



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



OCLÁVIO COUTINHO DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DOS CICLOS TÉRMICOS DE SOLDAGEM E SUA INFLUÊNCIA
NOS DEFEITOS, MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
JUNTAS DE ALUMÍNIO AA7075-T651 SOLDADAS PELO PROCESSO FSW**

**CAMPINA GRANDE
2023**

OCLÁVIO COUTINHO DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DOS CICLOS TÉRMICOS DE SOLDAGEM E SUA INFLUÊNCIA
NOS DEFEITOS, MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
JUNTAS DE ALUMÍNIO AA7075-T651 SOLDADAS PELO PROCESSO FSW**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica em nível de Mestrado como requisito para obtenção do título de Mestre em engenharia mecânica.

Linha de pesquisa: Processos Mecânico –
Metalúrgicos

Orientador: Dr. Raphael Henrique Falcão de
Melo

Coorientador: Dr. Marco Antonio dos Santos

CAMPINA GRANDE

2023

S237a

Santos, Oclávio Coutinho dos.

Avaliação dos ciclos térmicos de soldagem e sua influência nos defeitos, microestrutura e propriedades mecânicas de juntas de alumínio AA7075-t651 soldadas pelo processo FSW / Oclávio Coutinho dos Santos. – Campina Grande, 2024.

72 f. : il. color.

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

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

Referências.

1. Processos Mecânicos – Metalúrgicos. 2. Ligas de Alumínio 7075-T651. 3. Friction Stir Welding. 4. Ciclo Térmico de Soldagem. 5. Propriedades Mecânicas. I. Melo, Raphael Henrique Falcão de. II. Santos, Marco Antonio dos. III. Título.

CDU 621:622(043)

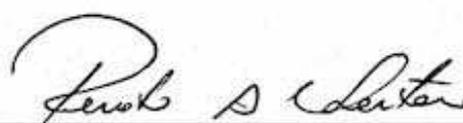
**INFLUÊNCIA DOS CICLOS TÉRMICOS DE SOLDAGEM NA MICROESTRUTURA E
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE JUNTAS DE ALUMÍNIO 7XXX SOLDADAS POR FSW
FSW**

OCLÁVIO COUTINHO DOS SANTOS

Dissertação Aprovada em 21/12/2023 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes membros:


Prof. Dr. RAPHAEEL 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)

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação aos meus pais, Fabiana Maria Coutinho Parnaíba dos Santos e Olávio Victor dos Santos, que me moldaram para ser o homem que sou hoje e em memória a Gilderlandia Dias Ricarte Silva.

AGRADECIMENTOS

Começo agradecendo a Deus, que sempre me deu forças, guiou e continuará guiando meu caminho. Mesmo nos momentos em que achei que não iria conseguir, Ele me provou o contrário e me fez levantar quantas vezes fosse necessário.

À toda minha família, que nunca me deixou faltar nada, desde suporte material até emocional, fornecendo tudo o que uma pessoa precisa para continuar sempre em frente com a cabeça erguida. Meus pais e meus irmãos são os alicerces da minha vida.

Ao meu orientador, Raphael Henrique Falcão de Melo, por todo o suporte que me tem dado desde o primeiro dia em que começamos a trabalhar juntos, em meados de 2018. Além de ser um excelente professor e orientador, é também um grande amigo, pelo qual tenho grande estima.

Aos professores Theophilo Moura Maciel e Marco Antônio dos Santos, pelas orientações valiosas para a conclusão deste trabalho.

Aos meus colegas de trabalho, Luciano, Gerberson, Lucas e Francisco José, que estiveram presentes no meu dia a dia, me animando e assim renovando minhas energias.

A empresa MID4U e em especial a Aristóteles de Melo por fornecer todo o apoio e compreensão ao longo do tempo em que desenvolvi este estudo.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ) pelo financiamento da pesquisa nº 3200/2021, bem como ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba pelo financiamento e pelas bolsas concedidas.

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

SANTOS, O.C. Avaliação dos ciclos térmicos de soldagem e sua influência nos defeitos, microestrutura e propriedades mecânicas de juntas de alumínio AA7075-T651 soldadas pelo processo FSW. 2023, 72 f. (**Mestrado em Engenharia Mecânica**), Universidade Federal de Campina Grande. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Campina Grande, 2023.)

RESUMO

As ligas de alumínio são uma ótima opção para quem deseja baixo custo em relação aos outros metais usados na indústria como Titânio e Fibra de Carbono Polímero/Plásticos Reforçados. Além de boas propriedades mecânicas, as ligas de alumínio da série 7XXX por sua vez ganham destaque devido suas excelentes características em relação às demais ligas de alumínio, como: sua baixa densidade atrelada a boa resistência mecânica, além de uma dureza relativamente alta em relação a outras ligas de alumínio. Porém quando submetido a técnicas de união por fusão esse material não possui boa soldabilidade. Uma das possíveis soluções a este gargalo é utilizar técnicas de soldagem no estado sólido, como o processo FSW, no entanto, esse processo possui diversas variáveis que influenciam na ocorrência de defeitos de soldagem, conseqüentemente, sobre as propriedades mecânicas destas juntas. Este trabalho teve como objetivo aferir os ciclos térmicos e correlacioná-lo com as propriedades mecânicas e a ocorrência de defeitos em juntas da liga de alumínio 7075-T651 soldadas pelo processo FSW, com o intuito de avaliar a influência da temperatura de pico e da taxa de resfriamento sobre a qualidade da junta em função dos parâmetros de soldagem empregados. Para caracterização mecânica, foram realizados os ensaios de tração uniaxial, dobramento de raiz à 60°, análise da macro e microestruturas, ensaio de dureza Vickers e por fim fractografia. Para as juntas com maiores velocidades de avanço e de rotação (117 mm/min e 1585 RPM) constatou-se uma maior temperatura de pico (375,700 °C) e uma maior taxa de resfriamento (7,745 °C/s) em relação as outras juntas 1 e 3 (47 mm/min e 470 RPM) que tiveram menores valores de temperatura de pico e taxa de resfriamento (358,735 °C e 3,226 °C/s, respectivamente), o que proporcionou a aparição de defeitos como rebarba, acabamento superficial grosseiro, falta de preenchimento na zona de mistura e menor resistência a tração.

Palavras-chave: *Ligas de Alumínio 7075-T651, Friction Stir Welding, Ciclo térmico de soldagem, propriedades mecânicas.*

SANTOS, O. C. Evaluation of welding thermal cycles and their influence on defects, microstructure and mechanical properties of AA7075-T651 aluminum joints welded by the FSW process. 2023, 72 f. (master's in mechanical engineering), Federal University of Campina Grande. Graduate Program in Mechanical Engineering. Campina Grande, 2023.

ABSTRACT

Aluminum alloys are a great option for those who want low cost compared to other metals used in industry such as Titanium and Carbon Fiber Reinforced Polymer/Plastics, in addition to good mechanical properties, the 7XXX series aluminum alloys in turn stand out due to their excellent characteristics in relation to other aluminum alloys, such as: its low density linked to good mechanical resistance, in addition to a relatively high hardness in relation to other aluminum alloys. However, when subjected to fusion joining techniques, this material does not have good weldability. One of the possible solutions to this bottleneck is to use solid state welding techniques, such as the FSW process, however, this process has several variables that influence the occurrence of welding defects, consequently, on the mechanical properties of these joints. This work aimed to measure the thermal cycles and correlate it with the mechanical properties and the occurrence of defects in 7075-T651 aluminum alloy joints welded by the FSW process, with the aim of evaluating the influence of the peak temperature and rate of cooling on the quality of the joint depending on the welding parameters used. For mechanical characterization, uniaxial tensile tests, 60° root bending, analysis of macro and microstructures, Vickers hardness test and finally fractography were carried out. For joints with higher feed and rotation speeds (117 mm/min and 1585 RPM), a higher peak temperature (375,700 °C) and a higher cooling rate (7,745 °C/s) were found in relation to the others. joints 1 and 3 (47 mm/min and 470 RPM) which had lower values of peak temperature and cooling rate (358.735 °C and 3.226 °C/s, respectively), which led to the appearance of defects such as burr, finish coarse surface, lack of filling in the mixing zone and lower tensile strength. With these temperature analyzes it can be concluded that for this alloy lower speed parameters imply peak temperatures and lower cooling rates inducing a higher quality in the joints, higher temperatures induced greater defects in the joints.

Keywords: *Aluminum Alloys 7075-T651, Friction Stir Welding, Welding thermal cycle, mechanical properties.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Porcentagem de alumínio em aeronaves civis e militares.	20
Figura 2 - Nomenclatura das ligas de alumínio.....	23
Figura 3 - Diagrama de fases do alumínio 7075-T651.....	24
Figura 4 - Ilustração do processo FSW.	26
Figura 5 - Divisão da zona de solda.	27
Figura 6 - Temperatura da ferramenta e das chapas no processo de soldagem.....	29
Figura 7 - Distribuição de calor na seção transversal da junta soldada.....	29
Figura 8 - Ciclo térmico de soldagem.	30
Figura 9 - Fluxograma da metodologia proposta na pesquisa.....	32
Figura 10 - Dimensões da chapa de AA7075-T651.....	33
Figura 11 - Corpos de prova para os ensaios de tração, dobramento e análise de dureza e microestrutura.....	33
Figura 12 - Posicionamento dos termopares.	35
Figura 13 - Máquina universal de ensaio modelo MTS-810 e corpo de prova adotado para os ensaios, seguindo a norma ASTM E8/E8M – 16 ^a	35
Figura 14 - Prensa universal de ensaio modelo MTS-810 e corpo de prova adotado para os ensaios, seguindo a norma ASTM E190-92.	36
Figura 15 - Microdurômetro digital FM-700 da FutureTech e corpo de prova.....	37
Figura 16 - Microscópio eletrônico de varredura, modelo VEGA3 SBH.	37
Figura 17 - ciclos térmicos das juntas 1 e 3.	40
Figura 18 - ciclos térmicos das juntas 2 e 4.	40
Figura 19 - Junta soldada 1; a) Macrografia da seção transversal; b) defeito de wormhole na ZM no LA; c) ZM e anéis de cebola (Onion rings); d) região de transição entre ZTMA e ZM.	47
Figura 20 - Junta soldada 2; a) Macrografia da seção transversal; b) região de transição entre ZTMA e ZM; c) ZM e falta de mistura; d) ZM e falta de mistura ampliada.	48
Figura 21 - Junta soldada 3; a) Macrografia da seção transversal; b) região de transição entre ZTMA e ZM; c) defeito de wormhole na ZM no LA; d) região de transição entre ZTMA e ZM.	48

Figura 22 - Junta soldada 4; a) Macrografia da seção transversal; b) ZTMA e ZM no LA com falta de mistura; c) defeito de wormhole na ZM no LA; d) defeito de soldagem kissing bord.	49
Figura 23 - Perfil transversal de microdureza Vickers da junta soldada 1 e 3.	50
Figura 24 - Perfil transversal de microdureza Vickers da junta soldada 2 e 4.	51
Figura 25 - Perfil transversal de microdureza Vickers das 4 juntas e do MB.	53
Figura 26 - Gráficos do ensaio de tração uniaxial.	53
Figura 27 - Gráficos do ensaio de dobramento de raiz 60°.	57
Figura 28 - Suporte para acoplar as chapas a serem soldadas.	65
Figura 29 - Distribuição dos corpos de prova extraídos da junta soldada.	66
Figura 30 - Dimensões da ferramenta de soldagem.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ligas de alumínio pela classificação da ABNT NBR 6834.	21
Tabela 2 - Composição química do AA7075-T651 (Peso).	24
Tabela 3 - Propriedades Físicas Típicas.	24
Tabela 4 - Parâmetros de soldagem.	34
Tabela 5 - Temperaturas de pico nas juntas soldadas e Temperatura teórica na zona de mistura obtida com a Eq1 (°C).	42
Tabela 6 - Taxa de aquecimento das juntas soldadas (°C/s).	43
Tabela 7 - Taxa de resfriamento das juntas soldadas (°C/s).	44
Tabela 8 - Dureza média das juntas soldadas e do MB.	52
Tabela 9 - Limite de resistência a tração e Eficiência de cada junta.	54
Tabela 10 - Valores de Limite de resistência a tração (LRT), Temperatura de pico e Taxa de resfriamento.	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Cordões de soldas das juntas soldadas pelo processo FSW.....	38
Quadro 2 - Imagem das microestruturas da liga soldada (Junta 1).	45
Quadro 3 - Fractografia das juntas 1, 2, 3 e 4 em 10X, 100X, 500X e 1000X.	55
Quadro 4 - Carga máxima suportada por cada junta no ensaio de dobramento de 60°.....	57
Quadro 5 - Fractografia das juntas 1, ampliado em 27X, 41X, 100X, 300X, 500X e 1000X.	68
Quadro 6 - Fractografia das juntas 2, ampliado em 27X, 32X, 100X, 300X, 500X, 1000X e 3000X.	69
Quadro 7 - Fractografia das juntas 3, ampliado em 29X, 32X, 100X, 300X, 500X, 1000X, 3000X e 5000X.....	70
Quadro 8 - Fractografia das juntas 4, ampliado em 10X, 31X, 100X, 300X, 500X, 1000X e 3000X.	71

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

CFRP - Carbon Fiber Reinforced Polymer/Plastics

FSW - Friction Stir Welding

AA - Aluminum Association

TT - Tratamento Térmico

MB – Metal Base

ZTA - Zona Termicamente Afetada

ZTMA – Zona termomecanicamente afetada

ZM – Zona de mistura

NBR - Norma técnica brasileira

AISI - American Iron and Steel Institute

GMAW - Gas Metal Arc Welding

GTAW - Gas Tungsten Arc Welding

TWI - The Welding Institute

CNC - Controle Numérico Computadorizado

V_r – Velocidade de rotação

V_a – Velocidade de avanço

θ = Inclinação da ferramenta

UAEM - Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica

UFMG - Universidade Federal de Campina Grande

mm/min – milímetro por minuto

RPM – Rotação por minuto

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	16
1 INTRODUÇÃO	16
2 JUSTIFICATIVA	16
3 OBJETIVOS	17
3.1 OBJETIVO GERAL.....	17
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	17
CAPÍTULO II.....	19
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
4.1. O ALUMÍNIO	19
4.2. CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO	20
4.3. LIGA 7075-T651.....	23
4.4 SOLDAGEM DO ALUMÍNIO	25
4.5. ZONAS DA JUNTA SOLDADA	27
4.6. DISTRIBUIÇÃO DE CALOR NA SOLDAGEM	28
CAPÍTULO III	31
5 MATERIAIS E METODOLOGIA.....	31
5.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA.....	31
5.2 CHAPAS DE ALUMÍNIO	32
5.3 EXECUÇÃO DA SOLDAGEM	33
5.3.1 <i>Parâmetros</i>	33
5.3.2 <i>Aquisição do ciclo térmico de soldagem</i>	34
5.4 METODOLOGIA DOS ENSAIOS.....	35
5.4.1 <i>Ensaio mecânico de tração uniaxial</i>	35
5.4.2 <i>Ensaio de dobramento de raiz 60°</i>	36
5.4.3 <i>Análise de dureza e microestrutura</i>	36
5.4.4 <i>Análise da superfície de fratura</i>	37
CAPÍTULO IV.....	38
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	38

6.1. INSPEÇÃO VISUAL DAS JUNTAS SOLDADAS.....	38
6.2. CICLO TÉRMICO DE SOLDAGEM.....	40
6.3. ANÁLISE DE MACRO E MICROESTRUTURA.....	44
6.3.1. <i>Macro e Microestrutura</i>	44
6.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO UNIAXIAL.....	53
6.5. ANÁLISE FRACTOGRÁFICA.....	55
6.6. ENSAIO DE DOBRAMENTO DE RAIZ 60°	56
CAPÍTULO V	59
7 CONCLUSÕES.....	59
REFERÊNCIAS	60
APÊNDICES	65

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

Devido à necessidade na indústria aeroespacial de componentes leves, as ligas de alumínio (Al) têm ganhado espaço como uma boa escolha para a fabricação de peças estruturais em aeronaves (MIRABEL, 2001). Comparado com outros materiais metálicos, as ligas de alumínio têm uma densidade baixa, e seu uso reduz o peso total da aeronave, além de melhorar a eficiência energética e aumentar a capacidade de carga total (LI *et al.*, 2023). As ligas de alumínio da série 7XXX, cujo principal elemento de liga é o zinco, ganham destaque mediante à sua alta relação resistência-peso, resiliência, boa ductilidade em baixas temperaturas, resistência à corrosão e boas características de usinabilidade (SENTHIL *et al.*, 2017).

No processo de união de ligas de alumínio, a soldagem é um dos principais métodos. No entanto, a soldagem de ligas da série 7XXX por processos convencionais de fusão requer precauções especiais, uma vez que as temperaturas envolvidas superam o ponto de fusão do material. Isso se deve à necessidade de evitar a perda de propriedades mecânicas devido ao crescimento excessivo dos grãos e à queda de dureza na zona termicamente afetada, além de outros defeitos associados à solidificação. Portanto, a soldagem dessa liga é mais restrita (YANG *et al.*, 2018).

Para superar as dificuldades impostas pelos processos de soldagem tradicionais, a soldagem por fricção e mistura (FSW) é a melhor escolha para a soldagem dessa liga de alumínio (VERMA; KUMAR, 2021). Acontecendo no estado sólido, esse processo possui algumas variáveis diretamente ligadas à qualidade da solda. O ajuste dessas variáveis do processo impacta nas propriedades mecânicas das juntas, proporcionando uma junta de melhor qualidade. A temperatura e a taxa de resfriamento que as diferentes regiões da junta atingem têm um papel fundamental sobre sua microestrutura e, conseqüentemente, sobre a qualidade das juntas. Nesse sentido, aferir os ciclos térmicos de soldagem é essencial para compreender os mecanismos de transporte de massa e as propriedades mecânicas resultantes.

2 JUSTIFICATIVA

Um estudo prospectivo para monitorar e verificar a influência das variáveis de processo sobre as características dos ciclos térmicos de soldagem, bem como sua influência sobre a microestrutura e propriedades mecânicas das juntas de alumínio 7075-T651 soldadas pelo processo FSW, é necessário para compreender o impacto da temperatura máxima atingida e da taxa de resfriamento sobre suas propriedades mecânicas.

Essas variáveis dos ciclos térmicos são determinantes, pois afetam a plasticidade e o escoamento do material na junta. O seu estudo tem sido uma das principais áreas de interesse associadas ao processo FSW. Os parâmetros de soldagem, como velocidade de rotação, velocidade de avanço, inclinação e penetração da ferramenta, têm sido reportados como os que mais influenciam os ciclos térmicos, sendo a velocidade de avanço e rotação da ferramenta os dois mais influentes (SILVA, 2019).

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o efeito das variáveis dos ciclos térmicos de soldagem sobre a microestrutura e propriedades mecânicas de juntas soldadas da liga 7075-T651 obtidas pelo processo FSW.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obter ciclos térmicos nas regiões próximas à zona de mistura do das juntas soldadas pelo processo FSW sob diferentes parâmetros de soldagem
- Correlacionar os valores das variáveis dos ciclos térmicos com a microestrutura e as propriedades mecânicas das juntas.

3.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos, distribuídos em:

- **CAPÍTULO I:** Apresenta a introdução sobre o trabalho e os seus objetivos, proporcionando uma visão geral sobre o tema, sua importância no mercado atual e os principais objetivos traçados na dissertação.
- **CAPÍTULO II:** Proporciona uma abordagem mais específica do assunto, descrevendo as características do alumínio e suas ligas, com ênfase na liga em estudo. Além disso, descreve o processo de soldagem utilizado na pesquisa e suas principais características.
- **CAPÍTULO III:** Fornece a metodologia aplicada para alcançar os objetivos traçados, os principais métodos, ensaios e maquinários utilizados.
- **CAPÍTULO IV:** Contém os resultados da pesquisa, incluindo as temperaturas alcançadas durante o processo, além dos resultados dos ensaios realizados neste trabalho. Também apresenta uma correlação com os resultados encontrados na literatura.
- **CAPÍTULO V:** São apresentadas as conclusões, baseando-se nos resultados obtidos a partir dos testes experimentais e literaturas dispostas ao longo do estudo.

CAPÍTULO II

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. O ALUMÍNIO

O alumínio é o segundo elemento metálico mais abundante na crosta terrestre, perdendo apenas para o aço. Suas excelentes propriedades, como resistência à corrosão, baixa densidade, elevada condutividade térmica e elétrica, além da facilidade de processamento por meio de diversos métodos de fabricação, faz com que ele ocupe uma posição de destaque no cenário industrial mundial (CAPELARI; MAZZAFERRO, 2009).

A resistência mecânica de algumas ligas de alumínio, em certos casos, é superior à de alguns aços com baixo teor de carbono. Aliada à excelente resistência à corrosão e ao peso específico de $2,7 \text{ g/cm}^3$ (equivalente a 1/3 do peso específico do aço), fazem com que essas ligas se apresentem como uma alternativa na substituição de componentes ou partes estruturais, visando a redução de peso e o consequente aumento da eficiência energética (ABAL, 2023). Isso abre a possibilidade de projetar e construir estruturas leves e fortes, vantajosas para todos os tipos de veículos terrestres, aquáticos e principalmente para espaçonaves e aeronaves (DAVIS, 2001).

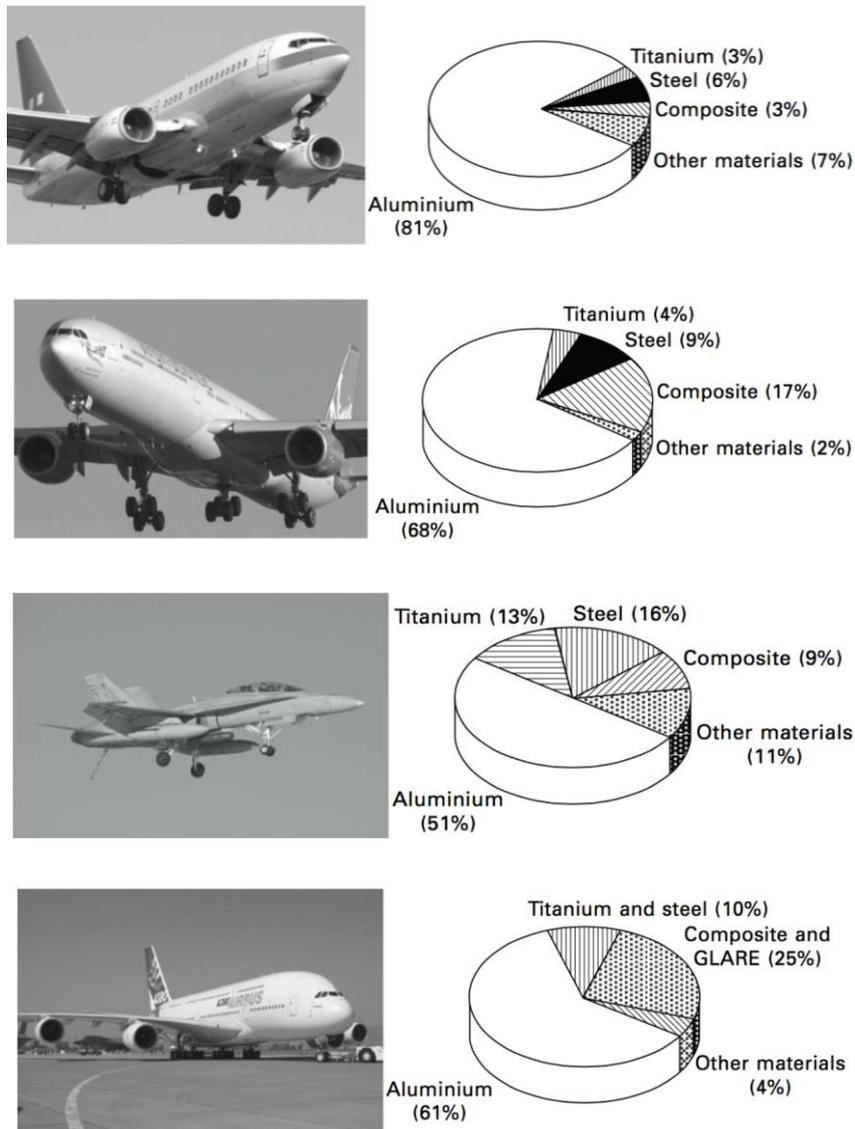
As ligas da série 7XXX, conhecidas como alumínio de uso aeronáutico, são compostas principalmente de alumínio e zinco (Al-Zn) e são sensíveis ao tratamento térmico. Sua aplicabilidade inclui a indústria militar, o desenvolvimento de ferramentas e a indústria aeroespacial. Pequenas porcentagens de magnésio, cobre e cromo podem ser adicionadas como elementos de liga complementares, promovendo aumento da resistência mecânica e da resistência à corrosão (CAVALIERE, 2013; KHAN *et al.*, 2017).

O alto coeficiente de expansão térmica, juntamente com o limite de escoamento elevado e uma menor ductilidade em comparação com outras ligas de alumínio, pode favorecer a geração de consideráveis tensões residuais. Além disso, a aplicação de calor elevado pode alterar a microestrutura do metal base (MB) e da zona soldada durante as operações de soldagem por fusão, o que impacta na dureza e resistência mecânica da junta (VERMA *et al.*, 2023).

A Figura 1 mostra os tipos e quantidades de materiais estruturais em vários tipos de aeronaves civis e militares modernas. Uma característica comum entre as diferentes

aeronaves é o uso dos mesmos materiais: alumínio, titânio, aço e compósitos. Embora as porcentagens em peso desses materiais diminuam entre os diferentes tipos de aeronaves, os mesmos quatro materiais são comuns a todas elas e seu peso combinado geralmente representa mais de 80-90% do peso estrutural total. A pequena porcentagem de "outros materiais" utilizados pode incluir magnésio, plásticos, cerâmica ou algum outro material (ZAVADSKI, 2018).

Figura 1 - Porcentagem de alumínio em aeronaves civis e militares.



Fonte: Zavadski (2018).

4.2. CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO

Apesar de suas boas propriedades físicas e químicas, o alumínio não consegue ser amplamente aplicado, pois há diversas aplicações para as quais não consegue atender a todos os requisitos necessários, mas se encaixa muito bem em alguns deles (FERNANDES; MARTENDAL, 2016). As ligas de alumínio surgiram como solução para esse problema.

Com a adição de determinados metais, a liga ganha o reforço necessário em algumas propriedades mecânicas, dependendo da porcentagem desse material. Uma das modificações buscadas para o alumínio é o endurecimento por precipitação, que melhora a resistência mecânica do material através da adição de elementos de liga específicos e tratamentos térmicos (FERNANDES; MARTENDAL, 2016).

Dentro do grupo das ligas trabalhadas mecanicamente, existem duas classificações: as tratáveis termicamente e as não tratáveis termicamente. As ligas tratáveis termicamente são aquelas cuja dureza pode ser aumentada por meio do tratamento térmico de solubilização e envelhecimento; pertencem a esse grupo as ligas das séries 2xxx, 6xxx, 7xxx e a maioria da série 8xxx. Já as ligas não tratáveis termicamente são endurecidas por encruamento, resultante do trabalho a frio. Pertencem a esse grupo as ligas das séries 1xxx, 3xxx, 4xxx e 5xxx (VASUDEVAN; DOHERTY, 1993). A Tabela 1 contém um resumo sobre as séries e seus principais elementos de liga.

Tabela 1 - Ligas de alumínio pela classificação da ABNT NBR 6834.

Série	Principais elementos de liga	Aplicação
1XXX	Alumínio (Al) ≥ 99%	Indústrias químicas e elétricas
2XXX	Cobre (Cu)	Aeronaves
3XXX	Manganês (Mn)	Aplicações arquitetônicas
4XXX	Silício (Si)	Chapas para brasagem e eletrodos de soldagem
5XXX	Magnésio (Mg)	Casco de barcos
6XXX	Magnésio e Silício (Mg, Si)	Produtos extrudados de uso arquitetônico
7XXX	Zinco (Zn)	Componentes estruturais de aeronaves
8XXX	Vários (Sn, Li, Fe, Cu, Mg...)	Produtos de uso geral

Fonte: Adaptado de NBR 6834

Alguns dos principais elementos de ligas apresentam, de forma geral, as seguintes características (ZANGRANDI, 2008):

- Zinco: contribui acentuadamente com o envelhecimento por precipitação natural e artificial, mas não contribui para o endurecimento por deformação quando presente em solução sólida.
- Cobre: aumenta a resistência mecânica e proporciona endurecimento por precipitação natural, porém, diminui a resistência a corrosão, a ductilidade e a

solubilidade da liga;

- Magnésio: reduz a temperatura de fusão, aumenta a capacidade de endurecimento por deformação e a resistência a corrosão em água salgada;
- Silício: diminui a temperatura de fusão e aumenta a fluidez da liga, aumenta a resistência mecânica e melhora a ductilidade. Se adicionado junto com o magnésio proporciona o endurecimento por precipitação da liga;
- Manganês: aumenta a resistência mecânica do alumínio comercialmente puro (99,50% a 99,79% de pureza) com redução pequena da ductilidade e melhora a resistência à corrosão.

Esses elementos de liga podem ser associados de forma a obter ligas específicas, que podem ser binárias, ternárias e quaternárias, de acordo com os elementos mais abundantes em cada liga (HOLTHAUSEN, 2018).

- Série 1XXX: Possui excelente resistência à corrosão, elevada condutividade térmica e elétrica, elevada ductilidade e baixa resistência mecânica. Respondem de maneira moderada a processos de endurecimento por deformação devido ao alto teor de pureza. Aplicações: Indústria química, refletores, trocadores de calor, condutores elétricos e capacitores (GUEDES, 2014).
- Série 2XXX: Possui boa usinabilidade, baixa soldabilidade e resistência a corrosão inferior às outras ligas de alumínio. As características relacionadas a corrosão podem ser melhoradas através do recobrimento com alumínio de alta pureza ou ligas da série 6xxx (Cladamento). Aplicações: rodas forjadas para indústrias aeronáuticas e de caminhões, fuselagem e componentes estruturais de aeronaves, componentes de suspensão de automóveis (ALMEIDA, 2015).
- Série 3XXX: O manganês proporciona à liga uma boa resistência à corrosão e boa soldabilidade, além de aumentar sua resistência mecânica e dureza, mas reduz sua ductilidade. Aplicações: Utensílios domésticos, tanques de armazenamentos, placas de trânsito, latas de bebidas (ALMEIDA, 2015).
- Série 4XXX: O silício pode ser adicionado para abaixar a temperatura de fusão sem provocar fragilidade excessiva, por este motivo estas ligas são utilizadas em arames de solda ou como ligas para brasagem (ALMEIDA, 2015).
- Série 5XXX: Possui boa soldabilidade, ductilidade e usinabilidade, além de elevada resistência à corrosão (principalmente em atmosfera salina). Aplicação: Alto uso na indústria naval, tanques para criogenia, estruturas automotivas (ALMEIDA,

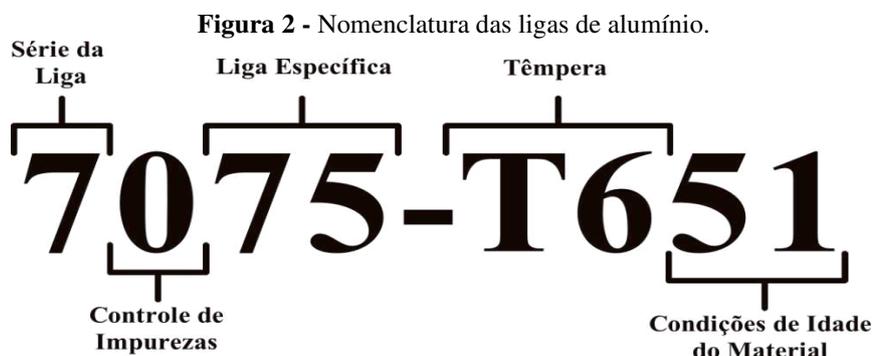
2015).

- Série 6XXX: O magnésio e o silício são adicionados em proporções suficientes para formação de Silicato de Magnésio ($3 \text{ MgO } 4 \text{ SiO}_2 \text{ H}_2\text{O}$), formando ligas tratáveis termicamente. As ligas desta série apresentam boa ductilidade, elevada resistência à corrosão, boa conformabilidade, boa soldabilidade e são de fácil usinagem. Aplicações: em uso arquitetônico, quadros de bicicletas e estruturas soldadas (GUEDES, 2014).
- Série 7XXX: Tem o zinco, em teores de 1 a 8%, como principal elemento de liga. Quando combinado com o magnésio, apresentam alta resistência mecânica, esta liga é utilizada quando a relação entre resistência mecânica/peso for característica importante. Aplicações: principalmente na indústria aeronáutica, componentes de alta resistência (GUEDES, 2014).
- Série 8xxx: Possuem resistência mecânica média. Aplicação: embalagens descartáveis, tampas para indústria alimentícias e bebidas (ALMEIDA, 2015).

4.3. LIGA 7075-T651

A liga de alumínio 7075 foi desenvolvida nos EUA, em meados da década de 50, para ser utilizada em componentes estruturais de veículos aeronáuticos. Seus estudos, inclusive, levaram ao desenvolvimento da liga 7050-T651, também bastante utilizada na indústria aeronáutica (ALUMINUM ASSOCIATION, 2017; MORETO, 2012).

A designação das diferentes ligas de alumínio é feita principalmente pela nomenclatura proposta pelo sistema internacional *Aluminum Association* (AA). As composições para trabalho mecânico são classificadas em séries de quatro dígitos, de acordo com o principal elemento de liga adicionado, conforme Figura 2.



Fonte: Adaptado de Jax Precision (2023).

O alumínio 7075-T651 é de boa usinabilidade, possui dureza e resistência elevada, propriedades necessárias para produções indústria aeronáutica. A Tabela 2 apresenta a composição química:

Tabela 2 - Composição química do AA7075-T651 (Peso).

Peso	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Zr+Ti	Outros	Al
Min.	0,18	1,2		2,1				5,1			
Max.	0,23	1,6	0,35	2,5	0,2	0,3	0,3	5,6	0,25	0,05	Rest.

Fonte: COPPERMETAL Aços e Metais (2022).

Suas propriedades mecânicas são apresentadas na Tabela 3. Nota-se uma dureza considerável da liga, superior, por exemplo, ao aço AISI 1020, cuja dureza média é de aproximadamente 120 HV (MATWEB, 2017).

Tabela 3 - Propriedades Físicas Típicas.

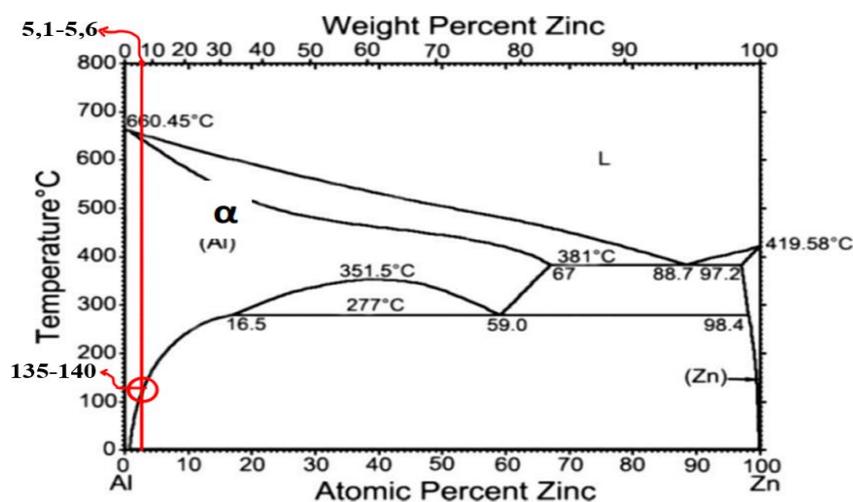
Liga	Peso Espec.(g/cm ³)	Módulo de Elast. (Mpa)	Temperatura de Fusão (°C)	Calor Espec. (Cal./g°C)	Coefficiente de Expansão Linear (L/°C)	Dureza (HV)
7075	2.80	73000	630	0,23	24x10 ⁻⁶	150-180

Fonte: COPPERMETAL Aços e Metais, 2022.

Quando submetida a tratamento térmico essa liga é endurecida por precipitação por meio da formação do composto intermetálico como o MgZn₂ (CALLISTER, 2008).

O diagrama de fases de uma liga Al-Zn é apresentado na Figura 3, com destaque para a composição de zinco entre 5,1 a 5,6% em peso, onde uma transformação de fase ocorre a aproximadamente 135 °C.

Figura 3 - Diagrama de fases do alumínio 7075-T651.



Fonte: Araújo *et al.* (2014).

Durante a solidificação da liga Al 7075-T651, à medida que a temperatura começou a diminuir, a interface líquida diminui continuamente em direção à fase sólida (YANG *et al.*, 2019).

4.4 SOLDAGEM DO ALUMÍNIO

A soldagem de ligas de alumínio por métodos convencionais, como soldagem ao arco elétrico, onde ocorre a fusão do metal de base, requer diversas precauções a fim de evitar a perda das propriedades (LEE *et al.*, 2005; MAGGIOLINI *et al.*, 2016; YANG *et al.*, 2018). Alternativas que visam contornar tais dificuldades impostas por processos tradicionalmente utilizados, como Gás Metal Arc Welding (GMAW) e Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), vêm motivando o desenvolvimento de novos métodos de união, incentivando a aplicação da soldagem por atrito de forma mais intensa, onde a união das peças ocorre sem fusão (CAPELARI; MAZZAFERRO, 2009; TEXIER *et al.*, 2018).

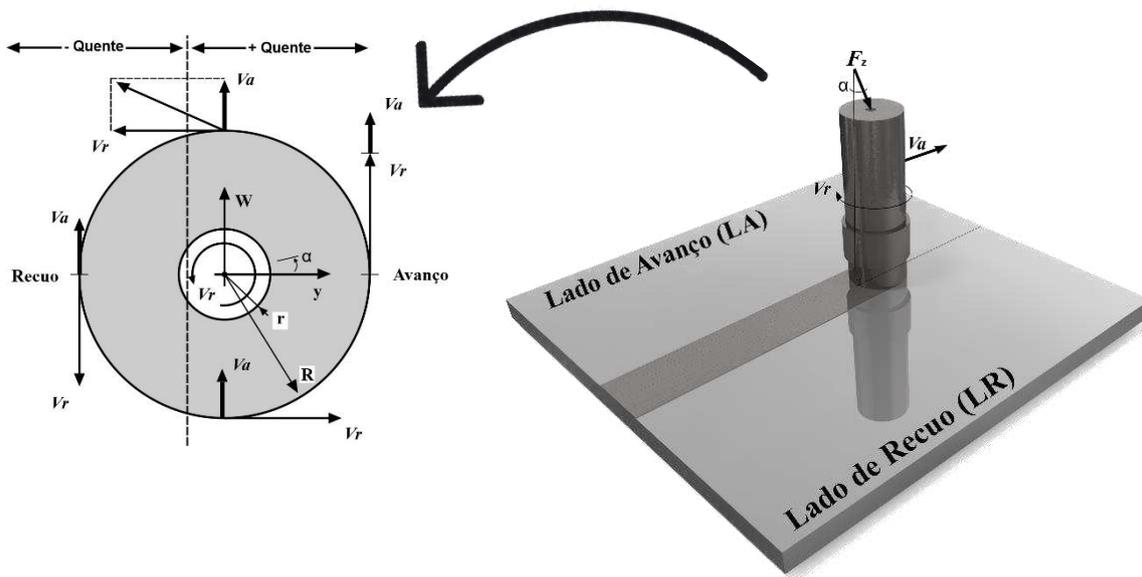
Alguns defeitos mais comuns são problemas com trincas de solidificação e porosidade na zona de fusão quando submetido à soldagem convencional por fusão. Além disso, a redução de valores de algumas propriedades mecânicas quando comparado ao metal base também está presente (FIORAVANTI, 2008).

Os problemas relacionados à soldagem das ligas de alumínio de alta resistência e ao excesso de peso devido ao uso de rebites em junções foram drasticamente alterados com a invenção de um método de soldagem em estado sólido (MARTINS, 2023). O processo FSW foi desenvolvido por Wayne Thomas e um grupo de pesquisadores no início da década de 1990 em Cambridge, no Reino Unido, e seu notável crescimento pode ser explicado pela possibilidade de união bem-sucedida de materiais até então considerados não soldáveis ou de difícil soldabilidade por processos convencionais de soldagem, bem como pela isenção de defeitos comuns aos processos de soldagem por fusão (PIRES *et al.*, 2018). Esta invenção revolucionou o método de unir as ligas de alumínio para aviões, tanques de combustível de foguetes e ônibus espaciais, automóveis, navios, trilhos e vários outros componentes estruturais (MISHRA; MA, 2005; MISHRA; KOMARASAMY, 2016).

O movimento combinado de rotação e translação da ferramenta gera diferentes velocidades de deslocamento relativo entre a ferramenta e as peças a serem unidas. Essas diferenças se traduzem em assimetria na geração de calor e deformação, bem como no

fluxo de material. Tais fatores promovem a formação dos denominados lados de avanço e retrocesso. O lado de avanço corresponde ao lado onde a velocidade de rotação (V_r) da ferramenta possui a mesma direção que a velocidade de avanço (V_a), conforme pode ser visualizado na Figura 4. Por outro lado, o lado de recuo, considerando a rotação da ferramenta, sofre uma força oposta ao vetor da velocidade de avanço, resultando no fluxo de material do lado de avanço em direção ao lado de recuo (VILAÇA; QUINTINO; SANTOS, 2005; PEREIRA; BOLFARINI; SANTOS, 2004).

Figura 4 - Ilustração do processo FSW.



Fonte: Próprio autor.

Os parâmetros de soldagem exercem grande influência sobre a temperatura, pois determinam o tempo e a velocidade de atrito entre a ferramenta e as chapas durante a soldagem. A velocidade de soldagem é o parâmetro responsável pelo tempo de duração do processo, enquanto a velocidade de rotação da ferramenta indica o quanto a ferramenta irá atritar com as chapas em uma determinada porção de tempo, regulada pela velocidade de soldagem. O sentido de rotação distingue para qual lado o fluxo de material será mais concentrado, enquanto a entrada do ombro da ferramenta está diretamente ligada à carga aplicada perpendicularmente às chapas. O ângulo de inclinação da ferramenta auxilia em um maior arrasto de material para dentro da Zona Mole (ZM) (NANDAN; DEBROY; BHADESHIA, 2008).

Variando os parâmetros de soldagem, é possível obter propriedades mecânicas com características satisfatórias. Pequenas alterações nessas variáveis têm influência direta sobre a qualidade da junta soldada, sua microestrutura e todo o conjunto de propriedades relevantes ao material (OLIVIECKI; BESKOW, 2013).

4.5. ZONAS DA JUNTA SOLDADA

O TWI (*The Welding Institute*) desenvolveu um esquema que divide as áreas de soldagem de uma junta soldada pelo processo FSW. O sistema divide a zona de solda em 4 regiões distintas de acordo com a Figura 5:

Figura 5 - Divisão da zona de solda.



Fonte: Kallee; Nicholas (2001).

- A. Metal Base (MB)
- B. Zona Termicamente Afetada (ZTA)
- C. Zona Termomecanicamente Afetada (ZTMA)
- D. Zona de mistura (ZM)

Metal Base (MB): É o material distante da solda, que não foi deformado e que, embora possa ter sofrido um ciclo térmico da soldagem, não foi suficiente para afetar microestrutura ou propriedades mecânicas.

Zona Termicamente Afetada (ZTA): Nesta região, que claramente ficará mais próxima do centro da solda que o MB, o material passou por um ciclo térmico que modificou a microestrutura e/ou as propriedades mecânicas. No entanto, não há deformação plástica ocorrendo nesta área.

Zona termomecanicamente afetada (ZTMA): Nesta região, o material foi deformado plasticamente pela ferramenta de soldagem por fricção e o calor do processo

também exercem alguma influência no material. No caso do alumínio, é possível obter deformação plástica significativa sem recristalização nesta região, e geralmente há um limite distinto entre a zona recristalizada e as zonas deformadas da ZTMA (KALLEE; NICHOLAS, 2001). Nessa Zona ocorre a deformação máxima sem mistura do material, é a fronteira entre o MB/ZTA e o MB (KUNDU; SINGH, 2016).

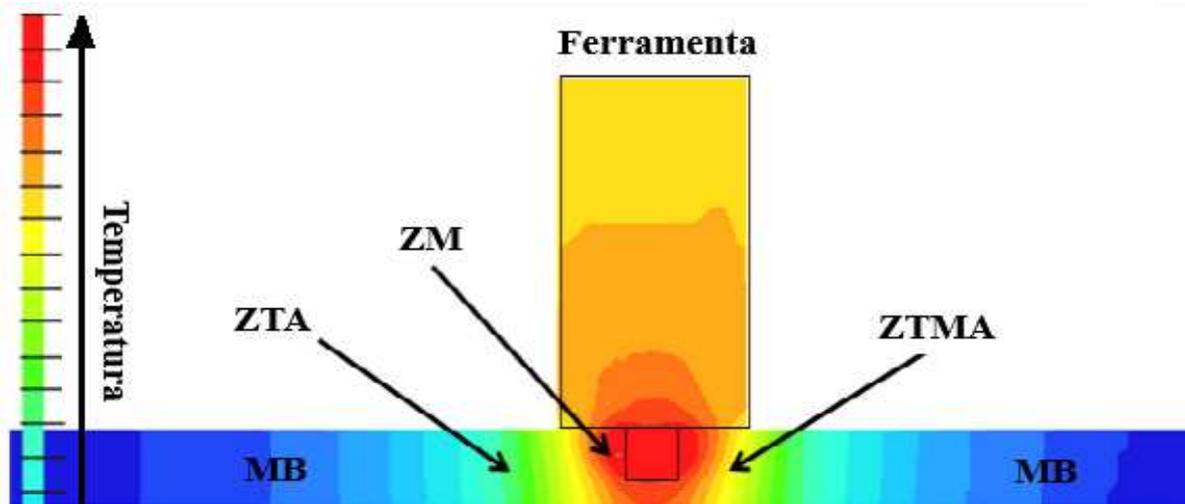
Zona de mistura (ZM): A área onde acontece o refino de grãos oriundo do processo FSW tem sido tradicionalmente chamada de zona de mistura ou pepita. Nessa zona há deformação plástica severa e resulta na recristalização dinâmica em grãos ultrafinos, com total ou parcial dissolução de precipitados durante o resfriamento da solda (MAJEED; MEHTA; SIDDIQUEE, 2021).

4.6. DISTRIBUIÇÃO DE CALOR NA SOLDAGEM

Os principais parâmetros que influenciam na geração de calor e na deformação plástica do material durante o processo de soldagem são a velocidade de rotação da ferramenta, a força normal aplicada e a velocidade de avanço. Além disso, fatores como a condutividade do material, da ferramenta e do *backing bar* podem determinar o aporte térmico e, conseqüentemente, a transferência de calor durante a soldagem (ROSALES *et al.*, 2010).

Segundo Almanar *et al.* (2014), a geração de calor durante o processo de soldagem por FSW ocorre devido ao atrito entre a ferramenta e a superfície do substrato. Existem três fontes de calor no processo: o calor gerado pelo contato do ombro da ferramenta com as chapas; o calor gerado pelo pino girando em alta velocidade; e, por fim, o calor da superfície de contato com as chapas soldadas. O calor no ombro é atribuído à força axial provocada durante o deslocamento da ferramenta na chapa, no plano transversal. O calor gerado no pino, por sua vez, tem sua maior fonte advinda da rotação da ferramenta na parte interna da junta, no plano frontal. Já no caso da ponta do pino, o calor também se dá pela mesma fonte, porém nesse caso o plano é o transversal. A Figura 6 ilustra a distribuição de temperatura na ferramenta e nas chapas durante a soldagem.

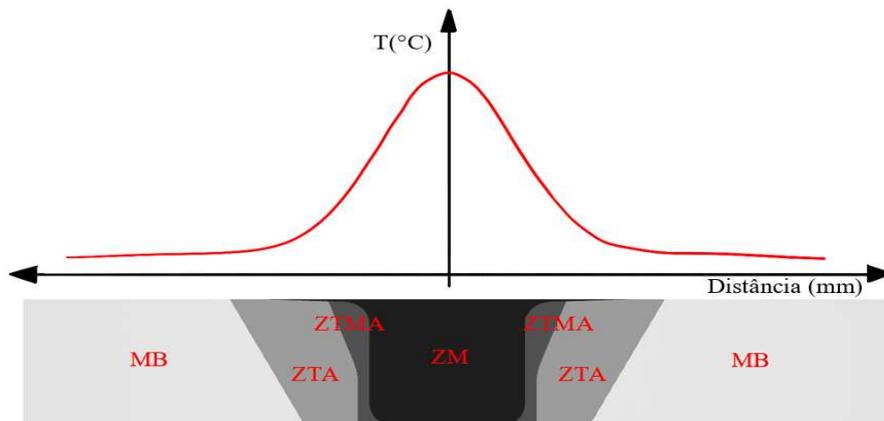
Figura 6 - Temperatura da ferramenta e das chapas no processo de soldagem.



Fonte: Adaptado de Pires *et al.* (2018).

As distribuições de temperatura ao longo das zonas de soldagem controlam diretamente a microestrutura das diferentes regiões da junta soldada, incluindo o tamanho de grão, características do contorno de grão, coalescimento e dissolução dos precipitados, resultando em mudanças nas propriedades mecânicas das juntas (ATHOS, 2013). A Zona Termicamente Afetada (ZTA) é uma região que sofre o efeito do calor gerado durante a soldagem e pode resultar na instabilidade do precipitado, assim como no crescimento de grão. Os precipitados geralmente coalescem, resultando em uma significativa deterioração da dureza quando comparada com o metal de base (TOLEDO *et al.*, 2009). Já na região adjacente à ZTA, a Zona Termomecanicamente Afetada (ZTMA), percebe-se que o calor durante o processo, oriundo do trabalho mecânico, gera deformação plástica, resultando em recristalização parcial e recuperação dos grãos (OLEA, 2008). Na Figura 7, é possível observar a distribuição de calor na chapa durante o processo.

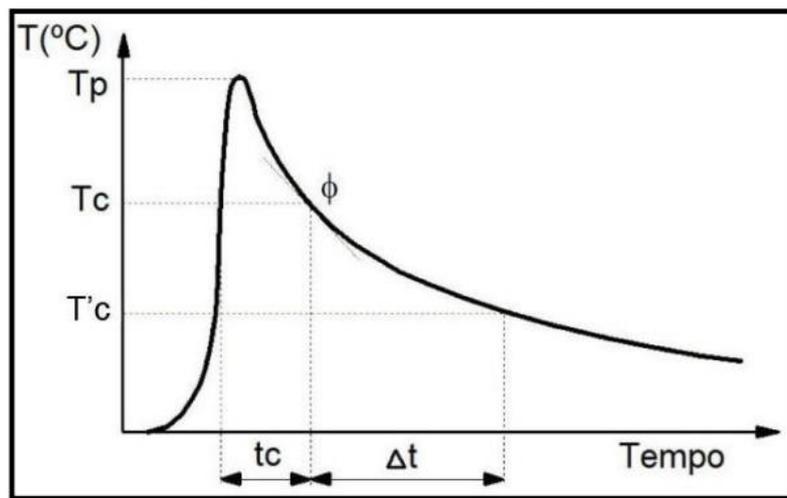
Figura 7 - Distribuição de calor na seção transversal da junta soldada.



Fonte: Próprio autor.

Sendo assim, os ciclos térmicos oriundos de operações de soldagem têm influência direta sobre as transformações microestruturais e podem produzir tensões residuais e distorções. Um ciclo térmico de soldagem, representado na Figura 8, consiste basicamente em três fases: o início do processo em que ocorre o aquecimento rápido do material; em seguida, ocorre a fase em que a temperatura máxima do ciclo é atingida (pico de temperatura); e, por fim, a etapa de resfriamento gradual, até que a temperatura retorne ao seu valor inicial (RIGO, 2015).

Figura 8 - Ciclo térmico de soldagem.



Fonte: Modenesi; Marques; Santos, (2012).

As principais variáveis do ciclo térmico de soldagem são a temperatura de pico (T_p), responsável pelo crescimento do grão e pela dissolução de precipitados, e a taxa de resfriamento (ϕ), onde podem ocorrer transformações de fase.

CAPÍTULO III

5 MATERIAIS E METODOLOGIA

Neste capítulo, serão abordados os materiais utilizados na pesquisa, bem como a metodologia aplicada para alcançar os objetivos propostos. O capítulo divide-se em: caracterização da pesquisa, onde será explanada a área de interesse do trabalho e um fluxograma expondo a organização desta pesquisa; execução da soldagem, abordando o material, ferramenta e máquina utilizados para soldagem; planejamento dos experimentos e seleção dos parâmetros de soldagem e a metodologia.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

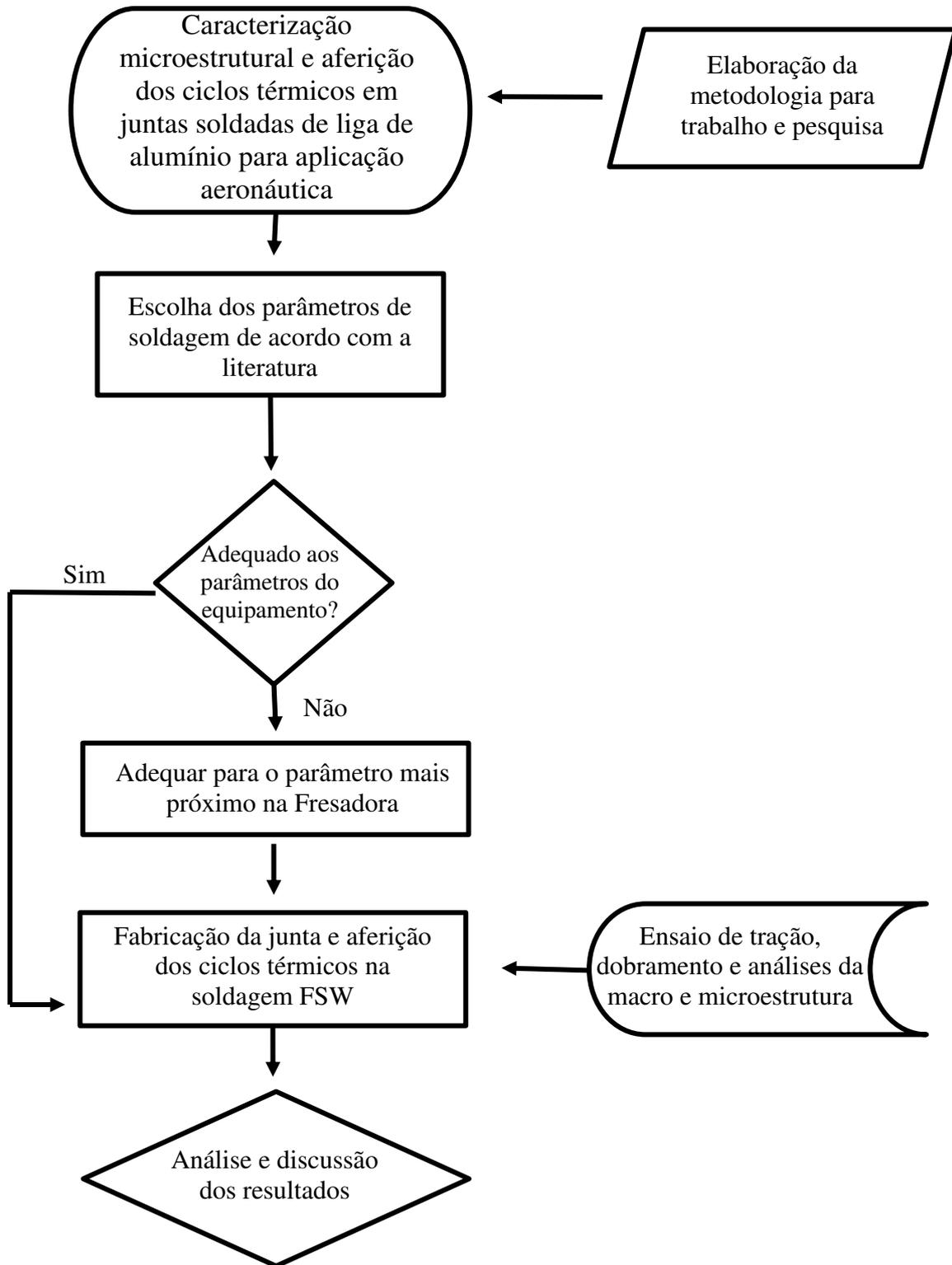
Este estudo é de natureza interdisciplinar, abrangendo as áreas da engenharia mecânica e de processos de fabricação, com um caráter teórico voltado para a análise do ciclo térmico e sua influência nos defeitos, na microestrutura e nas propriedades mecânicas, a fim de correlacionar com a qualidade das juntas confeccionadas com chapas de alumínio 7075-T651 soldadas pelo processo FSW.

O desenvolvimento deste trabalho foi conduzido através da execução da metodologia descrita no fluxograma, apresentado na Figura 9. Esse fluxograma serve como um guia para interessados neste trabalho, fornecendo um entendimento do processo de fabricação e análise das juntas soldadas de forma abrangente.

De acordo com o fluxograma, foi proposta inicialmente a seleção dos parâmetros de soldagem com base no trabalho de Lima (2020), desenvolvido no âmbito do grupo de pesquisa "Materiais e Processos de Fabricação", com o intuito de avaliar a influência dos parâmetros de soldagem sobre os ciclos térmicos nas juntas e sua influência na ocorrência de defeitos e, conseqüentemente, sobre as propriedades mecânicas.

Devido à fresadora utilizada não possuir os mesmos valores de rotação e avanço mencionados no trabalho de Lima (2020), foram empregados os valores mais próximos disponíveis no equipamento. Em seguida, as chapas foram cortadas com dimensões de 120 mm de comprimento, 60 mm de largura e 6 mm de espessura. Durante a soldagem, os ciclos térmicos foram aferidos e, em seguida, os corpos de prova foram extraídos das juntas para análises metalográficas e execução dos ensaios mecânicos.

Figura 9 - Fluxograma da metodologia proposta na pesquisa.



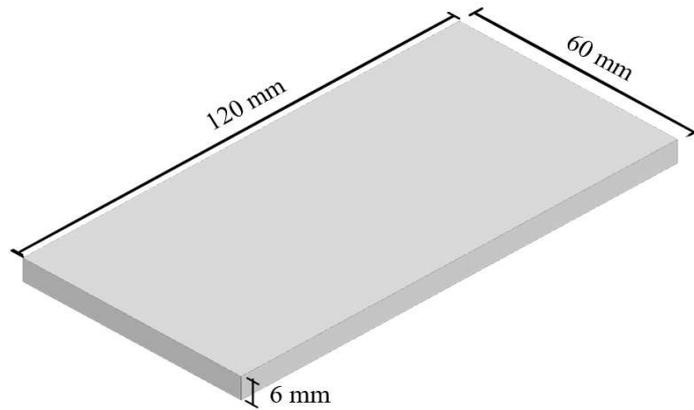
Fonte: Próprio autor.

5.2 CHAPAS DE ALUMÍNIO

Para confecção das juntas foi utilizado a liga de alumínio 7075-T651, que tem como

principal elemento de liga o Zinco. As chapas têm dimensões de 120 mm de comprimento, 60 mm de largura e 6 mm de espessura, representado na Figura 10.

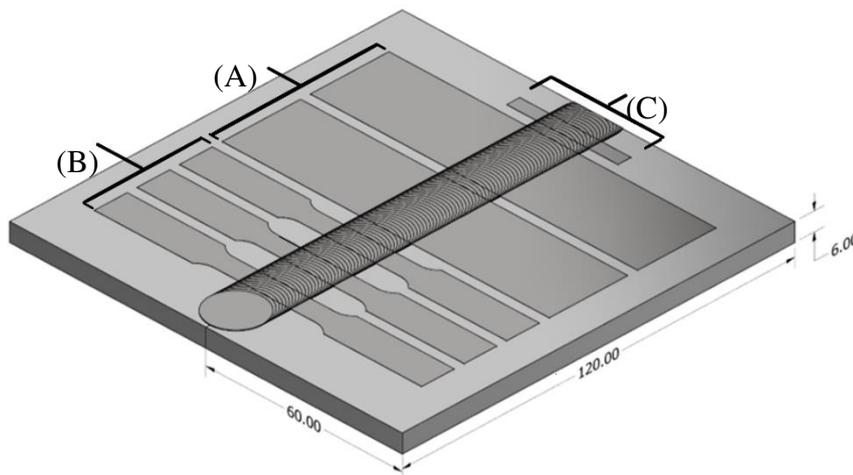
Figura 10 - Dimensões da chapa de AA7075-T651.



Fonte: Próprio autor.

A escolha dessas dimensões se deu para que haja a possibilidade de extrair todos os corpos de prova para os ensaios mecânicos, sendo dois para o (A) ensaio de dobramento de raiz 60°, três para (B) tração uniaxial e um para (C) análise de dureza e microestrutura, conforme possível observar na Figura 11:

Figura 11 - Corpos de prova para os ensaios de tração, dobramento e análise de dureza e microestrutura.



Fonte: Próprio autor.

5.3 EXECUÇÃO DA SOLDAGEM

5.3.1 Parâmetros

As soldagens foram realizadas empregando uma fresadora modelo FU-300-E da PROMILL. Os parâmetros de soldagem empregados podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros de soldagem.

Junta	V_a =Velocidade de Avanço (mm/min)	V_r =Velocidade de Rotação (RPM)	θ= Inclinação da ferramenta (°)
1	47	470	1
2	117	1585	1
3	47	470	3
4	117	1585	3

Fonte: Próprio autor.

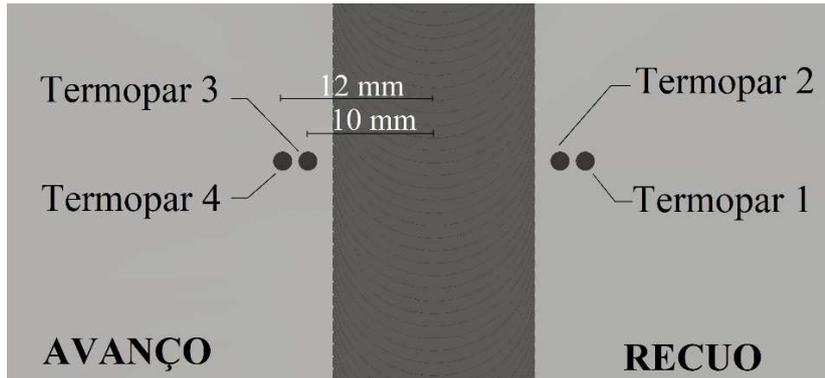
Os parâmetros adotados foram baseados no trabalho de Lima (2020), com a adaptação dos parâmetros do processo para os mais próximos disponíveis na fresadora. Isso se deve ao fato de que os parâmetros disponíveis na fresadora não eram semelhantes aos utilizados na literatura, uma vez que cada equipamento possui relações de transmissão específicas dos conjuntos de engrenagens, dependendo do fabricante e do modelo.

5.3.2 Aquisição do ciclo térmico de soldagem

Os ciclos térmicos de soldagem foram adquiridos por meio de um sistema de aquisição de dados da Agilent, modelo 34970^a. O termopar utilizado foi do tipo K e posicionado nas chapas conforme mostrado na Figura 12. A profundidade do furo para a inserção do termopar foi correspondente à metade da espessura da chapa (3 mm), com uma distância de 10 mm e 12 mm da interface entre elas e do centro da solda, garantindo que o ombro da ferramenta não atingisse os termopares, uma vez que o raio do ombro da ferramenta é de 8 mm.

Os termopares foram fixados no interior do furo utilizando fitas térmicas adesivas para altas temperaturas (500 °C) e, em seguida, reforçados com fita isolante. O diâmetro do furo foi elaborado com o valor mais próximo possível do diâmetro do termopar (1 mm) para garantir uma fixação livre de folgas.

Figura 12 - Posicionamento dos termopares.



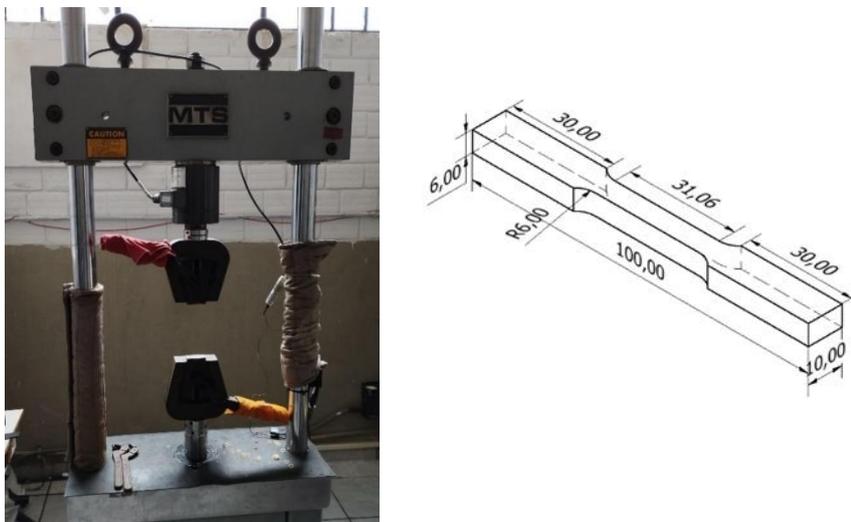
Fonte: Próprio autor.

5.4 METODOLOGIA DOS ENSAIOS

5.4.1 Ensaio mecânico de tração uniaxial

Foram realizados ensaios de tração uniaxial para cada uma das juntas soldadas. Utilizou-se uma máquina universal de ensaios, modelo MTS-810, localizada no Laboratório de Propriedades Mecânicas da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Para os ensaios, foi empregada uma taxa de deslocamento de 1 mm/min até a ruptura dos corpos de prova. Na Figura 13, é possível observar a máquina universal de ensaios e as dimensões geométricas do corpo de prova do ensaio de tração utilizado.

Figura 13 - Máquina universal de ensaio modelo MTS-810 e corpo de prova adotado para os ensaios, seguindo a norma ASTM E8/E8M – 16^a.

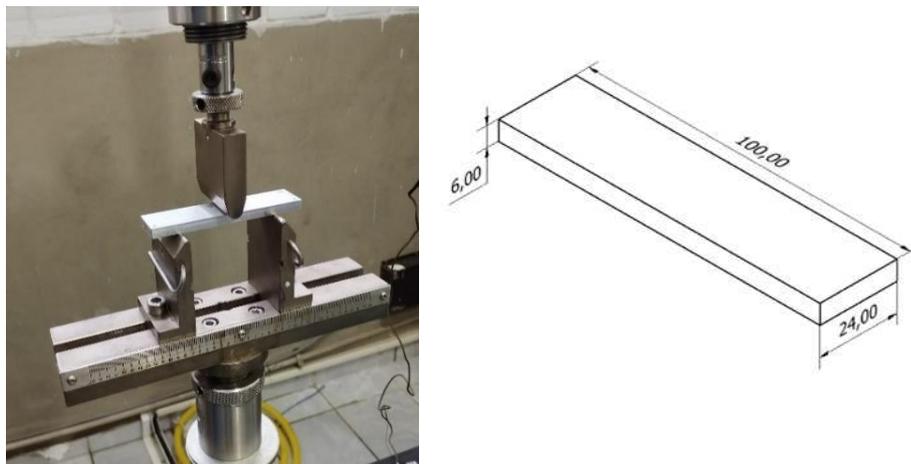


Fonte: Próprio autor.

5.4.2 Ensaio de dobramento de raiz 60°

O ensaio mecânico de dobramento de raiz a 60° foi realizado com o objetivo de avaliar a qualidade da solda. Foram executados dois ensaios para cada junta soldada. O ensaio foi conduzido em uma máquina universal de ensaios, modelo MTS-810. Na Figura 14, é possível observar o corpo de prova posicionado para o ensaio, juntamente com suas dimensões.

Figura 14 - Prensa universal de ensaio modelo MTS-810 e corpo de prova adotado para os ensaios, seguindo a norma ASTM E190-92.



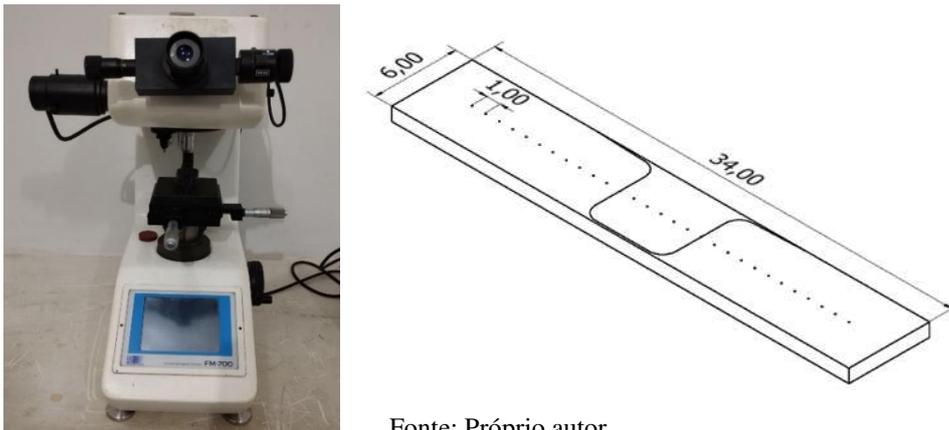
Fonte: Próprio autor.

5.4.3 Análise de dureza e microestrutura

Para a análise da microestrutura, os corpos de prova foram confeccionados com as dimensões ilustradas na Figura 15 e embutidos a frio em resina acrílica. Em seguida, foram lixados em poltrizes mecânicas com lixas de granulometria 220, 400, 600, 800, 1200 e 2200 sequencialmente, até que as superfícies estivessem livres de riscos. Esse processo foi acompanhado pela visualização em microscópio óptico após cada etapa de polimento, utilizando pasta de diamante de granulometria de 1µm. O acabamento final foi feito com sílica coloidal 0,4 µm e, por fim, os corpos de prova foram atacados com reagente Keller.

Os ensaios de dureza Vickers foram realizados com um microdurômetro digital modelo FM-700 da FutureTech. Durante o processo, foi aplicada uma carga de 200 gf por 15 segundos, com um espaçamento de 1 mm entre as indentações. O microdurômetro e a distribuição das indentações podem ser observados na Figura 15.

Figura 15 - Microdurômetro digital FM-700 da FutureTech e corpo de prova.



Fonte: Próprio autor.

5.4.4 Análise da superfície de fratura

A caracterização das superfícies de fratura após os ensaios de tração foi realizada por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com ampliações de imagem variando de 40 a 2000 vezes. O objetivo era identificar as características de fratura nos corpos de prova para investigar os defeitos. O equipamento utilizado foi um microscópio modelo VEGA3 SBH, localizado no Laboratório de Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas da UFCG, conforme apresentado na Figura 16.

Figura 16 - Microscópio eletrônico de varredura, modelo VEGA3 SBH.



Fonte: Adaptado de Lima (2020).

CAPÍTULO IV

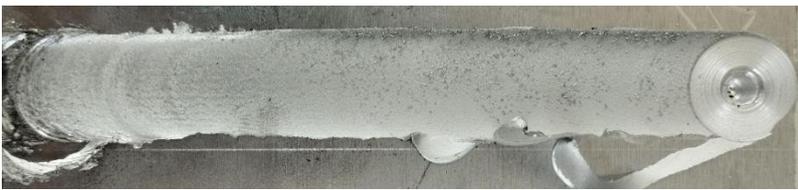
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

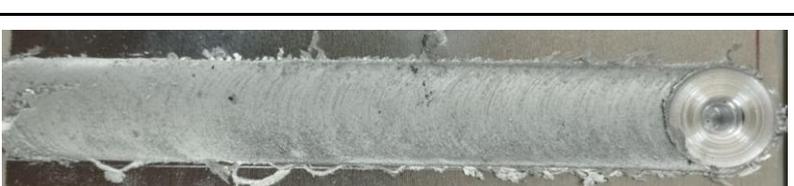
Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos por meio da metodologia proposta anteriormente, visando alcançar o objetivo geral estabelecido para a pesquisa. O capítulo está dividido em duas seções principais: a primeira trata da confecção das juntas e da avaliação da qualidade superficial por meio da análise visual. Em seguida, serão apresentados os resultados dos ciclos térmicos de soldagem, bem como a avaliação da microestrutura, microdureza, resistência à tração e dobramento das juntas.

6.1. INSPEÇÃO VISUAL DAS JUNTAS SOLDADAS

O Quadro 1 apresenta as juntas que foram executadas de forma que a junta 1 e 3 foram as juntas de melhores propriedades mecânicas e as juntas 2 e 4 foram as de propriedades mecânicas menos satisfatórias de acordo com Lima (2020).

Quadro 1 - Cordões de soldas das juntas soldadas pelo processo FSW.

JUNTA	VISTA SUPERIOR DO CORDÃO DE SOLDA	PARÂMETROS
1		<i>Va</i> : 47 mm/min; <i>Vr</i> : 470 RPM; θ : 1°
1 (Lima, 2020)		<i>Va</i> : 48 mm/min; <i>Vr</i> : 410 RPM; θ : 1°
2		<i>Va</i> : 117 mm/min; <i>Vr</i> : 1585 RPM; θ : 1°

2 (Lima, 2020)		V_a : 118 mm/min; V_r : 1415 RPM; θ : 1°
3		V_a : 47 mm/min; V_r : 470 RPM; θ : 3°
3 (Lima, 2020)		V_a : 48 mm/min; V_r : 410 RPM; θ : 3°
4		V_a : 117 mm/min; V_r : 1585 RPM; θ : 3°
4 (Lima, 2020)		V_a : 118 mm/min; V_r : 1415 RPM; θ : 3°

Fonte: Próprio autor.

Ao realizar uma análise visual, observa-se que as juntas 1 e 3 apresentaram melhor acabamento superficial, com pouca formação de rebarbas e sem nenhum defeito superficial aparente. Não foram percebidas ondulações na solda, além de apresentarem boa uniformidade ao longo de toda a extensão da junta, resultados similares aos obtidos por Lima (2020).

Por outro lado, nas juntas 2 e 4, constata-se uma presença considerável de rebarbas (flash), principalmente na junta 2. A rebarba nas laterais da solda, possivelmente originada da grande magnitude da força axial (força na direção Z) aplicada nas chapas durante a soldagem, resultando em uma perda de material durante o processo, o qual escorre para as laterais da solda após a passagem da ferramenta (COLAÇO, 2019). A solda apresentou-se mais rugosa e com acabamento superficial mais grosseiro.

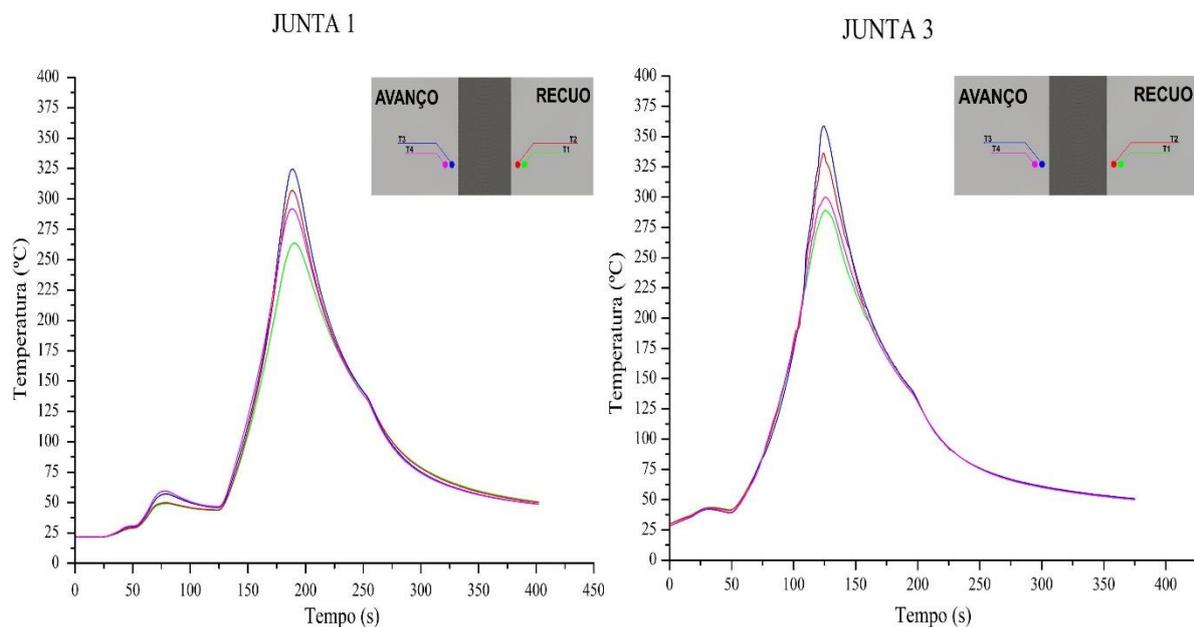
A velocidade de rotação da ferramenta pode ser outro fator que influencia a geração de rebarbas, pois em altas rotações, a força centrífuga atua no material na ZM, dispersando-o para as laterais da solda. Threadgill *et al.* (2009) afirma que o uso de altas velocidades

de soldagem e geometrias de ferramentas inadequadas podem proporcionar uma maior formação deste defeito.

6.2. CICLO TÉRMICO DE SOLDAGEM

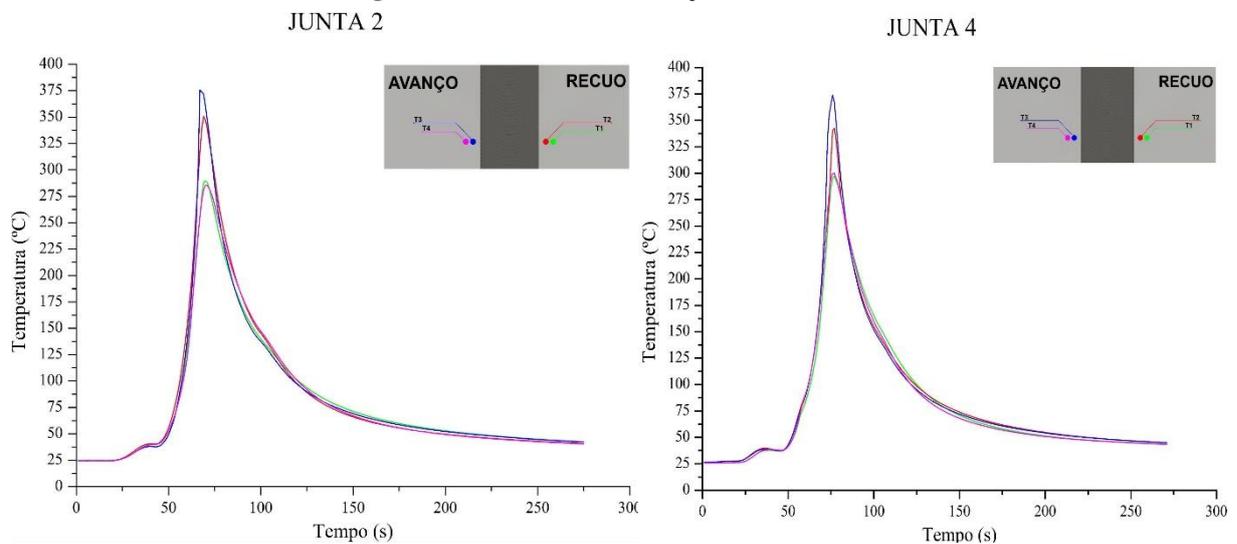
Nas Figuras 17 e 18 é possível observar os ciclos térmicos das juntas 1 e 3, bem como das juntas 2 e 4, respectivamente. Temperaturas mais altas foram observadas nos termopares 3 para todas as juntas e temperaturas por estarem mais próximas da região da solda:

Figura 17 - ciclos térmicos das juntas 1 e 3.



Fonte: Próprio autor..

Figura 18 - ciclos térmicos das juntas 2 e 4.



Fonte: Próprio autor.

A partir da aquisição dos ciclos térmicos durante o processo, foi possível determinar as temperaturas de pico (Tabela 5), taxa de aquecimento (Tabela 6) e taxa de resfriamento (Tabela 7). Esses valores são fundamentais para o entendimento dos fenômenos que ocorrem durante o processo, afetando a microestrutura e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas do material.

Nos gráficos de temperatura na zona de resfriamento, é possível observar ondulações nas curvas a uma temperatura de 135 °C a 140 °C, o que possivelmente é uma transformação de fase de Al para Al+Zn. Vale salientar que essa ondulação é mais acentuada nos ciclos térmicos das juntas 2 e 4, que coincidentemente possuem maior taxa de resfriamento.

Não foi possível averiguar a temperatura de pico no centro da solda, pois como o processo de soldagem FSW utiliza trabalho mecânico originado de uma ferramenta girando e agitando o material na ZM, fixar um termopar nessa região implica na sua destruição no momento em que a ferramenta entra em contato, interrompendo a aferição da temperatura. Sendo assim, para efeito comparativo, foi calculado o seu valor por meio de uma equação matemática (Equação 1), proposta por Commin *et al.* (2008) para ligas de alumínio, em função dos parâmetros de soldagem utilizados. Durante os cálculos, foi adotada a constante K como 0,65 e a constante α como 0,06.

Equação 1.

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

Onde:

T: Temperatura na ZM

T_m = Temperatura de Fusão

K = Constante (0,65-0,75)

α = Constante (0,04-0,06)

W = Velocidade de rotação da ferramenta

V = Velocidade de Avanço da ferramenta

As maiores temperaturas de pico observadas foram no lado de avanço da ferramenta, no termopar T3, devido ao maior trabalho mecânico experimentado nessa região. Assim, quanto maior a velocidade de rotação, maiores foram as temperaturas de pico observadas. Segundo NI *et al.* (2019), isso ocorre porque o vetor de ataque é o mesmo

que o vetor de velocidade da ferramenta, resultando em um somatório de vetores que aplicam um maior trabalho mecânico e, conseqüentemente, maior temperatura e fluxo de material.

As diferenças entre as temperaturas de pico no lado de avanço e recuo da ferramenta foram da ordem de 18 °C para menores velocidades de soldagem e rotação, com 1° de inclinação da ferramenta, e de 24 °C para 3° de inclinação. Para maiores velocidades de soldagem e rotação, essa diferença foi de 25 °C para 1° de inclinação da ferramenta e de 31 °C para 3° de inclinação. Dessa forma, é possível interpretar, de maneira indireta, que maiores ângulos de inclinação da ferramenta aumentam a pressão na zona misturada e, conseqüentemente, resultam em maior temperatura e trabalho mecânico.

Essas diferenças acentuadas na história térmica da junta soldada em seus lados de avanço e recuo podem resultar em diferentes perfis de dureza e tensões residuais devido à partição térmica desigual ao longo da largura da junta soldada.

Tabela 5 - Temperaturas de pico nas juntas soldadas e Temperatura teórica na zona de mistura obtida com a Eq1 (°C).

		RECUO		CENTRO	AVANÇO	
JUNTA	Parâmetros	T1	T2	Temp. Teórica	T3	T4
Junta 1	V = 47 mm/min	263,634	306,882	394,469	324,596	291,849
	W = 470 RPM					
	$\theta = 1^\circ$					
Junta 2	V = 117 mm/min	289,577	350,767	428,712	375,700	285,434
	W = 1585 RPM					
	$\theta = 1^\circ$					
Junta 3	V = 47 mm/min	288,804	336,470	394,469	358,735	299,894
	W = 470 RPM					
	$\theta = 3^\circ$					
Junta 4	V = 117 mm/min	297,533	342,581	428,712	373,925	300,009
	W = 1585 RPM					
	$\theta = 3^\circ$					

*T1=Termopar 1(-12 mm); T2=Termopar 2(-10 mm); T3= Termopar 3(10 mm); T4=Termopar 4(12 mm).
Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 6 é possível observar que maiores valores de velocidade de rotação da ferramenta geraram taxas de aquecimento mais rápidas. A taxa de aquecimento pode ser diretamente associada à variação da velocidade de soldagem (WEIS, 2008).

Tabela 6 - Taxa de aquecimento das juntas soldadas (°C/s).

JUNTA	Parâmetros	RECUO		AVANÇO	
		T1	T2	T3	T4
Junta 1	V = 47 mm/min	3,472	4,221	4,476	3,935
	W = 470 RPM				
	$\theta = 1^\circ$				
Junta 2	V = 117 mm/min	10,795	13,894	16,728	10,501
	W = 1585 RPM				
	$\theta = 1^\circ$				
Junta 3	V = 47 mm/min	3,388	4,167	5,334	3,553
	W = 470 RPM				
	$\theta = 3^\circ$				
Junta 4	V = 117 mm/min	9,494	10,780	12,353	9,584
	W = 1585 RPM				
	$\theta = 3^\circ$				

Fonte: Próprio autor.

Além disso, também é possível observar na Tabela 7 que, devido às maiores velocidades de soldagem, as taxas de resfriamento para as juntas 2 e 4 foram mais severas, praticamente suprimindo o pico de transformação de fase observados nos ciclos térmicos das Figuras 17 e 18. Na soldagem, as transformações de fase são dependentes das taxas de aquecimento e, principalmente, das taxas de resfriamento (MOOJEN *et al.*, 2015).

Segundo Cruz (2018), no regime de alta temperatura é onde se encontram as máximas taxas de resfriamento no material. Dependendo da intensidade, essas taxas podem levar à formação de fases ou frações de fases indesejadas.

Tabela 7 - Taxa de resfriamento das juntas soldadas (°C/s).

JUNTA	Parâmetros	RECUO		AVANÇO	
		T1	T2	T3	T4
Junta 1	V = 47 mm/min	1,999	2,640	2,925	2,448
	W = 470 RPM				
	$\theta = 1^\circ$				
Junta 2	V = 117 mm/min	4,893	6,569	7,745	4,532
	W = 1585 RPM				
	$\theta = 1^\circ$				
Junta 3	V = 47 mm/min	2,187	2,774	3,226	2,349
	W = 470 RPM				
	$\theta = 3^\circ$				
Junta 4	V = 117 mm/min	5,045	6,749	7,621	5,312
	W = 1585 RPM				
	$\theta = 3^\circ$				

Fonte: Próprio autor.

6.3. ANÁLISE DE MACRO E MICROESTRUTURA

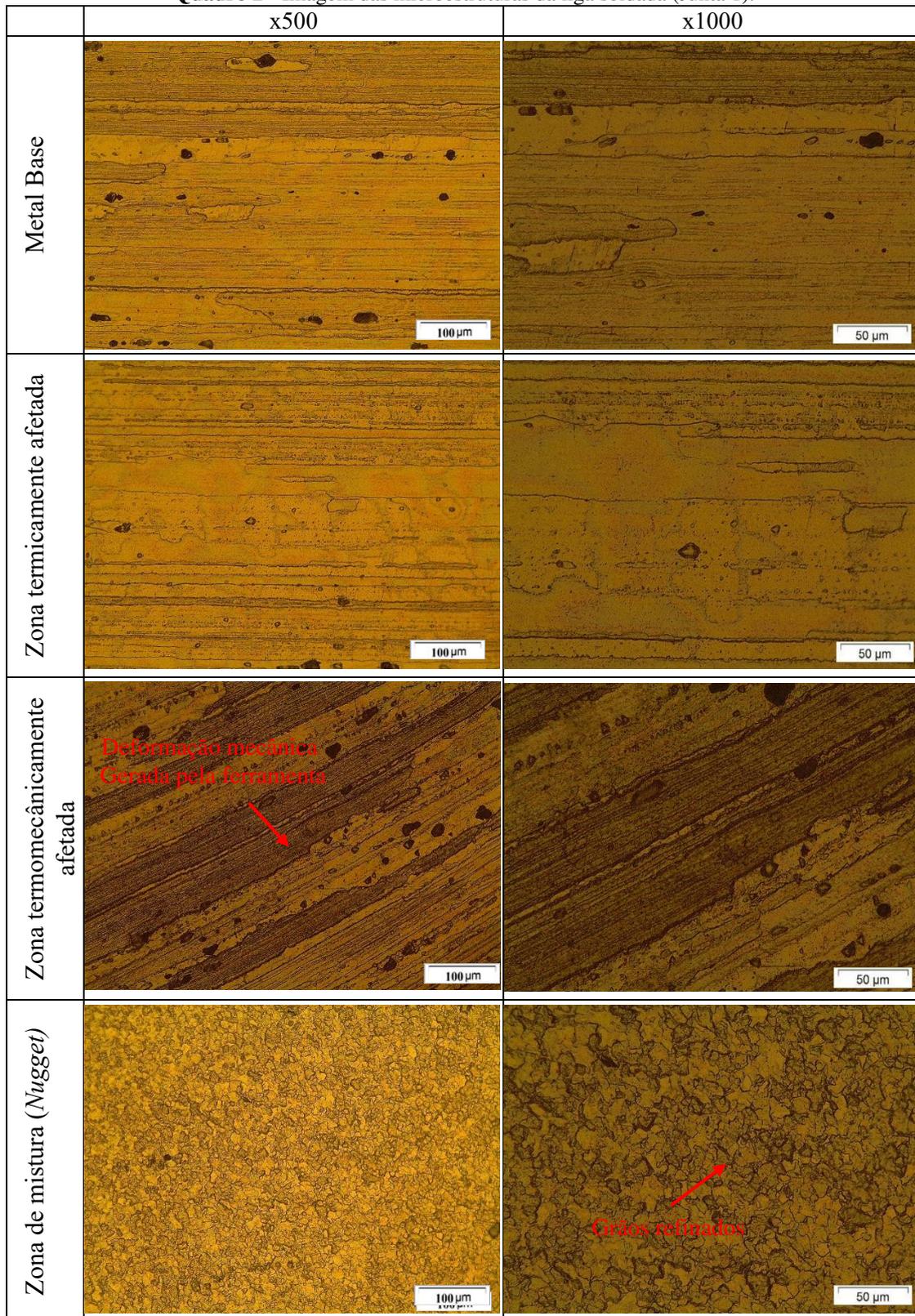
6.3.1. Macro e Microestrutura

No Quadro 2, é possível observar as quatro regiões da junta soldada 1 e suas respectivas microestruturas: o MB, a ZTA e a ZTMA. É notável que a microestrutura da ZTA é semelhante à do MB, pois, apesar dessa região ser afetada pela temperatura proveniente do trabalho mecânico durante o processo, as características microestruturais permanecem relativamente similares. Observando-se a microestrutura da ZTMA, verifica-se uma alteração da microestrutura devido ao trabalho mecânico oriundo da ferramenta, que distorce os contornos de grãos dessa região, como é possível notar no quadro, porém a mesma não experimenta um refino de grãos.

Por fim, observa-se a ZM: essa é a região mais afetada pelo calor, onde a ferramenta promove a mistura do material com sua rotação e, conseqüentemente, o refino de grãos. Fazendo uma comparação com as outras regiões, fica nítido que agora os grãos apresentam

dimensões diferentes.

Quadro 2 - Imagem das microestruturas da liga soldada (Junta 1).



Fonte: Próprio autor.

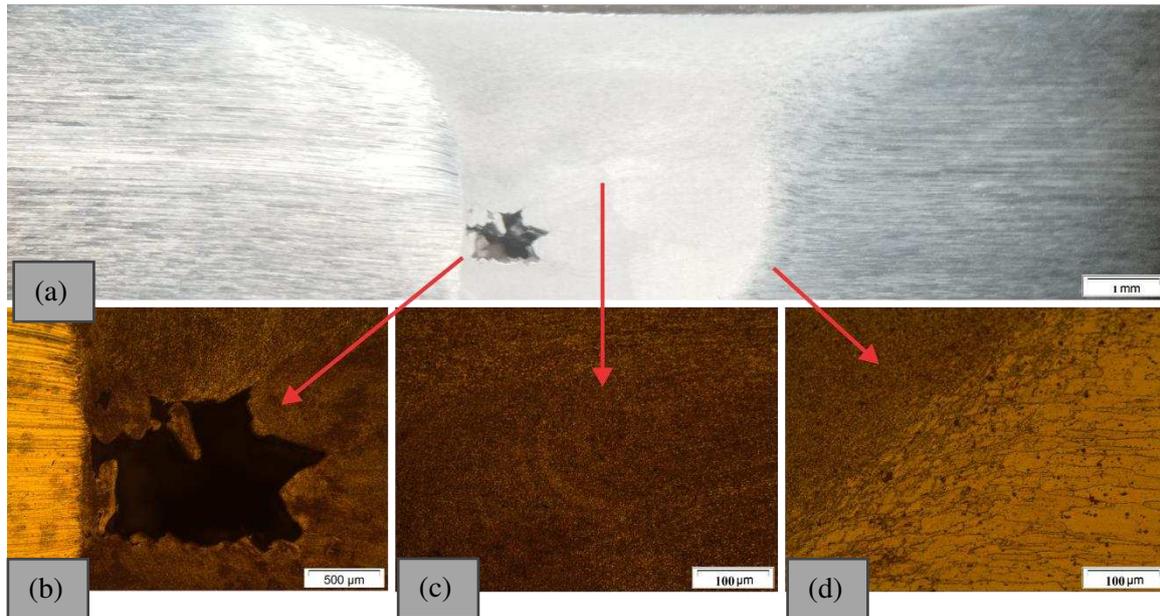
Na Figura 19, são mostrados cortes transversais da junta 1, nos quais se percebe a presença de um defeito conhecido como buraco de minhoca (wormhole) na ZM. Esse defeito é ocasionado pela falta de arraste de material, resultando na deficiência do preenchimento nessa área. Para os parâmetros usados na junta 3, não se esperava a presença desse defeito, pois no trabalho de Lima (2020), que utilizou parâmetros similares, esse defeito não ocorreu.

No entanto, Boldsai Khan *et al.* (2009) afirmam que alguns fatores podem contribuir para a formação de buracos de minhoca, como fixação. Este estudo, porém, varia apenas os três parâmetros listados acima: velocidade de rotação, velocidade de avanço e força axial aplicada. Assim, uma possível justificativa para o defeito de *wormhole* nesta junta pode ser a força axial aplicada.

Na Figura 19c, nota-se a presença de um fenômeno chamado anéis de cebola (*onion rings*). Esses anéis são vestígios deixados pelo transporte de material durante o processo de soldagem. O movimento giratório produzido pela ferramenta leva a círculos concêntricos distintos entre si pela redução do raio característico de cada um deles, formando camadas semelhantes a anéis de cebola, indicando a mistura entre os materiais na ZM (MISHRA; MA, 2005).

A Figura 19d mostra a fronteira da ZTMA com a ZM, com grãos mais alongados na ZTMA seguidos de grãos recristalizados dinamicamente na ZM. Essa fronteira fica mais evidente no lado de avanço, pois o fluxo de material acontece partindo do lado de avanço para o lado de recuo. Por essa razão, a fronteira entre a ZTMA e a ZM não fica tão evidente nesse lado, pois ele recebe um fluxo de material direcionado pela rotação da ferramenta. Quanto maior a velocidade de rotação, maior é a temperatura, proporcionando maior plasticidade do material nessa região.

Figura 19 - Junta soldada 1; a) Macrografia da seção transversal; b) defeito de wormhole na ZM no LA; c) ZM e anéis de cebola (Onion rings); d) região de transição entre ZTMA e ZM.

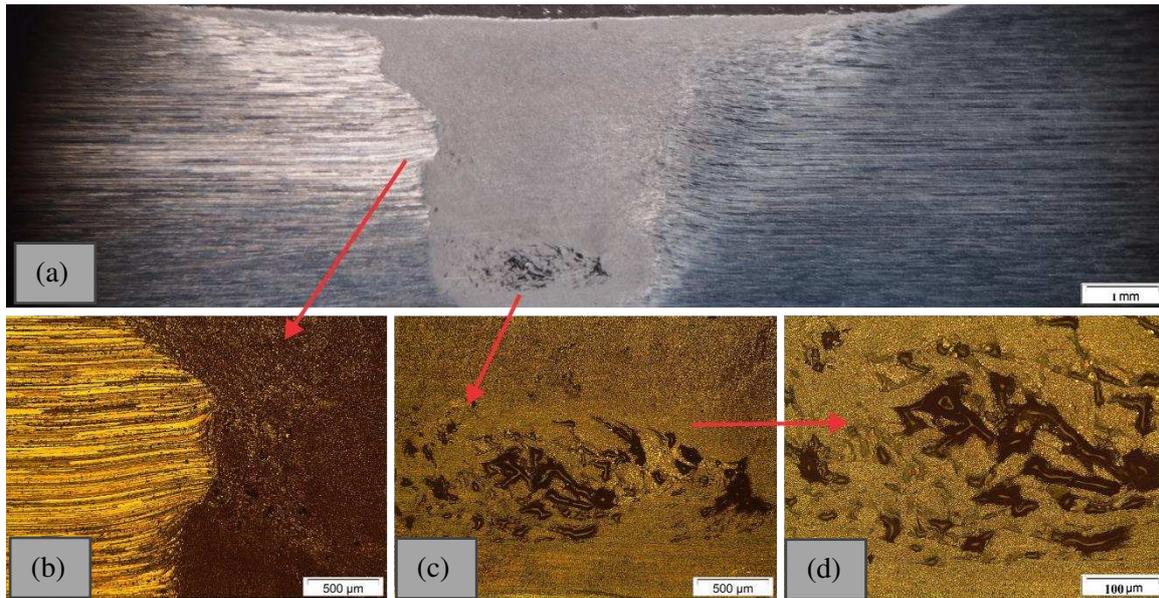


Fonte: Próprio autor.

A figura 20 apresenta a microestrutura da junta 2. É possível notar a presença de falta de preenchimento na ZM, mais nítido na figura 20c e 20d, resultando numa união mal sucedida com várias fissuras na zona em questão, essa falta de preenchimento acarreta efeitos em algumas propriedades mecânicas da junta, como baixa resistência a tração, além da tendência a fraturas no local após submetida trabalhos mecânicos. Fica nítido a diferença de granulometria da região soldada é possível destacar a diferença entre a ZM e a ZTMA, na ZM ocorre a recristalização total dos grãos, diferindo da ZTMA, onde ocorre apenas a recristalização parcial, obtendo assim, uma granulometria mais grosseira que a ZM (COLAÇO, 2019).

Outros defeitos de soldagem não foram detectados na junta. A presença desses defeitos pode estar relacionados com as temperaturas experimentadas durante o ciclo térmico de soldagem, tendo em vista que a junta 2 atingiu os maiores picos de temperatura teórica de 428,712 °C, provenientes das altas velocidades de rotação e avanço da ferramenta, induzindo uma maior deformação plástica e dispersão no material.

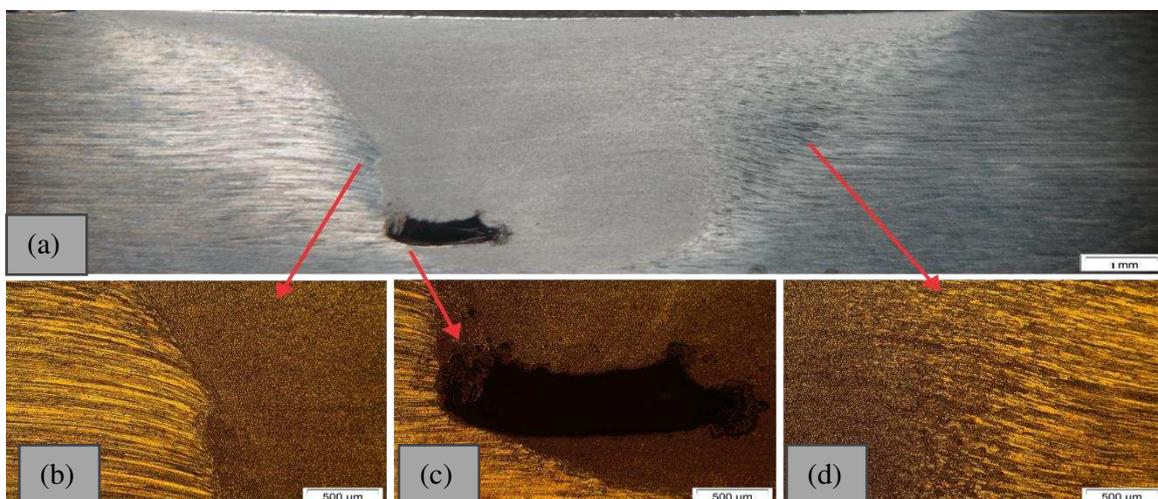
Figura 20 - Junta soldada 2; a) Macrografia da seção transversal; b) região de transição entre ZTMA e ZM; c) ZM e falta de mistura; d) ZM e falta de mistura ampliada.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 21, são apresentados cortes transversais da junta 3, onde esse defeito se torna visível novamente, um dos defeitos mais comuns associados ao FSW é um buraco de minhoca, uma cavidade abaixo da superfície da solda. Lima (2020) afirma que, devido ao fluxo de material de forma ineficiente durante o processo de soldagem por mistura, oriundo do uso de um menor ângulo de inclinação da ferramenta, que provoca um menor arraste de material, acarretando à falta de mistura e preenchimento. Outros defeitos de soldagem não foram detectados na junta.

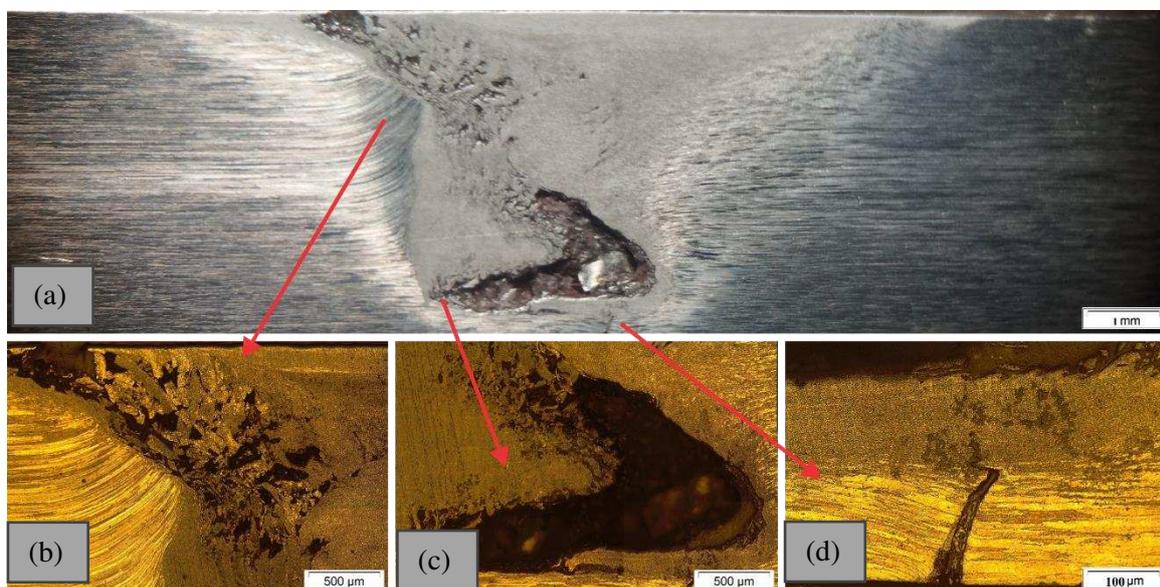
Figura 21 - Junta soldada 3; a) Macrografia da seção transversal; b) região de transição entre ZTMA e ZM; c) defeito de wormhole na ZM no LA; d) região de transição entre ZTMA e ZM.



Fonte: Próprio autor.

A microestrutura da junta 4, apresentada na Figura 22, mostrou defeitos de soldagem mais aparentes em relação às demais. A falta de preenchimento nessa junta é mais evidente entre os defeitos. Na ZM, o fluxo de material não foi suficiente para preencher toda a seção transversal. Além do wormhole na Figura 22c, houve a presença de um defeito de união conhecido como "kissing bond" na Figura 22d. Nesse local, não houve a união completa das chapas, formando assim um ponto frágil para uma futura fratura.

Figura 22 - Junta soldada 4; a) Macrografia da seção transversal; b) ZTMA e ZM no LA com falta de mistura; c) defeito de wormhole na ZM no LA; d) defeito de soldagem kissing bord.



Fonte: Próprio autor.

Jeenjitkaew (2011) afirma que a imperfeição de "kissing bond" ocorre na raiz da solda, esse defeito é definido como uma ligação fraca entre as interfaces presentes, formando apenas uma adesão muito instável que pode alterar drasticamente a resistência à ruptura da junta, causando falha prematura. Uma possível explicação para esse defeito é o ângulo de inclinação da ferramenta que foi de 1° , impossibilitando um arraste suficiente de material para uma boa mistura. Assim como a junta 2, a junta 4 foi submetida a temperaturas elevadas, chegando a $373,925^\circ\text{C}$ no termopar 3 e uma temperatura teórica de $428,712^\circ\text{C}$, a maior dentre as 4 juntas, e uma taxa de aquecimento de $12,353^\circ\text{C/s}$. Desse modo, é importante manter os parâmetros de soldagem controlados em relação à temperatura para garantir um bom fluxo de material na ZM. Boldsaikhan *et al.*, (2009) relatam que durante o processo de soldagem, o fluxo de material ao redor da ferramenta deve se manter regular para produzir uma boa solda.

6.3.2. Ensaio mecânico de dureza Vickers

Foi realizado um perfil de dureza transversal ao longo da junta soldada em todos os quatro corpos de prova a fim de averiguar a dureza do material. Nas Figuras 23 e 24 é possível observar as durezas medidas na seção transversal da solda, além da DM e do MB, que para essa liga é em torno de 180 HV (COPPERMETAL, 2022).

Figura 23 - Perfil transversal de microdureza Vickers da junta soldada 1 e 3.

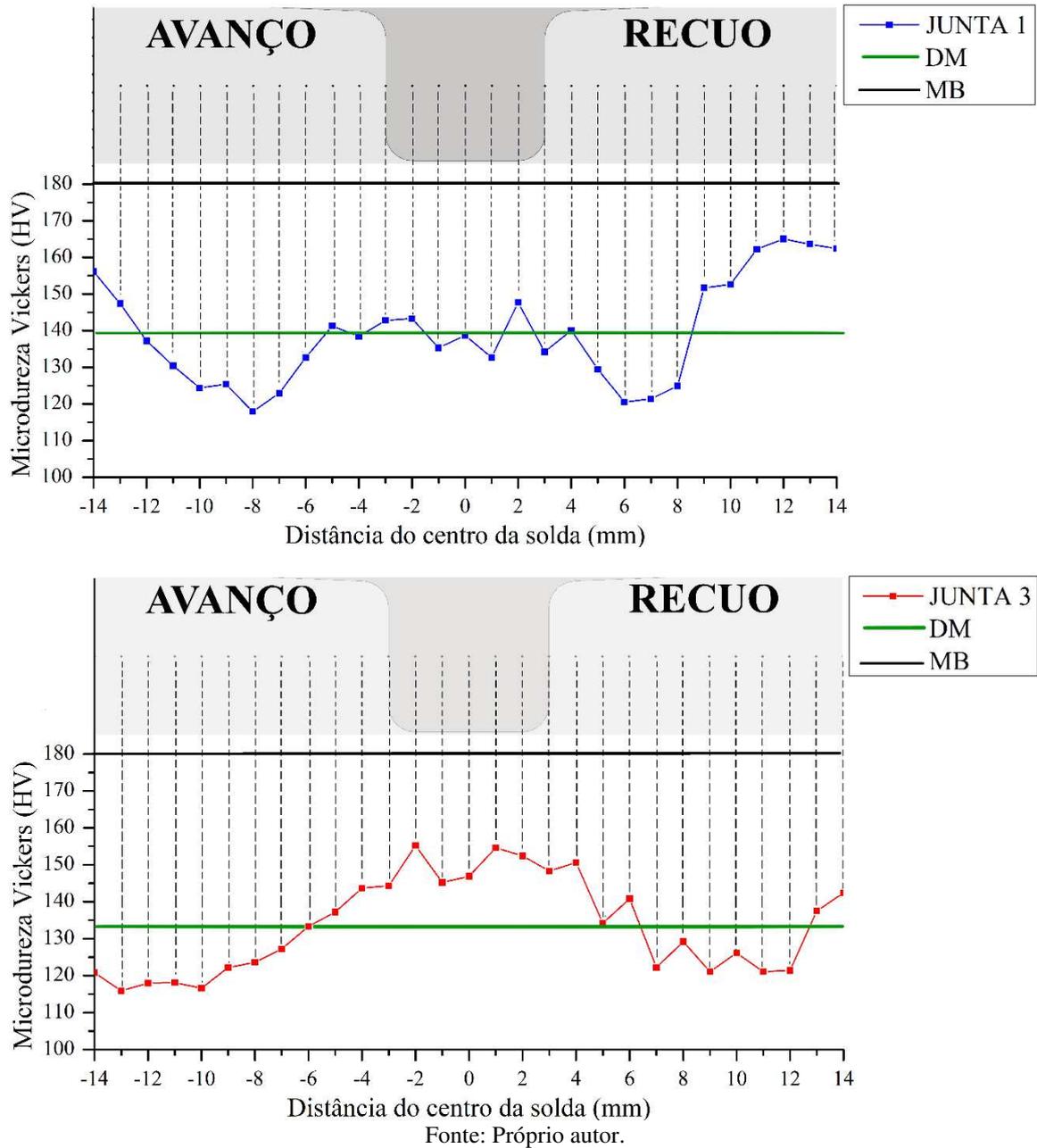
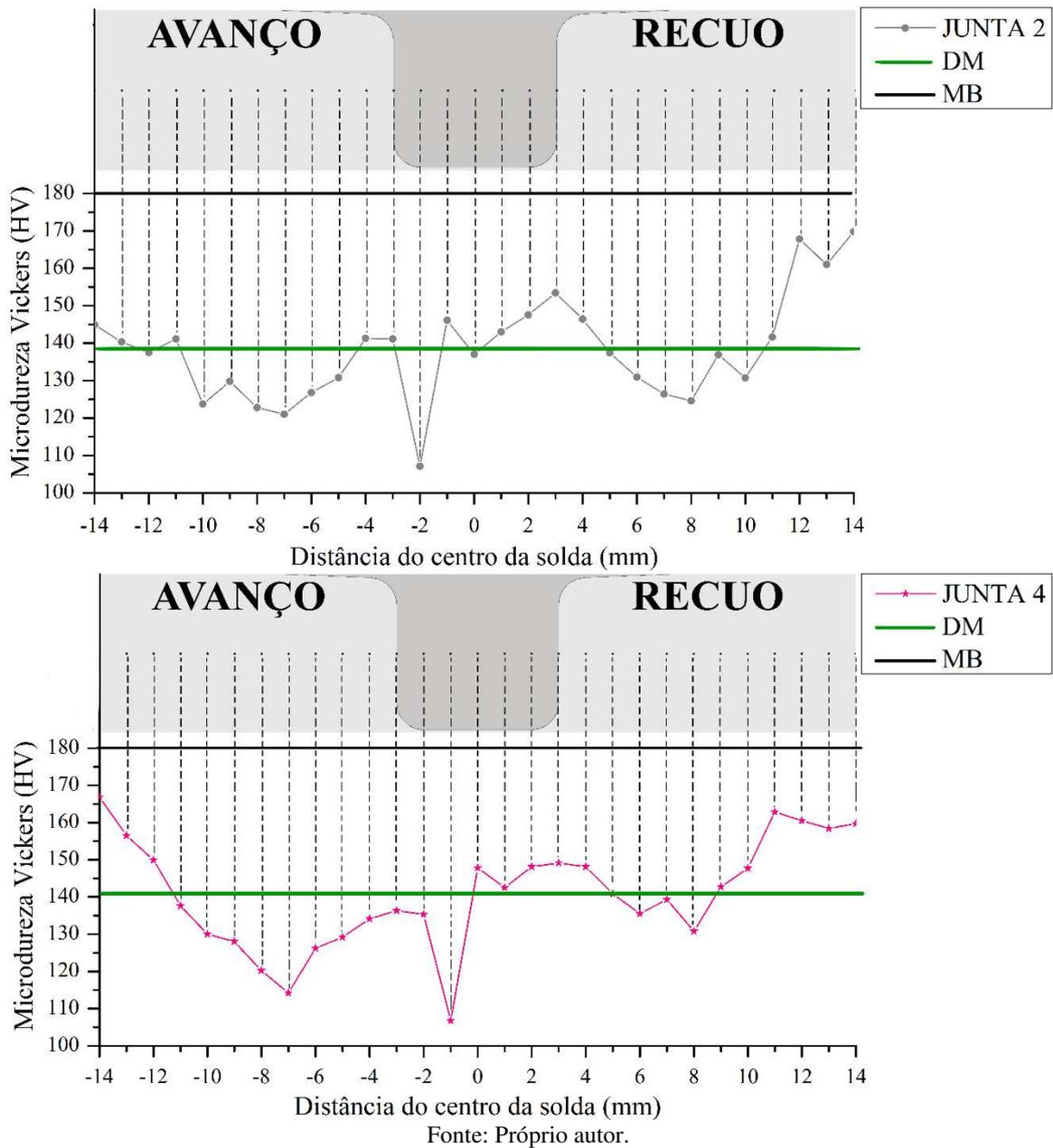


Figura 24 - Perfil transversal de microdureza Vickers da junta soldada 2 e 4.



A dureza média é de 139,4 HV para a junta 1 e de 133,4 HV para a junta 3, conforme observado na Tabela 8, o que representa uma redução em relação à dureza do MB. Cruz (2018) afirma que as variações nos valores da taxa de resfriamento podem causar modificações microestruturais que justificam as variações nos valores de dureza. Para essas juntas, as taxas de resfriamento foram de 2,925 °C/s para a junta 1 e 3,226 °C/s para a junta 3.

Em ligas tratáveis termicamente, há uma queda na dureza à medida que a temperatura de pico aumenta na região afetada pelo calor (COLAÇO, 2019). A temperatura

de pico experimentada pela junta 1 e 3 foi de 324,596 °C e 358,735 °C, respectivamente, observadas no lado de avanço da junta. A menor dureza média da junta 3 em relação à junta 1 pode ser explicada pela maior exposição ao calor durante o processo. Ambas as juntas foram produzidas com a mesma velocidade de rotação e de avanço, porém o ângulo de inclinação da junta 1 é de 1° e da junta 3 é de 3°, induzindo assim a um maior trabalho mecânico na ZM.

Tabela 8 - Dureza média das juntas soldadas e do MB.

	Dureza Média (DM)	DM (Lima, 2020)
JUNTA 1	139,4	134,0
JUNTA 2	138,2	137,0
JUNTA 3	133,4	126,0
JUNTA 4	140,8	134,0

Fonte: Próprio autor.

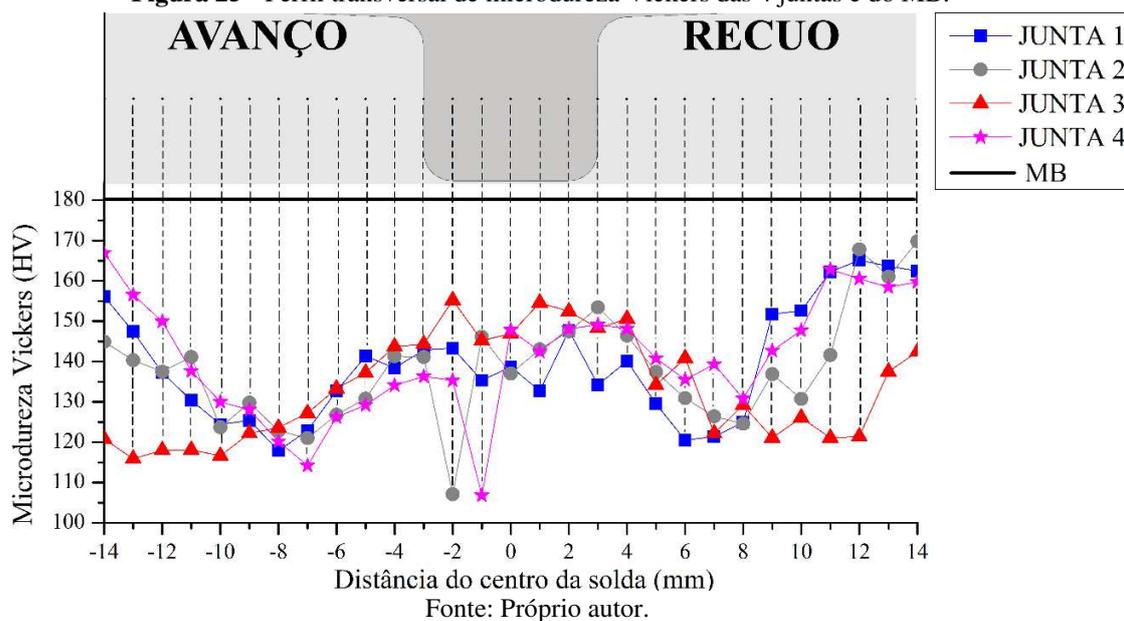
Na soldagem ou processamento de ligas à base de alumínio e magnésio geralmente uma mudança sistemática na resistência ou dureza é observada se o processamento parâmetros como taxa de rotação da ferramenta, velocidades de deslocamento da ferramenta, etc (MISHRA *et al.*, 2019).

Para a Figura 24 nas juntas 2 e 4 o perfil de dureza foi observado, no ponto -2 e -1, respectivamente, houve uma queda na dureza, uma possível explicação são os defeitos observados na ZM como *wornhole*, gerando uma redução da concentração de material na região.

Os parâmetros de soldagem mais elevados das juntas 2 e 4 influenciam diretamente a microestrutura e como consequência a dureza da junta. mais elevados, Shen *et al.*, (2015) explica que as influências dos parâmetros do processo sobre microdureza e propriedades mecânicas estão associados ao aumento da velocidade e o tempo de soldagem, pois, mais calor é gerado, o que diminui a dureza da junta soldada.

Na figura 25 encontra-se todos os perfis de microdureza para as 4 juntas e do MB, é possível identificar um leve aumento da dureza na região da ZM das juntas soldadas com redução dos valores próximo as posições -8 mm e 8 mm, associada ao final da região de contato com ombro da ferramenta de soldagem. Os valores de dureza voltam a aumentar e estabilizar no sentido do MB, formando um perfil de dureza semelhante a letra 'W' (DELIJAICOV *et al.*, 2018).

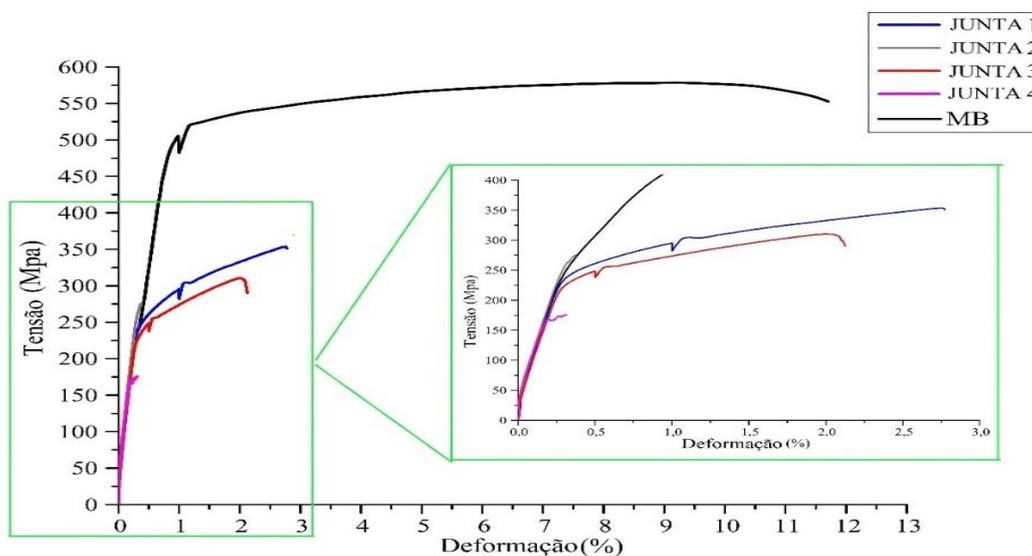
Figura 25 - Perfil transversal de microdureza Vickers das 4 juntas e do MB.



6.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO UNIAXIAL

Na Figura 26, é possível observar a curva tensão versus deformação para o MB e as 4 juntas soldadas. As juntas soldadas apresentaram variações nos valores de resistência à tração. Essas variações podem ser explicadas pela diferença no aporte de calor durante cada solda, resultante da combinação dos parâmetros de soldagem. Isso gera zonas com diferentes resistências na região de solda, dificultando a fluidez da mistura do metal e levando à existência de defeitos (LIMA *et al.*, 2020).

Figura 26 - Gráficos do ensaio de tração uniaxial.



Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 9, observa-se que as juntas 1 e 3 apresentaram maiores valores de resistência à tração longitudinal (LRT) em comparação com as juntas 2 e 4. Isso ocorre como consequência da única variação de parâmetros entre as juntas 1 e 3 e as juntas 2 e 4, que é o ângulo de inclinação da ferramenta, mantendo assim os valores mais próximos. No entanto, a junta 1 apresentou um resultado ligeiramente melhor. A eficiência das juntas em relação ao MB no ensaio de tração também é observada na tabela, sendo que as juntas 1 e 3 mostram maiores valores em relação às outras juntas, inclusive superiores aos das juntas estudadas por Lima (2020), com exceção da junta 3, que permaneceu próxima aos valores obtidos por ele.

Tabela 9 - Limite de resistência a tração e Eficiência de cada junta.

JUNTA	LRT (Mpa)	Eficiência (%)	Eficiência (%) Lima, (2020).
JUNTA 1	353,602	60,0	28,0
JUNTA 2	275,510	47,8	7,1
JUNTA 3	310,742	53,9	61,0
JUNTA 4	176,212	29,5	5,4

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 10 observa-se a correlação entre LRT (Mpa), temperatura de pico (°C) e taxa de resfriamento (°C/s), ambas do termopar 3.

Tabela 10 - Valores de Limite de resistência a tração (LRT), Temperatura de pico e Taxa de resfriamento.

JUNTA	Temperatura Teórica (°C)	T3- Temperatura de pico (°C)	T3- Taxa de resfriamento (°C/s)	LRT (Mpa)
JUNTA 1	394,469	324,596	2,925	353,602
JUNTA 2	428,712	375,700	7,745	275,510
JUNTA 3	394,469	358,735	3,226	310,742
JUNTA 4	428,712	373,925	7,621	176,212

Fonte: Próprio autor.

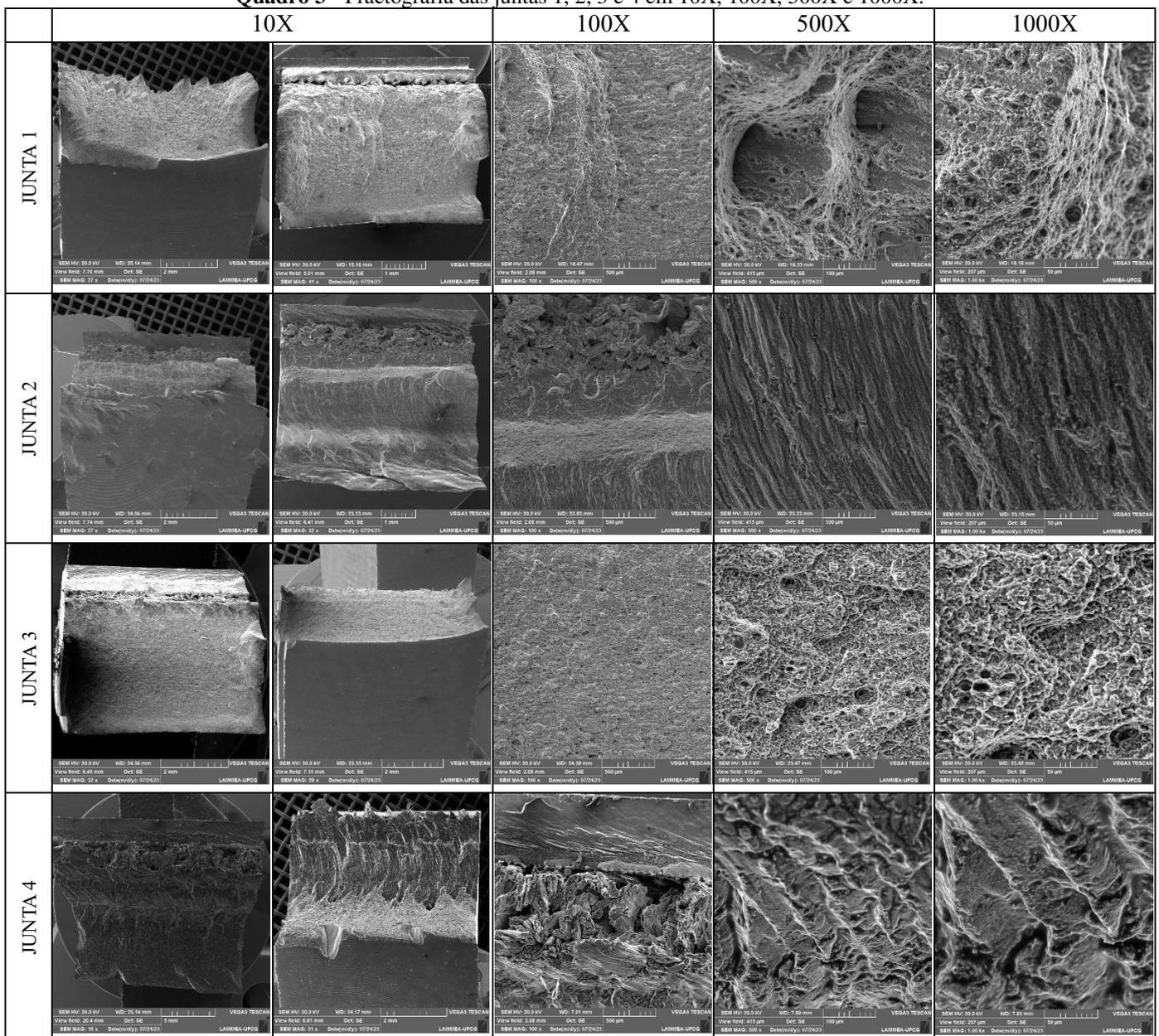
As juntas soldadas que atingiram as maiores temperaturas de pico resfriaram mais rapidamente, apresentando menores resistências à tração, o que coincide com as juntas que exibiram pior qualidade superficial e uma maior quantidade de defeitos em sua seção transversal. Observa-se que o aumento da velocidade de rotação da ferramenta resultou em uma redução da resistência à tração, devido ao maior aporte de calor, o que induziu a

temperaturas mais elevadas na ZM, ampliando os efeitos de crescimento de grão e dissolução de precipitados (SHARMA; DWIVEDI; KUMAR, 2012).

6.5. ANÁLISE FRACTOGRÁFICA

Análises fractográficas detalhadas, utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), foram realizadas nas superfícies fraturadas por tração das juntas soldadas 1, 2, 3 e 4. Os resultados podem ser observados no Quadro 3, com ampliações de 10X, 100X, 500X e 1000X.

Quadro 3 - Fractografia das juntas 1, 2, 3 e 4 em 10X, 100X, 500X e 1000X.



Fonte: Próprio autor.

As imagens mostram as fraturas obtidas nos corpos de prova durante o ensaio de tração uniaxial, todas localizadas no centro da solda. Nas juntas 1 e 3, é notado um aspecto de fraturas dúcteis, caracterizadas por maiores deformações plásticas. Em outras palavras, na fratura dúctil, há uma resistência maior ao rompimento do material tensionado, com tendência a deformar plasticamente antes da fratura. Geralmente, as fraturas dúcteis ocorrem de forma que a estrutura tensionada sofre uma gradual estrição na região de tensão (SILVA *et al.*, 2017).

Nas juntas 1 e 3, também é possível observar a presença de muitas cavidades e ausência de regiões planas, além da presença de *dimples* e uma superfície de aspecto extremamente irregular, similares aos resultados observados nas mesmas juntas no trabalho de Lima (2020). Essas duas juntas apresentaram temperaturas de pico inferiores às observadas nas juntas 2 e 4, além de uma menor taxa de aquecimento e resfriamento.

Já nas juntas 2 e 4, as imagens revelam características de fraturas frágeis, marcadas pela predominância da formação de trincas em relação à deformação plástica. Nesse tipo de fratura, ocorre uma rápida formação e propagação das trincas, levando à rápida ruptura do material com pouca ou nenhuma deformação plástica no processo (SILVA *et al.*, 2017).

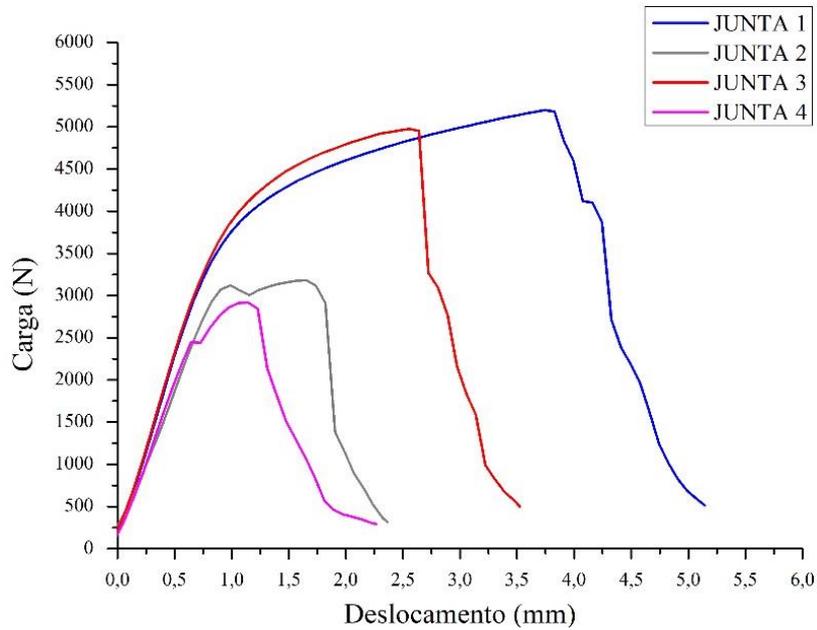
Uma possível explicação para esses diferentes tipos de fraturas é o aporte térmico experimentado durante o processo e a presença da transformação de fase durante o resfriamento nas juntas 1 e 3, que foi quase inexistente nas juntas 2 e 4. Isso ocorreu porque a alta taxa de resfriamento suprimiu essa transformação, influenciando na ductilidade das juntas. Rujas *et al.* (2012) afirmam que o tempo de transformação é determinado pelo trabalho mecânico aplicado no processo e pela temperatura de transformação, portanto, diminuirá à medida que a temperatura de transformação aumenta.

6.6. ENSAIO DE DOBRAMENTO DE RAIZ 60°

Com o objetivo de avaliar a qualidade das juntas soldadas, foi realizado o ensaio de dobramento de raiz a 60° nas 4 juntas e no MB. A Figura 27 ilustra o gráfico de Carga x Deslocamento, sendo que a carga máxima suportada foi de 5197 N na junta 1, seguida da junta 3 com carga máxima de 4976 N, valores próximos. Ao analisar os resultados do ensaio de tração, observa-se que as mesmas juntas apresentaram melhores resultados de resistência à tração, reforçando a ideia de que a menor temperatura e a menor taxa de resfriamento durante o processo de soldagem proporcionaram uma solda capaz de suportar

maiores esforços mecânicos em relação às juntas 2 e 4.

Figura 27 - Gráficos do ensaio de dobramento de raiz 60°.



Fonte: Próprio autor.

Souza *et al.* (2015) afirma que o processo de soldagem FSW influencia a resistência ao dobramento do material, diminuindo-a na ZM devido às alterações microestruturais na região soldada. Os valores mais baixos obtidos nas juntas 2 e 4 foram influenciados pela deficiência na mistura do material na ZM, conforme evidenciado na análise da microestrutura.

Analisando os valores de carga obtidos, verifica-se que as juntas 1 e 3 tiveram um desempenho melhor em comparação com as juntas 2 e 4. Devido à alta temperatura a que foram expostas, as juntas 2 e 4 apresentaram uma diminuição na resistência ao dobramento do material, possivelmente devido a alterações microestruturais na região de solda decorrentes do ciclo térmico ao qual foram submetidas, além de defeitos aparentes. O Quadro 4 contém os valores de carga máxima suportada por cada junta durante o ensaio, juntamente com as imagens dos corpos de prova.

Quadro 4 - Carga máxima suportada por cada junta no ensaio de dobramento de 60°.

JUNTA	Carga Máxima Média Suportada (N)	Imagem
1	5197	

2	3181	
3	4976	
4	2920	

Fonte: Próprio autor.

CAPÍTULO V

7 CONCLUSÕES

Maiores temperaturas de pico, taxa de aquecimento e resfriamento foram constatadas para a junta 2 (375,700 °C, 16,728 °C/s e 7,745 °C/s, respectivamente), seguida da junta 4 (373,925 °C, 12,353 °C/s e 7,621 °C/s, respectivamente), todas registradas no termopar 3, localizado no lado de avanço a 10 mm de distância do centro da solda. Ambas as juntas tiveram resultados inferiores nos ensaios mecânicos quando comparadas com as juntas 1 e 3.

As juntas soldadas com maiores valores de velocidade de soldagem e rotação (117 mm/min e 1585 RPM, respectivamente) atingiram temperaturas mais elevadas em todos os termopares, além de uma temperatura teórica mais alta no centro da junta, chegando a 428,712°C.

Temperaturas mais elevadas, resultantes do ciclo térmico decorrente de velocidades mais altas (rotação e avanço), independentemente do ângulo de inclinação da ferramenta, foram associadas a alguns defeitos, como *wornhole* e *flash*, pois as temperaturas mais elevadas aumentaram a plasticidade do material na ZM.

A investigação dos ciclos térmicos de soldagem revelou que altas velocidades de rotação, combinadas com alta velocidade de avanço da ferramenta, mostraram-se prejudiciais para a qualidade da junta soldada pelo processo FSW. As altas temperaturas resultantes desses parâmetros causaram maiores taxas de aquecimento e resfriamento durante o processo, afetando a microestrutura da junta resultante.

REFERÊNCIAS

ABAL - Associação Brasileira do Alumínio. Disponível em: <<https://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/>>. Acesso em: 15 agosto de 2023.

ALMANAR, I. P. *et al.* Temperature distribution in friction stir welding using finite element method. **International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering**, v. 8, n. 10, p. 1699-1704, 2014.

ALMEIDA, D. T. **Estudo dos parâmetros no processo de soldagem de mistura por atrito (FSW) da liga de alumínio 5083-O.** (Trabalho de Final de Curso). Departamento de Engenharia mecânica. UNIJUÍ, Panambi, 2015.

ARAÚJO, D. *et al.* Estudo do envelhecimento artificial da liga de alumínio 7075. **Universidade Paulista (UNIP)**, São Paulo, 2014.

ATHOS, H. P. Soldagem por fricção e mistura (fsw) no aço inoxidável austenítico AISI 304. **Universidade Federal de São Carlos**. Programa de pós-graduação em ciência e engenharia de materiais. 83p. 2013.

BOLDSAIXHAN, Enkhsaikhan *et al.* Detecting wormholes in friction stir welds from welding feedback data. In: **Proceedings of the 42nd Midwest Instruction and Computing Symposium (MICS 2009), Rapid City, SD, USA**. 2009. p. 17-18.

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, n. 3, p. 215–227, 2009.

CAVALIERE, P. Friction stir welding of Al alloys: Analysis of processing parameters affecting mechanical behavior. **Procedia CIRP**, v. 11, p. 139–144, 2013.

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

COMMIN, L. *et al.* Friction stir welding of AZ31 magnesium alloy rolled sheets: Influence of processing parameters. **Acta Materialia** 57. p.326–334. 2009.

COPPERMETAL AÇOS E METAIS, Informações Técnicas Alumínio 7075-T651. Disponível em <http://chrome-extension://efaidnbnmnibpcajpcglclefindmkaj/https://e5a5e21295859d53b15f-83f0bd7793a5a4b61ea12de988b1f44d.ssl.cf2.rackcdn.com/uploads/cimm/catalogo/arquivo/217/infoteccopp_alumi7075.pdf> Acesso em: 05 de novembro. 2022.

CRUZ, N. R. M. A. **Taxa de resfriamento na soldagem:** um novo entendimento. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. 326 p. São Paulo. 2018.

DAVIS, J. R. Aluminum and Aluminum Alloys. **Alloying:** Understanding the Basics.

2001. 351–416 p.

DELIJAICOV, S. *et al.* Effect of Weld Parameters on Residual Stress, Hardness and Microstructure of Dissimilar AA2024-T3 and AA7475-T761 Friction Stir Welded Joints. **Materials Research**, v. 21, n. 6, 2018.

FERNANDES, V. K.; MARTENDAL, C. P., **Endurecimento por precipitação em ligas de alumínio. Engenheiro de Materiais** - Santa Catarina, 2016. Disponível em: <<http://engenheirodemateriais.com.br/tag/classificacao-ligas-de-aluminio/>>. Acesso em: 20 de dezembro 2023.

FIORAVANTI, A. S. **Soldagem por FSW de ligas de alumínio ALCLAD AA2024-T3 E AA7075-T6**. Universidade Federal do Rio Grande do sul. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Porto Alegre. 2008.

GUEDES, S. Soldadura por fricção linear e por laser da liga Al6082. 68f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, **Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto** – FEUP. 2014.

HOLTHAUSEN, JR. H. H. **Avaliação dos tratamentos criogênicos deep cryogenic treatment e uphill quenching na microestrutura, conformação e microdureza das ligas de alumínio AA7075 e AA6063**. Universidade Federal do Rio Grande. Programa de pós-graduação em engenharia mecânica- PPMEC. 96 p. 2018.

JAX PRECISION. **How To Choose The Right Aluminum Alloy** - Jacksonville's Premier Manufacturing Experts. Disponível em: <<https://www.jaxmfg.com/blog/how-to-choose-the-correct-aluminum-alloy>>. Acessado em: 22 de dezembro de 2023.

JEENJITKAEW, Choothum. Kissing bonds in adhesive joints: a holistic approach for surface chemistry and joint mechanics. **School of Engineering and Materials Science Queen Mary**, University of London. 343p. 2011.

KALLEE, S. W.; NICHOLAS, D. Friction stir welding at TWI. **The Welding Institute (TWI): Cambridge, England**, 2006.

KHAN, Noor Zaman *et al.* Mechanical and microstructural behavior of friction stir welded similar and dissimilar sheets of AA2219 and AA7475 aluminium alloys. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 695, p. 2902-2908, 2017.

KUNDU, J.; SINGH, H. Friction stir welding of AA5083 aluminium alloy: Multi-response optimization using Taguchi-based grey relational analysis. **Advances in Mechanical Engineering**. 10p. 2016.

LEE, C. Y. *et al.* The Joint characteristics of friction stir welded Mg-Zn-Y alloy. In: **Materials Science Forum**. Trans Tech Publications Ltd, 2005. p. 555-558.

LI, S. S.; *et al.* Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry - **Journal of Materials Research and Technology**. 944-983 p. 2023.

LIMA, J. S. **Caracterização microestrutural e avaliação das propriedades mecânicas em juntas soldadas de alumínio 7075-T651 utilizando o processo FSW** - Universidade

Federal de Campina Grande, Centro de Ciência e Tecnologia - 95 f. Campina Grande, 2020.

MAGGIOLINI, E. *et al.* Crack path and fracture analysis in FSW of small diameter 6082-T6 aluminium tubes under tension–torsion loading. **International Journal of Fatigue**, v. 92, p. 478-487, 2016.

MAJEED, Tanveer; MEHTA, Yashwant; SIDDIQUEE, Arshad N. Precipitation-dependent corrosion analysis of heat treatable aluminum alloys via friction stir welding, a review. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, v. 235, n. 24, p. 7600-7626, 2021.

MARTINS, W. Soldagem do Alumínio e suas ligas. Início. **Disponível em:** <<https://www.whitemartins.com.br/>>. Acessado em: 23 de dezembro de 2023.

MATWEB. **Aluminum Alloy Heat Treatment Temper Designations**. Disponível em: <<http://www.matweb.com/reference/aluminumtemper.aspx>>. Acesso em: 10 de novembro de 2022.

Mirabel C. Rezende. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. Centro Técnico Aeroespacial, **Instituto de Aeronáutica e Espaço, Divisão de Materiais**. 2001.

MISHRA, R. S.; KOMARASAMY, M. **Friction Stir Welding of High Strength 7XXX Aluminum Alloys**. Butterworth-Heinemann, 2016.

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.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. Introdução à metalurgia da soldagem. **Belo Horizonte: UFMG**, 2012.

MOOJEN, Roberto Gomes *et al.* Efeitos da taxa de resfriamento na soldagem do aço API 5L-X80. **Soldagem & Inspeção**, v. 20, p. 68-80, 2015.

NANDAN, R.; DEBROY, Tarasankar; BHADESHIA, H. K. D. H. Recent advances in friction-stir welding–process, weldment structure and properties. **Progress in materials science**, v. 53, n. 6, p. 980-1023, 2008.

NI, Y.; MAO, Y.; QIN, D.; XIAO, X.; FU, L. Thermal Cycles and Deformation Characters During High-Speed Micro Friction Stir Welding Process of AA7075-T6 Sheets. **Metals**, 2019.

OLEA C.A. W. Influence of energy input in friction stir welding on structure evolution and mechanical behavior of precipitation-hardening in aluminum alloys (AA2024-T351, AA6013-T6 and Al-Mg-Sc). 2008. 149 p. Tese de Doutorado – **Institute of Materials Research, Ruhr** – Universität Bochum, Bochum – Alemanha, 2008.

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

PEREIRA, G. S. BOLFARINI, C. SANTOS, J. F. Microestrutura das ligas Al-Si hipereutéticas, conformadas por spray e soldadas por Friction Stir Welding. Porto Alegre: **Cbecimat - XVI**, 2004.

PIRES, J. P. *et al.* Temperature distribution prediction in 5052 H34 aluminum alloy joints welded by friction stir welding process. **Soldagem & Inspeção**, v. 23, p. 247-263, 2018.

RIGO, V. B. **Análise do ciclo termico em diferentes configurações de juntas soldadas pelo processo mag.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Departamento de engenharia mecânica. Porto Alegre. 29p. 2015.

ROSALES, M. J. C.; LOPES, J. L. B. Friction stir welding em ligas de alumínio - **Revista Intellectus** – p. 46-53. 2010.

SENTHIL, K. *et al.* Study of the constitutive behavior of 7075-T651 aluminum alloy. **International Journal of Impact Engineering**, v. 108, p. 171-190, 2017.

SHARMA, Chaitanya; DWIVEDI, Dheerendra Kumar; KUMAR, Pradeep. Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints of AA7039 aluminum alloy. **Materials & Design (1980-2015)**, v. 36, p. 379-390, 2012.

SHEN, Z. Y. *et al.* **Gerlich, Influence of processing parameters on microstructure and mechanical performance of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminium alloy**, 1718 (2015).

SILVA, D. **Estudo da cinética de envelhecimento e das propriedades mecânicas das ligas de alumínio 6061 e 7075 tratadas termicamente.** Trabalho de conclusão apresentado ao departamento acadêmico de engenharia de materiais, UTFPR, Londrina, PR, 2016.

SILVA, H. G. A. *et al.* **Caracterização de fraturas frágil e dúctil em microscopia eletrônica de varredura (MEV)** - Instituto Militar de Engenharia - Rio de Janeiro, p6. 2017.

SILVA, S. G. V. B.; **Análise Térmica e Mecânica do Processo Friction Stir Welding.** – Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2019.

SOUZA, S. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos** – fundamentos teóricos e práticos, 5ª Ed., São Paulo, Blucher, 1982.

TEXIER, Damien *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.

THREADGILL, P. L. *et al.* Friction stir welding of aluminium alloys. **International Materials Reviews**, v. 54, n. 2, p. 49-93, 2009.

TOLEDO, S. V. *et al.* **Caracterização Microestrutural e Comportamento Mecânico das Ligas de Alumínio AA2139 T3 e T8 Soldadas por Fricção Rotativa com Mistura (Microstructural Characterization and Mechanical Behavior of an AA2139 T3 and T8 Aluminum Alloy joined by Friction Stir Welding (FSW)).** Universidade Federal de São Carlos. Departamento de Engenharia de Materiais, São Carlos, São Paulo. 9p. 2009.

VERMA, R. P. *et al.* Difficulties and redressal in joining of aluminium alloys by GMA and GTA welding: A review. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 23, p. 2576-2586, 2023.

VERMA, R. P.; KUMAR, M. L. A short review on aluminium alloys and welding in structural applications. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 10687-10691, 2021.

VILAÇA, P.; QUINTINO, L.; SANTOS, J. F. iSTIR—analytical thermal model for friction stir welding. **Journal of materials processing technology**, v. 169, n. 3, p. 452-465, 2005.

WEÍŠ. O. C. A. Influence of Energy Input in Friction Stir Welding on Structure Evolution and Mechanical Behaviour of Precipitation-Hardening in Aluminium Alloys (AA2024-T351, AA6013-T6 and Al-Mg-Sc). **GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH – Geesthacht**, 2008.

YANG, C. *et al.* A comparative research on bobbin tool and conventional friction stir welding of Al-Mg-Si alloy plates. **Materials Characterization**, v. 145, p. 20-28, 2018.

YANG, X. *et al.* Microstructural evaluation and mechanical properties of 7075 aluminum alloy prepared by controlled diffusion solidification. **China Foundry**, v. 16, n. 4, p. 238-247, 2019.

ZAVADSKI, A. **Advanced welding technologies used in aerospace industry**, Saimaa University of Applied Sciences Faculty of Technology, p. 81, 2018.

APÊNDICES

Figura 28 - Suporte para acoplar as chapas a serem soldadas.

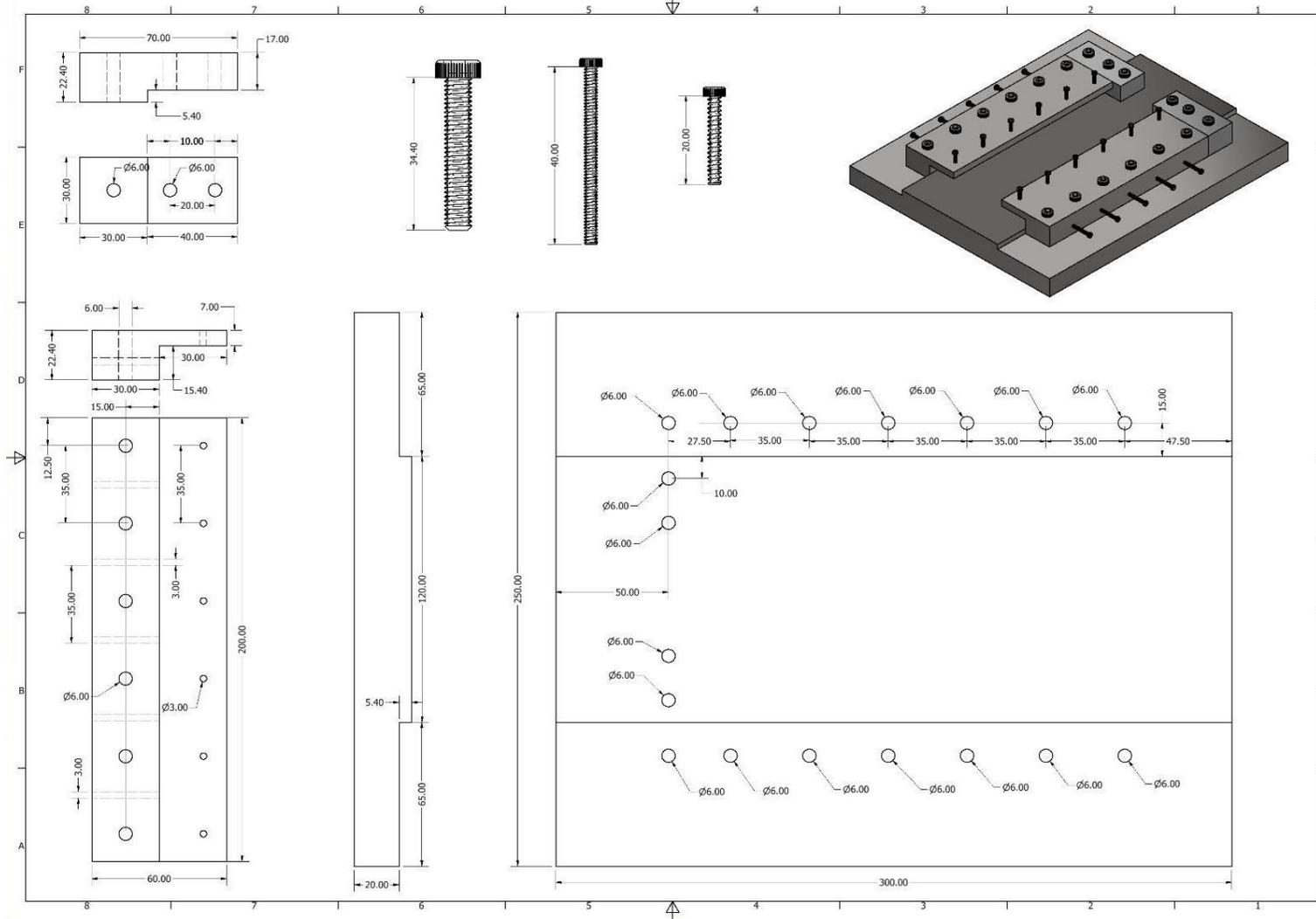


Figura 29 - Distribuição dos corpos de prova extraídos da junta soldada.

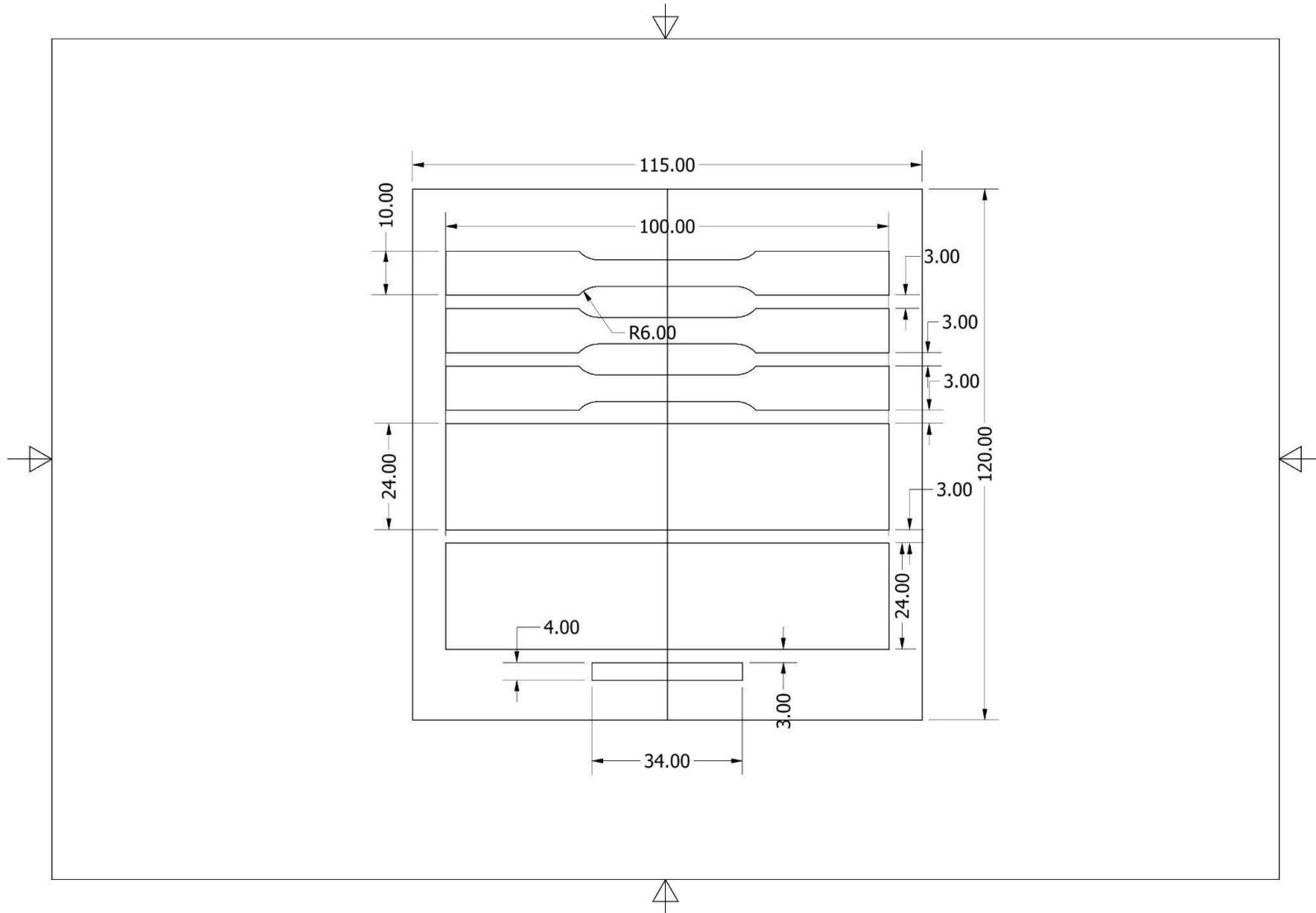
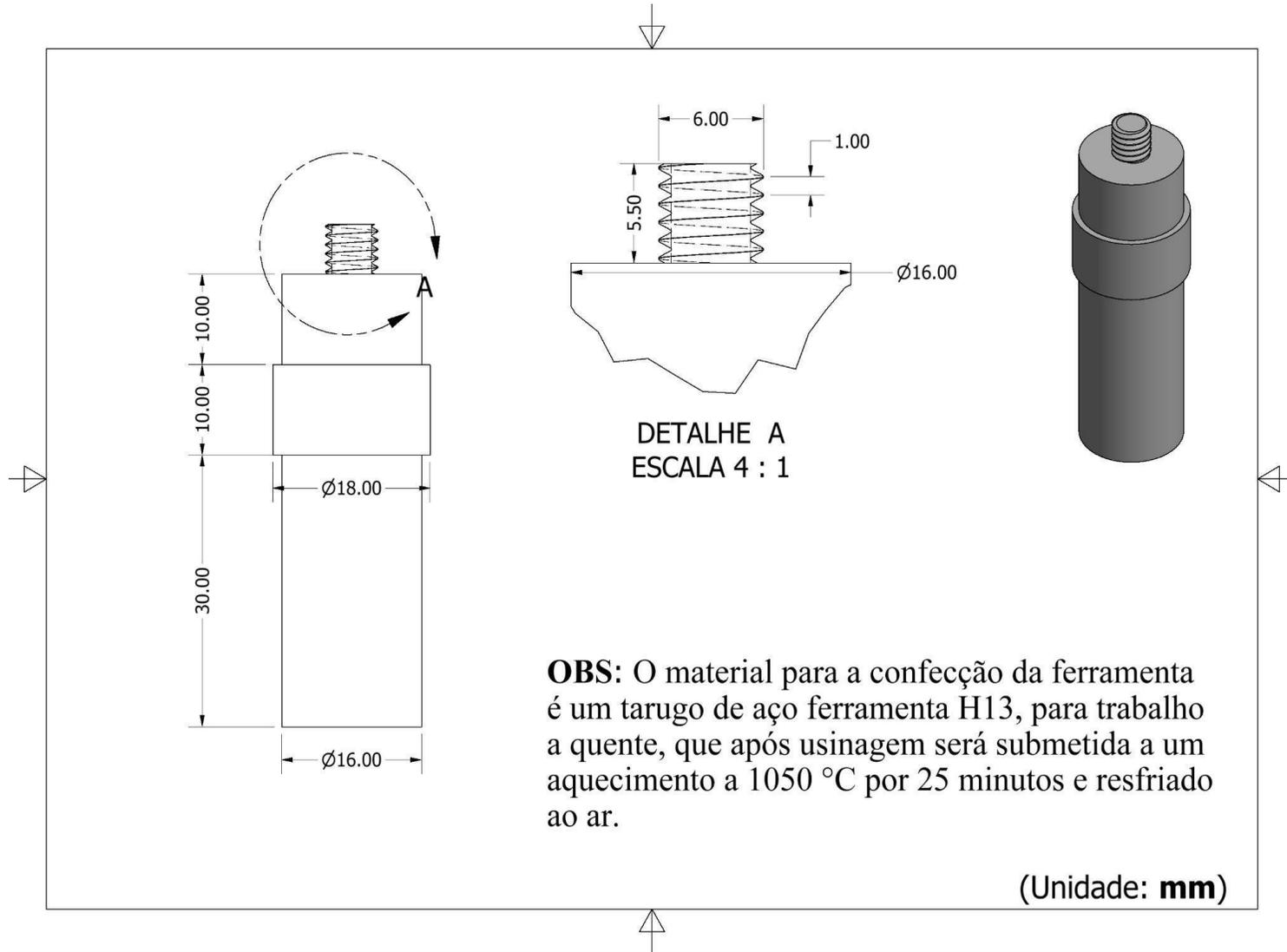
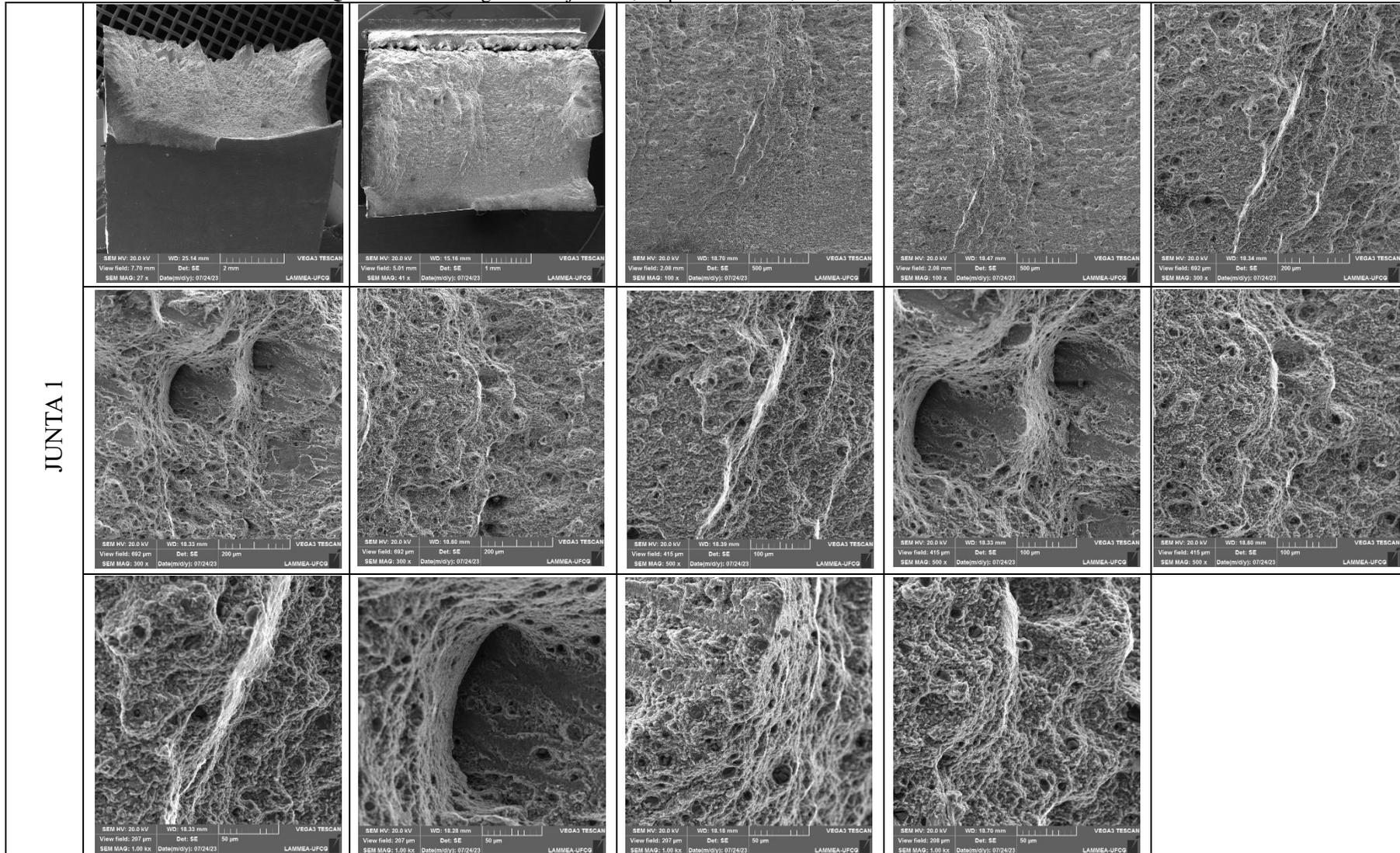


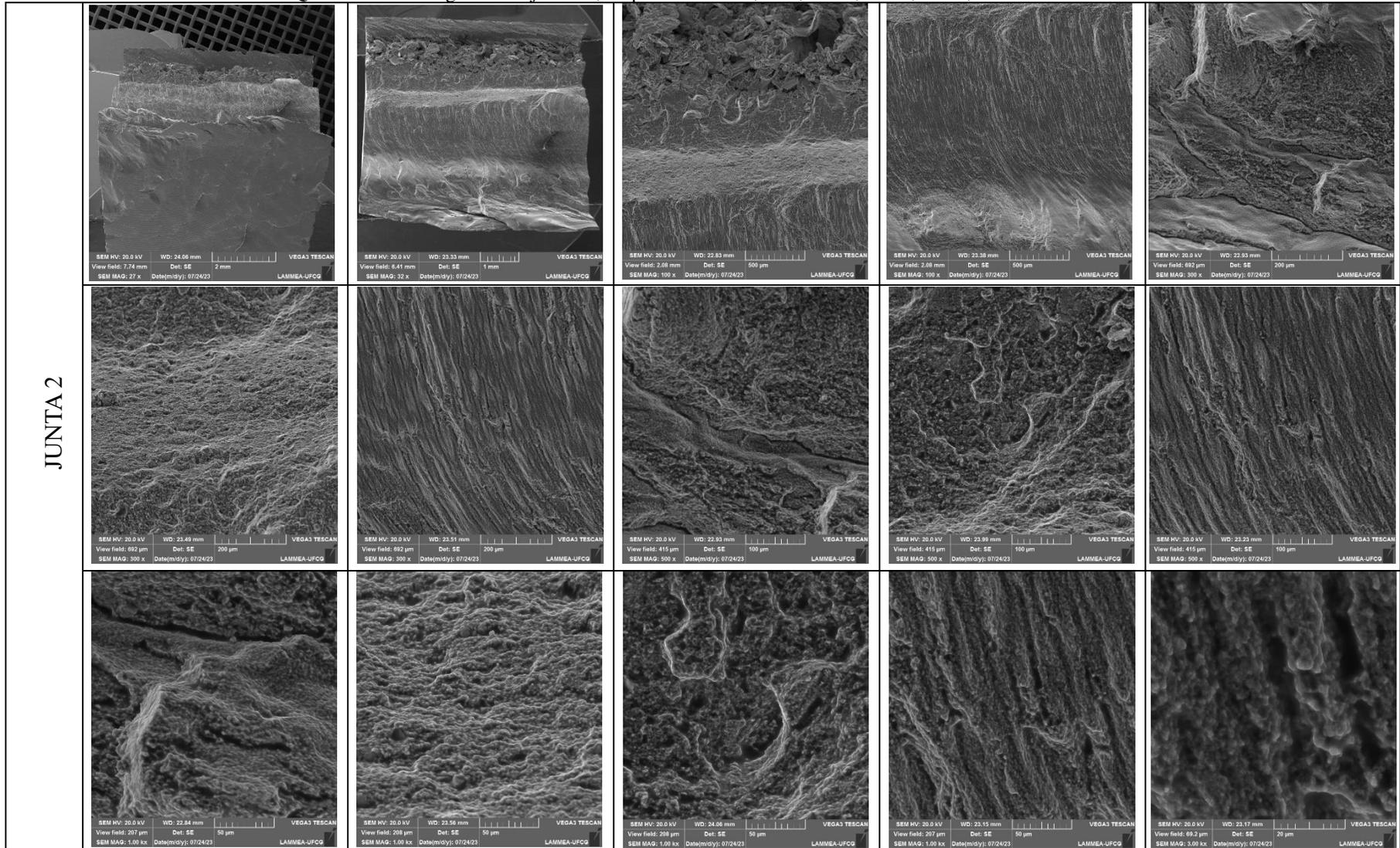
Figura 30 - Dimensões da ferramenta de soldagem



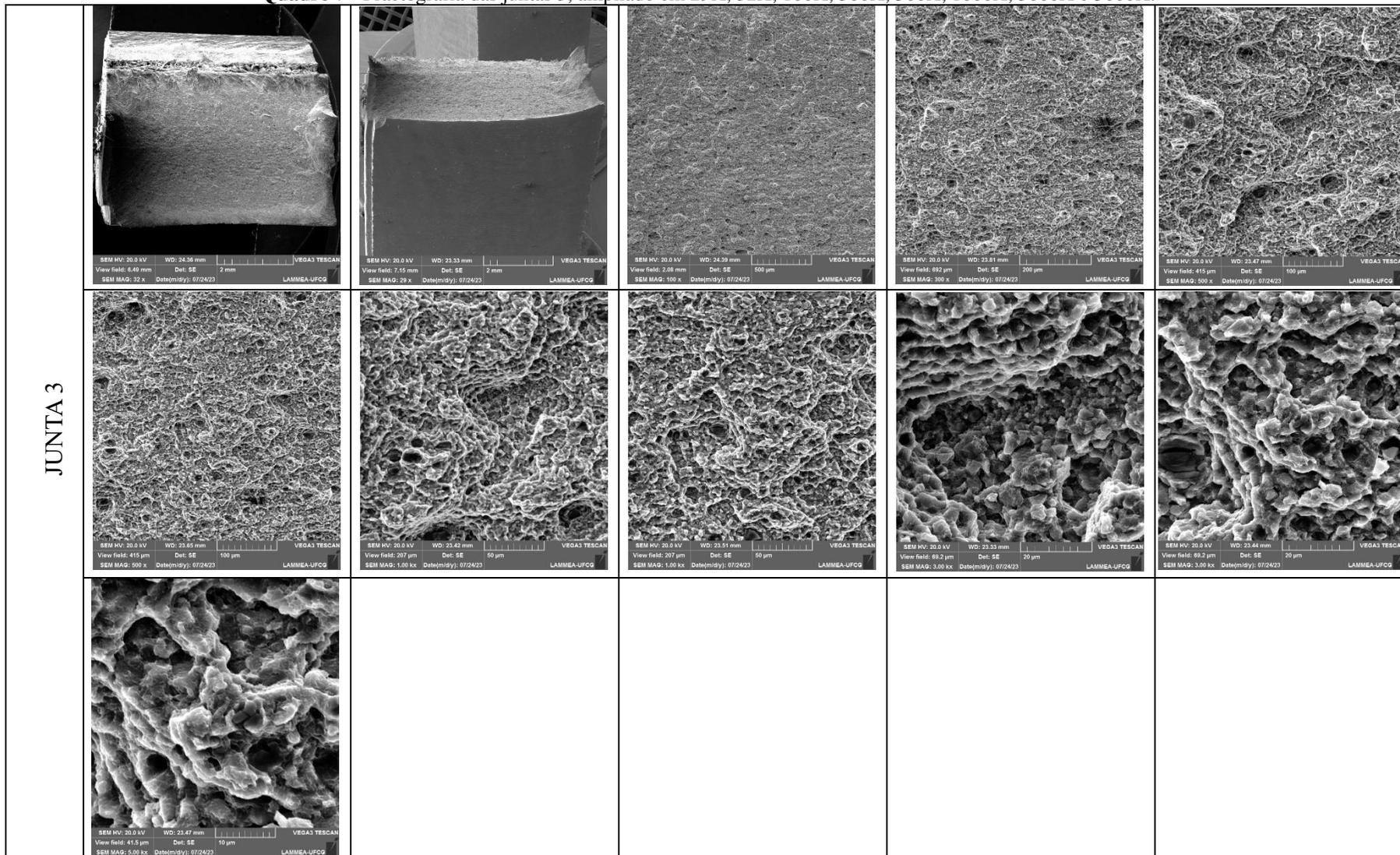
Quadro 5 - Fractografia das juntas 1, ampliado em 27X, 41X, 100X, 300X, 500X e 1000X.



Quadro 6 - Fractografia das juntas 2, ampliado em 27X, 32X, 100X, 300X, 500X, 1000X e 3000X.



Quadro 7 - Fractografia das juntas 3, ampliado em 29X, 32X, 100X, 300X, 500X, 1000X, 3000X e 5000X.



Quadro 8 - Fractografia das juntas 4, ampliado em 10X, 31X, 100X, 300X, 500X, 1000X e 3000X.

