura 41) observou-se pouca modificação na microestrutura das regiões em relação ao MB. Neste sentido, o tamanho médio em torno de 10 e 10,7 μm na ZM dos dois experimentos, respectivamente, evidenciam uma recristalização dinâmica de pouca intensidade, não sendo capaz de refinar bem a microestrutura, uma vez que o tamanho médio dos grãos do MB foi de 12,7 μm .

Figura 41: Junta 6 Micrografia em ampliação de 500x nas regiões de a) MB, b) ZTMA avanço, c) ZM e d) ZTMA recuo.



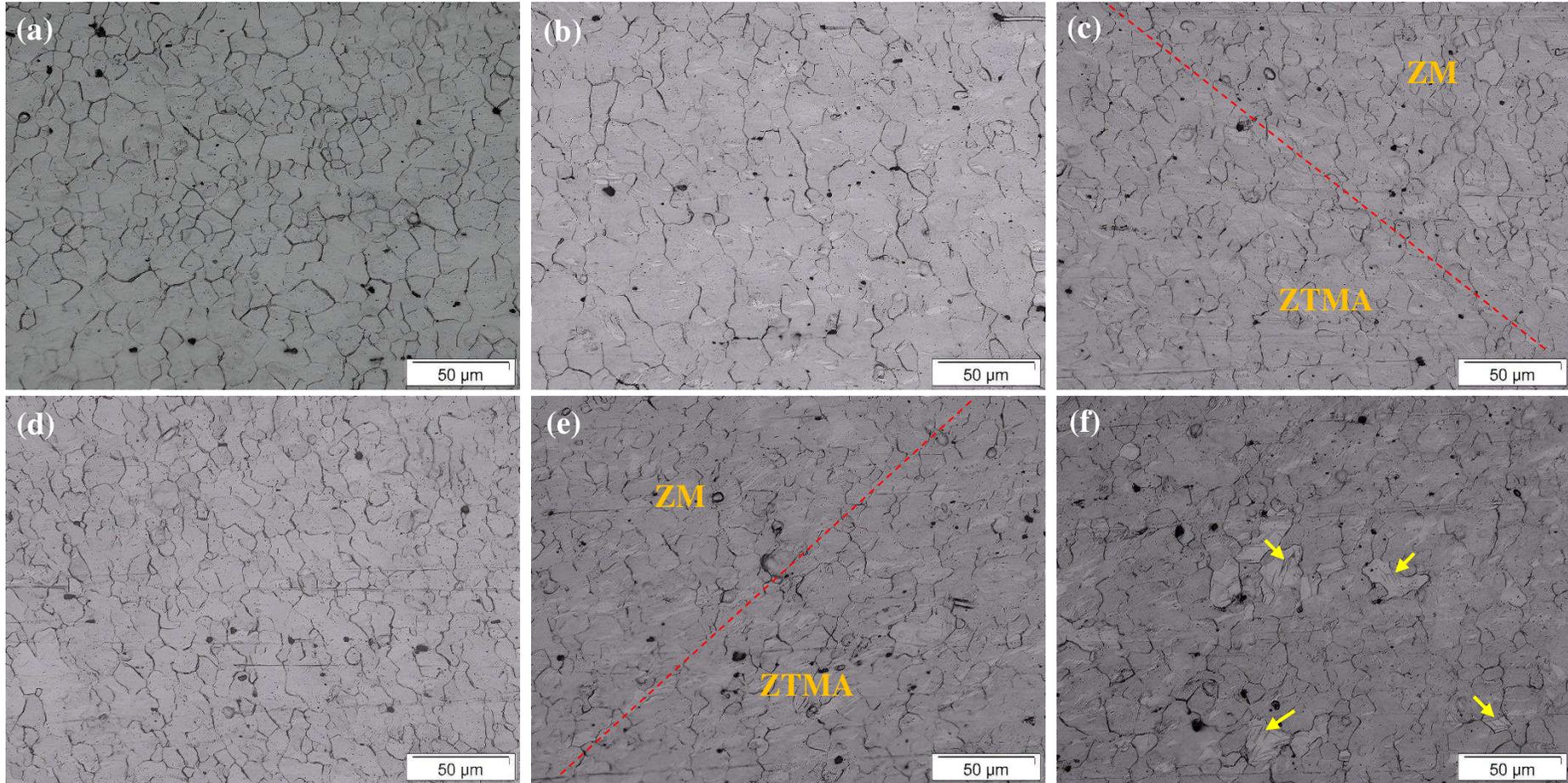
Fonte: Autoria própria

Figura 42: JUNTA 1 com ampliação de 500x em a) MB b) ZTMA AVANÇO c) ZM/ZTMA AVANÇO d) ZM e) ZM/ZTMA RECUIO e f) ZTMA RECUIO.



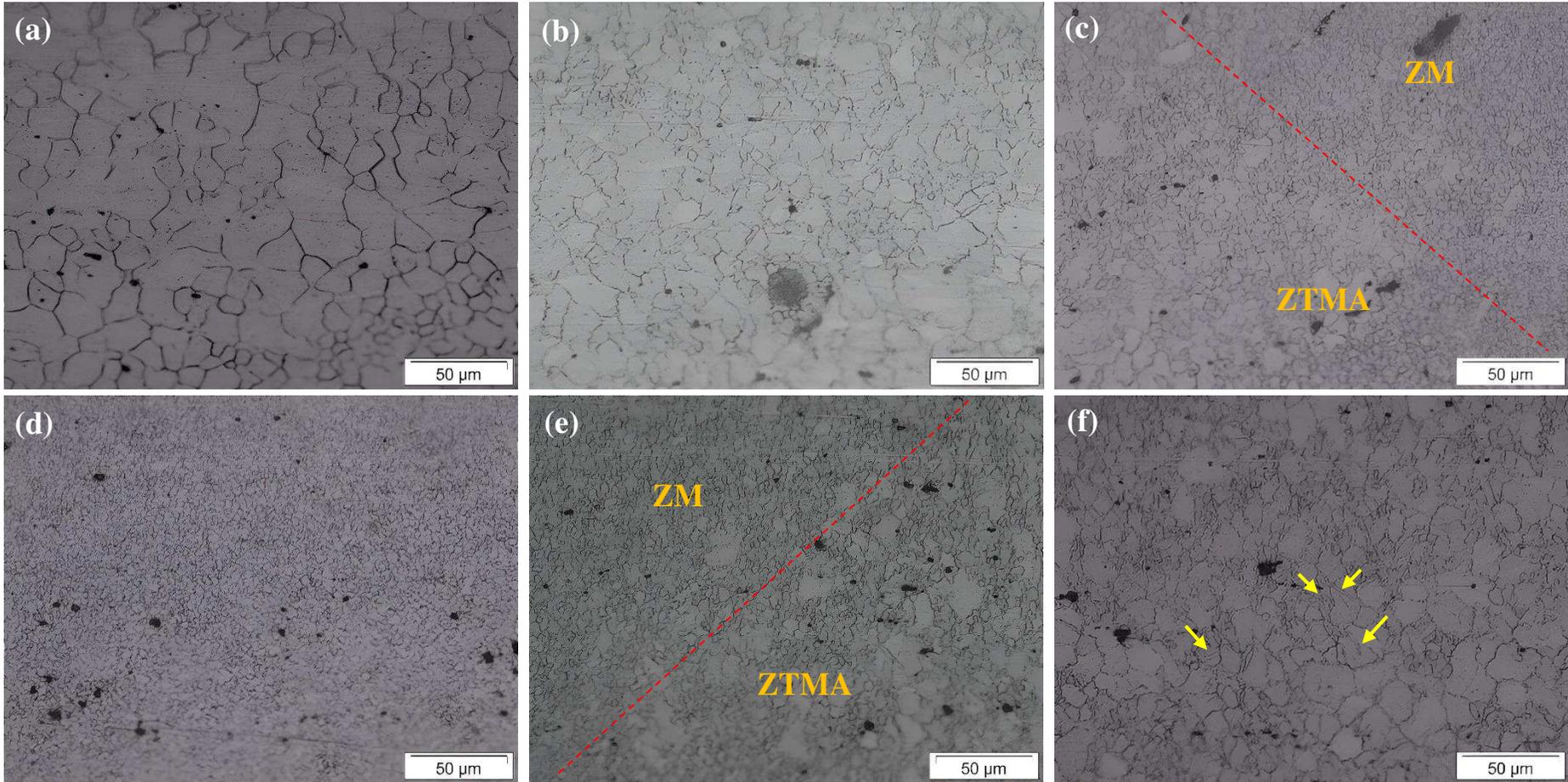
Fonte: Autoria própria.

Figura 43: JUNTA 2 com ampliação de 500X em a) MB b) ZTMA AVANÇO c) ZM/ZTMA AVANÇO d) ZM e) ZM/ZTMA RECUIO e f) ZTMA RECUIO.



Fonte: Autoria própria.

Figura 44: JUNTA 7 com ampliação de 500X em a) MB b) ZTMA c) ZM/ZTMA avanço d) ZM e) ZM/ZTMA recuo e f) ZTMA recuo.



Fonte: Autoria própria.

De maneira inversa, nas regiões da ZTMA dos dois lados (avanço e recuo) houve um aumento da granulometria, estando atrelado ao fato de que nessas juntas as condições (parâmetros) impostas combinando maior nível de rotação com menor nível de velocidade de soldagem favoreceram para um maior aporte de calor, portanto, evidenciando o efeito da temperatura excessiva na formação microestrutural dessas juntas. Onde a maior temperatura possibilitou-as um maior tempo para que pudessem crescer e, eventualmente, exceder o tamanho original dos grãos do MB, influenciando conseqüentemente nas propriedades mecânicas. Ficando esse crescimento mais evidente no experimento 2, corroborando com os resultados de resistência mecânica obtidos e apresentados na seção 4.6 através do ensaio de tração, em que apresentaram a segunda e terceira menor resistência, respectivamente e, nos perfis de dureza na seção 4.8. Nas duas condições foi possível observar a presença de maclas e/ou geminação (seta azul) na ZTMA do lado de recuo.

É importante mencionar que a ZTMA do lado de recuo do experimento 6 apresentou uma microestrutura com formações pontuais de grãos de dimensões consideráveis (um alongamento expressivo do grão), destacando-se significativamente perante a granulometria geral, conforme destacado por setas amarelas na Figura 41d. Essa característica também foi observada por (ZHANG et al., 2019) o qual atribuíram à insuficiente deformação plástica e ao calor de fricção que impossibilitou uma recristalização dinâmica completa, culminando em grãos de tamanhos bem distintos. Fenômeno também observado por (SINGH; KURIACHEN, 2022) na região da HAZ (atribuindo como formação necklace), causado pelo aumento da temperatura ao diminuir a velocidade de soldagem, mas também revelando que na ZTMA das juntas analisadas foram observados grãos de tamanhos diversificados, compreendendo grãos grossos e recristalizados finos.

Em relação aos experimentos 1 (Figura 42) e 7 (Figura 44) foi observado um significativo refinamento dos grãos, apresentando tamanhos médios em torno de 4 e 3,3 μm , respectivamente, evidenciando uma recristalização dinâmica na ZM que resultou em uma região composta de grãos recristalizados equiaxiais refinados. Pois a exposição em menor temperatura nesses casos devido à aplicação dos parâmetros terem sido em níveis que contribuíram para esse resultado, ou seja, velocidade de rotação de 560 rpm e velocidades de soldagem de 41 e 95 mm/min para as juntas 1 e 7, respectivamente, fez com que houvesse uma mitigação na recristalização secundária, o que conseqüentemente impossibilitou o crescimento dos grãos, mantendo-os sob condições de refino. Influenciando conseqüentemente nos perfis de microdureza, como será discutido posteriormente na seção 4.8. O tamanho médio de grão da ZM de cada uma das juntas encontra-se detalhado na Tabela 14.

Tabela 14: Tamanho médio de grão.

Experimentos	ZM (μm)
Junta 1	4
Junta 2	9,9
Junta 3	3,6
Junta 4	9,3
Junta 5	6,4
Junta 6	10,7
Junta 7	3,3
Junta 8	9,8

Fonte: Autoria própria.

De modo geral, é possível observar nitidamente a diferença entre a ZM e a ZTMA, correspondente a região de interface nas Figuras 42 e 44. Portanto, enquanto a ZM apresenta uma microestrutura com grãos mais refinados, a ZTMA se apresenta com uma granulometria fina na região ligeiramente as margens da ZM – ainda em consequência do processo mecânico da ferramenta (pino) – e, a medida que se desloca em direção ao MB, a microestrutura vai apresentando um crescimento e alongamento gradativo dos grãos de maneira não homogênea, ou seja, nesta região os tamanhos de grãos se mostram de maneira bem variada. Esse fenômeno se apresenta de maneira mais evidente na junta do experimento 7. Essa diferença de tamanho de grão vista na região da ZTMA se deriva da deformação e fluxo plástico insuficiente e do nível de calor experimentado provocando uma recristalização dinâmica incompleta da microestrutura (LIU et al., 2018) (Figura 44 c e e). Dentro deste contexto, a região de interface se caracteriza como potencial local mais fraco da junta soldada pelo processo FSW (ZHANG et al., 2019).

Somado a isso, independente das condições impostas, as juntas apresentam redução do tamanho de grão na ZM e todas as regiões com formação microestrutural equiaxial, mostrando uma irregularidade considerável na morfologia das juntas 1 e principalmente na 7 com grãos recristalizados equiaxiais finos, que pelos parâmetros utilizados de velocidade de rotação de 560 rpm e velocidades de soldagem de 41 e 95 mm/min, respectivamente, se constata que as condições favoreceram para o menor grão.

Com base nos resultados apresentados e sabendo que a ZM – a distribuição dos grãos foi homogênea nessa região – experimenta considerável deformação plástica em decorrência dos efeitos provocados pela combinação dos diferentes níveis de parâmetros aplicados atrelados a ferramenta, observou-se uma significativa modificação do tamanho médio dos grãos desta região em alguns casos, apresentando reduções de 68, 21, 16 e 74% para os experimentos 1, 2, 6 e 7, respectivamente. Enquanto isso na região da ZTMA, caracterizada pela recristalização

incompleta ocorreram duas situações distintas. Nos experimentos 1 e 7 os grãos foram reduzidos. Em relação a 2 e 6 os grãos tiveram um aumento em seus tamanhos. O que vem estar atrelado ao fato de a microestrutura ter tido tempo de crescer e conseqüentemente não apresentar uma microestrutura completamente refinada em função da temperatura experimentada.

Como é de conhecimento, a relação dos parâmetros – rotação e avanço – aplicados tem forte influência na temperatura de pico da ZM. Desta forma, de acordo com estudos anteriores (COMMIN et al., 2009; XIN et al., 2016) foi estabelecida uma relação dos parâmetros (rotação da ferramenta e velocidade de soldagem) com a temperatura, estimando que a temperatura de pico atingida na ZM durante o processo FSW pode ser calculada de acordo com a equação 2.

$$\frac{T}{T_M} = K \cdot \left(\frac{W^2}{V \cdot 10^4} \right)^\alpha \quad (2)$$

Onde T_M , T , W e V correspondem a temperatura de fusão do MB, temperatura na ZM, taxa de rotação e velocidade de soldagem, respectivamente. Somado a isso, para ligas de Mg AZ31 considera-se T_M e as constantes K e α como sendo 610 °C, 0.8052 e 0.0442, respectivamente (COMMIN et al., 2009; XIN et al., 2016).

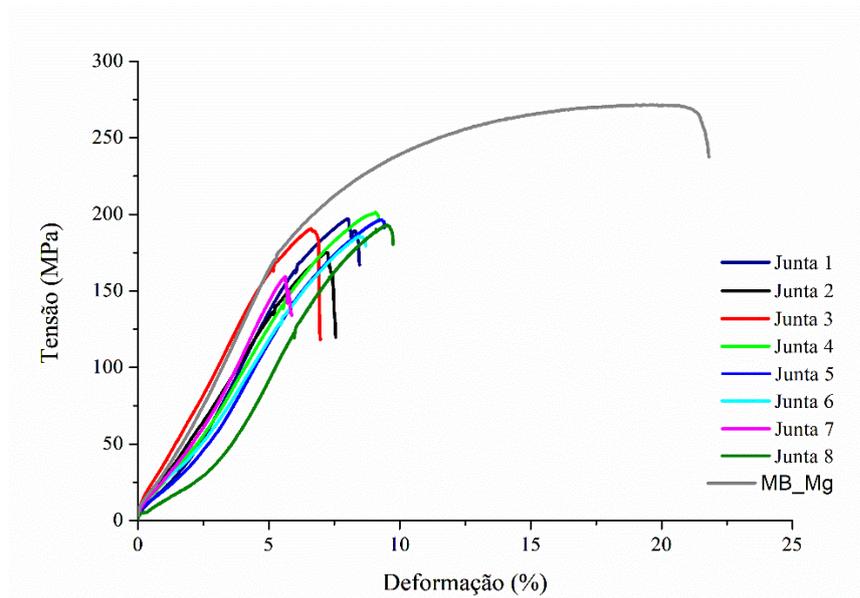
Em meio a isso, a temperatura calculada para cada um dos experimentos 1, 2, 6 e 7 durante o processo FSW corresponderam a 485, 518, 518 e 468 °C, respectivamente. O que por consequência atingiu a temperatura de recristalização das ligas de Mg que estão em torno de 400 °C (ZHANG et al., 2019). Sob influência do intenso fluxo plástico e efeito térmico uma forte recristalização dinâmica ocorreu na ZM (junta 1 e 7). Portanto, a ZM era composta por grãos recristalizados equiaxiais finos, o que também foi observado por (LIU et al., 2018; WANG et al., 2017) ao submeterem a junta a uma velocidade de rotação de 880 rpm e uma velocidade de soldagem de 60 mm/min.

Esses resultados se somam as constatações averiguadas na tração e principalmente na microestrutura, uma vez que na junta 7, por exemplo, foi onde se teve a menor temperatura, com isso, após a recristalização dos grãos as condições (560 rpm e 95 mm/min) não permitiram tempo hábil para recuperá-los.

4.6 ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL

Por meio deste ensaio foi possível determinar os níveis máximos de resistência a tração, bem como a propriedade de deformação de cada uma das juntas soldadas com seus respectivos parâmetros adotados. Diante disso foi possível perceber e/ou observar variações nos valores obtidos, o que está diretamente relacionado com os diferentes parâmetros submetidos a análise. Sendo assim, através da Figura 45 observa-se uma visão geral das curvas tensão x deformação característicos deste tipo de ensaio abrangendo todas as 8 juntas soldadas.

Figura 45: Curvas de tração x deformação geral (juntas e MB).



Fonte: Autoria própria.

De modo geral, com a extração desses importantes resultados o que se observa nos níveis de resistência das variadas juntas analisadas é o fato de possuírem valores inferiores ao do MB chegando a uma redução de 43%, ou seja, essa propriedade atingiu um range que variou de 155 na junta 7 a 197 MPa na junta 1, correspondendo ao menor e maior valor, respectivamente. Perante o exposto, é importante reafirmar que o FSW traz significativas mudanças nos níveis de deformação e temperatura experimentadas durante a formação de suas variadas regiões, culminando em mudanças no comportamento mecânico dessas juntas. Com isso, pesquisadores tem explanado que essas modificações na resistência à tração tem sido fruto de diferentes graus de deformação provocado por diferentes orientações cristalográficas experimentado nas regiões – ZM até o MB – da junta, o que acaba tornando a resistência a

tração do MB maior em relação a junta soldada (INOUE et al., 2021; LIU et al., 2021; ZHANG et al., 2020a, 2020b).

A literatura é unânime em apontar a eficiência da junta como o resultado de sua resistência a tração em relação ao do MB em termos percentuais. Considerando este fato, a eficiência das juntas analisadas nesta pesquisa esteve em um intervalo entre 57 e 73%. Levando em consideração os níveis de deformação, também foi possível verificar uma diminuição em relação ao MB, onde foram alcançadas deformações de 5.8 a 9.7%, enquanto o material de base foi de 21.8%. Do mesmo modo, por meio da Tabela 15 observa-se os diferentes valores médios de resistência a tração, deformação e consequente eficiência (em relação ao metal de base) para cada junta soldada em decorrência de serem analisados a partir de três corpos de prova por junta.

Tabela 15: Valores médios de resistência a tração para cada junta soldada.

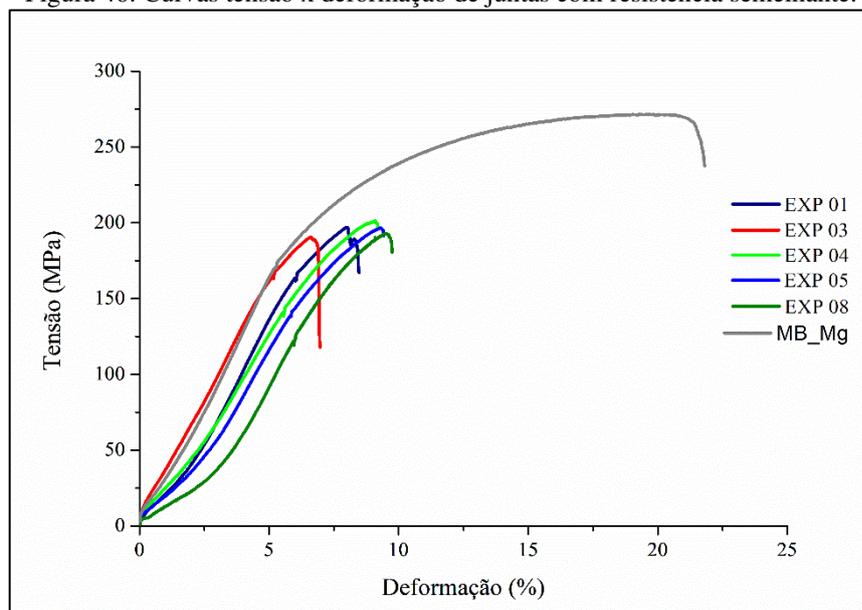
Experimentos	Média UTS (MPa)	Eficiência (%)	Deformação (%)
Junta 1	197	72	8.4
Junta 2	168	62	7.5
Junta 3	196	72	6.9
Junta 4	196	72	9.1
Junta 5	191	70	9.4
Junta 6	184	68	8.6
Junta 7	155	57	5.8
Junta 8	196	72	9.7
Metal base	271	-	21.8

Fonte: Autoria própria.

Extraindo ainda mais esses resultados, pode-se fazer algumas observações pertinentes e interessantes envolvendo uma análise sistemática da interação entre as juntas com base nos distintos níveis de parâmetros aplicados e consequente valores obtidos. Nisso, tem-se que as juntas 1, 3, 4, 5 e 8 obtiveram praticamente o mesmo valor de resistência a tração com interações distintas entre os níveis de seus parâmetros como observado anteriormente e destacado separadamente na Figura 46. Evidenciando que nesses casos, mesmo com a aplicação de diferentes possibilidades de produzi-las não foi suficiente para que houvesse modificações na resistência da junta. Nas demais juntas houve variações chegando a atingir índices significativos nos valores de resistência em relação as juntas supracitadas como pode ser observado em algumas situações particulares quando avaliados de maneira separada.

Analisando os dados de tração obtidos por cada junta cabe destacar que nas juntas 1 e 7 houve uma disparidade em seus valores de resistência máxima suportada no ensaio de tração, mas que seus níveis de parâmetros aplicados continham uma certa semelhança, uma vez que a rotação e a penetração da ferramenta foram iguais. Sabendo que a rotação e o avanço da ferramenta desempenham fundamental importância no processo, pode-se inferir que o aumento da velocidade de soldagem foi determinante para que a junta 7 apresentasse menor resistência, pois proporcionou menor aporte térmico na junta em níveis que impossibilitou o movimento e agitação adequada e/ou eficiente do material. Portanto, ocasionando a formação de defeito túnel na linha de solda, como pôde ser constatado por inspeção visual prévia após confecção do corpo de prova, afetando conseqüentemente na resistência à tração. Ao realizarem testes experimentais em juntas de liga de Mg, (SINGH; KURIACHEN, 2022) observaram que em determinado aumento de velocidade de soldagem a resistência a tração da junta foi prejudicada em decorrência de entrada de calor insuficientemente capaz de agitar e misturar adequadamente o material, conseqüentemente levando-a a má formação com presença de defeitos na região de solda. Em pesquisa realizada, (UGENDER, 2018) também observou a formação de defeitos túneis ao aplicar velocidades de soldagem mais altas conforme aplicações específicas deles, atribuindo este resultado ao amolecimento insuficiente por deformação plástica em decorrência de maior área de interface ZM/MB.

Figura 46: Curvas tensão x deformação de juntas com resistência semelhante.



Fonte: Autoria própria.

Tanto a rotação quanto a penetração estiveram dispostos em condições que favoreceram diretamente a maior entrada de calor na junta 2 em relação as juntas 1 e 7, principalmente em se tratando de maior rotação, o que por consequência faz com que a região experimente maiores níveis de temperatura, fazendo com que ocorra maior amolecimento do material a soldar, contribuindo conseqüentemente para possível formação de rebarbas excessivas. Ainda tendo o fator penetração favorecendo o maior esforço e poder de geração de temperatura. Mas de modo particular entre a junta 1 e 2, uma vez que na junta 7 houve uma maior velocidade de avanço, o que acabou prejudicando o desempenho da junta em relação as demais como explicado anteriormente na relação das juntas 1 e 7. Em pesquisa realizada por (SUCHARITHA; RAVI SANKAR; UMAMAHESWARAO, 2021) foi observado que a alta rotação da ferramenta provocou um aumento da temperatura por unidade de comprimento na região de solda da junta levando a um resfriamento mais lento, o que proporcionou maior tempo para que os grãos pudessem crescer e conseqüentemente diminuir a resistência da junta. Comportamento também observado por (WANG et al., 2017).

Como a configuração da junta 6 esteve com maior ângulo de inclinação em relação a junta 2 isso contribuiu para que o ombro da ferramenta tivesse maior controle sobre a movimentação do material, ou seja, agindo como agente mitigador da expulsão de material, evitando assim, a falta de material na região de solda, o que acabaria provocando defeitos tipo túnel. A menor entrada do ombro na junta 6 também agiu positivamente para o menor esforço na junta. Portanto, os casos mencionados permitiram que a junta 2 apresentasse maior formação de rebarbas e maior temperatura experimentada, o que possivelmente tenha vindo a causar o aumento do tamanho de grãos, justificando a menor resistência. A junta 6 conseguiu atingir uma resistência maior, evidenciando que o maior ângulo com poder de melhor contenção do material e menor penetração resultam no melhor resultado em termos de resistência mecânica para a junta.

Extraindo os dados da junta soldada 4 (rotação de 1170 rpm, avanço de 95 mm/min, inclinação 1°, penetração de 0.1 mm) e analisando juntamente com a junta 2 (rotação de 1170 rpm, avanço de 41 mm/min, inclinação de 1°, penetração de 0.3 mm), ou seja, possuindo mesma rotação, mas o avanço com extremos opostos – avanço em maior e menor nível, respectivamente – pode-se perceber que a junta 4 atingiu uma resistência bem superior a junta 2, conforme é possível observar na Tabela 15.

Algo explicável para isso é o fato de ter havido o que pode-se chamar de equilíbrio entre as condições da junta 4, onde aplicou-se maior velocidade de rotação e avanço, compensando o efeito térmico (alto) provocado pela alta rotação e avanço baixo na junta 2. O caso da junta 2

ter uma penetração mais profunda também se caracteriza como um fator influenciador de maior temperatura em decorrência do maior esforço exercido, somando-se com o menor avanço, o que por consequência pode ter ocasionado a formação de maior tamanho de grão na junta, resultando na menor resistência. Outro fator importante de mencionar diz respeito a formação de rebarbas que no caso da junta 2 foram bem significativas, uma vez que esse tipo de defeito pode também acabar influenciando nas propriedades. Mas embora tenha tido relevante formação de flash, pode-se inferir que sua formação seria maior em determinados casos, tendo em vista a maior penetração, ou seja, se com esse aumento a espessura da junta acaba diminuindo em relação ao metal de base, o material dessa região conseqüentemente terá que ser realocado em outro lugar.

4.7 FRACTOGRAFIA

Imagens dos corpos de prova fraturados encontram-se apresentados no Quadro 3. Nele é possível observar os locais em que ocorreram a fratura e delimitações de avanço (A) e recuo (R). Onde na sua grande maioria a fratura aconteceu em uma região de interface caracterizada por encontrar-se entre a ZM e o MB, sendo assim, os locais de fratura aconteceram entre a interface e ZM, na interface e na ZM. Nas situações em que a fratura aconteceu predominantemente na interface e na interface, essa localização pode indicar um sinal da região de ZTA nas juntas. Os resultados condizem com as investigações e características apresentadas por (MOTALLEB-NEJAD et al., 2014).

Quadro 3: Amostras fraturadas e suas respectivas localizações de fratura.

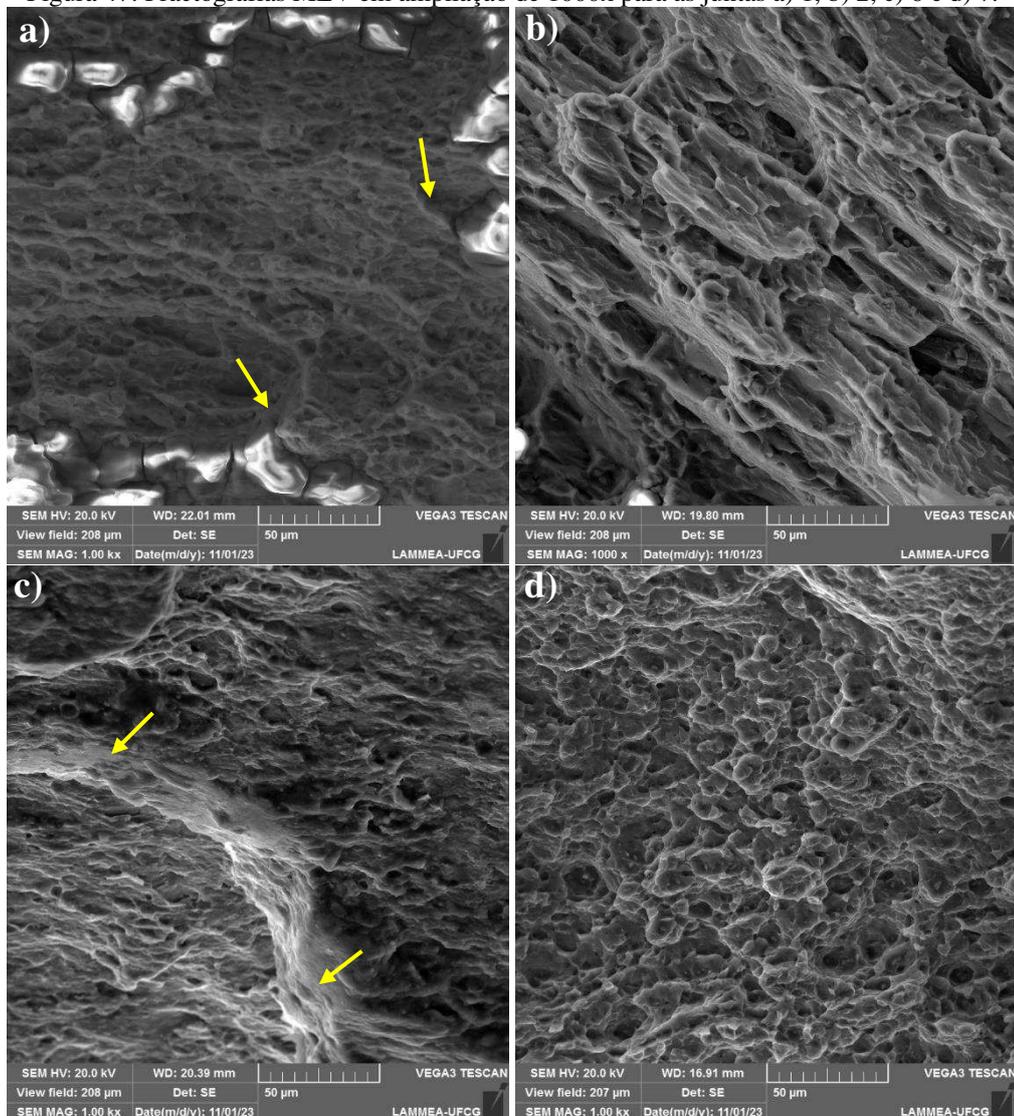
Amostras	Local da fratura	Imagem do CP fraturado
Junta 1	Interface	
Junta 2	Predominantemente na interface e ZM	
Junta 3	ZM	
Junta 4	Interface	
Junta 5	Predominantemente na interface e ZM	
Junta 6	Predominantemente na interface e ZM	
Junta 7	ZM	
Junta 8	Interface	

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 47 estão apresentadas as fractografias (imagem da superfície de fratura) típicas de fratura por tração das juntas 1, 2, 6 e 7, que assim como na análise microestrutural, foram avaliadas por apresentarem-se com maiores variação no resultado de resistência (ensaio de tração). Possibilitando através delas avaliar a natureza (mecanismos e tipo) da fratura.

Na Figura 47a (junta 1) se observa presença de dimples com possível formação de fratura secundária (setas amarelas). Na Figura 47c (junta 6) também se observa grande quantidade de dimples juntamente com a presença mais marcante de fraturas secundárias (setas amarelas) em algumas regiões. Comportamento consistente com as características observadas por (MOTALLEB-NEJAD et al., 2014).

Figura 47: Fractografias MEV em ampliação de 1000x para as juntas a) 1, b) 2, c) 6 e d) 7.



Fonte: Autoria própria.

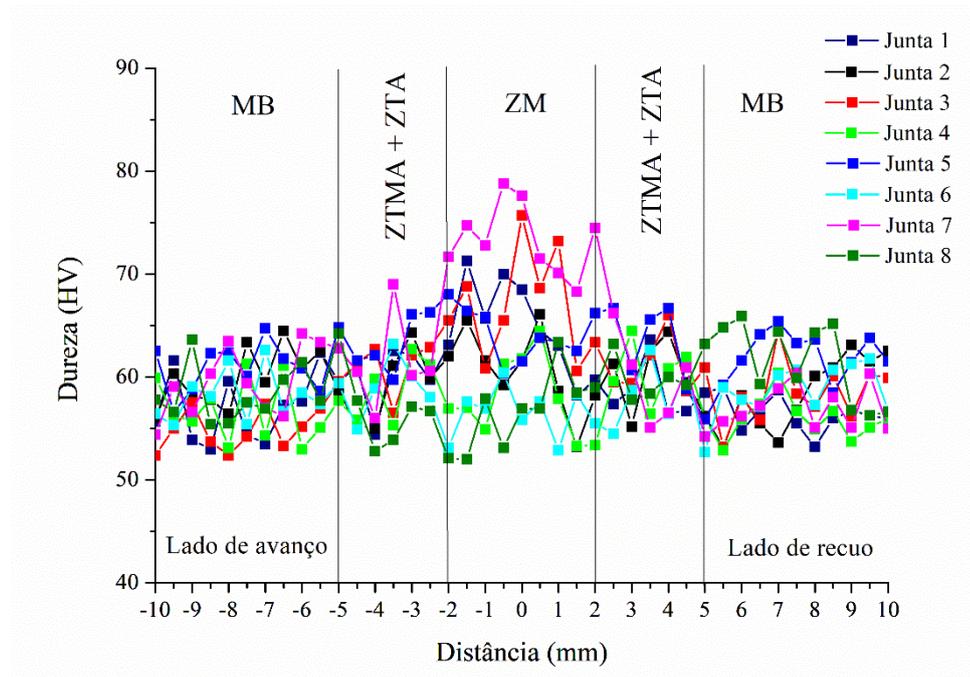
Na Figura 47b (junta 2) observou-se a presença de dimples alongados acompanhados de cumes de diferentes tamanhos na superfície. A superfície de fratura da junta 7 (Figura 47d) apresentou característica semelhante contendo grande quantidade de dimples, caracterizando a fratura de natureza dúctil, o que também foi observado por (SINGH; SINGH; SINGH, 2021).

De maneira geral, todas as superfícies de fratura apresentam predominantemente características dúcteis, que possui o indicativo de formação, crescimento e propagação de vazios. Apresentando-se de forma peculiar com comportamento em formato taça. As imagens revelam e/ou confirmam o comportamento característico de natureza dúctil deste tipo de material ao submetê-lo à tração.

4.8 MICRODUREZA VICKERS

O ensaio de dureza permite-nos obter dados qualitativos referente ao comportamento do material ou como no caso em específico, da junta soldada. Nesse sentido os dados de microdureza Vickers obtidos possibilita analisar a variação do perfil na junta soldada sob as diferenças metalúrgicas ocorridas no processo de soldagem, uma vez que isso é proveniente das diferenças microestruturais como visto na seção 4.5 sob efeito dos parâmetros aplicados. Com base nisso, os perfis de microdureza se encontram organizadas na Figura 48.

Figura 48: Perfis de microdureza Vickers ao longo da seção transversal das juntas.

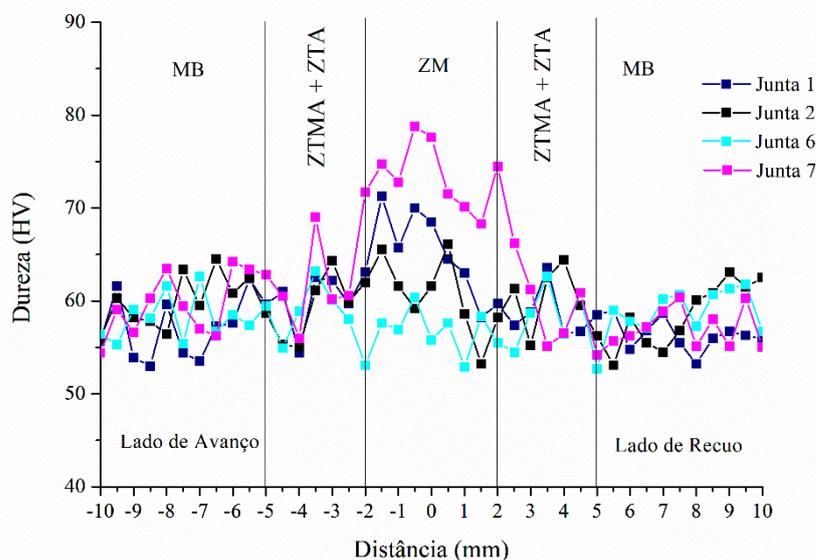


Fonte: Autoria própria.

Na Figura supracitada tem-se uma visão geral da variação no perfil de microdureza obtido a partir das diferentes juntas soldadas. Nela é possível observar as delimitações (distância entre cada endentação) correspondente aos locais em que cada ponto da endentação foi aplicado no que diz respeito as diferentes regiões desde o MB até o centro da solda e seus respectivos lados (avanço e recuo). O ponto zero corresponde a região central da solda e as distâncias negativas e positivas referente ao distanciamento em direção ao MB dos lados de avanço e recuo, respectivamente.

Diante disso, percebe-se que praticamente não ocorreu variações significativas e, que as combinações de diferentes condições impostas na soldagem não foram suficientes para que houvesse modificação expressiva em termos de microdureza na junta. Exceto mudança nos perfis das juntas 1, 3 e 7 que chegaram a ter modificação bem notável, alcançando os maiores níveis de microdureza na ZM, ou seja, excedendo os valores de microdureza do MB, corroborando com os dados apresentados na microestrutura, e em especial na Tabela 14. Os maiores níveis de microdureza obtidos na ZM dessas três juntas deve-se ao fato dessas juntas terem sido expostas a um menor tempo sob temperatura durante o processo FSW, portanto, impossibilitando o crescimento dos grãos. Desta forma, justificando que essa modificação mais acentuada nesses dois casos ocorreu devido ao significativo refinamento dos grãos dessas juntas. Tal característica vem confirmar a relação estabelecida por Hall-Petch. Na Figura 49 é possível observar os perfis de microdureza das juntas 1, 2, 6 e 7 vistas com maiores detalhes na microestrutura.

Figura 49: Perfis de microdureza Vickers das 4 juntas analisadas em maior detalhe em microestrutura e tração.



Fonte: Autoria própria.

Os valores médios de microdureza das juntas soldadas estiveram em um intervalo de 57,1 a 73,3 HV, sendo que dentro desse intervalo, estiveram comportados da seguinte maneira: No material de base foi obtido uma média de $58,4 \pm 2,5$ HV, na ZTMA junto com ZTA obteve-se valores entre 57,1 a 63,4 e de 57,6 a 62,4 HV no lado de avanço e de recuo, respectivamente, enquanto isso na ZM foi verificado que a microdureza esteve em um intervalo médio de 56,4 a 73,3 HV. Portanto, os valores de microdureza acabaram apresentando um perfil com valores sem grandes alterações posterior ao FSW. Conforme os valores de microdureza médios da ZM apresentados na Tabela 16, observa-se que nas juntas 1, 3, 5 e 7 foram obtidos os maiores valores. Esse comportamento é consequência do menor tamanho de grão obtido nessas juntas, conforme apresentado na Tabela 14 da seção 4.5. Os resultados de microdureza média referente a cada região encontra-se apresentados na Tabela 16.

Tabela 16: Valores médios de microdureza HV em diferentes regiões da junta.

Experimentos	ZTMA+ZTA Avanço (HV)	ZM (HV)	ZTMA+ZTA Recuo (HV)
Junta 1	$59,9 \pm 2,7$	$64,9 \pm 4,2$	$58,6 \pm 2,4$
Junta 2	$59 \pm 3,2$	$60,7 \pm 3,7$	$59,8 \pm 3,3$
Junta 3	$60,8 \pm 2,2$	$66,9 \pm 4,9$	$61,1 \pm 2,5$
Junta 4	$58,7 \pm 2,7$	$57,9 \pm 3,7$	$59,8 \pm 3$
Junta 5	$63,4 \pm 2,4$	$64,2 \pm 2,4$	$62,4 \pm 4,2$
Junta 6	$59,1 \pm 2,5$	$56,4 \pm 2,3$	$57,6 \pm 3,5$
Junta 7	$61,5 \pm 3,9$	$73,3 \pm 3,2$	$59 \pm 4,2$
Junta 8	$57,1 \pm 3,6$	$56,6 \pm 3,5$	$60,3 \pm 2,1$

Fonte: Autoria própria.

Em todos os casos foi observado que os valores de microdureza na ZM estiveram em condições similares ou pouco maiores que o MB em decorrência da recristalização dinâmica ocorrida nesta região, o que também foi observado por (GULATI et al., 2020). Comportamento similar de dureza maior na ZM em relação ao MB foi obtido por (LIU et al., 2018). Como explanado, as características microestruturais são fundamentais nos comportamentos de dureza do material. Nisso, menores tamanhos de grão proporcionam maiores valores de dureza. Portanto, isso ocorre devido o maior número de contornos de grãos terem um aumento no poder de restringir os movimentos de discordância, causando consequentemente maior resistência à deformação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta seção será dada ênfase às conclusões gerais dos resultados obtidos nesta pesquisa, bem como sugestões para trabalhos futuros a partir dos dados apresentados neste trabalho de dissertação.

5.1 CONCLUSÕES

Diante dos dados e resultados apresentados no decorrer deste trabalho pôde-se extrair algumas conclusões, portanto:

As juntas soldadas apresentaram bom aspecto visual externo sem a presença de falhas ou descontinuidades

Os resultados do planejamento experimental fatorial fracionário para a resposta de resistência à tração evidenciaram que o modelo analisado é estatisticamente significativo. Por meio desta técnica juntamente com as superfícies de resposta foi possível determinar os parâmetros de maior influência e a consequência destes na resistência à tração dentro das condições apresentadas. Portanto, o modelo estatístico mostrou que os efeitos individuais de inclinação e penetração e todas as interações se mostraram significativos com considerável influência nos resultados obtidos.

Em termos de microestrutura, todas as juntas apresentaram refinamento e distribuição mais uniforme na ZM com a presença de grãos recristalizados equiaxiais em decorrência da ação mecânica e térmica ocorrida na região.

As juntas 1, 3 e 7 obtidas com velocidade de rotação de 560 rpm, velocidade de soldagem de 41, 95 e 95 mm/min, respectivamente, inclinação da ferramenta de 1, 1 e 3°, respectivamente, e penetração do ombro de 0.1, 0.3 e 0.1 mm, respectivamente, apresentaram maior refinamento dos grãos na ZM com reduções de 68, 72 e 74%, respectivamente, no tamanho médio dos grãos.

A resistência à tração das juntas foi significativamente influenciada pelos níveis de parâmetros adotados, apresentando valores que chegaram a atingir 72% (eficiência) da resistência do material de base. Sendo os diferentes valores atribuídos principalmente à influência da temperatura e deformação plástica ocorridas durante o processo de soldagem.

O menor poder de geração de calor na junta 7 sob efeito dos parâmetros de velocidade de rotação de 560 rpm, velocidade de soldagem de 95 mm/min, inclinação da ferramenta de 3°

e penetração da ferramenta de 0.1 mm, foi determinante para a menor resistência obtida nessa junta, pois impossibilitou o movimento e agitação adequada e/ou eficiente do material.

As imagens fractográficas de todas as juntas soldadas apresentaram grande quantidade de dimples, indicando fratura dúctil das juntas.

De maneira geral as juntas soldadas não apresentaram variações significativas em seus níveis de microdureza. Dito isso, as juntas 1, 3, 5 e 7 com maior refinamento de grão apresentaram os maiores níveis de microdureza que atingiram valores de até aproximadamente 77 HV, confirmando a correlação do tamanho de grão com os valores de microdureza obtidos nas juntas soldadas.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar o efeito da variação dos parâmetros de soldagem sobre nasobre a resistência à corrosão das juntas soldadas pelo processo *Frction Stir Welding*;
- Avaliar o efeito da variação dos parâmetros de soldagem sobre os níveis de tensões residuais das juntas soldadas;
- Realizar estudo aprofundado com utilização de técnica EBSD para avaliar a textura cristalográfica apontando as direções e densidade dos planos basais das diferentes regiões microestruturais das juntas soldadas.

6 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, D. T. DE. Análise estrutural e avaliação mecânica de juntas soldadas por fricção e mistura mecânica FSW da liga de alumínio 5182-O. **Dissertação de Mestrado**, p. 120, 2015.
- AVAL, H. J. Microstructure and residual stress distributions in friction stir welding of dissimilar aluminium alloys. **Materials e design**, v. 87, p. 405–413, 2015.
- AVEDESIAN, M. M.; BAKER, H. **ASM Specialty Handbook: Magnesium and magnesium alloys**. [s.l.] ASM International, 1999.
- BAG, S.; YADUWANSI, D.; PAL, S. Heat transfer and material flow in friction stir welding. In: **Advances in Friction-Stir Welding and Processing**. Guwahati: Woodhead Publishing Limited, 2014. p. 21–63.
- BAILEY, N. S.; TAN, W.; SHIN, Y. C. A parametric study on laser welding of magnesium alloy AZ31 by a fiber laser. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 137, n. 4, 2015.
- BRASZCZYŃSKA-MALIK, K. N. Discontinuous and continuous precipitation in magnesium-aluminium type alloys. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 477, n. 1–2, p. 870–876, 2009.
- CAMPANELLI, L. C. **Estudo do processo de soldagem por fricção por ponto da liga de magnésio AZ31**. [s.l.] Universidade Federal de São Carlos, 2012.
- CAO, P.; STJOHN, D. H.; QIAN, M. The Effect of Manganese on the Grain Size of Commercial AZ31 Alloy. **Materials Science Forum**, v. 488–489, p. 139–142, 2005.
- CAO, X. et al. A review of laser welding techniques for magnesium alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 171, n. 2, p. 188–204, 2006.
- CAPELARI, T. V; MAZZAFERRO, J. A. E. Avaliação da geometria de ferramenta e parâmetros do processo FSW na soldagem da liga de alumínio AA 5052. **Soldagem e Inspecao**, v. 14, p. 215–227, 2009.
- CATORCENO, L. L. C. **Estudo do encruamento, recristalização e crescimento de grão em chapa da liga de magnésio AZ31B (Mg – 3% Al – 1% Zn – 0,3% Mn)**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2013.
- CELOTTO, S. Study of precipitation in aged binary Mg–Al and ternary Mg–Al–Zn alloys using ²⁷Al NMR spectroscopy. **Acta Materialia**, v. 49, n. 1, p. 41–51, jan. 2001.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica: processos de fabricação e tratamento**. 2. ed ed. [s.l.: s.n.].
- CHOUDHARY, A. K.; JAIN, R. Fundamentals of Friction Stir Welding, Its Application, and Advancements. In: DAVIM, J. P. (Ed.). **Welding Technology. Materials Forming, Machining and Tribology**. [s.l.] Springer, 2021. p. 41–90.
- CLARK, K. J.; CORP, W. D. Magnesium alloys: Metallographic techniques and microstructures. In: **ASM Handbook, v. 9. Metallography and Microstructures**. [s.l.] ASM International, 1985. p. 890–916.

- COELHO, R. S. et al. Microstructure and residual stresses in dissimilar Mg-Al-Zn-alloy single overlap laser beam welds. **Materials Science Forum**, v. 571–572, p. 361–366, 2008.
- COMMINS, L. et al. Friction stir welding of AZ31 magnesium alloy rolled sheets: Influence of processing parameters. **Acta Materialia**, v. 57, n. 2, p. 326–334, 2009.
- DANIEL, S. C. J.; LAKSHMINARAYANAN, A. K. Comparative Study of Friction Stir Welding and Underwater Friction Stir Welding on Magnesium ZE41 Alloy. In: VIJAYAN, S.; SUBRAMANIAN, N.; SANKARANARAYANASAMY, K. (Eds.). **Lecture Notes in Mechanical Engineering**. [s.l.] Springer Singapore, 2021. p. 755–766.
- DAVIM, J. P. **Welding Technology**. Aveiro: Springer, 2021.
- DUTTA, S. **Influência da alteração da trajetória de deformação no comportamento mecânico do Mg**. [s.l.] Aveiro, 2011.
- ELIEZER, D.; AGHION, E.; FROES, F. H. Magnesium science, technology and applications. **Advanced Performance Materials**, v. 5, n. 3, p. 201–212, 1998.
- ERAMUS. **Friction Stir Welding Handbook**. [s.l.: s.n.].
- ERICKSON, S. C.; VASS, C. Magnesium. In: **ASM Handbook, v. 2. Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials**. [s.l.] ASM International, 1990.
- FRIEDRICH, H. E.; MORDIKE, B. L. **Magnesium Technology: Metallurgy, Design Data, Applications**. 1. ed. ed. [s.l.] Springer Berlin, Heidelberg, 2006.
- GALIYEV, A.; KAIBYSHEV, R.; GOTTSTEIN. Correlation of plastic deformation and dynamic recrystallization in magnesium alloy ZK60. **Acta Materialia**, p. 1199–1207, 2001.
- GARCÍA, E. M. **Influence of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of extruded Mg-Zn based alloys**. [s.l.] Technischen Universität Berlin, Germany, 2009.
- GARG, A.; RATURI, M.; BHATTACHARYA, A. Influence of additional heating in friction stir welding of dissimilar aluminum alloys with different tool pin profiles. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 105, p. 155–175, 2019.
- GIPIELA, M. L.; MARTINS, F. Influência dos parâmetros de processo na soldagem da liga de alumínio 5052 pelo processo FSW. n. In: 8º Congresso Brasileiro de Engenharia De Fabricação, Salvador-BA ABCM, p. 18–22, 2015.
- GULATI, P. et al. Microstructural analysis of friction stir welded Mg AZ31 alloy. **Materials Today: Proceedings**, v. 26, p. 1145–1150, 2020.
- GUNN, G. **Critical Metals Handbook**. Gus Gunn ed. [s.l.: s.n.].
- GUPTA, M.; SHARON, N. M. L. Introduction to Magnesium. In: **Magnesium, Magnesium Alloys, and Magnesium Composites**. [s.l.] Wiley, 2011a. p. 1–12.
- GUPTA, M.; SHARON, N. M. L. Magnesium Alloys. In: **Magnesium, Magnesium Alloys, and Magnesium Composites**. [s.l.] Wiley, 2011b. p. 39–85.
- HOUSH, S.; MIKUCKI, B.; STEVENSON, A. Selection and application of magnesium and magnesium alloys. In: **ASM Handbook, v. 2. Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials**. [s.l.] ASM International, 1990. p. 1424–1589.
- INOUE, S. ICHI et al. Texture evolution and fracture behavior of friction-stir-welded non-

- flammable Mg–Al–Ca alloy extrusions. **Materials Science and Engineering A**, v. 799, n. 1, p. 140090, 2021.
- JAYASATHYAKAWIN, S. et al. Mechanical properties and applications of Magnesium alloy – Review. **Materials Today: Proceedings**, v. 27, n. xxxx, p. 909–913, 2020.
- Jl, P. et al. Residual stress distribution and microstructure in the friction stir weld of 7075 aluminum alloy. **Journal of materials science**, v. 50, p. 7262–7270, 2015.
- K YADAV, P.; KHURANA, M. K. Study of the performance parameters of friction stir welded magnesium AZ31B alloy at optimized process parameters. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, v. 235, n. 21, p. 5525–5541, 7 nov. 2021.
- KADIGITHALA, N. K.; VANITHA, C. Effects of welding speeds on the microstructural and mechanical properties of AZ91D Mg alloy by friction stir welding. **International Journal of Structural Integrity**, v. 11, n. 6, p. 769–782, 2020.
- KALEMBA-REC, I. et al. Effect of process parameters on mechanical properties of friction stir welded dissimilar 7075-T651 and 5083-H111 aluminum alloys. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 97, p. 2767–2779, 2018.
- KIMINAMI, C. S.; CASTRO, W. B. DE; OLIVEIRA, M. F. DE. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. 2. ed ed. [s.l.: s.n.].
- KOUADRI-HENNI, A.; BARRALLIER, L.; BADJI, R. Residual stresses of a magnesium alloy (AZ31) welded by the friction stir welding processes. **MATEC Web of Conferences**, v. 80, 24 out. 2016.
- KUMAR, N.; SU, J. Q.; MISHRA, R. S. Fundamentals of Friction Stir Welding. In: **ASM Handbook, V6A: Welding Fundamentals and Processes**. [s.l.] ASM International, 2011. p. 186–200.
- KUMAR RAJAK, D. et al. Friction-based welding processes: friction welding and friction stir welding. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 34, n. 24, p. 2613–2637, 2020.
- LASER, T. et al. The influence of manganese on the microstructure and mechanical properties of AZ31 gravity die cast alloys. **Acta Materialia**, v. 54, n. 11, p. 3033–3041, 2006.
- LI, X. et al. Influence of second-phase precipitates on the texture evolution of Mg-Al-Zn alloys during hot deformation. **Scripta Materialia**, v. 66, n. 3–4, p. 159–162, 2012.
- LIU, G. et al. Effects of Welding Speed and Post-weld Hot Rolling on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir-Welded AZ31 Magnesium Alloy. **Acta Metallurgica Sinica (English Letters)**, v. 31, n. 8, p. 853–864, 23 ago. 2018.
- LIU, W. et al. Effect of Rotational Speed on Microstructure and Mechanical Properties in Submerged Friction Stir Welding of ME20M Magnesium Alloy. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 28, n. 8, p. 4610–4619, 2019a.
- LIU, W. et al. Influence of cooling water temperature on ME20M magnesium alloy submerged friction stir welding: a numerical and experimental study. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 105, n. 12, p. 5203–5215, 2019b.
- LIU, W. et al. Effect of traverse speed in submerged friction stir welding ME20M magnesium alloy: microstructure and mechanical properties. **Materials Research Express**, v. 6, n. 8, p.

086579, 17 maio 2019c.

LIU, W. et al. Influence of preheating temperature on the friction stir welded ME20M magnesium alloy. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 26, n. 2, p. 136–143, 2021.

MADHAVAN, S. et al. Cold Metal Transfer Welding of Dissimilar A6061 Aluminium Alloy-AZ31B Magnesium Alloy: Effect of Heat Input on Microstructure, Residual Stress and Corrosion Behavior. **Transactions of the Indian Institute of Metals**, v. 70, n. 4, p. 1047–1054, 2017.

MAGALHÃES, V. M.; LEITÃO, C.; RODRIGUES, D. M. Friction stir welding industrialisation and research status. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 23, n. 5, p. 400–409, 2017.

MELO, R. H. F. DE. **Avaliação da influência do processo e dos parâmetros de soldagem sobre a resistência à corrosão de revestimentos de aços inoxidáveis AWS e 3088-LT1 aplicados em aços ASTM A36**. [s.l.] Universidade Federal de Campina Grande, 2013.

MIRONOV, S. et al. Microstructure evolution during friction-stir welding of AZ31 magnesium alloy. **Acta Materialia**, v. 100, p. 301–312, 2015.

MIRONOV, S.; SATO, Y. S.; KOKAWA, H. Influence of welding temperature on material flow during friction stir welding of AZ31 magnesium alloy. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 50, n. 6, p. 2798–2806, 2019.

MISHRA, R. S.; MA, Z. Y. Friction stir welding and processing. **Material science and engineering: R: Reports**, v. 50, n. 1–2, p. 1–78, 2005.

MISHRA, R. S.; DE, P. S.; KUMAR, N. Friction Stir Welding of Magnesium Alloys. In: **Friction Stir Welding and Processing**. 1. ed. [s.l.] Springer, Cham, 2014a. p. 149–187.

MISHRA, R. S.; DE, P. S.; KUMAR, N. Fundamental Physical Metallurgy Background for FSW/P. In: **Friction Stir Welding and Processing**. [s.l.] Springer International Publishing, 2014b. p. 59–93.

MISHRA, R. S.; MA, Z. Y. Friction stir welding and processing. **Materials Science and Engineering R: Reports**, v. 50, n. 1–2, p. 1–78, 2005.

MOOSBRUGGER, C. Introduction to Magnesium Alloys. In: **Engineering Properties of Magnesium Alloys**. [s.l.] ASM International, 2017. p. 1–9.

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

MOTALLEB-NEJAD, P. et al. Effect of tool pin profile on microstructure and mechanical properties of friction stir welded AZ31B magnesium alloy. **Materials and Design**, v. 59, p. 221–226, 2014.

NEELAMEGGHAM, N. R.; BROWN, B. Magnesium. In: GUNN, G. (Ed.). **Critical metals handbook**. [s.l: s.n.]. p. 261–283.

NING, Y. H. et al. 1406. Research on sound insulation characteristics of the friction stir welding magnesium alloy sheet. **Journal of Vibroengineering**, v. 16, n. 6, p. 3146–3156, 2014.

- QIN, F.; LI, Y.; ZHENG, J. The Activation and Evolution of Twinning during Bending of Friction Stir Welded AZ31 Magnesium Alloys. **Metals**, v. 10, n. 1, p. 12p, 2020.
- REDDY, U. et al. Effect of Surface Roughness Induced by Milling Operation on the Corrosion Behavior of Magnesium Alloys. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 30, n. 10, p. 7354–7364, 2021.
- ROUHI, S.; MOSTAFAPOUR, A.; ASHJARI, M. Effects of welding environment on microstructure and mechanical properties of friction stir welded AZ91C magnesium alloy joints. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 21, n. 1, p. 25–31, 2 jan. 2016.
- SERINDAG, H. T.; KIRAL, B. G. Friction stir welding of AZ31 magnesium alloys – A numerical and experimental study. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 14, n. 1, p. 113–130, 2017.
- SHAH, L. H. A. et al. Dissimilar friction stir welding of thick plate AA5052-AA6061 aluminum alloys : effects of material positioning and tool eccentricity. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 105, p. 889–904, 2019.
- SILVA, E. P. DA. **Fundição, laminação e soldagem por fricção e mistura mecânica de ligas de magnésio com adição de mischmetal**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2016.
- SINGH, B. R. **A Hand Book on Friction Stir Welding**. 1^a ed. Reino Unido - UK: LAP LAMBERT academic Publishing, 2012.
- SINGH, K.; SINGH, G.; SINGH, H. Review on friction stir welding of magnesium alloys. **Journal of Magnesium and Alloys**, v. 6, n. 4, p. 399–416, 2018.
- SINGH, K.; SINGH, G.; SINGH, H. Influence of post welding heat treatment on the microstructure and mechanical properties of friction stir welding joint of AZ31 Mg alloy. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering**, v. 235, n. 5, p. 1375–1382, 27 out. 2021.
- SINGH, U. K.; DUBEY, A. K. Study of Weld Characteristics in Friction Stir Welding of Dissimilar Mg-Al-Zn Magnesium Alloys under Varying Welding Conditions. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 30, p. 7690–7703, 2021.
- SINGH, V. P.; KURIACHEN, B. Experimental Investigations into the Mechanical and Metallurgical Characteristics of Friction Stir Welded AZ31 Magnesium Alloy. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 31, p. 9812–9828, 2022.
- SONG, G. L.; ATRENS, A. Corrosion Mechanisms of Magnesium Alloys. **Advanced Engineering Materials**, v. 1, n. 1, p. 11–33, set. 1999.
- SUCHARITHA, M.; RAVI SANKAR, B.; UMAMAHESWARARAO, P. Experimental investigations on the effect of tool rotational speed on mechanical properties and microstructure of friction stir welded AZ31 Mg alloy. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, n. 9, p. 3455–3459, 2021.
- SUN, S. J. et al. Influence of Friction Stir Welding on Mechanical Properties of Butt Joints of AZ61 Magnesium Alloy. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2017, p. 13p, 2017.
- SUTTON, M. A. et al. A study of residual stresses and microstructure in 2024-T3 aluminum friction stir butt welds. v. 124, 2002.
- TEMPLEMAN, Y.; BEN HAMU, G.; MESHI, L. Friction stir welded AM50 and AZ31 Mg

alloys: Microstructural evolution and improved corrosion resistance. **Materials Characterization**, v. 126, p. 86–95, 2017.

TEMPLEMAN, Y.; MESHI, L.; BEN HEMU, G. Friction stirwelded AM50 and AZ31 Mg alloys: Microstructural evolution and improved corrosion resistance. **Materials Characterization**, p. 86–95, 2017.

TEXIER, D. et al. 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, p. 220–233, 2018.

UGENDER, S. Influence of tool pin profile and rotational speed on the formation of friction stir welding zone in AZ31 magnesium alloy. **Journal of Magnesium and Alloys**, v. 6, n. 2, p. 205–213, 2018.

WAINER, E.; BRAND, S. D.; MELLO, F. D. H. DE. **Soldagem: processos e metalurgia**. [s.l: s.n.].

WANG, H. F. et al. Microstructure and Impact Load Performance of Friction Stir Welded Joint of AZ31B Magnesium Alloy. **Key Engineering Materials**, v. 866, p. 54–62, out. 2020.

WANG, W. et al. Influence of tool rotation rates on temperature profiles and mechanical properties of friction stir welded AZ31 magnesium alloy. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 88, n. 5–8, p. 2191–2200, 2017.

WESTENGEN, H.; AUNE, T. K. Magnesium Casting Alloys. In: **Magnesium Technology: Metallurgy, design data, application**. Berlin/Heidelberg: Springer, 2006. p. 145–218.

XIN, R. et al. Influence of welding parameter on texture distribution and plastic deformation behavior of as-rolled AZ31 Mg alloys. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 670, p. 64–71, 2016.

XU, N. et al. Improvement of microstructure and mechanical properties of AZ61 Mg alloys subjected to rapid cooling friction stir welding. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 26, n. 7, p. 503–512, 2021.

ZARANDI, F. et al. Microstructure evolution during rolling of AZ31 magnesium alloy under decreasing temperatures. **Proceedings of magnesium technology**, n. The minerals, Metals, and Materials, p. 75–80, 2007.

ZHANG, J. et al. Microstructure evolution and mechanical properties of friction stir welded dissimilar joints of as-extruded AM60 and AZ31 alloys. **Materials Science and Engineering A**, v. 759, p. 479–489, 2019.

ZHANG, J. et al. Improving performance of friction stir welded AZ31/AM60 dissimilar joint by adjusting texture distribution and microstructure. **Materials Science and Engineering A**, v. 778, p. 139088, 2020a.

ZHANG, J. et al. Optimizing the mechanical properties of friction stir welded dissimilar joint of AM60 and AZ31 alloys by controlling deformation behavior. **Materials Science and Engineering A**, v. 773, p. 138839, 2020b.

ZHANG, Y. N. et al. Review of tools for friction stir welding and processing. **Canadian Metallurgical Quarterly**, v. 51, n. 3, p. 250–261, 2012.

APÊNDICE A – Tabela com os dados de obtenção do tamanho médio de grão do MB

Tamanho médio de grão no MB					
MB em 100x					
Linha	Ponto interceptado	Ponto triplo	P	Comprimento da linha (um)	Tamanho médio (μm)
1	65	23	99,5	1200	12,06030151
2	67	14	88	1200,184	13,63845455
3	71	18	98	1200,824	12,25330612
4	68	16	92	1200,278	13,0465
5	61	21	92,5	1200,115	12,97421622
6	71	13	90,5	1200,722	13,26764641
7	73	17	98,5	1200,539	12,1882132
					12,77551971

APÊNDICE B – Tabela com os dados de obtenção do tamanho médio de grão da junta 1

Tamanho médio de grão da junta 1					
ZM centro 500x					
Linha	Ponto interceptado	Ponto triplo	P	Comprimento da linha (um)	Tamanho médio (μm)
1	54	11	70,5	260,157	3,690170213
2	51	7	61,5	260,129	4,229739837
3	50	13	69,5	260,363	3,746230216
4	50	16	74	260,522	3,520567568
5	51	5	58,5	260,587	4,454478632
6	52	7	62,5	260,105	4,16168
7	49	7	59,5	260,372	4,376
					4,025552352

APÊNDICE C – Tabela com os dados de obtenção do tamanho médio de grão da junta 2

Tamanho médio de grão da junta 2					
ZM centro 200x					
Linha	Ponto interceptado	Ponto triplo	P	Comprimento da linha (um)	Tamanho médio (μm)
1	56	10	71	660,07	9,296760563
2	57	5	64,5	660,857	10,24584496
3	50	14	71	660,843	9,307647887
4	55	6	64	660,754	10,32428125
5	51	7	61,5	660,115	10,73357724
6	56	8	68	660,846	9,718323529
7	52	9	65,5	660,633	10,086
					9,958919347

APÊNDICE D – Tabela com os dados de obtenção do tamanho médio de grão da junta 3

Tamanho médio de grão da junta 3					
ZM centro 500x					
Linha	Ponto interceptado	Ponto triplo	P	Comprimento da linha (um)	Tamanho médio (μm)
1	63	8	75	260,735	3,476466667
2	57	10	72	260,613	3,619625
3	59	10	74	260,379	3,518635135
4	70	6	79	260,37	3,295822785
5	68	8	80	260,257	3,2532125
6	54	6	63	260,317	4,132015873
7	58	5	65,5	260,093	3,970885496
					3,609523351

APÊNDICE E – Tabela com os dados de obtenção do tamanho médio de grão da junta 4

Tamanho médio de grão da junta 4					
ZM centro 200x					
Linha	Ponto interceptado	Ponto triplo	P	Comprimento da linha (um)	Tamanho médio (μm)
1	58	5	65,5	660,588	10,08531298
2	60	5	67,5	660,632	9,787140741
3	56	12	74	660,77	8,929324324
4	52	11	68,5	660,663	9,644715328
5	63	9	76,5	660,861	8,638705882
6	61	10	76	660,156	8,686263158
7	56	9	69,5	660,22	9,499568345
					9,324432965

APÊNDICE F – Tabela com os dados de obtenção do tamanho médio de grão da junta 5

Tamanho médio de grão da junta 5					
ZM centro 200x					
Linha	Ponto interceptado	Ponto triplo	P	Comprimento da linha (um)	Tamanho médio (μm)
1	80	7	90,5	660,622	7,299690608
2	85	6	94	660,333	7,024819149
3	89	9	102,5	660,495	6,443853659
4	101	8	113	660,22	5,842654867
5	99	11	115,5	660,802	5,721229437
6	87	14	108	660,872	6,119185185
7	87	9	100,5	660,448	6,571621891
					6,431864971

APÊNDICE G – Tabela com os dados de obtenção do tamanho médio de grão da junta 6.

Tamanho médio do grão da junta 6						
ZM centro 200x						
Linha	Ponto interceptado	Ponto triplo	P	Comprimento da linha (um)	Tamanho médio (µm)	
1	53	5	60,5	660,594	10,91890909	
2	54	8	66	660,589	10,00892424	
3	51	4	57	660,781	11,59264912	
4	50	9	63,5	660,633	10,40366929	
5	55	6	64	660,688	10,32325	
6	50	7	60,5	660,017	10,9093719	
7	55	4	61	660,448	10,82701639	
					10,71197001	

APÊNDICE H – Tabela com os dados de obtenção do tamanho médio de grão da junta 7.

Tamanho médio de grão da junta 7						
ZM centro 500x						
Linha	Ponto interceptado	Ponto triplo	P	Comprimento da linha (um)	Tamanho médio (µm)	
1	70	11	86,5	260,545	3,01208092	
2	64	13	83,5	260,362	3,11810778	
3	66	9	79,5	260,918	3,28198742	
4	66	5	73,5	260,776	3,54797279	
5	63	10	78	260,274	3,33684615	
6	64	7	74,5	260,625	3,49832215	
7	60	13	79,5	260,723	3,27953459	
					3,2964074	

APÊNDICE I – Tabela com os dados de obtenção do tamanho médio de grão da junta 8.

Tamanho médio de grão da junta 8					
ZM centro 200x					
Linha	Ponto interceptado	Ponto triplo	P	Comprimento da linha (um)	Tamanho médio (µm)
1	63	9	76,5	660,782	8,637673203
2	51	8	63	660,787	10,48868254
3	50	14	71	660,788	9,306873239
4	53	10	68	660,455	9,712573529
5	54	8	66	660,055	10,00083333
6	53	9	66,5	660,626	9,934225564
7	50	9	63,5	660,453	10,40083465
					<u>9,783099436</u>