

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA

DANIEL LUCAS FELICIANO

**Estudo do comportamento em fadiga de juntas soldadas por processo
TIG nas ligas de alumínio 3104, 5052 e dissimilares**

Lorena

2023

DANIEL LUCAS FELICIANO

**Estudo do comportamento em fadiga de juntas soldadas por processo
TIG nas ligas de alumínio 3104, 5052 e dissimilares**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais na área de Concentração de Materiais Convencionais e Avançados.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antonio Reis Pereira
Baptista

Versão Corrigida

Lorena

2023

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Automatizado
da Escola de Engenharia de Lorena,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Feliciano, Daniel Lucas

Estudo do comportamento em fadiga de juntas soldadas por processo TIG nas ligas de alumínio 3104, 5052 e dissimilares / Daniel Lucas Feliciano; orientador Carlos Antonio Reis Pereira Baptista - Versão Corrigida. - Lorena, 2023.
119 p.

Dissertação (Mestrado em Ciências - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais na Área de Materiais Convencionais e Avançados) - Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo.
2023

1. Ligas de alumínio. 2. Sustentabilidade. 3. Resistência à fadiga. 4. Juntas soldadas. 5. Processo tig. I. Título. II. Baptista, Carlos Antonio Reis Pereira, orient.

À minha família, amigos e colegas, pois juntos conseguimos alçar voos mais altos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, por me permitir chegar a esse momento com saúde.

Ao meu pai Benedito Moyséis Feliciano (*in memoriam*) e à minha mãe Nazaré Maria de Jesus Feliciano, por terem me educado e mostrado a importância dos estudos.

À minha esposa Daniela, ao meu primeiro filho Gabriel e ao meu segundo filho Matheus, que nasceu na fase final do trabalho, por serem a base e o combustível para eu sempre buscar desafios maiores, e por estarem sempre ao meu lado.

À minha família e amigos, que mesmo não estando por perto, sempre me apoiaram.

Ao meu colega de trabalho e amigo Msc. Alexandre Sartori, por me dar grande suporte com seu conhecimento metalúrgico, compartilhando materiais e informações muito relevantes para a elaboração desse trabalho.

Aos meus colegas de trabalho Daniel Catarina e Igor Pacheco, por me auxiliarem nos ensaios de laboratório, sempre realizando o trabalho com excelência.

Ao meu orientador, professor Dr. Carlos Antonio Reis Pereira Baptista, por me apoiar durante toda a pesquisa, disponibilizando seu tempo e levantando pontos essenciais para a elaboração de um trabalho de qualidade.

Ao meu ex-gestor e amigo Guilherme Superbia, por me liberar e principalmente apoiar na condução desse trabalho, que terá contribuição importante para a indústria do alumínio.

Às empresas Novelis e Elfer por fornecerem o metal, profissionais para realização das soldas e disponibilizarem a infraestrutura para a realização de parte dos ensaios necessários a este estudo.

À EEL-USP, por me proporcionar a realização do mestrado e disponibilizar equipamentos e técnicos, em especial o Francisco Paiva, para a realização dos ensaios de fadiga, além de todo o conhecimento adquirido com os docentes nas disciplinas realizadas.

“Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino”.

(Leonardo da Vinci)

RESUMO

FELICIANO, D. L. **Estudo do comportamento em fadiga de juntas soldadas por processo TIG nas ligas de alumínio 3104, 5052 e dissimilares.** 2023. 119p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2023.

A indústria do alumínio vem buscando otimizar a eficiência da cadeia produtiva como um todo, principalmente em termos de eficiência energética e consequente redução da pegada de carbono. Um diferencial do alumínio, a reciclabilidade sem perda de propriedades físico/químicas, torna o metal uma excelente escolha. O processo de reciclagem, além de colaborar com a preservação ambiental, tem na economia de energia uma das suas maiores vantagens pois utiliza apenas 5% da energia necessária para a produção do metal primário. Ligas de alumínio com alto conteúdo reciclado, como é o caso da liga 3104 no Brasil, vem ganhando cada vez mais destaque nesse cenário. A liga 5052, uma das ligas mais tradicionais utilizadas no setor do alumínio, por sua vez, atualmente utiliza de forma predominante o alumínio primário como matéria prima. A substituição de ligas que utilizam basicamente alumínio primário por ligas com alto conteúdo reciclado, mais especificamente a 3104, é um passo adiante em termos de sustentabilidade, motivando estudos para embasar essa substituição em diversos segmentos de mercado, incluindo o estudo da resistência à fadiga em juntas soldadas de alumínio. O presente trabalho apresenta o estudo das propriedades mecânicas e do comportamento em fadiga de alto ciclo das ligas de alumínio 3104 H32 e 5052 H32, nas condições sem solda e soldadas por processo TIG, bem como as análises microestruturais e fractográficas dos materiais. Os resultados demonstraram grande semelhança entre as duas ligas nas condições analisadas, com resistência à fadiga do metal base em termos da tensão máxima no ciclo igual a 164 MPa para a liga 3104 e 156 MPa para a liga 5052, para carregamento com razão de tensão $R = 0,1$ e considerando uma vida em fadiga de 2 milhões de ciclos. Verificou-se uma queda na vida em fadiga de 41% para a junta 3104-3104 e de 48% para as juntas 5052-5052 e 3104-5052.

Palavras-chave: Ligas de alumínio. Sustentabilidade. Resistência à fadiga. Juntas soldadas. Processo TIG.

ABSTRACT

FELICIANO, D. L. **Study of fatigue behavior of welded joints using TIG process in aluminum alloys 3104, 5052 and dissimilar.** 2023. 119p. Dissertation (Master of Science) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2023.

The aluminum industry has been seeking to optimize the overall production efficiency, mainly in terms of energy efficiency and consequent carbon footprint reduction. One highlight of aluminum is the recyclability without loss of physical/chemical properties, that makes this metal an excellent choice. The recycling process, beyond to collaborate to environmental preservation, has energy savings as one of its greatest advantages, as it uses only 5% of the energy needed to produce the primary metal. Aluminum alloys with high recycled content, such as the 3104 alloy in Brazil, are gaining more and more prominence in this scenario. Alloy 5052, one of the most traditional alloys used in the aluminum market, uses predominantly primary aluminum as raw material. The replacement of alloys that basically use primary aluminum for alloys with high recycled content, more specifically 3104, is a step forward in terms of sustainability, motivating studies to support this replacement in several market segments, including fatigue strength studies for aluminum welded joints. This work presents the study of mechanical properties and high cycle fatigue behavior of the aluminum alloys 3104 H32 and 5052 H32, in unwelded and welded joints using TIG process, as well as the microstructural and fractographic analysis of the materials. The results showed a great similarity between the two alloys in all analyzed conditions, with fatigue strength results for parent metal in terms of maximum stress cycle of 164 MPa for 3104 and 156 MPa for 5052, considering 2 million cycles of fatigue life. It was observed that there was a drop in fatigue life of 41% to joint 3104-3104 and 48% to joints 5052-5052 and 3104-5052.

Keywords: Aluminum alloys. Sustainability. Fatigue strength. Welded joints. TIG process.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Desenvolvimento do alumínio primário e reciclado até 2050, com base em números de 2019 para taxas de coleta de produtos em fim de vida. MT: milhões de toneladas.	24
Figura 2 – Consumo médio específico de energia elétrica na produção mundial de alumínio primário.....	25
Figura 3 – Terminologia típica de solda e zonas de uma junta de topo soldada.....	34
Figura 4 – Efeito da temperatura de recozimento no trabalho a frio e resistência.	35
Figura 5 – Efeito da soldagem na resistência de uma liga trabalhada a frio.....	36
Figura 6 – Tensões residuais longitudinais (L) e transversais (T) em uma junta de topo. ...	37
Figura 7 – Distorções que podem ocorrer em uma junta de topo. a) Contração transversal. b) Contração longitudinal. c) Variação angular.	38
Figura 8 – Distorção rotacional.	38
Figura 9 – Componentes de tensão em uma chapa soldada.....	39
Figura 10 – Participação do metal de adição na composição química do cordão de solda.	44
Figura 11 – Sensibilidade a trincas em diferentes grupos de ligas de alumínio quando soldadas.....	44
Figura 12 – Ilustração do processo de soldagem TIG.	47
Figura 13 – Tipos de juntas de topo recomendadas para o processo TIG (CA), com destaque para o tipo de junta adotado para este trabalho.....	48
Figura 14 – Junta de topo sem cobre-junta com solda TIG em alumínio com espessura de 3,0 mm.	50
Figura 15 – Parâmetros de corrente sugeridos para uma soldagem utilizando argônio como gás de proteção, com destaque para o parâmetro dos materiais utilizados.....	50
Figura 16 – Alguns defeitos relacionados a uma junta soldada.....	51
Figura 17 – Superfície de uma fratura de fadiga com duas regiões distintas, sendo uma região com aspecto polido e outra com aspecto granular.	54
Figura 18 – Fraturas de fadiga de peças sujeitas a ciclos de tensões variáveis com o tempo apresentam na área polida o aspecto de uma concha.....	55
Figura 19 – Ciclo de deslizamento levando à nucleação da trinca.	56
Figura 20 – Seção transversal de uma microtrinca.	56
Figura 21 – Diversos aspectos referentes à iniciação e propagação de trincas por fadiga.	57

Figura 22 – Curva S/N típica.	58
Figura 23 – Componentes alternada, média e o intervalo de variação de tensões para tensões cíclicas pulsantes.....	59
Figura 24 – Curvas S/N para a liga 5083 soldada e não soldada.....	63
Figura 25 – Pontos críticos sujeitos a trincas em diferentes tipos de juntas soldadas. (a) a (e) – trinca iniciando no pé da solda. (f) a (j) – trinca iniciando na raiz da solda.	64
Figura 26 – Curvas S/N para componentes soldados de alumínio.....	65
Figura 27 – Layout das peças soldadas.....	68
Figura 28 – Dimensões do corpo de prova para o ensaio de tração.....	69
Figura 29 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de fadiga.....	70
Figura 30 – a) Equipamento de solda TIG utilizado. b) Peças posicionadas na mesa. c) Execução da solda.....	71
Figura 31 – Peças soldadas e corpos de prova prontos para o ensaio de tração e micrografias.	72
Figura 32 – a) Embutidora utilizada. b) Lixadeira manual. c) Politriz automática.....	73
Figura 33 – a) Amostras preparadas. b) Microscópio óptico utilizado.....	73
Figura 34 – a) Equipamento para ensaio de tração. b) CP's após ensaios de tração.	74
Figura 35 – a) Microdurômetro utilizado. b) Exemplo de uma endentação realizada.....	75
Figura 36 – Exemplo de parte das endentações realizadas em uma das análises.	75
Figura 37 – a) Equipamento utilizado para o ensaio de fadiga. b) Corpo de prova rompido após ensaio.	76
Figura 38 – MEV utilizado para as análises.	77
Figura 39 – Micrografia do MB 3104 com ampliação de 50X e destaque para imagem com ampliação de 100X. Microscópio óptico.	78
Figura 40 – Micrografia do MB 5052 com ampliação de 50X e destaque para imagem com ampliação de 100X. Microscópio óptico.	79
Figura 41 – Micrografia da junta 3104-3104 com ampliação de 50X e destaque para imagem com ampliação de 100X. Microscópio óptico.	80
Figura 42 – Micrografia da junta 5052-5052 com ampliação de 50X e destaque para imagem com ampliação de 100X. Microscópio óptico.	80
Figura 43 – Micrografia da junta 3104-5052 com ampliação de 50X e destaque para imagem com ampliação de 100X. Microscópio óptico.	81
Figura 44 – Curvas tensão-deformação dos metais base 3104 e 5052.....	81
Figura 45 – Curvas tensão-deformação das juntas soldadas.....	82

Figura 46 – Propriedades mecânicas dos materiais ensaiados.....	83
Figura 47 – Dureza Vickers (1000 gf) ao longo da seção da amostra 3104-3104.....	84
Figura 48 – Dureza Vickers (1000 gf) ao longo da seção da amostra 5052-5052.....	84
Figura 49 – Dureza Vickers (1000 gf) ao longo da seção da amostra 3104-5052.....	84
Figura 50 – Dureza vickers (1000 gf) ao longo da seção das 3 condições analisadas.....	85
Figura 51 – CP's dos metais base após ensaios de fadiga. a) 3104 e b) 5052.	87
Figura 52 – Curvas S/N dos metais base 3104 e 5052.....	88
Figura 53 – CP's de fadiga da junta 3104-3104. a) Antes do ensaio – face da solda. b) Antes do ensaio – raiz da solda. c) Depois do ensaio.	89
Figura 54 – CP's de fadiga da junta 5052-5052. a) Antes do ensaio – face da solda. b) Antes do ensaio – raiz da solda. c) Depois do ensaio.	90
Figura 55 – CP's de fadiga da junta 3104-5052. a) Antes do ensaio – face da solda. b) Antes do ensaio – raiz da solda. c) Depois do ensaio.	91
Figura 56 – Curva S/N da junta 3104-3104.....	92
Figura 57 – Curva S/N da junta 5052-5052.....	93
Figura 58 – Curva S/N da junta 3104-5052.....	93
Figura 59 – Sobreposição das curvas das 3 condições de juntas estudadas.	94
Figura 60 – Superfície de fratura do CP 5 do metal base 3104 ensaiado com nível de tensão de 200 MPa. a) Composição de imagens para mostrar superfície completa. b) Imagem ampliada na região destacada. MEV.....	96
Figura 61 – Superfície de fratura do CP 2 do metal base 5052 ensaiado com nível de tensão de 200 MPa. a) Composição de imagens para mostrar superfície completa. b) Imagem ampliada na região destacada. MEV.....	97
Figura 62 – Superfície de fratura do CP A5 da junta 3104-3104 ensaiado a 160 MPa. Local da Fratura: Solda. a) Composição de imagens para mostrar superfície completa. b) Imagem ampliada na região destacada. MEV.....	98
Figura 63 – Região de fratura do CP A5 ampliada com magnitude de 514X. MEV.	99
Figura 64 – Superfície de fratura do CP A9 da junta 3104-3104 ensaiado a 140 MPa. Local da Fratura: Solda. a) Composição de imagens para mostrar superfície completa. b) Imagem ampliada na região destacada. MEV.....	100
Figura 65 – Região de fratura do CP A9 ampliada com magnitude de 505X. MEV	100
Figura 66 – Superfície de fratura do CP A11 da junta 3104-3104 ensaiado a 130 MPa. Local da Fratura: ZTA. a) Composição de imagens para mostrar superfície completa. b) Imagem ampliada na região destacada. MEV.....	101

Figura 67 – Região central de fratura do CP A11 ampliada com magnitude de 502X. MEV.	102
Figura 68 – Superfície de fratura do CP B3 da junta 5052-5052 ensaiado a 130 MPa. Local da Fratura: ZTA. a) Composição de imagens para mostrar superfície completa. b) Imagem ampliada na região destacada. MEV.....	103
Figura 69 – Região de fratura do CP B3 ampliada com magnitude de 537X. MEV.....	103
Figura 70 – Superfície de fratura do CP B5 da junta 5052-5052 ensaiado a 130 MPa. Local da Fratura: Solda. a) Composição de imagens para mostrar superfície completa. b) Imagem ampliada na região destacada. MEV.....	104
Figura 71 – Região de fratura do CP B5 ampliada com magnitude de 510X. MEV.....	105
Figura 72 – Superfície de fratura do CP B14 da junta 5052-5052 ensaiado a 130 MPa. Local da Fratura: Solda. a) Composição de imagens para mostrar superfície completa. b) Imagem ampliada na região destacada. MEV.....	105
Figura 73 – Região de fratura do CP B14 ampliada com magnitude de 504X. MEV.....	106
Figura 74 – Superfície de fratura do CP C5 da junta 3104-5052 ensaiado a 130 MPa. Local da Fratura: Solda. a) Composição de imagens para mostrar superfície completa. b) Imagem ampliada na região destacada. MEV.....	107
Figura 75 – Região de fratura do CP C5 ampliada com magnitude de 522X. MEV.....	107
Figura 76 – Superfície de fratura do CP C6 da junta 3104-5052 ensaiado a 130 MPa. Local da Fratura: Solda. a) Composição de imagens para mostrar superfície completa. b) Imagem ampliada na região destacada. MEV.....	108
Figura 77 – Região de fratura do CP C6 ampliada com magnitude de 508X. MEV.....	109
Figura 78 – Superfície de fratura do CP C13 da junta 3104-5052 ensaiado a 140 MPa. Local da Fratura: ZTA. a) Composição de imagens para mostrar superfície completa. b) Imagem ampliada na região destacada. MEV.....	110
Figura 79 – Região de fratura do CP C13 ampliada com magnitude de 504X. MEV.....	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais elementos de liga por grupo, com destaque para os grupos das ligas utilizadas neste trabalho.....	30
Tabela 2 – Propriedades do alumínio em relação ao aço.....	33
Tabela 3 – Composição química de algumas ligas de metal de adição utilizadas na soldagem de ligas trabalháveis, com destaque para a liga utilizada neste trabalho.	40
Tabela 4 – Propriedades típicas de algumas ligas de metal de adição comumente utilizadas, com destaque para a liga utilizada neste trabalho.....	41
Tabela 5 – Guia para seleção do metal de adição para soldagem em geral de algumas ligas dos grupos 1XXX, 3XXX e 5XXX, com destaque para as ligas utilizadas neste trabalho.	42
Tabela 6 – Classificação de algumas propriedades do metal soldado para diferentes ligas de metal de adição.	43
Tabela 7 – Soldabilidade de diferentes ligas de alumínio não tratáveis termicamente, com destaque para os materiais utilizados no presente trabalho.	46
Tabela 8 – Recomendações de parâmetros de soldagem TIG para juntas de topo, com destaque para alguns parâmetros de solda utilizados neste trabalho.	49
Tabela 9 – Principais defeitos da soldagem TIG e suas causas.....	52
Tabela 10 – Limites de fadiga estimados para ensaios de flexão rotativa de algumas ligas de alumínio comerciais não tratáveis termicamente, com destaque para as ligas estudadas neste trabalho.	62
Tabela 11 – Classificação de algumas juntas considerando pontos críticos sujeitos a trincas (<i>hot spot</i>).....	66
Tabela 12 – Propriedades mecânicas nominais dos materiais estudados.	69
Tabela 13 – Composição química nominal das ligas estudadas e do metal de adição.	69
Tabela 14 – Parâmetros de solda utilizados.....	70
Tabela 15 – Replicância dos ensaios de todas as condições estudadas.	77
Tabela 16 – Resultados dos ensaios de tração para os metais base.....	82
Tabela 17 – Resultados dos ensaios de tração para as juntas soldadas.....	82
Tabela 18 – Resultados dos ensaios de fadiga dos metais base 3104 e 5052.....	86
Tabela 19 – Comparativo do limiar ente a fadiga de alto ciclo (HCF) e a fadiga de baixo ciclo (LCF) com o limite de resistência à tração (L.R.T) das ligas 3104 e 5052.	87

Tabela 20 – Resultados dos cálculos de A e B utilizando o modelo de regressão linear para as ligas 3104 e 5052.....	88
Tabela 21 – Resistência à fadiga para 2 milhões de ciclos para as ligas 3104 e 5052 em termos da tensão máxima e carregamento com $R = 0,1$	88
Tabela 22 – Identificação do local da fratura dos CP's da junta 3104-3104.	89
Tabela 23 – Identificação do local da fratura dos CP's da junta 5052-5052.	90
Tabela 24 – Identificação do local da fratura dos CP's da junta 3104-5052.	91
Tabela 25 – Resultados dos ensaios de fadiga das juntas 3104, 5052 e dissimilares.	92
Tabela 26 – Resultados dos cálculos de A e B utilizando o modelo de regressão linear para as juntas 3104-3104, 5052-5052 e 3104-5052.	94
Tabela 27 – Resistência à fadiga para 2 milhões de ciclos para as juntas 3104-3104, 5052-5052 e 3104-5052 em termos da tensão máxima e carregamento com $R = 0,1$	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A (%)	Percentual de alongamento
AA	<i>Aluminum Association</i>
ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
Al	Alumínio
ANOVA	<i>Analysis of variance</i>
ANSI H35.1	<i>American National Standard Institute - Alloy and Temper Designation</i>
ASI	<i>Aluminium Stewardship Initiative</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
CA	Corrente alternada
CCEN	Corrente contínua e eletrodo negativo
CCEP	Corrente contínua e eletrodo positivo
CP's	Corpos-de-prova
Cr	Cromo
Cu	Cobre
EEL	Escola de Engenharia de Lorena
FAT	Classe de fadiga
Fe	Ferro
H32	Têmpera na qual o material sofre aproximadamente 20% de redução de espessura por laminação a frio e passa por um processo de estabilização, em que o material é colocado em um forno por tempo e temperatura pré-determinados
HCF	<i>High Cycle Fatigue</i>

HV	<i>Hardness Vickers</i>
IAI	<i>International Aluminium Institute</i>
IIW	<i>International Institute of Welding</i>
LCF	<i>Low Cycle Fatigue</i>
L.E	Limite de escoamento
L.R.T	Limite de resistência à tração
MB	Metal base
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
Mg	Magnésio
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
Mn	Manganês
NDT	<i>Non destructive testing</i>
SATG	Soldagem a arco tungstênio com atmosfera gasosa
SBTi	<i>Science Based Target</i>
Si	Silício
Ti	Titânio
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
USP	Universidade de São Paulo
ZF	Zona fundida
Zn	Zinco
Zr	Zircônio
ZTA	Zona termicamente afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

$2N_f$	número de reversões até a falha
A	intercepto
B	coeficiente angular
b	parâmetro de regressão para um ajuste polinomial do segundo grau
d	média das diagonais medidas no ensaio de dureza Vickers
N_f	número de ciclos até a falha
P	carga aplicada
R	razão de carregamento
t	espessura do material
X	variável independente
Y	variável dependente
$\Delta\sigma$	faixa de tensão
σ	tensão
σ'_f	coeficiente de resistência à fadiga
σ_a	amplitude de tensão
σ_b	tensão de flexão
σ_F	tensão limite de fadiga
σ_m	tensão de membrana ou tensão média
σ_{max}	tensão máxima
σ_{min}	tensão mínima
σ_{nl}	tensão não linear de pico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
2	OBJETIVOS	26
2.1	OBJETIVO GERAL.....	26
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26
3	REVISÃO DA LITERATURA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	27
3.1	CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO	27
3.1.1	Classificação quanto ao processo de fabricação	27
3.1.2	Classificação quanto ao tratamento térmico.....	28
3.1.3	Classificação quanto à composição química – principais elementos de liga .	30
3.2	SOLDAGEM DO ALUMÍNIO	32
3.2.1	Características do alumínio	33
3.2.2	Efeitos metalúrgicos da soldagem.....	34
3.2.3	Tensões residuais e distorções durante a soldagem	36
3.2.4	Metal de adição	40
3.2.5	Soldabilidade.....	44
3.2.6	Soldagem TIG	46
3.2.6.1	Problemas de soldagem.....	51
3.3	FADIGA.....	53
3.3.1	Nucleação e propagação das trincas.....	53
3.3.2	Abordagem tensão-número de ciclos - Curvas S/N	58
3.3.3	Vida em fadiga em ligas de alumínio.....	60
3.3.4	Resistência à fadiga em juntas soldadas.....	61
3.3.5	Análise dos dados de fadiga.....	66
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	68
4.1	MATERIAIS	68
4.2	MÉTODOS.....	70
4.2.1	Obtenção das juntas soldadas	70
4.2.2	Análise metalográfica.....	72
4.2.3	Ensaio de tração	73
4.2.4	Medidas de dureza.....	74
4.2.5	Ensaio de fadiga.....	75
4.2.6	Análise Fractográfica	77

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	78
5.1	ANÁLISE METALOGRÁFICA	78
5.2	ENSAIOS DE TRAÇÃO	81
5.3	MEDIDAS DE DUREZA	83
5.4	ENSAIOS DE FADIGA	86
5.4.1	Metal base.....	86
5.4.2	Juntas soldadas	89
5.5	ANÁLISE FRACTOGRÁFICA	95
5.5.1	Metal base.....	95
5.5.2	Juntas Soldadas.....	97
5.5.2.1	Junta 3104-3104 – CP’s A1 a A14	98
5.5.2.2	Junta 5052-5052 – CP’s B1 a B14	102
5.5.2.3	Junta 3104-5052 – CP’s C1 a C14	106
6	CONCLUSÕES.....	112
7	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	114
	REFERÊNCIAS.....	115

1 INTRODUÇÃO

As ligas de alumínio são os materiais mais utilizados em aplicações mecânicas, especialmente em aplicações estruturais, e a soldagem é o principal método de união desses materiais. Os processos de soldagem são de dois tipos: soldagem no estado sólido e no estado líquido. Soldagem a arco metálico a gás (MIG) e soldagem a arco metálico de tungstênio (TIG) são os dois processos de soldagem mais populares aplicados na indústria (VERMA; LILA, 2021). As propriedades de fadiga de juntas soldadas podem apresentar dispersão considerável devido a uma variedade de imperfeições nas juntas. Como consequência, a fadiga de juntas soldadas sempre foi motivo de preocupação, mas boas práticas de soldagem podem ser especificadas para estruturas críticas à fadiga, incluindo inspeções não destrutivas de todas as soldas (SCHIJVE, 2001).

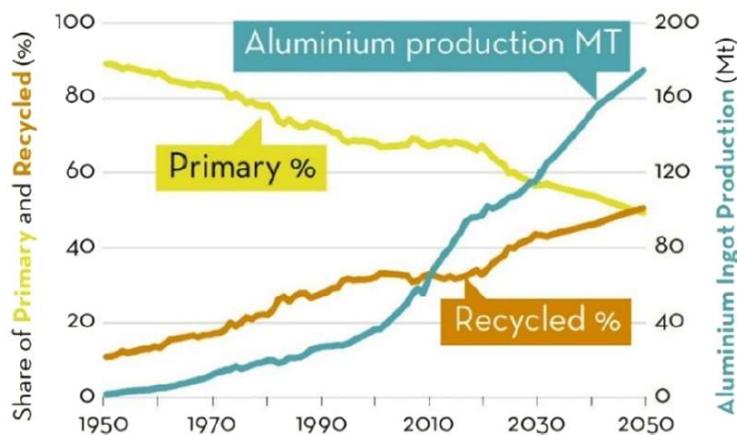
A fadiga é uma forma de falha que ocorre em estruturas submetidas a tensões dinâmicas e flutuantes (por exemplo, pontes, aeronaves e componentes de máquinas). Sob tais circunstâncias é possível ocorrer uma falha sob um nível de tensão consideravelmente inferior ao limite de resistência à tração ou ao limite de escoamento para uma carga estática. O termo "fadiga" é usado porque esse tipo de falha normalmente ocorre após um período longo sob tensões repetidas ou ciclos de deformação. A fadiga é importante uma vez que é a maior causa individual de falha nos metais, sendo estimado que compreenda aproximadamente 90% de todas as falhas de metais (CALLISTER, 2012).

O Brasil é referência quando o assunto é a sustentabilidade do alumínio. Além da baixa pegada de carbono do metal – 4,6 vezes menor do que a média mundial –, o país é o único no mundo a ter todos os elos da cadeia produtiva certificados pela *Aluminium Stewardship Initiative* (ASI) nos quesitos padrões de desempenho e cadeia de custódia e a ter a primeira produtora de alumínio primário com certificado da *Science Based Target* (SBTi), instituição internacional criada pelo Pacto Global das Nações Unidas para impulsionar a transição rumo a uma economia de baixo carbono (ABAL, 2022). Destaque ainda para o desempenho da cadeia de reciclagem, que responde por 54,7% do volume total de metal consumido no Brasil, número este muito superior à média mundial, de 28%. Em 2021, o Brasil registrou um novo recorde de reciclagem de latas para bebidas, alcançando a marca de 98,7%. Este índice é resultado direto dos investimentos feitos pela indústria do alumínio na modernização e ampliação dos centros de coleta e reciclagem, aliados aos esforços conjuntos de toda a cadeia de suprimento na implementação de uma política bem-

sucedida de gestão de resíduos sólidos. Um estudo elaborado pela consultoria *CRU International*, a pedido do *International Aluminium Institute (IAI)*, projetou um crescimento da demanda global de alumínio de 40% até o final de 2030, impulsionado pelos segmentos de transportes, construção civil, energia renovável e embalagens. Somadas a essas perspectivas, as preocupações com as mudanças climáticas têm mobilizado esforços da sociedade, indústrias e governos na revisão dos hábitos de consumo, de processos produtivos e na construção de políticas de incentivo à transição para uma economia de baixo carbono. (ABAL, 2022).

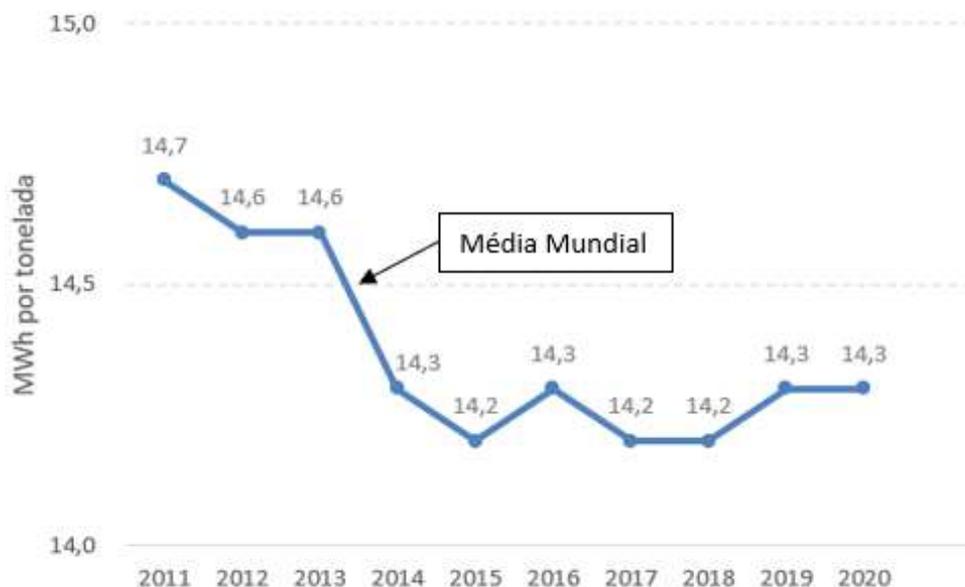
Existem várias peculiaridades do alumínio quando se trata de sustentabilidade. Embora ajude a economizar combustível devido à sua baixa densidade, produzi-lo a partir do minério consome muita energia. O uso do alumínio reciclado tem um papel fundamental para mudar esse equilíbrio, pois a reciclagem economiza 95% de energia se comparada com a produção do alumínio a partir do minério. Estima-se que a quantidade de alumínio disponível para reciclagem dobre até 2050, conforme pode ser observado na Figura 1. Isso oferece uma oportunidade de aproximar o setor metalúrgico de uma economia circular. O alumínio é um material infinitamente reciclável, e atualmente, cerca de 75% de todo o alumínio produzido na história – quase um bilhão de toneladas – ainda está em uso (RAABE *et al*, 2022). Ligas com alto conteúdo reciclado, como é o caso da liga 3104 no Brasil, vem ganhando cada vez mais destaque nesse cenário. A liga 5052, por sua vez, utiliza basicamente alumínio primário como matéria prima. A Figura 2 apresenta o consumo médio específico de energia elétrica na produção mundial de alumínio primário.

Figura 1 – Desenvolvimento do alumínio primário e reciclado até 2050, com base em números de 2019 para taxas de coleta de produtos em fim de vida. MT: milhões de toneladas.



Fonte: RAABE, 2022.

Figura 2 – Consumo médio específico de energia elétrica na produção mundial de alumínio primário.



Fonte: ABAL, 2022.

A utilização de ligas com alto teor de material reciclado é um avanço em termos de sustentabilidade, o que motiva estudos que embasam a substituição de ligas em mercados específicos.

A liga 5052, por possuir boa resistência mecânica e boa formabilidade, é bastante utilizada no mercado de implementos rodoviários, máquinas agrícolas, embarcações e veículos militares (REVISTA ALUMÍNIO, 2021), dentre outros, já a liga 3104, utilizada principalmente no mercado de latas de bebidas, tem resistência mecânica e formabilidade semelhantes à 5052, demonstrando ser uma liga com grande versatilidade.

Em 2020, a liga 3104 produzida no Brasil, contou com cerca de 72,5% de conteúdo reciclado, sendo considerada uma liga sustentável (NOVELIS, 2021). Em 2021, o índice de reciclagem de latas de alumínio no Brasil atingiu 98,7% (ABRALATAS, 2022).

Nesse contexto, um estudo comparativo do comportamento em juntas soldadas é de valiosa importância para o processo de substituição de ligas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo do presente trabalho é comparar o comportamento em fadiga de juntas soldadas por processo TIG nas ligas de alumínio 3104, 5052 e dissimilares, de forma a demonstrar que a substituição de uma liga pela outra pode ser realizada de forma satisfatória em aplicações específicas, como no mercado de transportes.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do trabalho proposto são:

- Definição dos parâmetros de solda para a união dos materiais;
- Caracterização básica dos metais base e das juntas soldadas;
- Avaliação das propriedades mecânicas e microestruturais dos materiais;
- Obtenção das curvas S/N para os metais base e juntas soldadas em 3104, 5052 e dissimilares;
- Avaliação do comportamento em fadiga dos materiais;
- Análises das características fractográficas das peças ensaiadas em fadiga.

3 REVISÃO DA LITERATURA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO

Em virtude da grande variedade de ligas de alumínio e tratamentos térmicos existentes, surgiu a necessidade de classificá-las. A classificação mais comum utilizada atualmente é da *Aluminum Association* (AA), que classifica o alumínio e suas ligas segundo três critérios: quanto ao processo de fabricação, têmpera e composição química

3.1.1 Classificação quanto ao processo de fabricação

As ligas de alumínio podem ser divididas em duas grandes classes: ligas fundidas e ligas trabalháveis. Essas duas classes podem ser subdivididas em famílias de ligas com base na composição química e, finalmente, na designação de têmperas, que são usadas para identificar a condição da liga, definida pela quantidade de trabalho a frio à qual foi submetida ou sua condição de tratamento térmico (MATHERS, 2002).

As ligas fundidas contêm proporções comparativamente maiores de elementos de liga, o que resulta em uma estrutura heterogênea com a presença de partículas de segunda fase, que geralmente cria vários entalhes internos. Conseqüentemente, são regiões propícias ao surgimento de fissuras e trincas sob carregamento. Assim, o alongamento e a resistência, especialmente em fadiga, da maioria dos produtos fundidos são considerados baixos, enquanto as ligas de alumínio trabalháveis exibem uma resistência comparativamente maior (VERMA; LILA, 2021).

As ligas trabalháveis são aquelas em que a forma final do produto acabado é obtida a partir de transformações de semimanufaturados (lâmina, chapa, folha, perfil, vergalhão, forjado), oriundos de transformação mecânica a quente e/ou a frio de um tarugo ou placa. Os processos de transformação mecânica mais comuns na produção de semimanufaturados são: laminação, extrusão, trefilação e forjamento.

As ligas trabalháveis são ainda subdivididas em função de sua têmpera (tratamento térmico), conforme AA.

3.1.2 Classificação quanto ao tratamento térmico

As ligas de alumínio trabalháveis são classificadas em tratáveis termicamente e não-tratáveis termicamente. As ligas tratáveis termicamente são aquelas que permitem aumento da resistência mecânica e mudança da microestrutura por meio de fornecimento de energia térmica e resfriamento brusco.

De acordo com a NBR ISO 2107, a designação do tratamento é definida pela letra “T”, seguida de um número, variando de 1 a 10, que define a sequência de tratamentos básicos aos quais a liga foi submetida, conforme indicado abaixo:

T1 – Resfriado após o processo de fabricação a uma temperatura elevada e envelhecido naturalmente até uma condição estável.

T2 – Resfriado após o processo de fabricação a uma temperatura elevada, posteriormente deformado plasticamente a frio e finalmente envelhecido naturalmente até uma condição estável.

T3 – Solubilizado, deformado plasticamente a frio e envelhecido naturalmente até a condição estável.

T4 – Solubilizado e envelhecido naturalmente até a condição estável.

T5 – Resfriado após o processo de fabricação a uma temperatura elevada e envelhecido artificialmente.

T6 – Solubilizado e envelhecido artificialmente.

T7 – Solubilizado e estabilizado (superenvelhecimento).

T8 – Solubilizado, deformado plasticamente a frio e envelhecido artificialmente.

T9 – Solubilizado, envelhecido artificialmente e em seguida deformado plasticamente a frio.

T10 – Resfriado após o processo de fabricação a uma temperatura elevada, deformado plasticamente a frio e posteriormente envelhecido artificialmente.

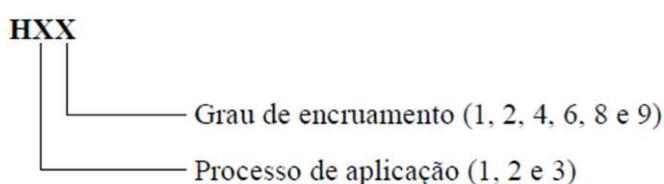
As designações “T1” a “T10” podem ser seguidas de dígitos adicionais, dos quais o primeiro não pode ser zero, a fim de indicar uma variação de tratamento básico, alterando assim significativamente as características do produto.

As ligas não tratáveis termicamente são aquelas em que o aumento da resistência mecânica só é possível mediante a realização de um trabalho a frio. Este é o caso da maioria dos produtos laminados de alumínio no Brasil, cuja classificação é definida conforme indicado na sequência:

F – Como Fabricado – Aplica-se aos produtos obtidos por conformação mecânica, não havendo nenhum controle térmico ou de encruamento durante o processamento e, nesses casos, não se especificam as propriedades mecânicas.

O – Recozido – Aplica-se aos produtos na condição de menor resistência mecânica.

H – Encruado – Aplica-se à maioria dos produtos laminados não tratáveis termicamente, indicando que o aumento na propriedade mecânica se deu por trabalho a frio. A letra “H” é acompanhada de mais dois algarismos que permitem identificar o processo aplicado e o seu grau de encruamento, conforme indicado abaixo:



Os números 1, 2 e 3 referentes ao primeiro algarismo são indicativos do processo aplicado e significam:

1 – Liga apenas encruada. As propriedades mecânicas obtidas, neste caso, são resultantes exclusivamente do trabalho a frio.

2 – Liga encruada e recozida parcialmente. Neste caso, a liga é encruada até um grau de encruamento definido e, em seguida recozida parcialmente, reduzindo as propriedades mecânicas até um grau requerido. Este processo não é muito usual, em função das dificuldades de controle do processo de recozimento parcial.

3 – Liga encruada e estabilizada. A liga foi trabalhada a frio e em seguida submetida a um tratamento térmico a baixa temperatura, visando apenas um alívio das tensões geradas durante o processo de trabalho a frio. Este tratamento, normalmente, é aplicado a fim de promover a estabilidade dimensional e das propriedades mecânicas das ligas de alumínio-magnésio.

Os números 1, 2, 4, 6, 8 e 9 referentes ao segundo algarismo indicam o grau de encruamento a que o produto foi submetido, sendo que 1 significa um encruamento de aproximadamente 10% e assim sucessivamente até 9, que significa um encruamento de aproximadamente 90%.

3.1.3 Classificação quanto à composição química – principais elementos de liga

A classificação do alumínio e suas ligas designada pela ANSI H35.1 da AA é constituída de 4 dígitos, abrangendo tanto as ligas não trabalháveis quanto as trabalháveis por processos de conformação mecânica. O primeiro dígito define sempre o grupo de ligas e indica o seu principal elemento, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Principais elementos de liga por grupo, com destaque para os grupos das ligas utilizadas neste trabalho.

Grupo	Designação
Alumínio (99% mín. de pureza)	1XXX
Cobre (Cu)	2XXX
Manganes (Mn)	3XXX
Silício (Si)	4XXX
Magnésio (Mg)	5XXX
Magnésio e Silício (Mg , Si)	6XXX
Zinco (Zn)	7XXX
Outros elementos	8XXX
Série não utilizada	9XXX

Fonte: Adaptado de THE ALUMINUM ASSOCIATION, 2018.

O grupo 1XXX corresponde ao alumínio puro, não-ligado, com no mínimo 99% de pureza. Os grupos de 2XXX a 7XXX classificam as ligas de alumínio em função do principal ou principais elementos de liga. O segundo dígito indica se a liga ainda é a original, quando zero, ou, se foi modificada, quando de 1 a 9.

GRUPO 1XXX: Alumínio com pureza maior ou igual a 99% é um material cuja resistência mecânica pode ser aumentada via deformação plástica. Possui várias aplicações, principalmente nas áreas elétrica e química. Este grupo é caracterizado por possuir excelente resistência à corrosão, altas condutividades térmica e elétrica, baixa resistência mecânica e excelente trabalhabilidade. Ferro e silício são as principais impurezas.

GRUPO 2XXX: São ligas endurecidas por precipitação tendo o cobre como principal elemento de liga. Essas ligas apresentam melhores propriedades mecânicas quando submetidas a tratamentos térmicos adequados. Em alguns casos, a resistência mecânica obtida com tratamento térmico excede até a resistência dos aços de médio carbono. Não

possui boa resistência à corrosão, como outras ligas de alumínio e, sob certas condições, podem apresentar corrosão intergranular. Para minimizar esse problema, normalmente, no caso de chapas, utilizam-se chapas revestidas, com revestimento superficial de alumínio (1XXX) ou uma liga de alumínio-magnésio-silício (6XXX), que conferem à liga base uma proteção galvânica, aumentando, consideravelmente, a resistência à corrosão. A liga mais conhecida deste grupo 2XXX é a 2024, a qual tem larga aplicação na indústria aeronáutica.

GRUPO 3XXX: Este grupo tem o manganês como principal elemento de liga, não sendo tratável termicamente, pois o manganês apenas em níveis superiores a 1,5% torna-se efetivo para esse propósito e, nas ligas deste grupo, raramente se ultrapassa este limite. Uma das ligas mais conhecidas do grupo 3XXX é a liga 3003, destinada a aplicações nas quais se requer moderada resistência e boa trabalhabilidade como, por exemplo, no caso de utensílios domésticos. A liga 3104 utilizada nesse estudo pertence a este grupo, porém, além do Mn, possui Mg em sua composição, sendo considerada uma liga de Al-Mn-Mg.

GRUPO 4XXX: Neste grupo o principal elemento de liga é o silício, o qual é acrescentado em quantidade suficiente para causar substancial redução do ponto de fusão. Por esta razão, as ligas deste grupo são usadas para fabricação de arames de solda e para brazagem, cujo ponto de fusão deve ser menor que o do metal-base. Muitas ligas deste grupo não são tratáveis termicamente, porém, com a adição de outros elementos, esta característica pode ser conferida à liga, principalmente, para os casos de soldagem de ligas tratáveis termicamente.

GRUPO 5XXX: O magnésio é um dos elementos de liga mais efetivos e é largamente usado nas ligas de alumínio. Quando usado como principal elemento de liga ou, com manganês, confere à liga uma resistência mecânica de moderada a alta. O magnésio é ainda considerado o melhor elemento endurecedor, quando comparado com o manganês. Assim, uma liga com 0,8% de Mg possui a mesma dureza que outra com 1,25% de Mn e, além disso, o Mg pode ser adicionado ao alumínio em quantidades significativas. As ligas deste grupo possuem boa resistência à corrosão em atmosfera marinha e boa soldagem, porém, com elevados teores de Mg e sob condições de tensão, torna-se suscetível ao fenômeno de corrosão sob tensão. Essas ligas são largamente utilizadas nos segmentos de transportes, embarcações e na indústria automobilística. A liga 5052 utilizada nesse estudo pertence a esse grupo.

GRUPO 6XXX: Nesse grupo, as ligas contêm silício e magnésio em proporções semelhantes para formar compostos da família Si-Mg, tornando a liga tratável termicamente. Embora sejam ligas menos resistentes que as ligas das séries 2XXX e 7XXX, apresentam boas características de conformabilidade e resistência à corrosão. A liga AA6061 é a mais usada deste grupo, sendo uma das mais versáteis entre as tratáveis termicamente.

GRUPO 7XXX: O zinco é o principal elemento de liga desse grupo e, quando estão presentes pequenas quantidades de magnésio, torna-se também uma liga tratável termicamente, e com elevada resistência mecânica. Normalmente, outros elementos como o cobre e o cromo são também acrescentados em pequenas quantidades. A liga AA7075 é a mais conhecida e possui a mais elevada resistência mecânica dentre as ligas deste grupo, sendo utilizada em estruturas aeronáuticas.

GRUPO 8XXX: Ligas contendo outros elementos. Uma liga bastante conhecida nesse grupo é a liga AA8011, utilizada para fabricação de tampas de vinho, dentre outros produtos, devido a sua boa formabilidade.

3.2 SOLDAGEM DO ALUMÍNIO

O alumínio pode ser soldado com relativa facilidade, mas primeiramente, o processo de soldagem correto deve ser adotado. A soldagem do alumínio requer diferentes técnicas de soldagem, diferentes gases de proteção, diferentes especificações e processos de pré e pós-soldagem quando comparadas com a soldagem do aço. As técnicas de soldagem que podem ser adequadas para ambos também podem exigir alterações para que possam ser utilizadas no alumínio (MILA, 2021).

A escolha do processo a ser utilizado depende das propriedades do material, tipo de aplicação e viabilidade financeira (ALCAN, 2001). Antes de dissertar sobre a soldagem do alumínio propriamente dita, serão descritas as principais características que diferenciam o alumínio do aço carbono, material mais comum utilizado em processos de soldagem.

3.2.1 Características do alumínio

As diferenças entre soldagem do alumínio e do aço são ocasionadas pelas diferenças de propriedades dos materiais, conforme ilustrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades do alumínio em relação ao aço.

Propriedade	Unidade	Alumínio	Aço
Calor específico / peso	J/(kg.°C)	2	1
Calor específico / volume	J/(m ³ .°C)	2/3	1
Calor de fusão / peso	J/kg	1,5	1
Calor de fusão / volume	J/m ³	0,5	1
Condutividade térmica	W/(m.°C)	3	1
Expansão térmica	1/°C	2	1
Modulo de elasticidade	MPa	1/3	1
Densidade	kg/m ³	1/3	1

Fonte: Adaptado de WEMAN, 2012.

Deve ser dado um destaque especial para as seguintes propriedades do alumínio e seus óxidos:

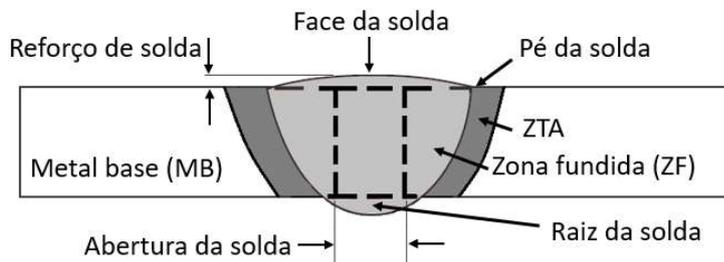
- As diferenças substanciais na condutividade térmica, expansão térmica e outras propriedades do alumínio e do aço significam que a distorção ocorre mais facilmente no alumínio. O efeito da distorção é detalhado na seção 2.2.3.
- O alumínio reage fortemente com o oxigênio, formando o Al₂O₃;
- O óxido é forte e resistente, podendo causar defeitos na solda;
- Devido a sua maior densidade, o óxido pode afundar na poça de fusão e causar inclusões;
- O óxido não funde durante o processo de soldagem (temperatura de fusão do óxido é de aproximadamente 2.050°C);
- O hidrogênio se dissolve com facilidade no alumínio no estado fundido, mas não no metal sólido e, portanto, facilmente causa poros.

O óxido na superfície do alumínio, portanto, tem um impacto considerável na soldagem. Se não for removido antes da soldagem, pode causar defeitos, reduzindo drasticamente a resistência da solda (WEMAN, 2012).

3.2.2 Efeitos metalúrgicos da soldagem

Com exceção dos materiais recozidos ou fundidos, a soldagem por fusão provoca uma redução de resistência mecânica nas ligas tratáveis e não-tratáveis termicamente. Basicamente, a solda é compreendida por duas regiões. Uma delas é o cordão de solda, que apresenta uma estrutura bruta de solidificação cuja composição é o resultado das participações de metal base e metal de adição. A outra é a zona termicamente afetada (ZTA) no metal base, em cada lado da solda, onde ocorrem alterações metalúrgicas devido ao calor da soldagem. As propriedades da estrutura bruta de solidificação do cordão de solda são influenciadas pela composição química e taxa de solidificação. Um aumento na taxa de solidificação contribui para a obtenção de melhores propriedades mecânicas, devido à formação de uma microestrutura mais fina. Quanto menor for o aporte térmico, maior será a taxa de solidificação. Por sua vez, o aporte térmico é influenciado pela velocidade de soldagem, de modo que velocidades maiores diminuem o aporte térmico cedido à solda e o tamanho dos cordões. Embora os cordões de solda menores geralmente apresentem propriedades mais elevadas, deve-se tomar cuidado em relação ao tamanho das soldas, pois quando os cordões de solda são muito pequenos, eles podem trincar durante a soldagem devido às tensões geradas em virtude da restrição de movimentação imposta pelo metal base (ALCAN, 2001). A Figura 3 apresenta terminologia típica de solda e as zonas de uma junta de topo soldada.

Figura 3 – Terminologia típica de solda e zonas de uma junta de topo soldada.

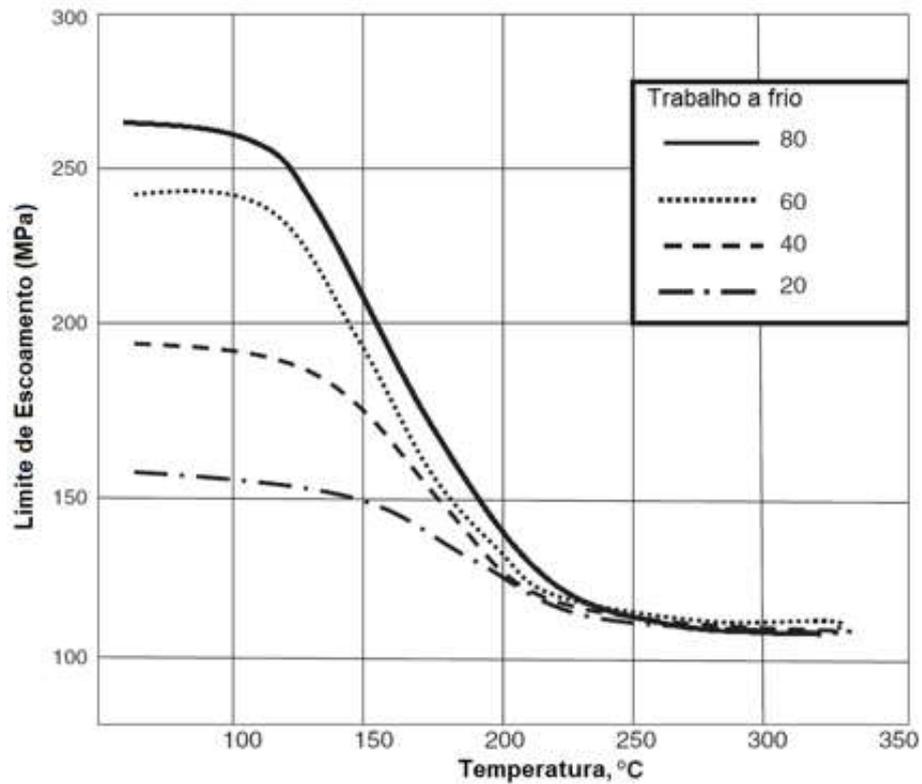


Fonte: O autor.

Como citado anteriormente, ligas de alumínio na condição fundida ou recozida podem ser soldadas sem perda significativa de resistência na ZTA. Já em ligas trabalhadas a

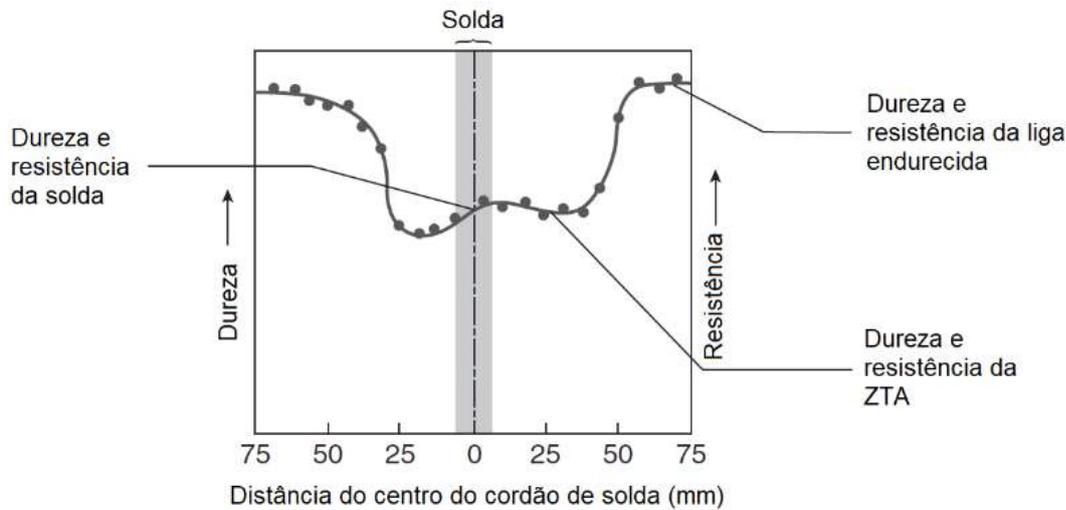
frio, como é o caso das ligas utilizadas no presente trabalho, pode haver uma perda substancial de resistência na ZTA, que ocorre devido à recristalização nessa região. Essa recristalização começa a ocorrer quando a temperatura na ZTA excede 200 °C e aumenta progressivamente com o recozimento total ocorrendo acima de 300 °C. A Figura 4 mostra uma liga do grupo 1XXX trabalhada a frio com diferentes taxas de deformação e tratada termicamente em uma faixa de temperaturas, mostrando como o tratamento térmico de recozimento resulta em uma grande perda de resistência. O resultado disso na prática é ilustrado na Figura 5, que mostra uma liga do grupo 5XXX soldada por processo TIG (MATHERS, 2002).

Figura 4 – Efeito da temperatura de recozimento no trabalho a frio e resistência.



Fonte: Adaptado de MATHERS, 2002.

Figura 5 – Efeito da soldagem na resistência de uma liga trabalhada a frio.



Fonte: Adaptado de MATHERS, 2002.

De acordo com a Figura 5, pode-se observar que a dureza do material vai aumentando à medida que se distancia do cordão de solda e sai definitivamente da ZTA, onde atinge o metal base e a dureza passa a ser constante.

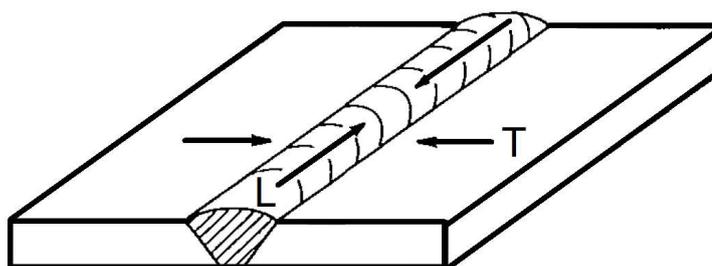
As soldas nas ligas não-tratáveis termicamente possuem excelente ductilidade e, dessa forma, conseguem resistir a grandes deformações antes de atingir a ruptura, devido à capacidade que apresentam de redistribuir as tensões (ALCAN, 2001).

3.2.3 Tensões residuais e distorções durante a soldagem

A distribuição de temperaturas na soldagem não é uniforme e mudanças estruturais e metalúrgicas ocorrem à medida que a soldagem progride ao longo de uma junta. Geralmente, o metal de solda e a ZTA estão em temperaturas muito superiores às do metal base. À medida que a poça de fusão se solidifica e encolhe, ela começa a exercer tensões no metal de solda circundante e na ZTA. Quando solidifica pela primeira vez, o metal de solda está quente, relativamente fraco e pode exercer pouca tensão, mas à medida que esfria até a temperatura ambiente, as tensões na área de solda aumentam e, eventualmente, atingem o limite de escoamento do metal base e da ZTA. Quando a solda é feita progressivamente, a porção de solda que já está solidificada resiste à contração das porções adjacentes da gota de solda. Conseqüentemente, as porções soldadas primeiro são tensionadas em uma direção

longitudinal à linha de solda, isto é, diminuindo o comprimento dos cordões de solda. No caso de juntas de topo, a menor porção de solda está na direção transversal devido à preparação da junta de solda e ao efeito de endurecimento em passes subjacentes (AWS, 2001). Devido às contrações na solda, as tensões residuais transversais estão também presentes, como mostra a Figura 6.

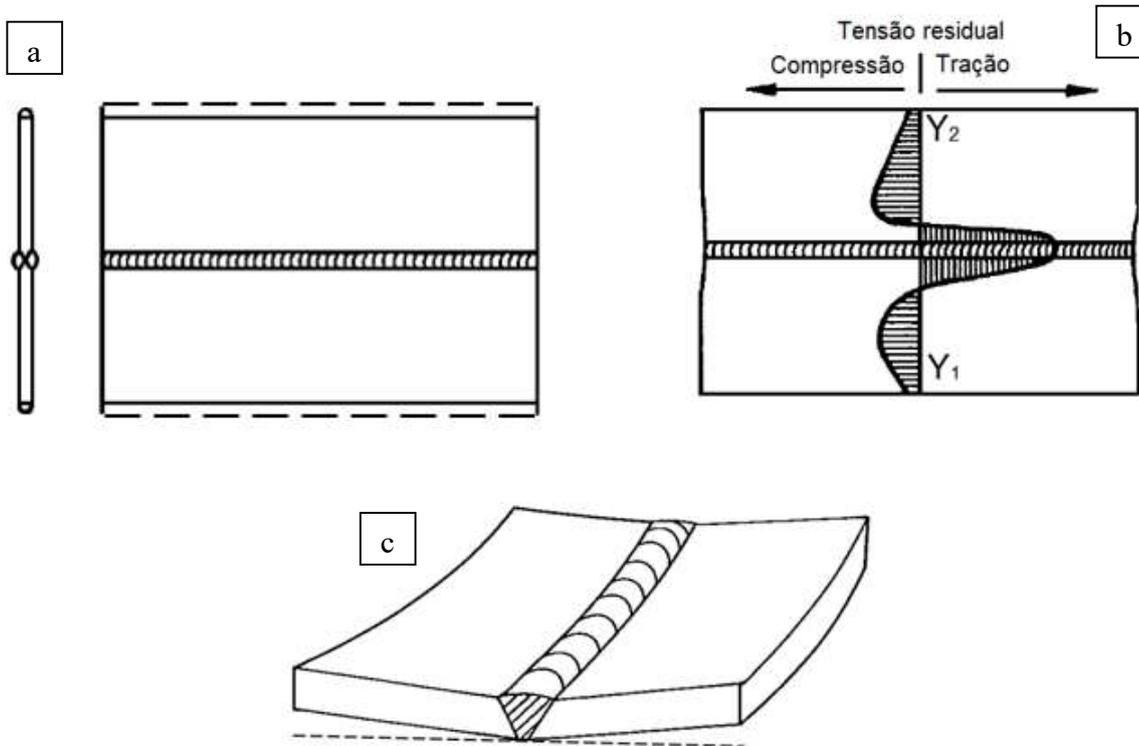
Figura 6 – Tensões residuais longitudinais (L) e transversais (T) em uma junta de topo.



Fonte: AWS, 2001.

As tensões residuais na soldagem podem ter dois efeitos principais, podendo produzir distorção e/ou causar fratura prematura. A distorção é causada quando a região aquecida de solda contrai de maneira não uniforme, causando contração em uma parte da solda, originando forças excêntricas na seção transversal. As estruturas soldadas são deformadas elasticamente em resposta a estas tensões. A distorção pode aparecer em juntas de topo como contração longitudinal, contração transversal e variação angular (rotação) quando a face da solda contrai mais do que a raiz. A variação angular produz dobramentos transversais nas chapas ao longo do comprimento (AWS, 2001). A Figura 7 apresenta as distorções que podem ocorrer em uma junta de topo.

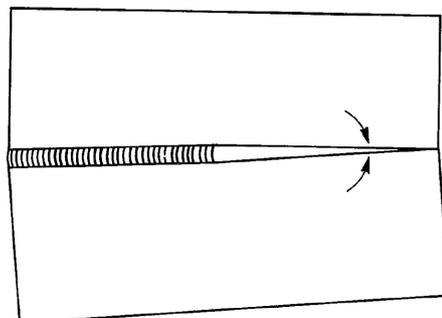
Figura 7 – Distorções que podem ocorrer em uma junta de topo. a) Contração transversal. b) Contração longitudinal. c) Variação angular.



Fonte: Adaptado de AWS, 2001.

A distorção que ocorre devido à contração transversal também pode ser rotacional, conforme ilustrado na Figura 8. Quando as chapas são soldadas, a região que ainda não foi soldada tende a fechar, e o grau de contração transversal é afetado pelo grau de restrição que é aplicado à junta. Quanto maior for a restrição, menor será a contração.

Figura 8 – Distorção rotacional.



Fonte: AWS, 2001.

Segundo Hobbacher (2016), na vizinhança do cordão de solda, isto é, no pé da solda, a distribuição de tensões na espessura da chapa ocorre de maneira não linear, conforme Figura 9, em que σ_m é a tensão de membrana, σ_b é a tensão de flexão e σ_{nl} é a tensão não linear de pico.

Figura 9 – Componentes de tensão em uma chapa soldada.



Fonte: HOBACHER, 2016.

A tensão na membrana σ_m é igual a tensão média calculada através da espessura da chapa. Essa tensão é constante em toda a espessura. A tensão de flexão σ_b é distribuída de maneira linear através da espessura da chapa, e é encontrada desenhando uma linha reta através do ponto “O”, conforme Figura 9, onde a tensão de membrana intercepta o meio da chapa. A tensão não linear de pico σ_{nl} é a componente remanescente da tensão. As componentes de tensão podem ser separadas analiticamente para uma dada distribuição de tensão $\sigma(x)$ de $x = 0$ à superfície $x = t$, conforme Equações 1 a 3.

$$\sigma_m = \frac{1}{t} \int_{x=0}^{x=t} \sigma(x) dx, \quad (1)$$

$$\sigma_b = \frac{6}{t^2} \int_{x=0}^{x=t} (\sigma(x) - \sigma_m) \cdot \left(\frac{t}{2} - x\right) dx, \quad (2)$$

$$\sigma_{nl}(x) = \sigma(x) - \sigma_m - \left(1 - \frac{2x}{t}\right) \sigma_b. \quad (3)$$

3.2.4 Metal de adição

Tanto os eletrodos como as varetas de solda são classificados com base em sua composição química. A nomenclatura é composta por quatro dígitos, idêntica à utilizada pela AA, precedidos das letras E e R, que são utilizadas como prefixos que designam de que forma o metal de adição é empregado. O prefixo R indica que o metal de adição é apropriado para ser usado como vareta de solda, enquanto o prefixo E indica que o metal de adição é adequado como eletrodo. Como alguns desses metais de adição são utilizados como eletrodos no processo de soldagem a arco metálico com atmosfera gasosa (MIG), e como varetas de solda nos processos a gás oxicombustível, a arco tungstênio com atmosfera gasosa (TIG) e a plasma, ambas as letras “ER” são usadas para indicar que o metal de adição é apropriado para o emprego tanto na forma de vareta de solda como na forma de eletrodo (ALCAN, 2001). A Tabela 3 apresenta a composição química de algumas das ligas de metal de adição mais utilizadas no processo de soldagem de ligas trabalháveis, com destaque para a liga utilizada no presente trabalho.

Tabela 3 – Composição química de algumas ligas de metal de adição utilizadas na soldagem de ligas trabalháveis, com destaque para a liga utilizada neste trabalho.

Elemento - % em Peso											
Liga	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Outros (Cada)	Outros (Total)	Aluminio (mín)
ER 1100	0,95 Si + Fe		0,05 - 0,20	0,80 - 0,05	-	-	0,10	-	0,05	0,15	99,00
ER 4043	4,50 - 6,00	0,80	0,30	0,05	0,05	-	0,10	0,20	0,05	0,15	Restante
ER 4047	11,0 - 13,0	0,80	0,30	0,15	0,10	-	0,20	-	0,05	0,15	Restante
ER 5183	0,40	0,40	0,10	0,50 - 1,00	4,30 - 5,20	0,05 - 0,25	0,25	0,15	0,05	0,15	Restante
ER 5356	0,25	0,40	0,10	0,05 - 0,20	4,50 - 5,50	0,05 - 0,20	0,10	0,06 - 0,20	0,05	0,15	Restante
ER 5556	0,25	0,40	0,10	0,50 - 1,00	4,70 - 5,50	0,05 - 0,20	0,25	0,05 - 0,20	0,05	0,15	Restante

Fonte: Adaptado de ASM, 1983.

A escolha do metal de adição mais adequado para uma determinada aplicação pode ter vários níveis de complexidade. Pode ser simples, quando as estruturas são fabricadas a partir de ligas usuais, as práticas empregadas na fabricação são comuns, e as condições de serviço às quais ficam expostas são consideradas normais (sem esforços complexos). Por outro lado, para ligas especiais, procedimentos de fabricação ou condições de serviço específicos, podem ser necessários maiores estudos para escolha do metal de adição

(ALCAN, 2001). A Tabela 4 apresenta as propriedades típicas de algumas ligas de metal de adição comumente utilizadas, com destaque para a liga utilizada neste trabalho.

Tabela 4 – Propriedades típicas de algumas ligas de metal de adição comumente utilizadas, com destaque para a liga utilizada neste trabalho.

Liga	Ductilidade da solda (% alongamento)	Tenacidade ao crescimento de trincas	Resistência a trincas de solidificação	L.R.T. típico (MPa)
ER 1100	Alto (55)	Bom	Bom	Baixo (90)
ER 4043	Baixo (15)	Baixo	Muito bom	Baixo (193)
ER 4047	Baixo (13)	Baixo	Excelente	Alto (262)
ER 5183	Bom (25)	Alto	Bom	Alto (283)
ER 5356	Alto (35)	Muito alto	Bom	Alto (262)
ER 5556	Bom (25)	Alto	Bom	Alto (290)

Fonte: Adaptado de HOBART, 2013.

Os fatores que influenciam na escolha do metal de adição são composição química do metal base, geometria da junta, diluição, resistência mecânica e ductilidade do metal de solda, tendência ao fissuramento a quente, resistência à corrosão em serviço, comportamento da solda em temperaturas elevadas, fluidez do metal de solda, diferença de tonalidade entre o metal de solda e o metal base após a anodização, dentre outros.

A Tabela 5 apresenta um guia para seleção do metal de adição para soldagem em geral, com destaque para as ligas utilizadas neste trabalho. As descrições das legendas de “a” a “j” são apresentadas na sequência da Tabela 5. Basicamente, os metais de adição que poderiam ser utilizados em todas as configurações de juntas utilizadas nesse trabalho (3104-3104, 5052-5052 e 3104-5052) são nas ligas ER4043, ER5356, ER5183 e ER5556.

Tabela 5 – Guia para seleção do metal de adição para soldagem em geral de algumas ligas dos grupos 1XXX, 3XXX e 5XXX, com destaque para as ligas utilizadas neste trabalho.

Metal Base	5456	5454	5154, 5254	5086	5083	5052, 5652	5005, 5050	3004, 3104	1100, 3003	1060, 1070, 1080, 1350
1060, 1070, 1080, 1350	5356 c	4043 i	4043 e, i	5356 c	5356 c	4043 i	1100 c	4043	1100 c	1188 j
1100, 3003	5356 c	4043 e, i	4043 e, i	5356 c	5356 c	4043 e, i	4043 e	4043 e	1100 c	-
3004, 3104	5356 e	5654 b	5654 b	5356 e	5356 e	4043, 5356 e, i	4043 e	4043, 5356 e	-	-
5005, 5050	5356 e	5654 b	5654 b	5356 e	5356 e	4043 e, i	4043 d, e	-	-	-
5052, 5652	5356 b	5654 b	5654 b	5356 e	5356 e	5654 5356 a, b, c	-	-	-	-
5083	5183 e	5356 e	5356 e	5356 e	5356 e	-	-	-	-	-
5086	5356 e	5356 b	5356 b	5356 e	-	-	-	-	-	-
5154, 5254	5356 b	5654 b	5654 a, b	-	-	-	-	-	-	-
5454	5356 b	5554 c,e	-	-	-	-	-	-	-	-
5456	5556 e	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Adaptado de ASM, 1983.

- a. Os metais base de ligas 5254 e 5652, são usados em serviços com peróxido de hidrogênio. O metal de adição 5654 é usado para a soldagem de ambas as ligas para serviços em baixas temperaturas, iguais ou inferiores a 65°C.
- b. Os metais de adição 5183, 5356, 5554, 5556, 5654 podem ser usados. Em alguns casos, esses metais de adição proporcionam:
 - Melhor semelhança de tonalidade após o tratamento de anodização;
 - Maior resistência da solda
 - Maior ductilidade da solda. O metal de adição 5554 é adequado para serviços em temperaturas elevadas
- c. O metal de adição 4043 pode ser usado em algumas especificações.
- d. Em alguns casos é usado metal de adição com a mesma composição química do metal base.
- e. Os metais de adição 5183, 5356 ou 5556 podem ser usados.
- f. O metal de adição 4145 pode ser usado em algumas aplicações.
- g. O metal de adição 2319 pode ser usado em algumas aplicações.
- h. O metal de adição 5039 pode ser usado em algumas aplicações.
- i. O metal de adição 4047 pode ser usado em algumas aplicações.
- j. O metal de adição 1100 pode ser usado em algumas aplicações.

A Tabela 6 apresenta a classificação de algumas propriedades da junta soldada com diferentes ligas de metal de adição, para cada configuração de junta soldada utilizada neste trabalho.

Tabela 6 – Classificação de algumas propriedades do metal soldado para diferentes ligas de metal de adição.

	3104-3104				5052-5052				3104-5052			
	ER4043	ER 5183	ER 5356	ER 5556	ER 4043	ER 5183	ER 5356	ER 5556	ER 4043	ER 5183	ER 5356	ER 5556
Sensibilidade a trincas	A	B	B	B	A	A	A	A	A	B	B	B
Resistência	D	A	B	A	C	A	B	A	C	A	B	A
Ductilidade	D	C	B	C	C	B	A	B	C	B	A	B
Tenacidade	D	B	A	B	D	B	A	B	D	B	A	B

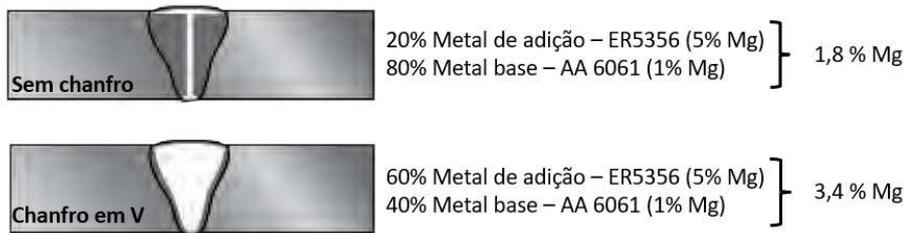
Fonte: Adaptado de HOBART, 2013.

As classificações A, B, C e D das propriedades do metal de adição são valores relativos à soldagem. Uma classificação A é a mais adequada para a propriedade de soldagem indicada e a classificação D é a menos adequada. Uma classificação em branco indica que o metal de adição não é recomendado para essa aplicação específica de propriedade de soldagem.

Verma *et al.* estudaram o efeito dos metais de adição nas ligas ER4043 e ER5356 nas propriedades mecânicas e metalúrgicas de juntas de alumínio soldadas por processo TIG nas ligas 5052 e 6061. O metal de adição na liga ER5356 foi capaz de melhorar as propriedades mecânicas e as características microestruturais das amostras quando comparadas com a ER4043 (YELAMASETTI, 2021).

Segundo Hobart (2013), a composição química final do cordão de solda depende, dentre outros fatores, do tipo de junta utilizada, com ou sem chanfro. O chanfro em V permite maior participação do metal de adição na composição química final do cordão que a junta de topo reta (sem chanfro). A Figura 10 apresenta uma comparação da participação do metal de adição e do metal base no teor de Mg em uma junta de topo com chanfro em V e sem chanfro. No material utilizado nesse trabalho, devido à baixa espessura, não foi utilizado chanfro.

Figura 10 – Participação do metal de adição na composição química do cordão de solda.

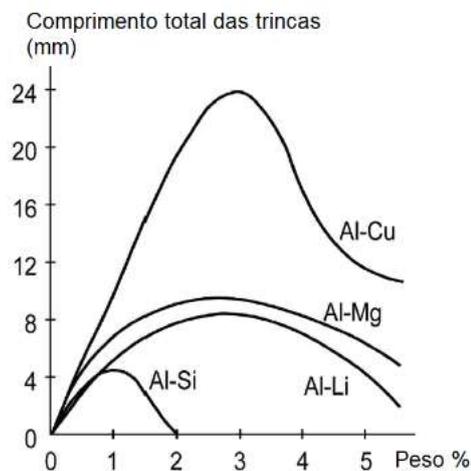


Fonte: Adaptado de HOBART, 2013.

3.2.5 Soldabilidade

A *American Welding Society* (AWS) define soldabilidade como “a capacidade de um material ser soldado nas condições de fabricação impostas por uma estrutura específica projetada de forma adequada e de se comportar adequadamente em serviço”. Um material com boa soldabilidade deve se apresentar, após a soldagem, sem concentração excessiva de tensões internas e com boas propriedades mecânicas de tenacidade e ductilidade. A soldabilidade depende de fatores como o tipo de liga do metal base, o método de soldagem, o metal de adição, a forma das peças a serem soldadas, o grau de liberdade de movimento das peças durante a soldagem, dentre outros. A Figura 11 ilustra a sensibilidade do material relacionado a trincas geradas por esfriamento da solda para diferentes (% peso) em vários grupos de ligas de alumínio.

Figura 11 – Sensibilidade a trincas em diferentes grupos de ligas de alumínio quando soldadas.



Fonte: Adaptado de WEMAN, 2012.

Na soldagem de uma liga de alumínio específica, a escolha do metal de adição é fator preponderante para evitar a ocorrência de trincas de solidificação. Além disto, os aumentos de espessura e tamanho de grão do metal, do aporte de energia fornecida pelo processo de soldagem, da diluição e do grau de restrição a movimentos também favorecem a formação de trincas. Quando o consumível possui temperatura de fusão similar ou inferior à do metal base, a tendência a fissuração intergranular na ZTA é bastante reduzida. O consumível com esta característica minimiza as tensões impostas pela contração decorrentes da solidificação do metal de solda, até que as fases de baixo ponto de fusão existentes na ZTA se solidifiquem e desenvolvam resistência suficiente para suportar as tensões (ALCAN, 2001).

A soldagem utilizando consumível com maior teor de liga que o metal base é um recurso eficaz para se reduzir a tendência a trincas de solidificação. No caso dos metais de solda nas ligas de Al-Mg (Grupo 5XXX), a sensibilidade a trincas de solidificação é maior quando contém cerca de 0,5 a 2,0% de magnésio. A tendência a trincas diminui quando a composição do metal de solda está abaixo ou acima desta faixa. Por exemplo, se a liga 5052 (2,5% de Mg) for soldada com metal de adição ER-5554 (2,7% de Mg), a solda apresentará mais suscetibilidade à trinca do que se fosse soldada com a liga ER-5356 (5,0% de Mg) (ALCAN, 2001).

A soldabilidade das ligas de alumínio pode ser dividida em:

- fácil de soldar: materiais que podem ser utilizados em soldas estruturais;
- soldagem limitada: materiais que devem ser evitados em soldas estruturais;
- inadequados: materiais que não devem ser utilizados em soldas estruturais.

A Tabela 7 apresenta a soldabilidade de diferentes ligas de alumínio não tratáveis termicamente para diferentes tipos de solda, com destaque para as ligas e o processo utilizados nesse trabalho.

Tabela 7 – Soldabilidade de diferentes ligas de alumínio não tratáveis termicamente, com destaque para os materiais utilizados no presente trabalho.

EN AW alloy	Gas welding	MMA welding	MIG / TIG welding	Resistance welding	Brazing	Soldering with flux
1060	A	A	A	B	A	A
1100	A	A	A	A	A	A
1350	A	A	A	B	A	A
3003	A	A	A	A	A	A
3004, 3104	B	A	A	A	B	B
5005	A	A	A	A	B	B
5050	A	A	A	A	B	B
5052, 5652	A	A	A	A	C	C
5083	C	C	A	A	X	X
5086	C	C	A	A	X	X
5154, 5254	B	B	A	A	X	X
5454	B	B	A	A	X	X
5456	C	C	A	A	X	X

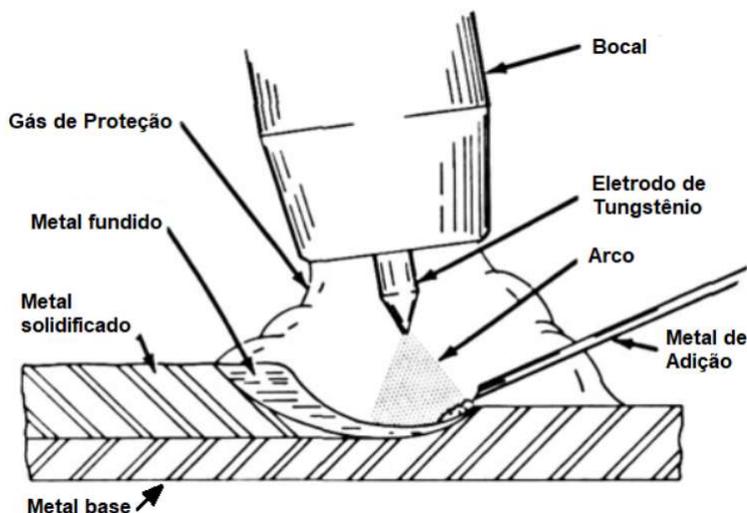
Fonte: Adaptado de WEMAN, 2012.

A classificação A indica que a liga tem boa soldabilidade, B que a soldabilidade é aceitável para a maioria das aplicações, mas pode exigir métodos ou testes especiais para encontrar os parâmetros de soldagem corretos, C que a soldabilidade é limitada e X que não é recomendada. Pode-se observar que ambas as ligas estudadas (3104 e 5052) possuem boa soldabilidade para o processo TIG.

3.2.6 Soldagem TIG

A soldagem a arco tungstênio com a atmosfera gasosa (SATG), ou mais comumente designada como soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*), é um processo de soldagem em que o arco elétrico é estabelecido entre um eletrodo de tungstênio não-consumível e a peça, numa atmosfera de gás inerte (MATHERS, 2002). A Figura 12 apresenta um esquema do processo de soldagem TIG.

Figura 12 – Ilustração do processo de soldagem TIG.

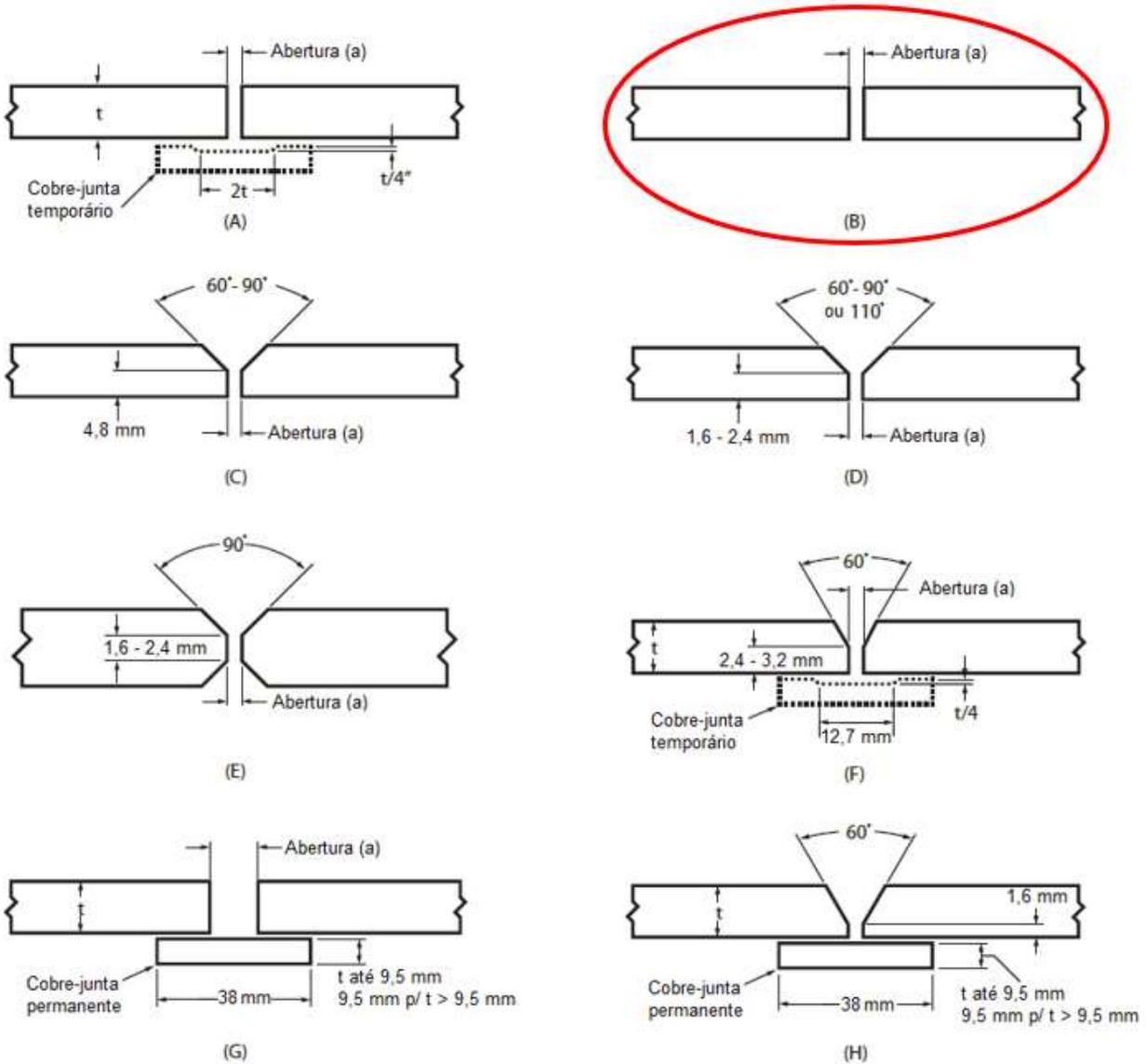


Fonte: Adaptado de ANTONINI, 2014.

No processo TIG o arco elétrico pode ser obtido por meio de corrente alternada (CA), corrente contínua e eletrodo positivo (CCEP) ou corrente contínua e eletrodo negativo (CCEN). Entretanto, na indústria em geral, o processo TIG (CA) é o mais aplicado na soldagem das ligas de alumínio. Por isso, quando se refere ao processo TIG sem outra especificação, subentende-se que o processo empregado é o CA. Ele foi desenvolvido antes do processo MIG, bem como foi o primeiro processo de soldagem com proteção de gás inerte adequado para soldar o alumínio. Durante muito tempo foi utilizado para soldar uma vasta variedade de produtos e estruturas nas mais diversas espessuras, mas, com a subsequente viabilidade do processo MIG com suas altas velocidades, arco com mais penetração e outras vantagens, o TIG passou a ser aplicado principalmente em espessuras mais finas (como é o caso do material em estudo), em juntas complexas e em soldas autógenas. Um arco de soldagem TIG ideal é aquele que fornece a máxima quantidade de calor ao metal base e a mínima ao eletrodo. Além disso, por meio de sua ação de limpeza deve promover a remoção do óxido de alumínio na frente da poça de solda (ALCAN, 2001).

Os principais tipos de juntas de topo recomendadas para a soldagem TIG (CA) estão representados na Figura 13, com destaque para o tipo de junta adotado para este trabalho. A Tabela 8 apresenta alguns parâmetros de solda recomendados de acordo com a espessura (t) do material.

Figura 13 – Tipos de juntas de topo recomendadas para o processo TIG (CA), com destaque para o tipo de junta adotado para este trabalho.



Fonte: Adaptado de HOBART, 2013.

Tabela 8 – Recomendações de parâmetros de soldagem TIG para juntas de topo, com destaque para alguns parâmetros de solda utilizados neste trabalho.

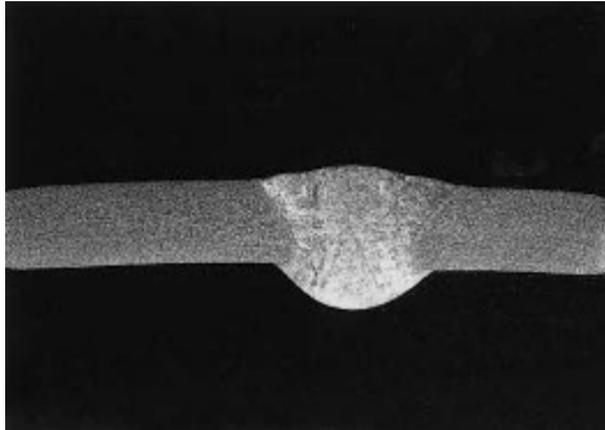
Espessura (t) (mm)	Posição de Soldagem *	Tipo de Junta	Abertura (a) (mm)	Pré- Aquecimento	Passes de solda	Diâmetro do arame (mm)	Vazão de Argônio (l/min)	Corrente alternada (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
1,6	P, V, H	A ou B	0 - 1,6	Não	1	2,4	9,4	70 - 100	20 - 25
	S	A ou B	0 - 1,6	Não	1	2,4	11,8	60 - 75	20 - 25
2,4	P	A ou B	0 - 2,4	Não	1	3,2	9,4	95 - 115	20 - 25
	V, H	A ou B	0 - 2,4	Não	1	2,4 - 3,2	9,4	85 - 110	20 - 25
	S	A ou B	0 - 2,4	Não	1	2,4 - 3,2	11,8	90 - 110	20 - 25
3,2	P	A ou B	0 - 3,2	Não	1 - 2	3,2 - 4,0	9,4	125 - 150	25 - 30
	V, H	A ou B	0 - 2,4	Não	1 - 2	3,2	9,4	110 - 140	25
	S	A ou B	0 - 2,4	Não	1 - 2	3,2 - 4,0	11,8	115 - 40	25 - 30
4,8	P	D - 60°	0 - 3,2	Não	1 - 2	4,0 - 4,8	11,8	170 - 190	25 - 30
	V	D - 90°	0 - 2,4	Não	1 - 2	4,0	11,8	160 - 175	25 - 30
	H	D - 60°	0 - 2,4	Não	1 - 2	4,0	11,8	155 - 170	25 - 30
	S	D - 110°	0 - 2,4	Não	1 - 2	4,0	14,2	165 - 180	25 - 30
6,4	P	D - 60°	0 - 3,2	Não	2	4,8	14,2	220 - 275	20 - 25
	V	D - 60°	0 - 2,4	Não	2	4,8	14,2	200 - 240	20 - 25
	H	D - 90°	0 - 2,4	Não	2 - 3	4,0 - 4,8	14,2	190 - 225	20 - 25
	S	D - 110°	0 - 2,4	Não	2	4,8	14,2	210 - 250	20 - 25
9,5	P	D - 60°	0 - 3,2		2	4,8 - 6,4	16,5	315 - 375	20 - 25
	P	E	0 - 2,4		2	4,8 - 6,4	16,5	340 - 380	20 - 25
	V	D - 60°	0 - 2,4	Opcional até 121°C máx.	3	4,8	16,5	260 - 300	20 - 25
	V, H, S	E	0 - 2,4		2	4,8	16,5	240 - 300	20 - 25
	H	D - 90°	0 - 2,4		3	4,8	16,5	240 - 300	20 - 25
	S	D - 110°	0 - 2,4		3	4,8	18,9	260 - 300	20 - 25

* P = Plana; H = Horizontal; V = Vertical; S = Sobrecabeça

Fonte: Adaptado de HOBART, 2013.

O gás preferido para a soldagem TIG (CA) de alumínio é o argônio, embora possam ser usadas misturas de hélio e argônio-hélio. O argônio fornece um cordão de solda de penetração ampla e rasa, e deixa a solda brilhante e com aparência prateada. O argônio também deixa o arco mais estável e a ignição mais fácil (MATHERS,2002). A Figura 14 apresenta uma junta de topo TIG sem chapa de suporte (cobre-junta) em alumínio com espessura de 3,0 mm.

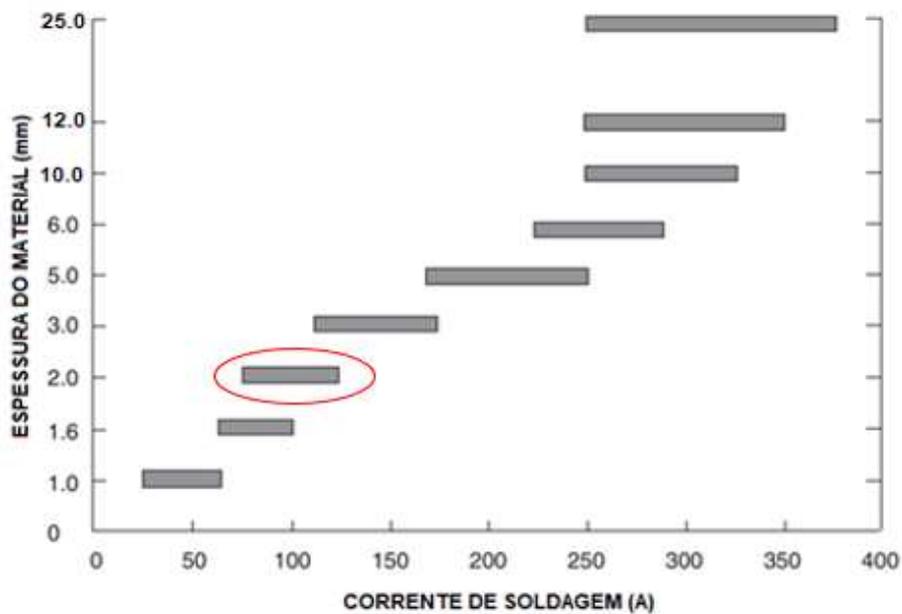
Figura 14 – Junta de topo sem cobre-junta com solda TIG em alumínio com espessura de 3,0 mm.



Fonte: MATHERS, 2002.

A Figura 15 apresenta os parâmetros de corrente sugeridos para uma soldagem utilizando argônio como gás de proteção.

Figura 15 – Parâmetros de corrente sugeridos para uma soldagem utilizando argônio como gás de proteção, com destaque para o parâmetro dos materiais utilizados.



Fonte: Adaptado de MATHERS, 2002.

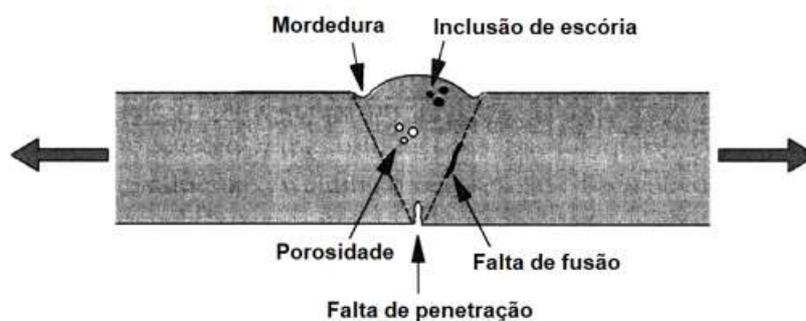
O metal de adição sob a forma de vareta de solda é comumente utilizado no processo TIG e em geral é alimentado manualmente, embora a soldagem mecanizada nesses processos possa envolver tanto a alimentação manual da vareta de solda como o emprego de um mecanismo de alimentação.

Babu *et al.* (2019) estudaram a influência dos principais parâmetros de processo na soldagem TIG nas propriedades mecânicas da liga 5059 utilizando o método ANOVA (análise de variância). Os resultados indicaram que a velocidade de soldagem tem a maior influência, seguida da corrente de soldagem e da vazão de gás.

3.2.6.1 Problemas de soldagem

A Figura 16 apresenta um esboço de uma junta de topo soldada em apenas um dos lados, indicando alguns defeitos relacionados.

Figura 16 – Alguns defeitos relacionados a uma junta soldada.



Fonte: Adaptado de SCHIJVE, 2001.

Segundo Schijve (2001) sob uma carga de tensão cíclica, a falta de penetração é o tipo de defeito mais grave. Pode ocorrer a uma distância considerável e o defeito é semelhante a uma trinca superficial. A mordedura pode ser grave se o perfil for acentuado na parte inferior do rebaixo. Se não houver rebaixo, a transição do reforço de solda para o metal base também é um concentrador de tensão no pé da solda. Inclusões de escória podem

ser defeitos graves para iniciação de trincas de fadiga, mais do que a porosidade devido ao formato desses defeitos.

Os defeitos determinam a qualidade da solda e podem existir diferenças significativas entre soldas realizadas manualmente e aquelas automatizadas. A qualidade de uma soldagem manual depende da competência do operador de solda, e requer treinamento, prática e habilidade. Os processos automatizados foram desenvolvidos especificamente para a produção rápida de cordões de solda longos e para eliminar o fator humano, obtendo assim uma qualidade de solda mais homogênea (SCHIJVE, 2001).

A Tabela 9 apresenta os principais defeitos encontrados na soldagem TIG e suas causas, de acordo com a *American Welding Society* (AWS, 2001).

Tabela 9 – Principais defeitos da soldagem TIG e suas causas.

Defeito de solda	Possíveis causas
Porosidade	Aprisionamento de gás por condição inadequada do gás de proteção; Hidrogênio proveniente de umidade, superfície do arame suja, óleo no metal base; Taxa de resfriamento excessiva da poça de solda, alimentação incorreta do eletrodo; Transferência de arco incorreta causada por corrente inadequada.
Falta de fusão	Excesso de óxidos no metal base; Preparação inadequada das bordas; Arco muito longo ou ângulo da tocha inadequado; Peças ou eletrodos sujos; Corrente insuficiente.
Falta de penetração	Preparação inadequada das bordas para as características do arco (espaçamento muito estreito ou muito raso); Excesso de metal de adição na poça de solda; Corrente insuficiente; Arco muito longo; Velocidade de soldagem muito alta.
Trincas	Tensões localizadas excedem a resistência máxima do metal; Geralmente está associada ao aumento de tensão próximo a descontinuidades em soldas e metais base, ou próximo a entalhes associados à soldagem.

Fonte: O autor.

3.3 FADIGA

Componentes de máquinas, veículos e estruturas são frequentemente submetidos a cargas repetidas, e as tensões cíclicas resultantes podem levar a danos físicos microscópicos nos materiais envolvidos. Mesmo em tensões bem abaixo da resistência máxima de um determinado material, esse dano microscópico pode se acumular com o ciclo contínuo até que se desenvolva em uma trinca ou outro dano macroscópico que leve à falha do componente. Este processo de dano e falha devido ao carregamento cíclico é chamado de fadiga (DOWLING, 2007).

As falhas resultam da ação simultânea de tensão cíclica, deformação plástica e tensão de tração. As duas primeiras são responsáveis pela iniciação da trinca enquanto a última é responsável por sua propagação (ASM, 1986).

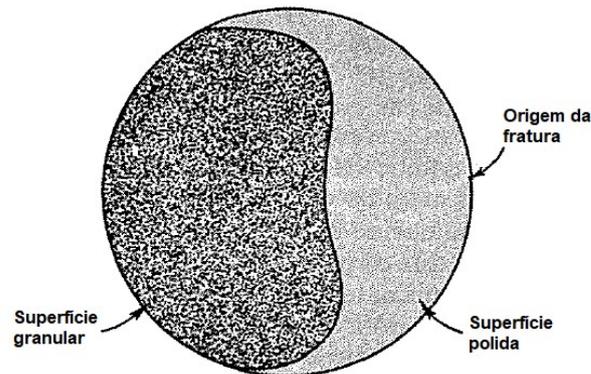
3.3.1 Nucleação e propagação das trincas

A fadiga é dividida em 3 estágios. O primeiro estágio ou estágio 1, é a iniciação da trinca, que depende do material, da geometria da peça, das condições da superfície e do histórico de tensões e deformações atuantes nele. O segundo estágio ou estágio 2, é a propagação da trinca, que depende do histórico dos fatores de intensidade de tensões a que a peça é submetida. O último estágio ou estágio 3, é a fratura súbita da seção transversal restante (ASM, 1986).

A fratura por fadiga sempre se inicia como uma pequena trinca que, sob aplicações repetidas de tensão, aumenta de tamanho. À medida que a trinca cresce, a seção transversal resistente do corpo de prova diminui, resultando em um aumento da tensão na seção. Finalmente, é atingido o ponto onde a seção resistente restante não é capaz de suportar a carga e o avanço da fratura se torna catastrófico. Dada a maneira pela qual a fratura se desenvolve, as superfícies de uma fratura de fadiga se dividem em duas áreas de aparências distintas, como mostra esquematicamente a Figura 17. Na maioria dos casos, a superfície apresentará um aspecto polido na região onde a trinca se desenvolveu lentamente. Este aspecto decorre do atrito entre as superfícies da trinca, à medida que o corpo de prova é deformado em sentidos opostos, em cada ciclo de tensão. No último estágio, quando a

amostra finalmente se rompe, não há essa ação de atrito e as superfícies desenvolvidas nessa ocasião são grosseiras e irregulares (REED-HILL, 1982).

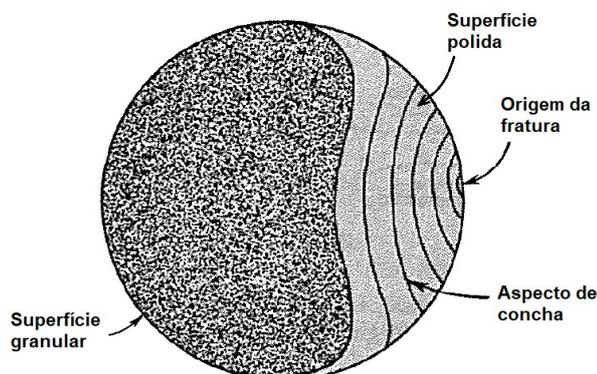
Figura 17 – Superfície de uma fratura de fadiga com duas regiões distintas, sendo uma região com aspecto polido e outra com aspecto granular.



Fonte: Adaptado de REED-HILL, 1982.

Em componentes mecânicos, as amplitudes dos ciclos de tensão não têm sempre o mesmo valor. Considere por exemplo um eixo motor de um automóvel, no qual os ciclos de tensão são muito maiores em período de rápida aceleração do que quando o carro se move em velocidade uniforme. Sob amplitudes variáveis de tensão, a trinca pode parar de crescer quando a tensão é baixa e continua crescendo quando ela aumenta. Esta alternância de períodos de rápido crescimento e períodos de pequeno ou nenhum crescimento muda o atrito entre a superfície da trinca, fazendo com que a superfície possa apresentar o aspecto de uma concha. Geralmente, essas marcas em forma de anel são concêntricas com a origem da fratura e tornam possível a sua determinação. A existência dessas marcas na superfície de fratura de um objeto metálico é também uma boa evidência de que a peça fraturou por um mecanismo de fadiga (REED-HILL, 1982). A Figura 18 apresenta esquematicamente essa condição.

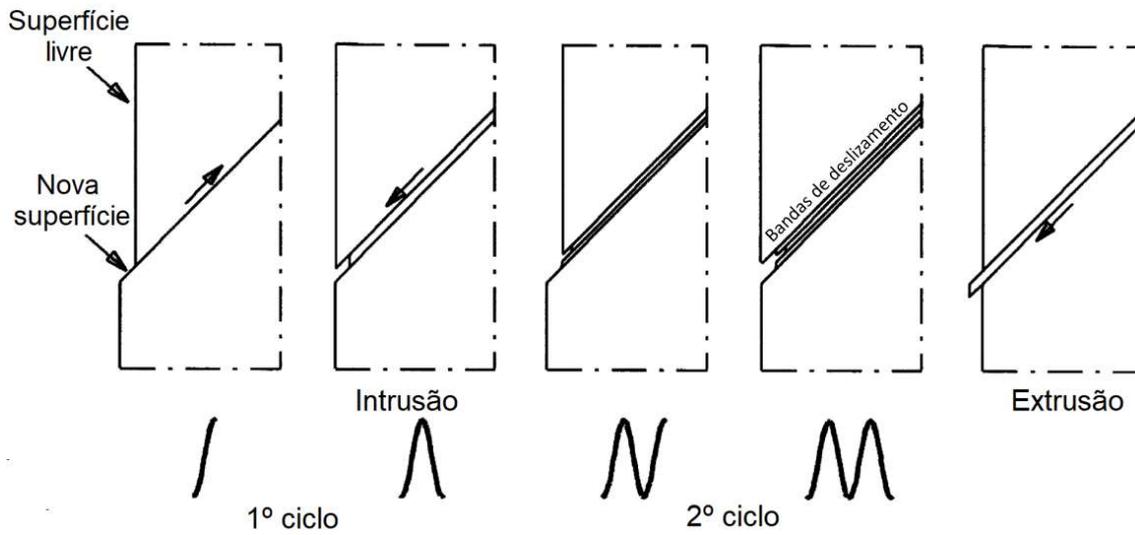
Figura 18 – Fraturas de fadiga de peças sujeitas a ciclos de tensões variáveis com o tempo apresentam na área polida o aspecto de uma concha.



Fonte: Adaptado de REED-HILL, 1982.

Em geral, a nucleação tem início na superfície do material, próxima a entalhes. O mecanismo do estágio 1 é explicado pelo movimento das bandas de deslizamento a um nível microscópico conduzido pela tensão de cisalhamento máxima. Esse mecanismo é limitado a uma pequena quantidade de grãos, que estão sujeitos à deformação plástica envolvendo o deslizamento de alguns planos cristalográficos (LASSEN; RÉCHO, 2006). A iniciação de trincas de fadiga e o crescimento de trincas são uma consequência do deslizamento cíclico, que implica na deformação plástica cíclica, ou em outras palavras, movimentação de discordâncias. A fadiga ocorre em amplitudes de tensão abaixo da tensão de escoamento. Em um nível de tensão tão baixo, a deformação plástica é limitada a um pequeno número de grãos do material. Esta microplasticidade ocorre preferencialmente em grãos na superfície do material por causa da menor restrição ao deslizamento. Na superfície livre de um material, o material circundante está presente apenas de um lado. O outro lado é o ambiente, geralmente gasoso (por exemplo, ar) ou líquido (por exemplo, água do mar). Como consequência, a deformação plástica nos grãos da superfície é menos restrita pelos grãos vizinhos do que nos grãos da subsuperfície. No período de iniciação da trinca, a fadiga é um fenômeno de superfície (SCHIJVE, 2001). A Figura 19 mostra o ciclo de deslizamento que leva à nucleação da trinca, que é o estágio 1.

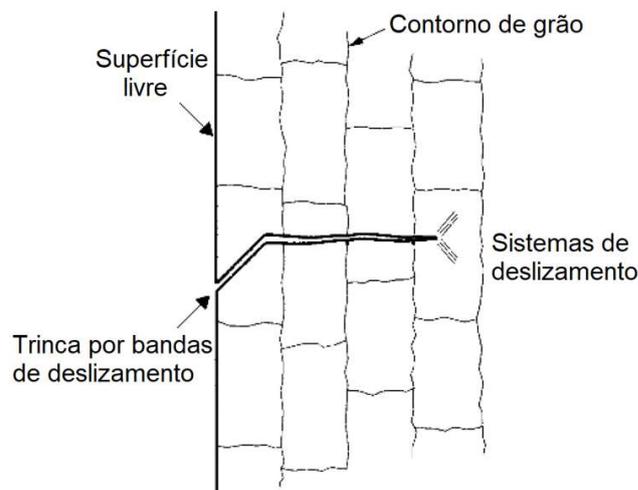
Figura 19 – Ciclo de deslizamento levando à nucleação da trinca.



Fonte: Adaptado de SCHIJVE, 2001.

No estágio 2, a trinca inicia sua propagação no sentido perpendicular às tensões normais. Esse crescimento pode ser descrito por uma abertura na frente da trinca, seguida pelo seu fechamento durante o ciclo de carregamento, resultando na formação de pequenas estrias na região da falha. Após concluído esse processo, o ciclo de carregamento à frente da trinca recebe um pequeno acréscimo (SCHIJVE, 2001). A Figura 20 apresenta a seção transversal de uma microtrinca.

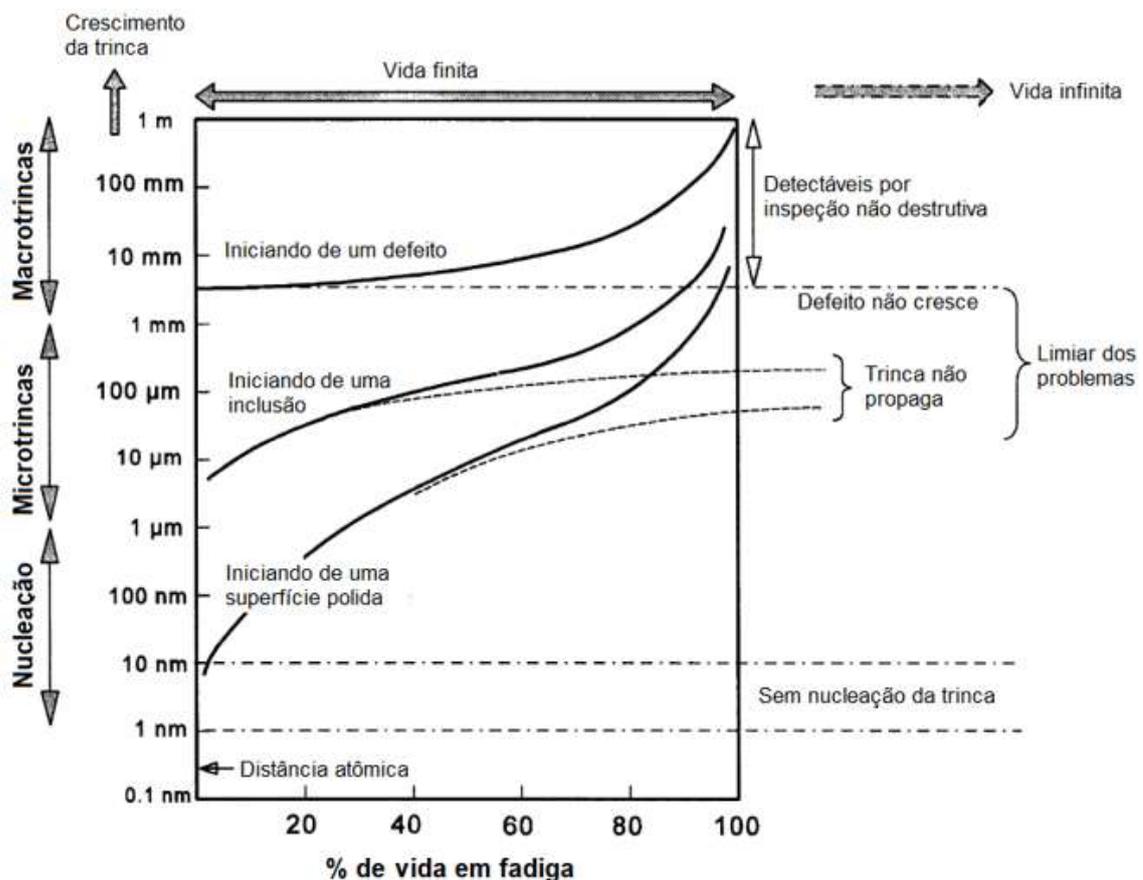
Figura 20 – Seção transversal de uma microtrinca.



Fonte: Adaptado de SCHIJVE, 2001.

A resistência à propagação da trinca e a penetração da trinca no material depende de inúmeras propriedades do material, e o crescimento da trinca não é mais um fenômeno de superfície. O período de iniciação deve ser concluído quando o crescimento da microtrinca não depende mais das condições da superfície do material. A Figura 21 apresenta diversos aspectos relacionados aos mecanismos de iniciação e propagação das trincas por fadiga. A curva superior pode caracterizar uma trinca a partir de um defeito do material que não deveria estar presente, como por exemplo, um defeito em uma junta soldada (SCHIJVE, 2001).

Figura 21 – Diversos aspectos referentes à iniciação e propagação de trincas por fadiga.

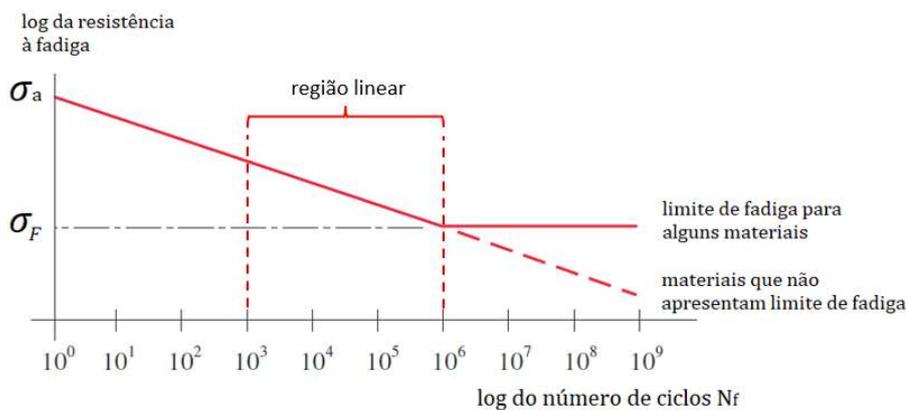


Fonte: Adaptado de SCHIJVE, 2001.

3.3.2 Abordagem tensão-número de ciclos - Curvas S/N

As características da fadiga de alto ciclo geralmente são avaliadas com base em curvas S/N em ensaios de flexão rotativa ou axial. As curvas S/N são diagramas que fornecem a tensão alternada (σ_a) em função da vida (N_f). Essas curvas foram desenvolvidas por meio de experimentos científicos realizados pelo engenheiro alemão August Wöhler, e deram início ao estabelecimento da tensão limite de fadiga (σ_F) (NORTON, 2013). A Figura 22 apresenta uma curva S/N típica.

Figura 22 – Curva S/N típica.



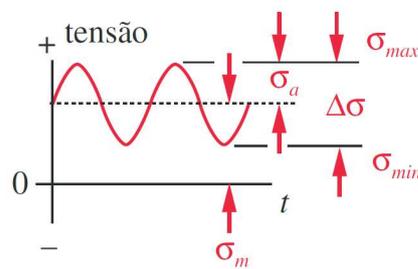
Fonte: Adaptado de NORTON, 2013.

Pode-se observar que a resistência à fadiga decai de forma contínua e linear (em coordenadas log-log) em função do número de ciclos, até atingir uma inflexão por volta do intervalo entre 10^6 e 10^7 ciclos. Essa inflexão define o limite de fadiga σ'_f para o material, cuja definição é o nível de tensão abaixo do qual não ocorrem mais falhas por fadiga, podendo-se continuar os ciclos de tensão ilimitadamente. O termo limite de fadiga é usado para representar a resistência para uma vida infinita somente para os materiais que apresentam essa grandeza característica. Para a região compreendida entre 10^3 e 10^6 , a curva é tratada como linear em escalas logarítmicas. Trata-se de um modelo baseado na tensão, que busca determinar a resistência à fadiga e/ou o limite de fadiga para o material, de modo que as tensões cíclicas possam ser mantidas abaixo deste nível e, com isso, evita-se a falha para o número de ciclos requerido. A peça é, posteriormente, projetada com base na resistência à fadiga do material (ou limite de fadiga) e em um coeficiente de segurança. De

fato, esta abordagem busca manter baixas as tensões locais nos entalhes e, assim, o estágio de iniciação da trinca nunca começa. A suposição é que as tensões e deformações permanecem no regime elástico e que não haja ocorrência de escoamento local para a propagação de uma trinca qualquer (NORTON, 2013).

As funções típicas de tensão-tempo podem ser modeladas como ondas senoidais, conforme demonstrado na Figura 23, que ilustra o modelo de tensão pulsante, na qual todas as componentes têm valor diferente de zero.

Figura 23 – Componentes alternada, média e o intervalo de variação de tensões para tensões cíclicas pulsantes.



Fonte: NORTON, 2013.

A variação da tensão $\Delta\sigma$, a amplitude de tensão (ou tensão alternada) σ_a , a tensão média σ_m , e a razão de tensão R são definidas pelas Equações de 4 a 7, respectivamente.

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (4)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (5)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (6)$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (7)$$

3.3.3 Vida em fadiga em ligas de alumínio

Embora as ligas de alumínio de alta resistência e tenacidade tenham reduzido drasticamente a probabilidade de falhas catastróficas em estruturas, os requisitos de fadiga por corrosão continuarão a ser essenciais para estruturas duráveis, de baixa manutenção e vida útil longa. Um bom projeto, atenção aos detalhes estruturais e inspeção confiável são de importância primordial para controlar a fadiga, e os projetistas geralmente consideram esses fatores mais importantes do que a própria escolha da liga. No entanto, um dos principais desafios enfrentados pelos projetistas e engenheiros de materiais é a extensão da vida útil à fadiga e aumento da eficiência estrutural por meio da seleção ideal e do uso de ligas resistentes à fadiga (ASM, 1996).

Os defeitos estruturais são os principais iniciadores de trincas por fadiga. Sob a ação do carregamento cíclico, uma zona plástica ou região de deformação se desenvolve na extremidade do defeito. Assim a zona de alta deformação torna-se um sítio de iniciação de trinca por fadiga (ASM, 1986). Quando as tensões cíclicas que solicitam o ponto de alta deformação da estrutura (ou componente em questão) são pequenas em relação à resistência ao escoamento do material, a iniciação da trinca por fadiga é lenta, requerendo muitos ciclos de carregamento (CASTRO; MEGGIOLARO, 2009).

A iniciação das trincas por fadiga ocorre de forma preferencial em superfícies livres e o processo de fadiga é influenciado pelo acabamento superficial e pelo tratamento da superfície. Além disso, a nucleação da trinca, do mesmo modo que todo o processo de fadiga, é controlada pela deformação plástica cíclica. Desta forma, espera-se que as trincas se iniciem em pontos de concentração de deformação, os quais estão diretamente relacionados com a concentração de tensão (LUKÁS; KUNZ, 2001).

A existência de entalhes, partículas de segunda fase, inclusões ou precipitados em componentes mecânicos submetidos a carregamentos complexos ou a um carregamento axial que contenha pequenas excentricidades, gera gradientes de tensão. Esse efeito será maior na superfície do material e favorece a iniciação da trinca. Um fator importante é que microtrincas oriundas, por exemplo, de soldas, tratamentos térmicos e conformações mecânicas podem também estar presentes no material antes da aplicação do carregamento cíclico. Quando isto ocorre não há de fato um processo de iniciação de trinca por fadiga, pois

as trincas embrionárias já se encontravam presentes no material antes da aplicação do carregamento cíclico (BARTER *et al.*, 2011).

A vida em fadiga em ligas de alumínio depende de diversos fatores, incluindo a composição química da liga, seu tratamento térmico, sua microestrutura e as condições de carregamento a que é submetida. Ligas de alumínio tratadas termicamente, por exemplo, podem apresentar uma maior resistência à fadiga em comparação com ligas não tratadas termicamente. As diferenças na performance dos materiais podem ser traduzidas em vida útil mais longa, redução de peso e custos de manutenção reduzidos das estruturas de engenharia. As melhorias no desempenho em fadiga em ligas de alumínio foram demonstradas por meio de modificações na composição da liga, na prática de fabricação e nos controles de processamento. Uma melhor compreensão da mecânica da fadiga levou a novas hipóteses com potencial para levar à comercialização de ligas melhoradas para fadiga (ASM, 1996).

3.3.4 Resistência à fadiga em juntas soldadas

Estruturas soldadas de alumínio devido ao baixo peso e alta resistência são amplamente utilizadas nas indústrias naval, aeroespacial, automotiva e outras aplicações em que as soldas são submetidas à ambientes corrosivos e a elevadas temperaturas que requerem tenacidade. A liga 5052 é uma liga de magnésio que possui excelentes características como alta resistência à fadiga e boa resistência à corrosão, sendo bastante utilizada também em ambientes marinhos. Para juntas dissimilares, a seleção do processo de soldagem e do metal de adição são fundamentais para se obter as juntas desejadas. Os processos MIG e TIG são os mais empregados, sendo o processo TIG mais comumente utilizado para produzir estruturas soldadas de alta qualidade (YELAMASSETI *et al.*, 2021).

A maior parte das peças reais apresentam descontinuidades geométricas que são muitas vezes inevitáveis no projeto de componentes estruturais, tais como furos, chanfros e ranhuras, que fazem com que a tensão local seja elevada e por isso são chamados de concentradores de tensão. Os concentradores de tensão merecem uma atenção especial pois sua presença reduz a resistência à fadiga de um componente ou estrutura. Esta ocorrência é simplesmente uma consequência da alta tensão local que provoca a iniciação de trincas por fadiga nessas localizações (STEPHENS *et al.*, 2001).

Parece haver maior dispersão na resistência à fadiga em amostras sem entalhe do que amostras com entalhe. Isso parece ser uma evidência de que a presença de um entalhe minimiza as diferenças, sugerindo assim uma propagação de trinca semelhante após o início da trinca com um entalhe agudo. Nesse contexto, a propagação da vida em fadiga suave está parcialmente associada a variações nas fontes de iniciação de trincas (em imperfeições superficiais ou deformações localizadas). Em geral, no entanto, a abordagem S/N não fornece distinções claras na caracterização dos estágios de iniciação e propagação de trincas por fadiga. As curvas S/N para resistência à fadiga em flexão rotativa de ligas de alumínio sem entalhe tendem a se nivelar à medida que o número de ciclos aplicados se aproxima de 500 milhões. Isso permite a classificação de resistência à fadiga para ensaios de flexão rotativa (ASM, 1996). A Tabela 10 apresenta os limites de fadiga estimados para ensaios de flexão rotativa de algumas ligas de alumínio comerciais, com destaque para as ligas estudadas neste trabalho.

Tabela 10 – Limites de fadiga estimados para ensaios de flexão rotativa de algumas ligas de alumínio comerciais não tratáveis termicamente, com destaque para as ligas estudadas neste trabalho.

Liga e Têmpera	L.R.T MPa	L.E MPa	Alongamento (%)	Limite de Fadiga * MPa
1100 O	90	35	35	35
1100 H12	110	105	12	40
1100 H14	125	115	9	50
1100 H16	145	140	6	60
1100 H18	165	150	5	60
3003 O	110	40	30	50
3003 H12	130	125	10	55
3003 H14	150	145	8	60
3003 H16	180	170	5	70
3003 H18	200	185	4	70
3104 O	180	70	20	95
3104 H32	215	170	10	105
3104 H34	240	200	9	105
3104 H36	260	230	5	110
3104 H38	285	250	5	110
5052 O	195	90	30	110
5052 H32	230	195	12	115
5052 H34	260	215	10	125
5052 H36	275	240	8	130
5052 H38	290	255	7	140

*Baseado em 500.000.000 de ciclos de carregamento totalmente reverso no ensaio de flexão rotativa (R.R Moore)

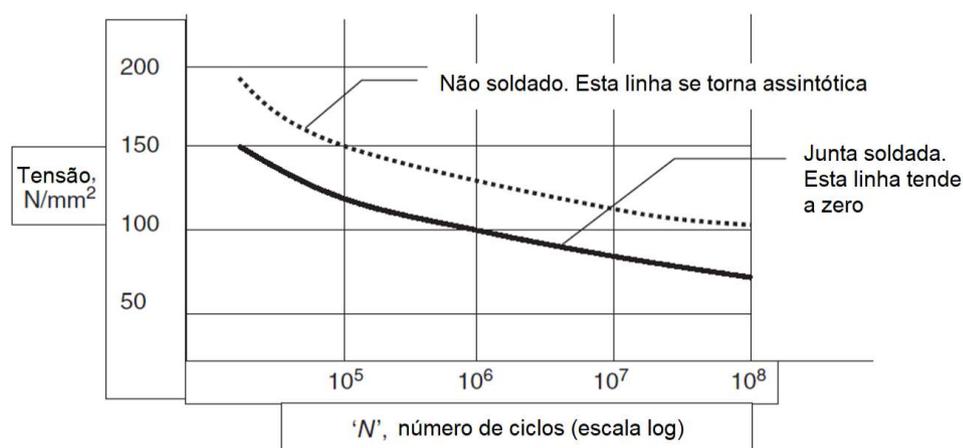
Fonte: Adaptado de ASM, 1996.

A falha por fadiga sempre ocorre na direção normal à tensão principal aplicada e a superfície de fratura é caracterizada pela chamada "marca de praia", onde mudanças no nível

de tensão dão diferentes taxas de propagação de trinca. Isso dá à superfície uma aparência ondulada semelhante a uma praia quando a maré está baixa. A taxa de propagação da trinca é proporcional à faixa de tensão e ao comprimento da trinca. As trincas nos estágios iniciais de crescimento tendem a ser muito pequenas e a crescer lentamente, tornando mais difícil identificá-las durante a inspeção. Para prever a vida em fadiga de uma estrutura, o projetista precisa de detalhes precisos sobre as condições de carregamento em serviço e do desempenho em fadiga de cada um dos componentes da estrutura. Os locais mais comuns para iniciação das trincas são a raiz e face da solda, furos perfurados, cantos usinados e furos roscados. Destes locais, os mais significativos são as soldas. Uma vez que a soldagem tem um efeito significativo na vida em fadiga, é necessário especificar os detalhes e os controles de soldagem de forma mais precisa do que para uma estrutura carregada estaticamente. Contudo, isso terá inevitavelmente, um efeito sobre o custo de fabricação (MATHERS, 2002).

Como abordado na seção 2.3.2, a performance em fadiga pode ser representada graficamente pela curva S/N, em que S é a tensão média e N é o número de ciclos até a falha. Para componentes não soldados, o limite de fadiga é atingido onde abaixo de uma certa tensão a falha não irá ocorrer, independentemente do número de ciclos. Juntas soldadas, no entanto, não exibem limite de fadiga. A falha irá ocorrer se uma quantidade suficiente de ciclos for aplicada (MATHERS, 2002). A Figura 24 apresenta a diferença entre o comportamento em fadiga de uma junta soldada e outra não soldada.

Figura 24 – Curvas S/N para a liga 5083 soldada e não soldada.

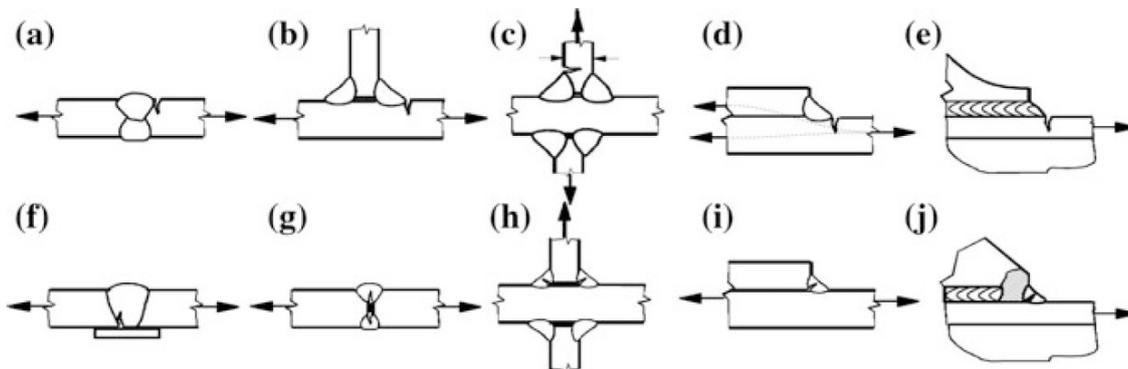


Fonte: Adaptado de MATHERS, 2002.

O processo de soldagem resulta em uma redução substancial na vida em fadiga e na eliminação do limite de fadiga. Mudanças abruptas na seção como entalhes e cantos também

reduzem a resistência à fadiga. De acordo com o IIW, a resistência à fadiga em juntas soldadas de alumínio varia entre 1/5 e 1/30 do limite de resistência à tração, além disso, nas estruturas soldadas com chapas finas, os defeitos de soldagem reduzirão ainda mais a resistência à fadiga (XU, 2022). A Figura 25 apresenta pontos críticos sujeitos a trincas em diferentes tipos de juntas soldadas.

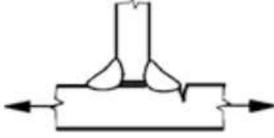
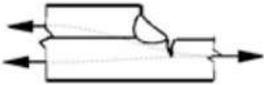
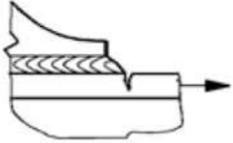
Figura 25 – Pontos críticos sujeitos a trincas em diferentes tipos de juntas soldadas. (a) a (e) – trinca iniciando no pé da solda. (f) a (j) – trinca iniciando na raiz da solda.



Fonte: HOBACHER, 2016.

A avaliação de fadiga em detalhes estruturais classificados e juntas soldadas é baseada na faixa de tensão nominal $\Delta\sigma$. Na maioria dos casos, os detalhes estruturais são avaliados com base na faixa máxima de tensão principal na seção onde a potencial trinca por fadiga é considerada. Dentro dos limites impostos pelas considerações de resistência estática, as curvas de fadiga das juntas soldadas são independentes da resistência à tração do material. Cada curva S/N é identificada pela resistência à fadiga característica do detalhe em MPa em 2 milhões de ciclos (2×10^6 ciclos). Este valor é a classe de fadiga, designada como FAT (HOBACHER, 2016). A Figura 26 apresenta curvas de variação da tensão para componentes soldados de alumínio de várias classes.

Tabela 11 – Classificação de algumas juntas considerando pontos críticos sujeitos a trincas (*hot spot*).

Detalhe da Estrutura	Descrição	Requisitos	FAT (Alumínio)
	Junta de topo	Como soldado; NDT	40
	Junta de filete sem carga	Acessório transversal sem transporte de carga; Não mais espesso que a chapa principal; Como soldado	40
	Chapa de cobertura, juntas similares	Como soldado	40
	Extremidades de suporte, extremidade de reforço longitudinal	Junta de filete com solda ao redor ou não; Como soldado	40

Fonte: Adaptado de HOBACHER, 2016.

3.3.5 Análise dos dados de fadiga

Vários modelos podem ser empregados para a análise dos dados de fadiga. Dentre os mais usados estão a Lei de Basquin, dada pela Equação 8, e o modelo linear apresentado na norma ASTM E739 – *Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ε-N) Fatigue Data*, conforme apresentado na Equação 9.

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (8)$$

Em que σ_a é a amplitude de tensão, $2N_f$ é o número de reversões até a falha, sendo cada ciclo de tensão constituído por duas reversões, σ'_f é o coeficiente de resistência à fadiga e b é o expoente de resistência à fadiga. Esse modelo é adequado para representar o comportamento em fadiga sob carregamento reverso, ou seja, com razão de tensão $R = -1$.

$$Y = A + BX \quad (9)$$

Ao empregar a Equação 9, pode-se adotar a tensão máxima como variável independente e a vida em termos no número de ciclos para a falha como variável dependente, conforme as Equações 10 e 11.

$$X = \sigma_{max} \quad (10)$$

$$Y = \log(N_f) \quad (11)$$

A Lei de Basquin pode ser reescrita de forma similar ao modelo linear. Tomando os logaritmos e rearranjando os termos, obtemos as Equações 12 a 14.

$$\log(2N_f) = \frac{-1}{b} \log(\sigma'_f) + \frac{1}{b} \log(\sigma_a) \quad (12)$$

$$b = \frac{1}{B} \quad (13)$$

$$\sigma'_f = 10^{-Ab} \quad (14)$$

4 MATERIAIS E MÉTODOS

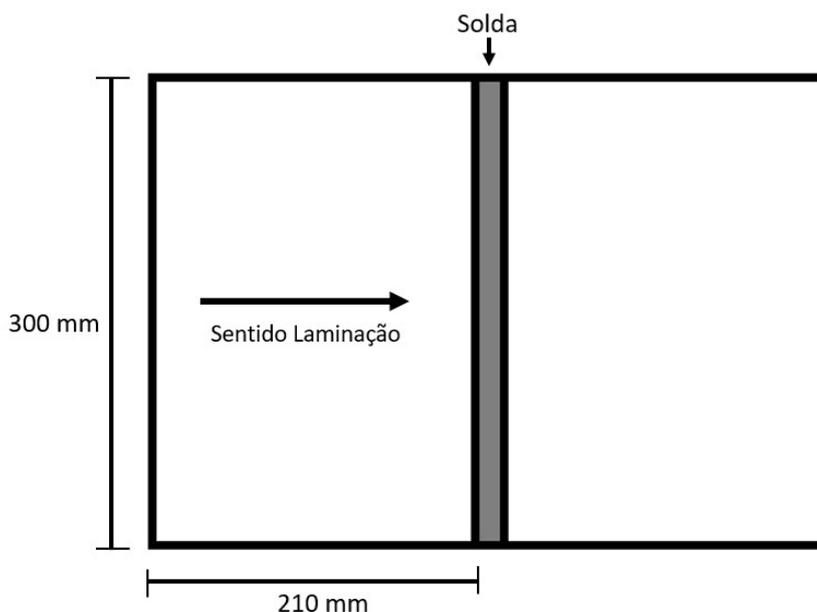
4.1 MATERIAIS

Para o presente estudo, foram utilizados corpos de prova de alumínio laminado a frio nas ligas 3104 H32 e 5052 H32, ambas na espessura de 2,0 mm. Os materiais foram fabricados pela empresa Novelis, que também disponibilizou o laboratório para diversas análises que serão descritas na sequência deste trabalho. A têmpera H32 indica que o material sofreu aproximadamente 20% de redução de espessura por laminação a frio e passou por um processo de estabilização, em que o material é colocado em um forno por tempo e temperatura pré-determinados para alívio de tensões residuais e melhoria da formabilidade do metal. As peças foram cortadas no formato 210 x 300 mm e soldadas pela empresa parceira, Elfer Alumínio, nas seguintes configurações:

- 3104-3104;
- 5052-5052;
- 3104-5052.

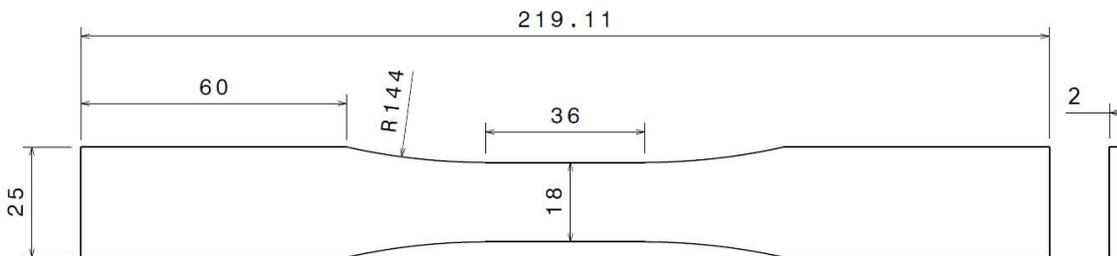
O metal de adição (vareta de solda) utilizado para a união das chapas foi na liga ER 5356, com diâmetro de 2,4 mm. A Figura 27 apresenta o layout das peças soldadas.

Figura 27 – Layout das peças soldadas.



Tests of Metallic Materials), conforme geometria e dimensões mostradas na Figura 29. As dimensões estão em mm.

Figura 29 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de fadiga.



Fonte: O autor.

4.2 MÉTODOS

4.2.1 Obtenção das juntas soldadas

A escolha dos parâmetros de solda foi realizada de modo a minimizar a incidência de defeitos como porosidade, falta de fusão, trincas de solidificação, falta de penetração etc., de acordo com os procedimentos pré-estabelecidos pela empresa parceira Elfer Alumínio, responsável pelo processo de soldagem das peças e com grande conhecimento nessa atividade. O processo de soldagem segue as recomendações da ASME IX (*American Society of Mechanical Engineers* – Seção IX - Qualificação de Soldagem, Brasagem e Fusão). A Tabela 14 apresenta os parâmetros de solda estabelecidos para o trabalho.

Tabela 14 – Parâmetros de solda utilizados.

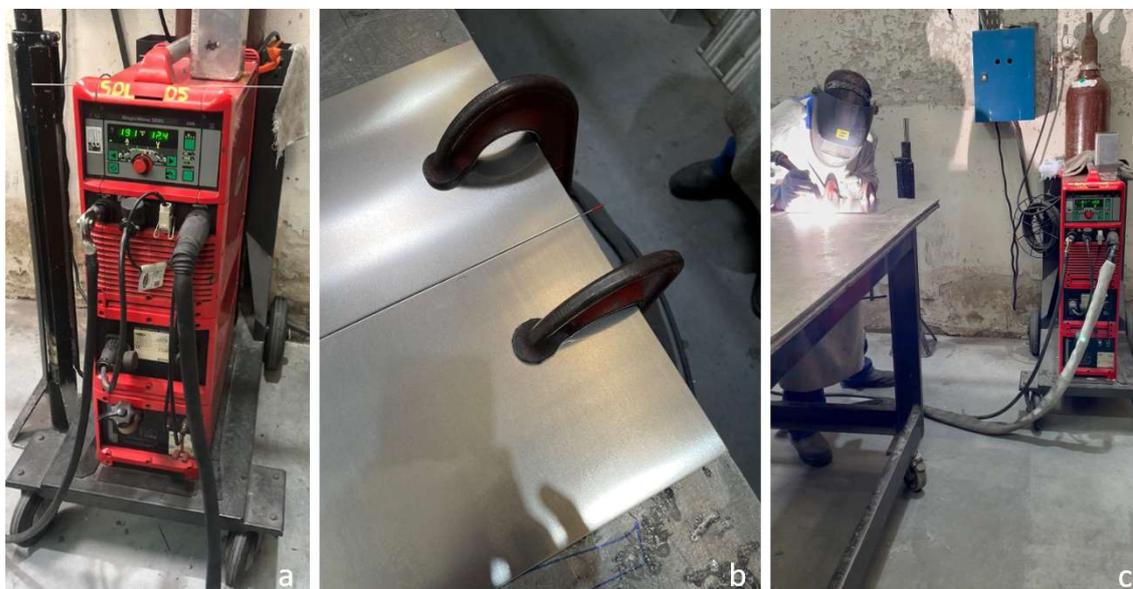
Metal Base		Metal de adição		Posição de Soldagem	Proc.	Pré-aquecim.	Parâmetros elétricos			Vazão de Argônio (l/min)	Veloc. Soldagem (cm/min)
Liga	Espes. (mm)	Liga	Diâmetro (mm)				Corrente (A)	Polaridade	Tensão (V)		
3104 5052	2,0	ER 5356	2,4	Topo 1G	TIG	NA	90	CA	11 - 13	15	15 - 20

Fonte: O autor

A posição de soldagem Topo 1G indica que as peças estão alinhadas plano horizontal e o metal é adicionado por cima. A Figura 30 apresenta o equipamento utilizado para a soldagem da marca Fronius, modelo MagicWave 3000, as duas peças a serem soldadas na mesa presas com grampos sargentos na posição Topo 1G separadas por uma distância de

1,6mm, e o soldador executando a soldagem, que foi realizada em um único passe. O gás de proteção utilizado foi o argônio.

Figura 30 – a) Equipamento de solda TIG utilizado. b) Peças posicionadas na mesa. c) Execução da solda.

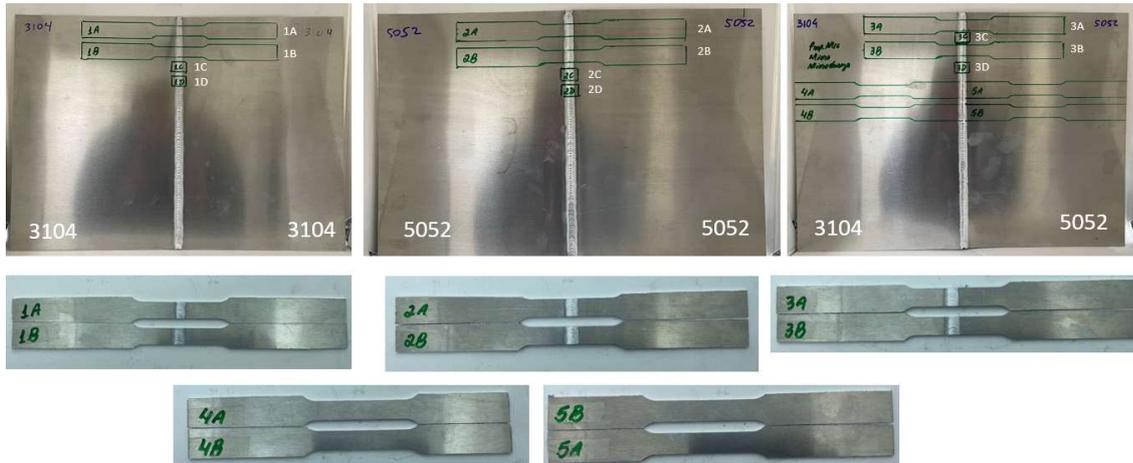


Fonte: O autor.

Para todas as configurações de juntas soldadas, observou-se que no terço final do processo de soldagem as chapas, mesmo presas aos grampos sargentos, iam se fechando devido ao calor das peças, e a penetração da solda era menor nessa região. Esse efeito é chamado de distorção rotacional, conforme descrito na seção 2.2.3.

Após soldadas as peças, foram realizados o corte e usinagem dos corpos de prova para a realização dos ensaios. Em cada configuração, para o ensaio de tração, foram retirados dois corpos de prova. A Figura 31 apresenta as peças soldadas e os corpos de prova já confeccionados, incluindo o metal base. As soldas não foram esmerilhadas, ou seja, os reforços de solda foram mantidos conforme se encontravam, uma vez que as peças reais também não são esmerilhadas para a aplicação estudada.

Figura 31 – Peças soldadas e corpos de prova prontos para o ensaio de tração e micrografias.



Fonte: O autor.

4.2.2 Análise metalográfica

Para cada condição analisada, conforme Figura 31, foram retiradas duas amostras na região da solda, conforme descrito abaixo:

- 3104-3104 – Amostras 1C e 1D
- 5052-5052 – Amostras 2C e 2D
- 3104-5052 – Amostras 3C e 3D

As amostras foram cortadas, embutidas a quente com baquelite, lixadas manualmente com lixas 220, 400 e 600, polidas com pasta de diamante e sílica coloidal e atacadas eletroliticamente por solução de ácido tetrafluorobórico (HBF₄). A Figura 32 apresenta o equipamento de embutimento utilizado da marca Buehler modelo simplimet 4000, a lixadeira/politriz manual da marca Arotec modelo Aropol VV e a politriz automática da marca Buehler modelo Automet 250. A Figura 33 apresenta as amostras já preparadas e o microscópio óptico utilizado da marca Zeiss modelo Scope A1.

Figura 32 – a) Embutidora utilizada. b) Lixadeira manual. c) Politriz automática.



Fonte: O autor.

Figura 33 – a) Amostras preparadas. b) Microscópio óptico utilizado.



Fonte: O autor.

4.2.3 Ensaios de tração

Os ensaios de tração foram realizados no equipamento disponibilizado pela empresa Novelis, marca Kratos modelo KE 10000 MP. A velocidade de avanço utilizada foi de 7,5 mm/min e utilizou-se extensômetro axial com comprimento de referência de 50 mm para medir a deformação. Para cada configuração foram realizados dois ensaios, A e B, e

posteriormente foi feita uma média dos valores. A Figura 34 apresenta o equipamento utilizado e os corpos de prova após os ensaios.

Figura 34 – a) Equipamento para ensaio de tração. b) CP's após ensaios de tração.



Fonte: O autor.

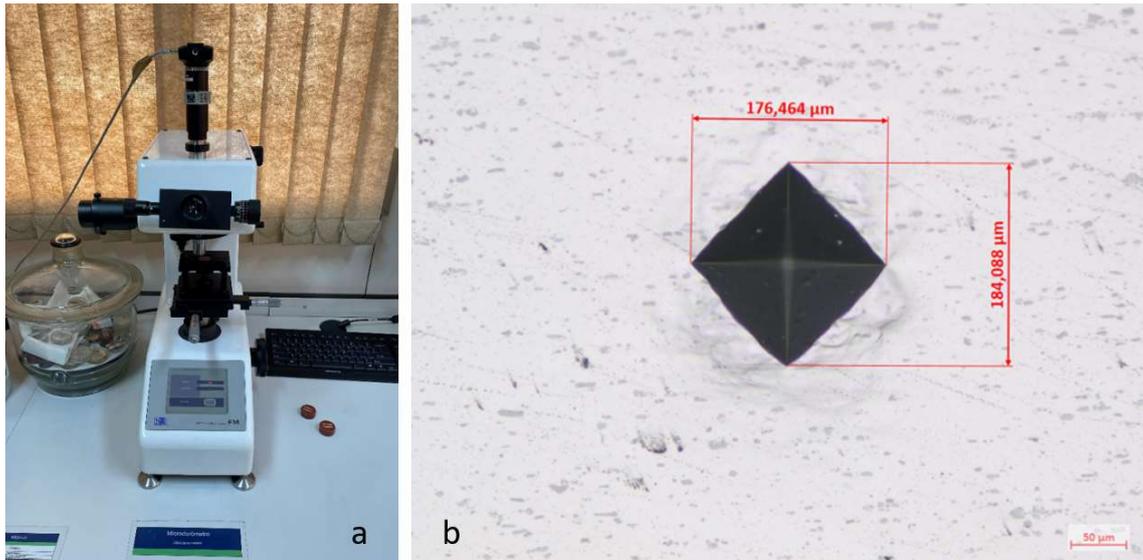
4.2.4 Medidas de dureza

Para o ensaio de dureza foi utilizado o equipamento microdurômetro Vickers da marca Future-Tech modelo FM-1 com endentador de diamante, disponibilizado pela empresa Novelis. O comprimento da seção das amostras foi de aproximadamente 50mm, e as endentações foram realizadas a partir do centro do cordão de solda variando de um em um milímetro, sempre no meio da espessura da amostra. Os ensaios foram realizados conforme a norma ASTM 384-17 (*Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*). Cada endentação possui uma geometria de um losango, onde são medidos os comprimentos das diagonais e realizado uma média. As medidas de dureza Vickers (HV) são obtidas a partir da Equação 15, em que P é a carga aplicada em kgf e d é a média das diagonais em μm .

$$HV = 1,8544 \times \frac{P}{d^2} \quad (15)$$

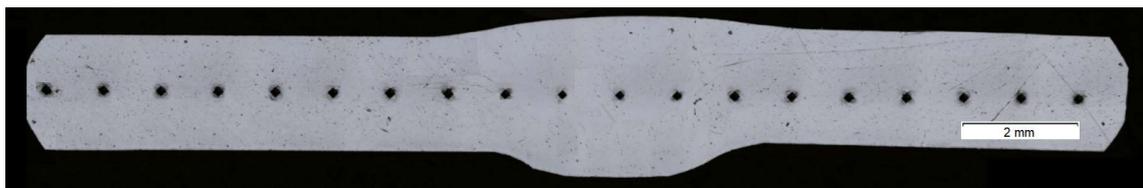
A carga utilizada para o ensaio foi de 1 Kgf (1000 gf) por 15s. A Figura 35 apresenta o microdurômetro utilizado e um exemplo de uma endentação já com a medida dos comprimentos das diagonais, obtidas por meio de microscópio óptico. A Figura 36 apresenta parte das endentações realizadas em uma das análises.

Figura 35 – a) Microdurômetro utilizado. b) Exemplo de uma endentação realizada.



Fonte: O autor.

Figura 36 – Exemplo de parte das endentações realizadas em uma das análises.

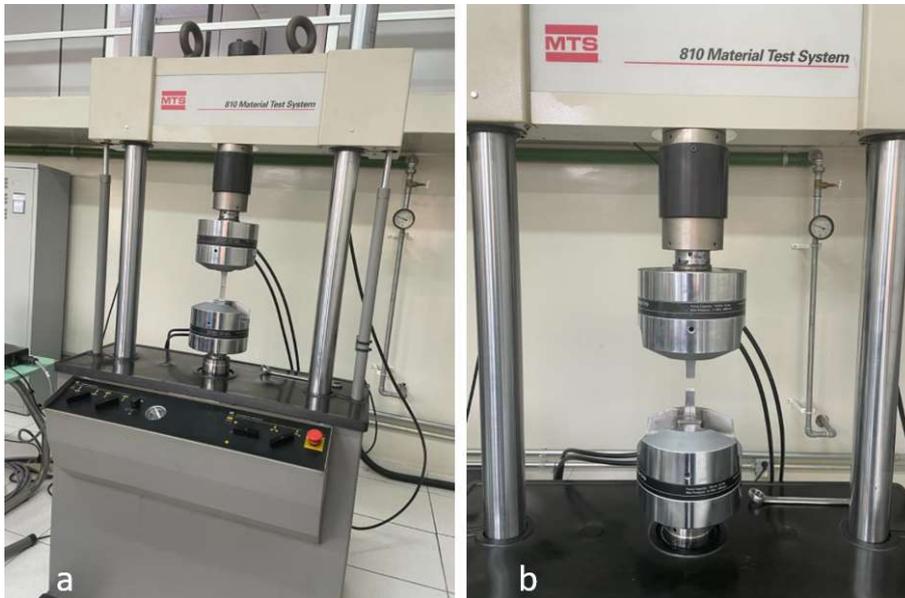


Fonte: O autor.

4.2.5 Ensaios de fadiga

Os ensaios de fadiga foram realizados no sistema servo-hidráulico MTS 810.23M pertencente ao laboratório de ensaios mecânicos da EEL/USP, com carregamento de amplitude constante, frequência de 10 Hz e com razão R de 0,1. A Figura 37 apresenta o equipamento utilizado para os ensaios e logo após o rompimento de um corpo de prova.

Figura 37 – a) Equipamento utilizado para o ensaio de fadiga. b) Corpo de prova rompido após ensaio.



Fonte: O autor.

A primeira etapa consistiu em ensaiar os metais base nas ligas 3104 e 5052, e posteriormente as juntas soldadas, sendo 3104-3104, 5052-5052 e 3104-5052. Com isso, foram obtidas 5 curvas S/N com o objetivo de avaliar o comportamento mecânico das juntas soldadas sob carregamentos cíclicos e realizar um comparativo do comportamento entre as diferentes condições. A quantidade de amostras foi definida de acordo com a norma ASTM E739-10 (*Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (E-N) Fatigue Data*) que exige a quantidade mínima de 6 a 12 ensaios e uma replicância acima de 50% para nível de pesquisa e desenvolvimento. A replicância foi calculada de acordo com a Equação 16.

$$\% \text{ replicância} = 100 \left[1 - \frac{\text{Quantidade de níveis de tensão}}{\text{Quantidade de corpos de prova ensaiados}} \right] \quad (16)$$

A Tabela 15 apresenta a replicância para cada condição estudada.

Tabela 15 – Replicância dos ensaios de todas as condições estudadas.

Liga	Quant. de níveis de tensão	Quant. de CP's ensaiados	Replicância
MB 3104	5	15	67%
MB 5052	5	14	64%
Junta 3104-3104	4	12	67%
Junta 5052-5052	4	12	67%
Junta 3104-5052	4	12	67%

Fonte: O autor.

4.2.6 Análise Fractográfica

Após os ensaios de fadiga, foram realizadas análises fractográficas por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV, com o objetivo de identificar e comparar os mecanismos de fratura nas ligas de alumínio. O equipamento utilizado foi o modelo FEI Quanta 450 cedido pela Novelis. A Figura 38 apresenta o equipamento utilizado para as análises.

Figura 38 – MEV utilizado para as análises.



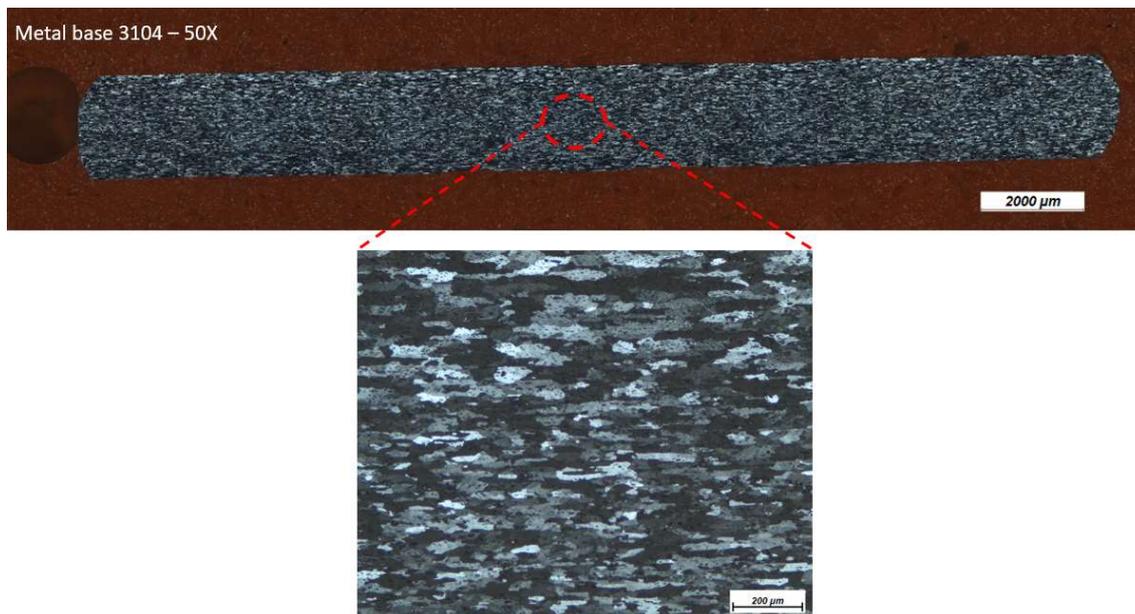
Fonte: O autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ANÁLISE METALOGRÁFICA

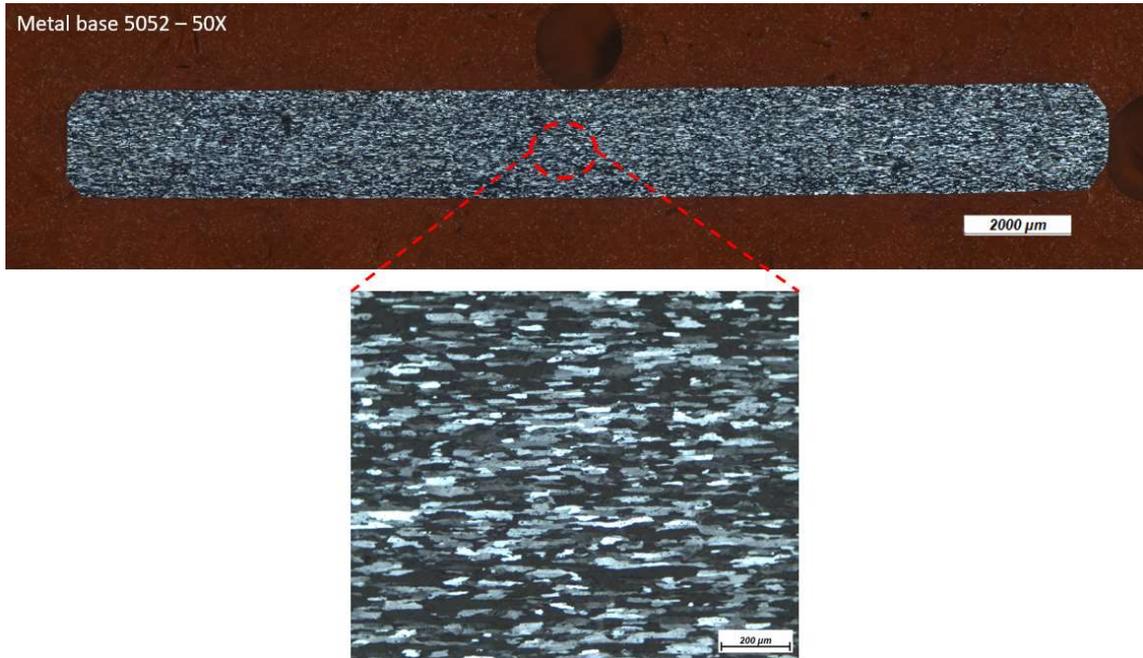
As Figuras 39 e 40 apresentam a micrografia dos metais base 3104 e 5052, respectivamente. Para ambos os casos se observa grãos alongados, condição esperada para a têmpera H32, que está recuperada com energia armazenada na forma de defeitos provenientes da deformação a frio. A diferença de tonalidade dos grãos, sendo uns grãos mais escuros e outros mais claros, é explicada pela diferença de orientação entre grãos.

Figura 39 – Micrografia do MB 3104 com ampliação de 50X e destaque para imagem com ampliação de 100X. Microscópio óptico.



Fonte: O autor.

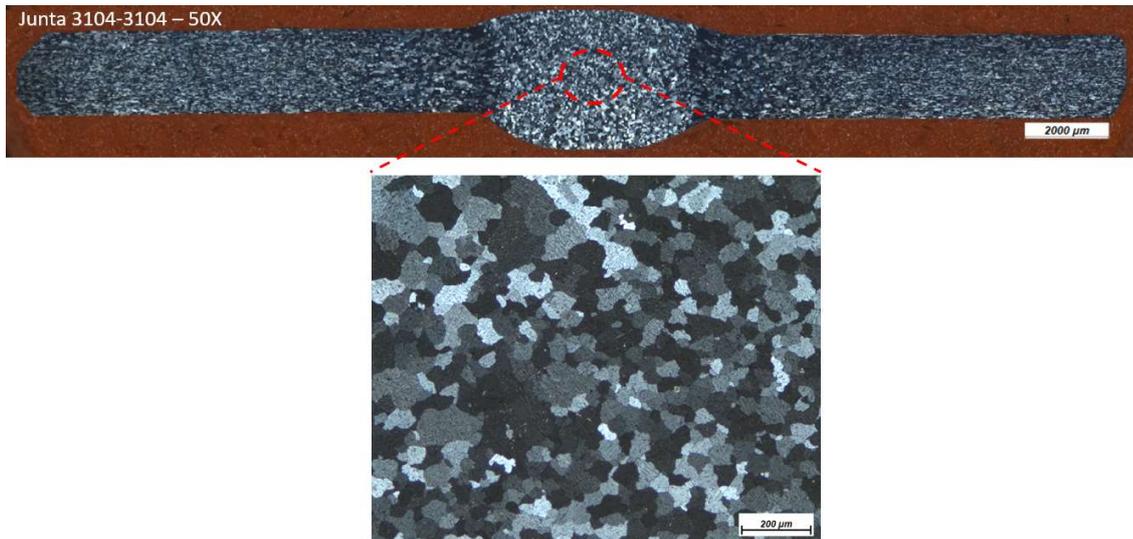
Figura 40 – Micrografia do MB 5052 com ampliação de 50X e destaque para imagem com ampliação de 100X. Microscópio óptico.



Fonte: O autor.

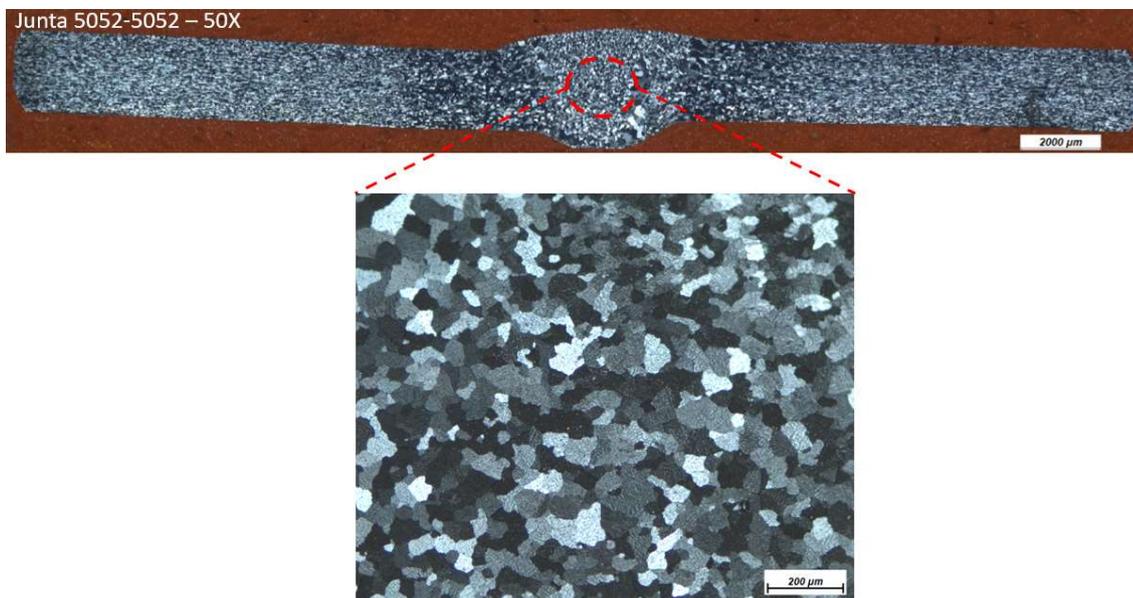
As Figuras 41, 42 e 43 apresentam as micrografias das juntas soldadas 3104-3104, 5052-5052 e 3104-5052, respectivamente. Em todos os casos, houve recristalização na região da solda e adjacências, constatada pela presença de grãos equiaxiais. A força motriz para essa recristalização foi a energia interna armazenada na forma de defeitos presentes na têmpera H32. Para a medição do tamanho de grão das juntas soldadas utilizou-se como referência a norma ASTM E112-21 (*Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*). O tamanho médio de grão para todas as configurações de juntas soldadas foi de 7,0 ASTM.

Figura 41 – Micrografia da junta 3104-3104 com ampliação de 50X e destaque para imagem com ampliação de 100X. Microscópio óptico.



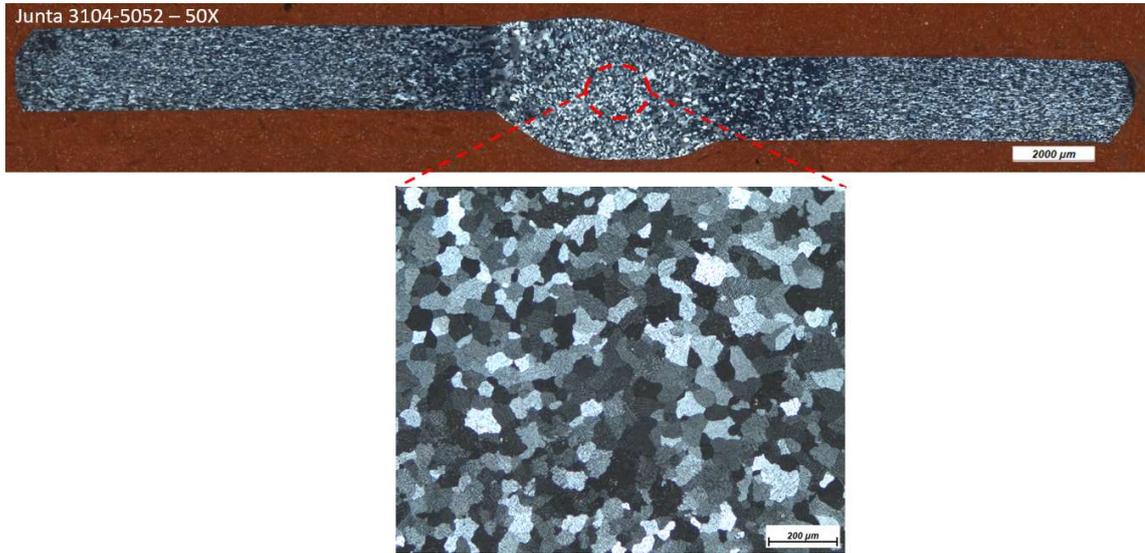
Fonte: O autor.

Figura 42 – Micrografia da junta 5052-5052 com ampliação de 50X e destaque para imagem com ampliação de 100X. Microscópio óptico.



Fonte: O autor.

Figura 43 – Micrografia da junta 3104-5052 com ampliação de 50X e destaque para imagem com ampliação de 100X. Microscópio óptico.

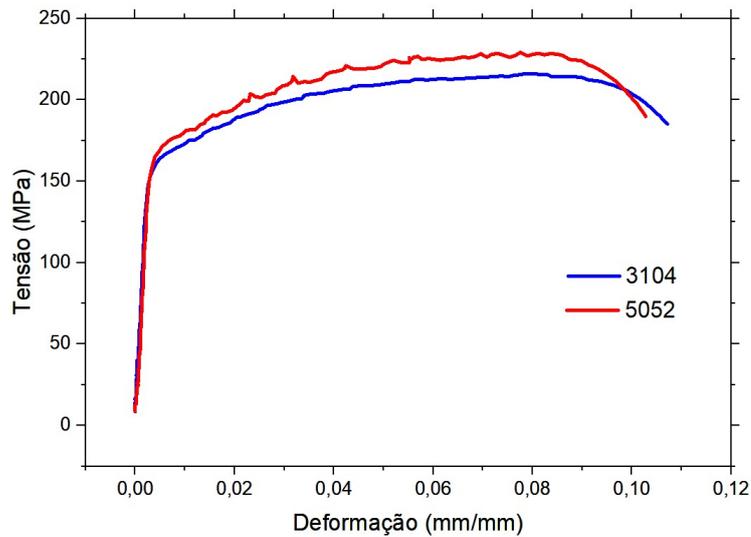


Fonte: O autor.

5.2 ENSAIOS DE TRAÇÃO

A Figura 44 apresenta a sobreposição das curvas tensão-deformação dos metais base nas ligas 3104 e 5052. A Tabela 16 apresenta os resultados dos ensaios.

Figura 44 – Curvas tensão-deformação dos metais base 3104 e 5052.



Fonte: O autor.

Tabela 16 – Resultados dos ensaios de tração para os metais base.

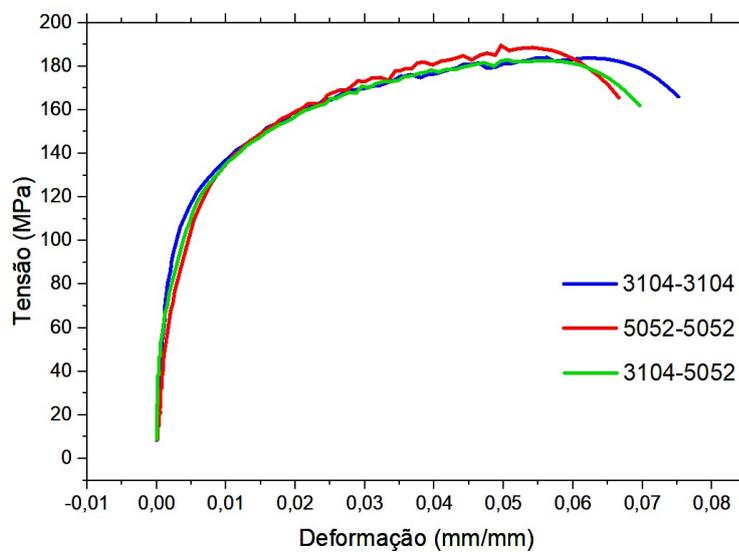
Condição	L.R.T (MPa)	L.E (MPa)	A (%)
METAL BASE 3104	215	164	10,3
METAL BASE 5052	229	168	10,4

Fonte: O autor.

Pode-se observar que os resultados são muito próximos, com a liga 5052 apresentando valores ligeiramente superiores, mas demonstrando a semelhança entre as duas ligas em termos de propriedades mecânicas.

A Figura 45 apresenta as curvas tensão-deformação das juntas soldadas 3104-3104, 5052-5052 e 3104-5052, e a Tabela 17 apresenta os resultados dos ensaios.

Figura 45 – Curvas tensão-deformação das juntas soldadas.



Fonte: O autor.

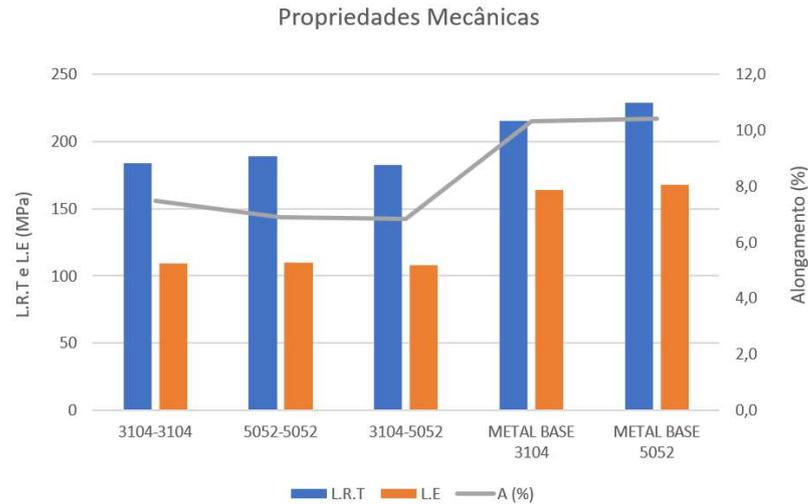
Tabela 17 – Resultados dos ensaios de tração para as juntas soldadas.

Condição	L.R.T (MPa)	L.E (MPa)	A (%)
3104-3104	184	110	7,5
5052-5052	189	110	6,9
3104-5052	183	108	6,8

Fonte: O autor.

Observou-se também que as juntas soldadas 3104-3104, 5052-5052 e dissimilares apresentaram valores muito próximos, comportamento similar ao do metal base. A Figura 46 apresenta os dados médios de propriedades mecânicas de cada condição.

Figura 46 – Propriedades mecânicas dos materiais ensaiados.



Fonte: O autor.

Observa-se que houve uma queda nas propriedades mecânicas das juntas soldadas com relação ao metal base, com perda entre 17 e 21% do limite de resistência à tração e de 50 a 53% do limite de escoamento. É importante salientar que os valores obtidos de limite de resistência e limite de escoamento das juntas soldadas não são do cordão de solda, uma vez que os CP's se romperam na ZTA.

5.3 MEDIDAS DE DUREZA

As Figuras 47, 48 e 49 apresentam os resultados de dureza obtidos para as 3 condições de juntas soldadas (3104-3104, 5052-5052 e 3104-5052). A Figura 50 apresenta a sobreposição das 3 condições analisadas.

Figura 47 – Dureza Vickers (1000 gf) ao longo da seção da amostra 3104-3104.



Fonte: O autor.

Figura 48 – Dureza Vickers (1000 gf) ao longo da seção da amostra 5052-5052.



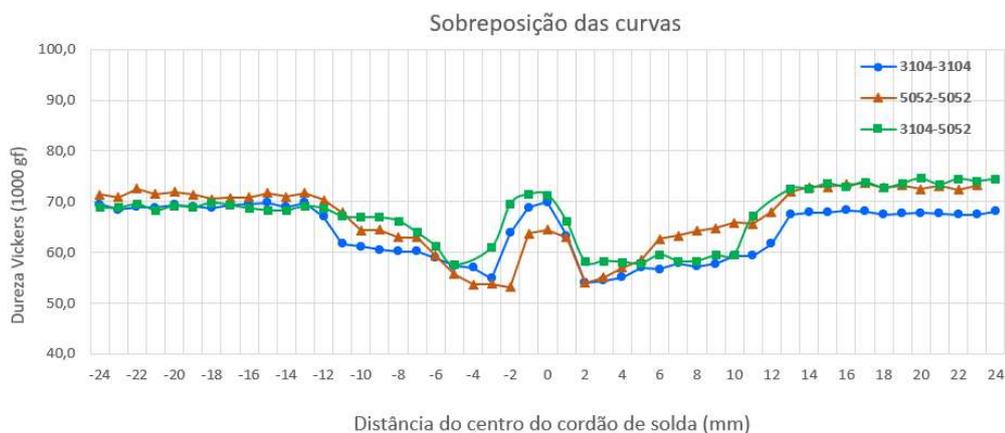
Fonte: O autor.

Figura 49 – Dureza Vickers (1000 gf) ao longo da seção da amostra 3104-5052.



Fonte: O autor.

Figura 50 – Dureza vickers (1000 gf) ao longo da seção das 3 condições analisadas.



Fonte: O autor.

Em todos os casos, na região do centro cordão de solda houve uma dureza maior que nas regiões adjacentes. Esse efeito pode ser explicado pela composição química dessa região, que contém a mistura da liga do metal de adição ER5356, que é mais resistente que os metais base nas ligas 3104 e 5052. Considerando a participação de 20% do metal de adição ER5356 (5% Mg) e 80% do metal base (1% Mg na liga 3104 e 2,5% Mg na liga 5052) na composição química do cordão de solda, conforme descrito na seção 2.2.4, Figura 10, essa região terá maior concentração de magnésio, que é um elemento endurecedor, o que explica a maior dureza nessa região.

A dureza maior na região do centro do cordão das juntas 3104-3104 e 3104-5052 com relação à junta 5052-5052 pode estar associada com a difusão do manganês que está em solução sólida na liga 3104. A liga 5052 não possui manganês em sua composição.

Para os metais base, as microdurezas Vickers encontradas foram de 69 para a liga 3104 e 72 para a liga 5052. Esses valores são próximos aos encontrados nos ensaios das juntas soldadas quando os pontos se afastavam do cordão, indicando que as amostras analisadas ultrapassaram a ZTA e atingiram a região do metal base.

Em todos os casos observou-se também que a ZTA teve um comprimento entre 12 e 14mm a partir do centro do cordão de solda. Isso pode ser explicado pela utilização dos mesmos parâmetros de solda para todas as configurações.

5.4 ENSAIOS DE FADIGA

Os ensaios de fadiga foram iniciados nas amostras de metal base 3104 e 5052, e posteriormente realizados nas juntas soldadas 3104, 5052 e dissimilares. Para cada condição, foi confeccionada uma tabela com a tensão máxima (σ_{\max}) e o número de ciclos até a falha (N_f). Nas juntas soldadas foi identificado também o local da fratura, que para melhor compreensão foram divididos em dois locais, conforme descrito a seguir:

- ZTA: quando a fratura se iniciou e terminou na zona termicamente afetada;
- SOLDA: quando a fratura se iniciou no cordão de solda:

5.4.1 Metal base

A Tabela 18 apresenta os resultados experimentais dos ensaios de fadiga realizados nos CP's dos metais base nas ligas 3104 e 5052. A Figura 51 apresenta os CP's após os ensaios.

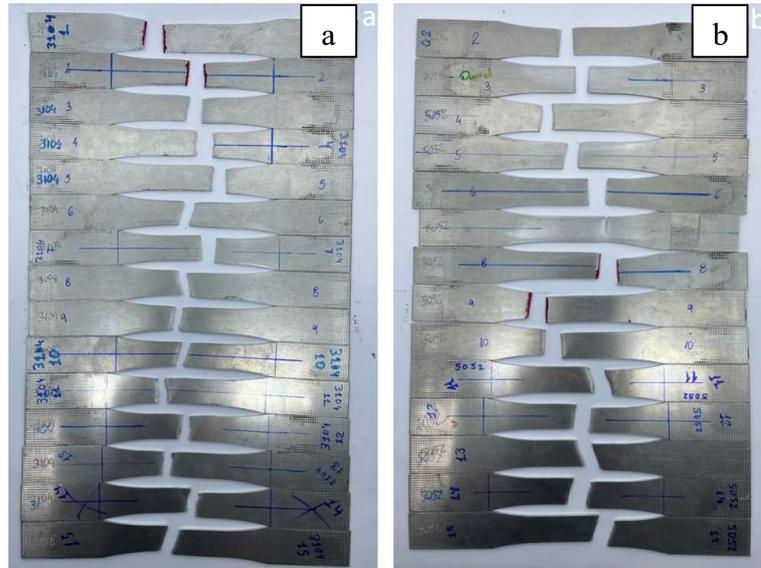
Tabela 18 – Resultados dos ensaios de fadiga dos metais base 3104 e 5052.

3104		5052	
Vida (Ciclos)	Tensão (MPa)	Vida (Ciclos)	Tensão (MPa)
200 *	220	119 *	232
89 *	217	284 *	232
155 *	217	83 *	230
167 *	216	131673	230
154658	216	195159	230
171116	216	118925	225
209750	215	142864	225
243235	215	173835	225
281827	215	173092	215
187861	208	207972	215
223342	208	326069	215
317623	208	288306	200
234457	200	307170	200
508557	200	787876	200
612878	200	-	-

* Dados não utilizados para confecção da curva S/N.

Fonte: O autor.

Figura 51 – CP's dos metais base após ensaios de fadiga. a) 3104 e b) 5052.



Fonte: O autor.

De acordo com a Tabela 18, pode-se observar que para cada liga, para um determinado nível de tensão máxima, a vida em fadiga teve uma queda abrupta, caracterizando fadiga de baixo ciclo. No caso da liga 3104 essa tensão ficou entre 215 e 217 MPa, e para a liga 5052, entre 225 e 232 MPa. A Tabela 19 apresenta um comparativo do limiar entre a fadiga de alto ciclo (HCF) e baixo ciclo (LCF) com o limite de resistência à tração das ligas 3104 e 5052.

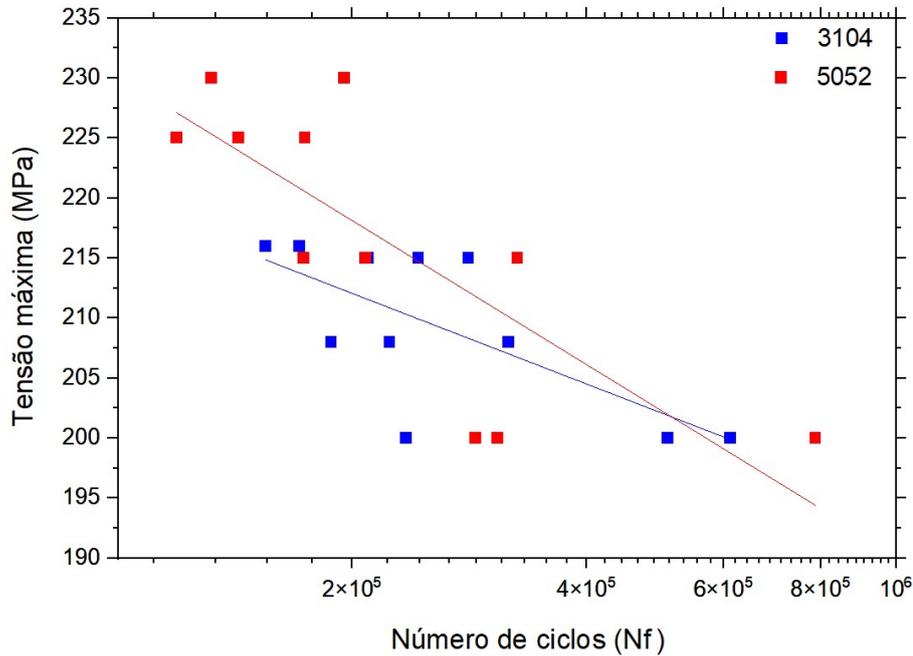
Tabela 19 – Comparativo do limiar entre a fadiga de alto ciclo (HCF) e a fadiga de baixo ciclo (LCF) com o limite de resistência à tração (L.R.T) das ligas 3104 e 5052.

Liga	Limiar entre HCF e LCF (MPa)	L.R.T. (MPa)
3104	215 - 217	215
5052	225 - 232	229

Fonte: O autor.

Observa-se que a fadiga passou de alto ciclo para baixo quando o ensaio foi realizado com tensões máximas próximas ao L.R.T. nas duas ligas. Para a confecção das curvas S/N, foram desconsiderados os pontos de baixo ciclo, pois a intenção era avaliar a fadiga de alto ciclo. A Figura 52 apresenta a curva S/N com a sobreposição das curvas dos ensaios das duas ligas.

Figura 52 – Curvas S/N dos metais base 3104 e 5052.



Fonte: O autor.

A partir dessas curvas, empregando o modelo de regressão linear dado pela Equação 9, obteve-se os valores de A e B, conforme apresentado na Tabela 20, e determinou-se a resistência à fadiga para 2 milhões de ciclos, conforme apresentada na Tabela 21.

Tabela 20 – Resultados dos cálculos de A e B utilizando o modelo de regressão linear para as ligas 3104 e 5052.

Liga	A	B
3104	9,5025	-0,0195
5052	8,7303	-0,0156

Fonte: O autor.

Tabela 21 – Resistência à fadiga para 2 milhões de ciclos para as ligas 3104 e 5052 em termos da tensão máxima e carregamento com R = 0,1.

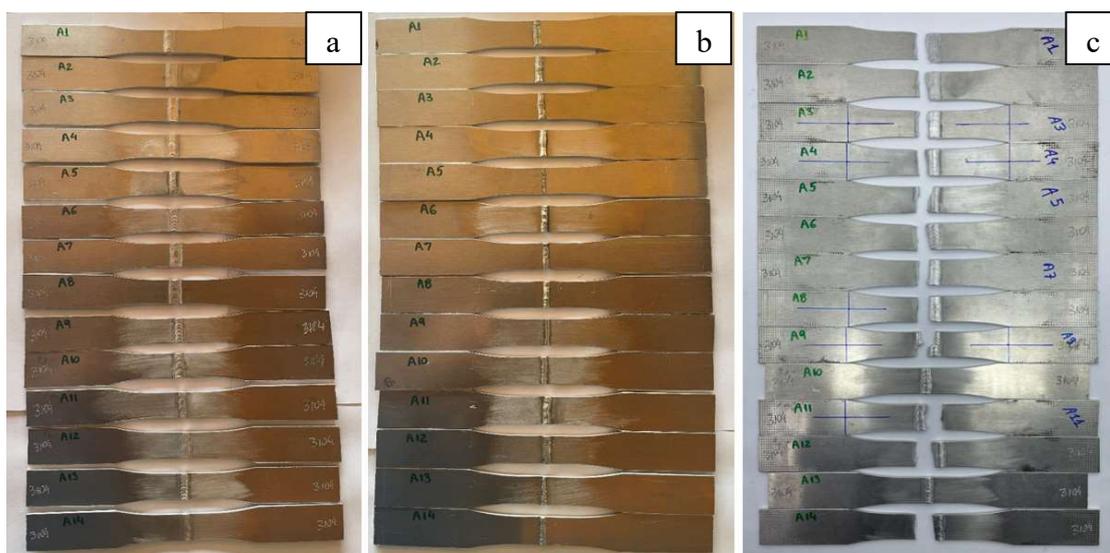
Liga	Resistência à fadiga (MPa) Nf = 2 x 10 ⁶ ciclos
3104	164
5052	156

Fonte: O autor.

5.4.2 Juntas soldadas

As Figuras 53, 54 e 55 apresentam os CP's antes e depois dos ensaios de fadiga para as juntas 3104-3104, 5052-5052 e 3104-5052, respectivamente. As Tabelas 22, 23 e 24 apresentam os locais onde os CP's fraturaram.

Figura 53 – CP's de fadiga da junta 3104-3104. a) Antes do ensaio – face da solda. b) Antes do ensaio – raiz da solda. c) Depois do ensaio.



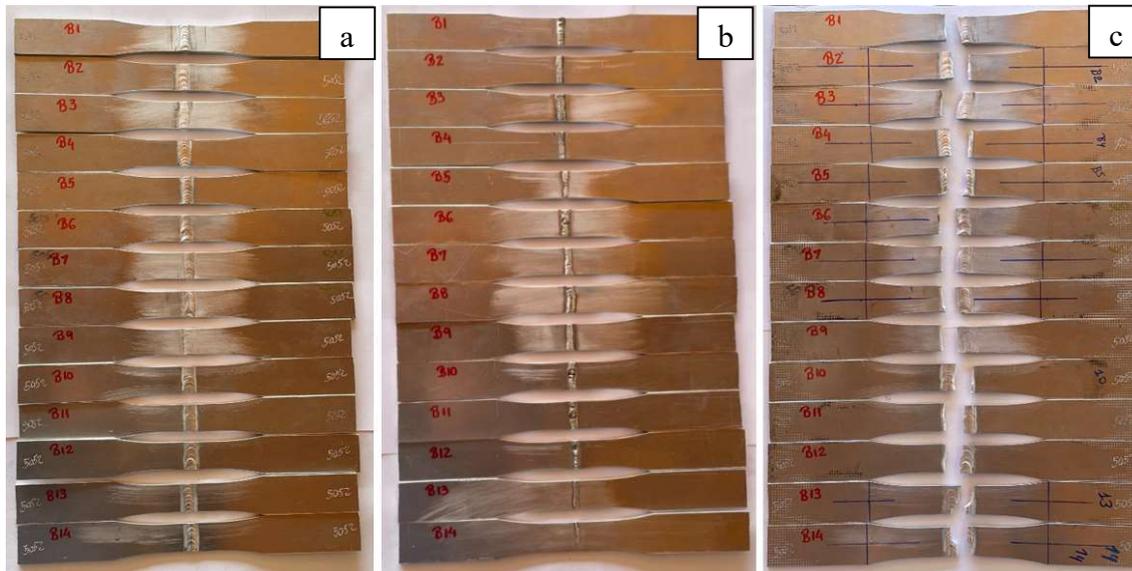
Fonte: O autor.

Tabela 22 – Identificação do local da fratura dos CP's da junta 3104-3104.

Junta 3104-3104			
Identificação do CP	Tensão máx. (MPa)	Vida (Ciclos)	Local de início da fratura
A1	160	55442	ZTA
A2	160	89197	ZTA
A3	140	255208	ZTA
A4	180	33685	ZTA
A5	160	7003	SOLDA
A6	140	112059	ZTA
A7	180	48207	ZTA
A8	180	33200	ZTA
A9	140	55016	SOLDA
A10	Não Ensaiado	-	-
A11	130	843817	ZTA
A12	130	367440	ZTA
A13	Não Ensaiado	-	-
A14	130	64609	ZTA

Fonte: O autor.

Figura 54 – CP's de fadiga da junta 5052-5052. a) Antes do ensaio – face da solda. b) Antes do ensaio – raiz da solda. c) Depois do ensaio.



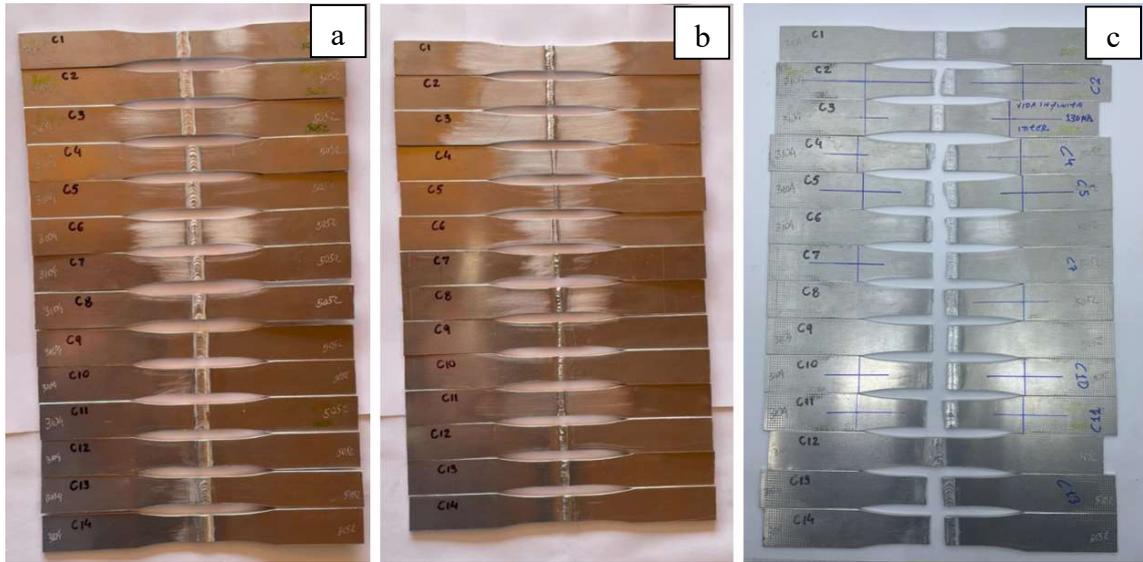
Fonte: O autor.

Tabela 23 – Identificação do local da fratura dos CP's da junta 5052-5052.

Junta 5052-5052			
Identificação do CP	Tensão máx. (MPa)	Vida (Ciclos)	Local de início da fratura
B1	160	26404	ZTA
B2	140	17907	ZTA
B3	130	432820	ZTA
B4	130	317623	ZTA
B5	130	27136	SOLDA
B6	140	307193	ZTA
B7	160	162538	ZTA
B8	180	80514	ZTA
B9	200	54	ZTA
B10	190	73293	ZTA
B11	160	15032	ZTA
B12	140	22745	SOLDA
B13	190	21794	SOLDA
B14	130	4341	SOLDA

Fonte: O autor.

Figura 55 – CP's de fadiga da junta 3104-5052. a) Antes do ensaio – face da solda. b) Antes do ensaio – raiz da solda. c) Depois do ensaio.



Fonte: O autor.

Tabela 24 – Identificação do local da fratura dos CP's da junta 3104-5052.

Junta 3104-5052			
Identificação do CP	Tensão máx. (MPa)	Vida (Ciclos)	Local de início da fratura
C1	Não Ensaiado	-	-
C2	160	152558	ZTA
C3	130	1000000 *	-
C4	180	7108	SOLDA
C5	130	7840	SOLDA
C6	130	9716	SOLDA
C7	160	40162	ZTA
C8	180	8858	ZTA
C9	160	18507	ZTA
C10	180	10159	ZTA
C11	140	20366	ZTA
C12	Não Ensaiado	-	-
C13	140	423631	ZTA
C14	140	4671	ZTA

*Runout : Indica que a peça não fraturou com até um milhão de ciclos.

Fonte: O autor.

A Tabela 25 apresenta os resultados experimentais dos ensaios de fadiga ordenados da maior para a menor tensão nos CP's das juntas 3104-3104, 5052-5052 e 3104-5052 respectivamente.

Tabela 25 – Resultados dos ensaios de fadiga das juntas 3104, 5052 e dissimilares.

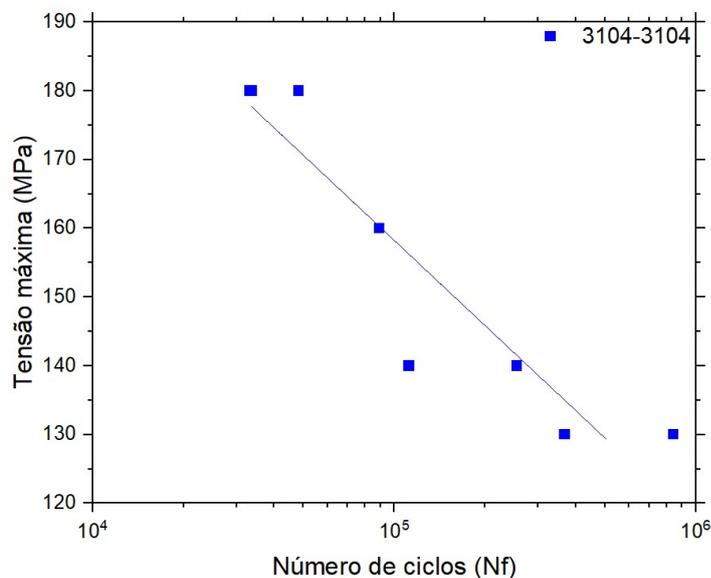
3104-3104		5052-5052		3104-5052	
Vida (Ciclos)	Tensão (MPa)	Vida (Ciclos)	Tensão (MPa)	Vida (Ciclos)	Tensão (MPa)
33200	180	21794	180	7108	180
33685	180	73293	180	8858	180
48207	180	80514	180	10159	180
7003	160	15032	160	18507	160
55442	160	26404	160	40162	160
89197	160	162538	160	152558	160
55016	140	17907	140	4671	140
112059	140	22745	140	20366	140
255208	140	307193	140	423631	140
64609	130	27136	130	7840	130
367440	130	333540	130	9716	130
843817	130	432820	130	1000000 *	130

*Runout : Indica que a peça não fraturou com até um milhão de ciclos.

Fonte: O autor.

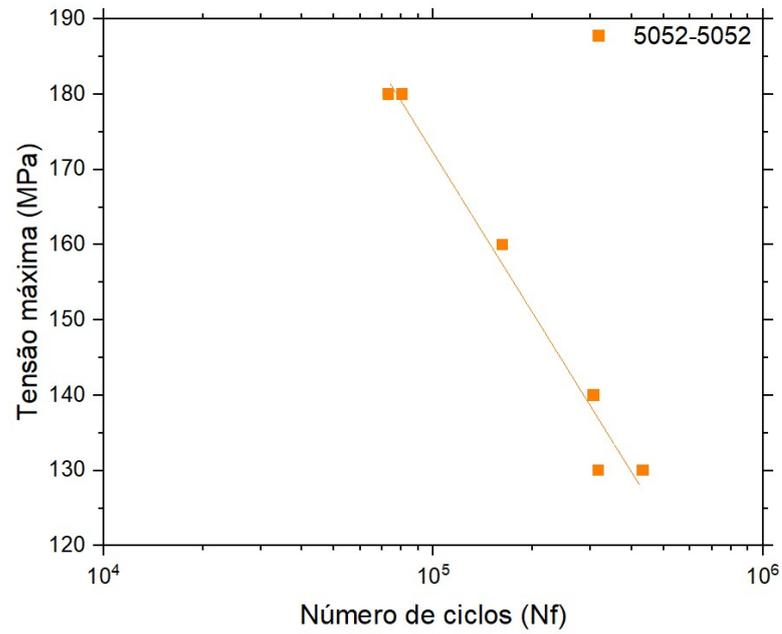
As Figuras 56, 57 e 58 apresentam as curvas S/N para as juntas 3104-3104, 5052-5052 e 3104-5052, respectivamente. A Figura 59 apresenta a sobreposição das 3 curvas. Optou-se por desconsiderar nos cálculos os CPs que fraturaram na solda, assim como aqueles que tiveram uma vida muito baixa determinada por defeitos pré-existentes. Esses CPs mostram que existem fatores relacionados à solda que afetam a vida em fadiga, devendo o processo de soldagem ser aperfeiçoado para a eliminação desses defeitos ocasionais. O objetivo da determinação dessas retas desconsiderando os CPs defeituosos é fazer uma avaliação comparativa com o potencial de vida em fadiga de cada junta.

Figura 56 – Curva S/N da junta 3104-3104.



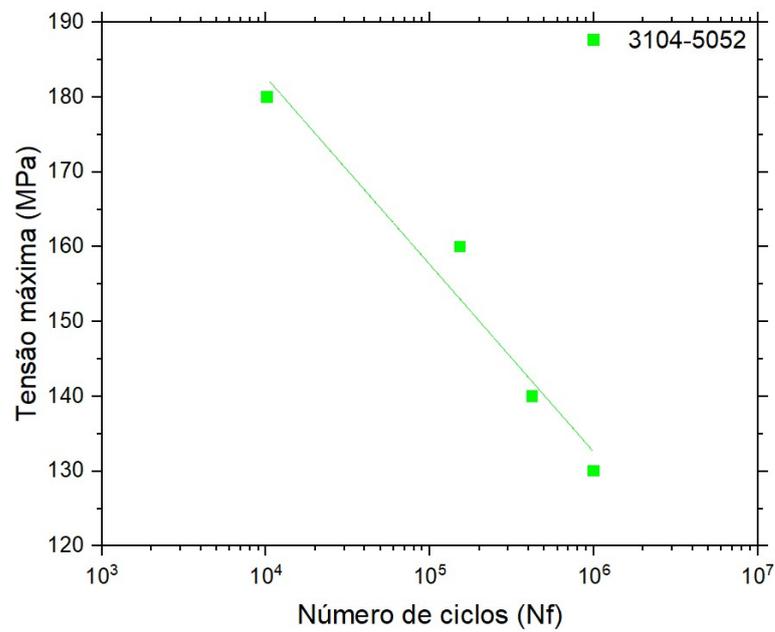
Fonte: O autor.

Figura 57 – Curva S/N da junta 5052-5052.



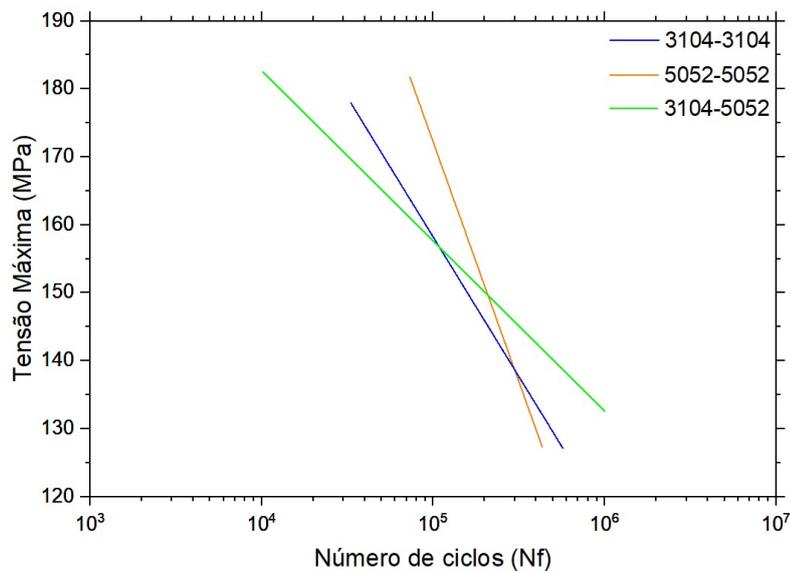
Fonte: O autor.

Figura 58 – Curva S/N da junta 3104-5052.



Fonte: O autor.

Figura 59 – Sobreposição das curvas das 3 condições de juntas estudadas.



Fonte: O autor.

Seguindo a mesma metodologia utilizada para o metal base, a partir das curvas S/N, utilizando o modelo de regressão linear, obteve-se os valores de A e B, conforme apresentado na Tabela 26, e consequentemente a resistência à fadiga para 2 milhões e ciclos, conforme apresentada na Tabela 27.

Tabela 26 – Resultados dos cálculos de A e B utilizando o modelo de regressão linear para as juntas 3104-3104, 5052-5052 e 3104-5052.

Junta	A	B
3104-3104	8,373	-0,0214
5052-5052	7,6842	-0,0171
3104- 5052	8,4236	-0,0248

Fonte: O autor.

Tabela 27 – Resistência à fadiga para 2 milhões de ciclos para as juntas 3104-3104, 5052-5052 e 3104-5052 em termos da tensão máxima e carregamento com $R = 0,1$.

Junta	Resistência à fadiga (MPa)
	$N_f = 2 \times 10^6$ ciclos
3104-3104	97
5052-5052	81
3104- 5052	86

Fonte: O autor.

É importante ressaltar que essas retas representam somente os melhores pontos, eliminando os potenciais defeitos relacionados à solda dos materiais. Observa-se que nessas condições, as juntas soldadas apresentam comportamentos próximos com relação à vida em fadiga.

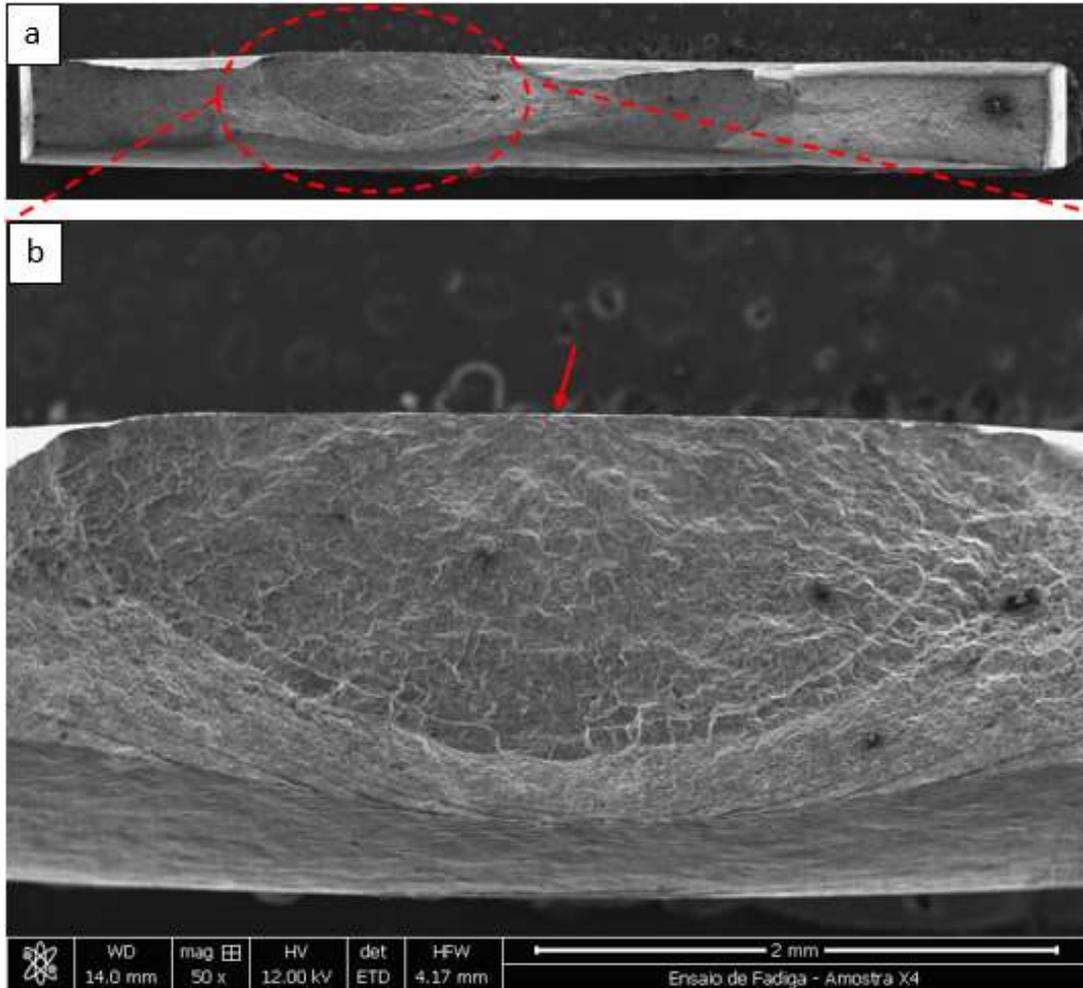
5.5 ANÁLISE FRACTOGRÁFICA

Para todas as condições ensaiadas, foram selecionadas algumas amostras para análise fractográfica por meio de MEV. Como foi citado anteriormente, alguns CP's fraturaram no cordão, indicando que houve algum problema na solda. Essas amostras foram analisadas com o intuito de se avaliar o defeito, visto que é uma condição considerada inaceitável em termos de qualidade.

5.5.1 Metal base

Para o metal base, foram selecionados um CP de cada liga para análise por meio de MEV. O critério de seleção foi aquele que suportou o maior número de ciclos até a falha. A Figura 60 apresenta a superfície de fratura do CP 5 do metal base 3104 ensaiado a um nível de tensão de 200 MPa, que se rompeu com 612.878 ciclos. A Figura 61 apresenta a superfície do CP 2 do metal base 5052 ensaiado a 200 MPa, que se rompeu com 787.876 ciclos.

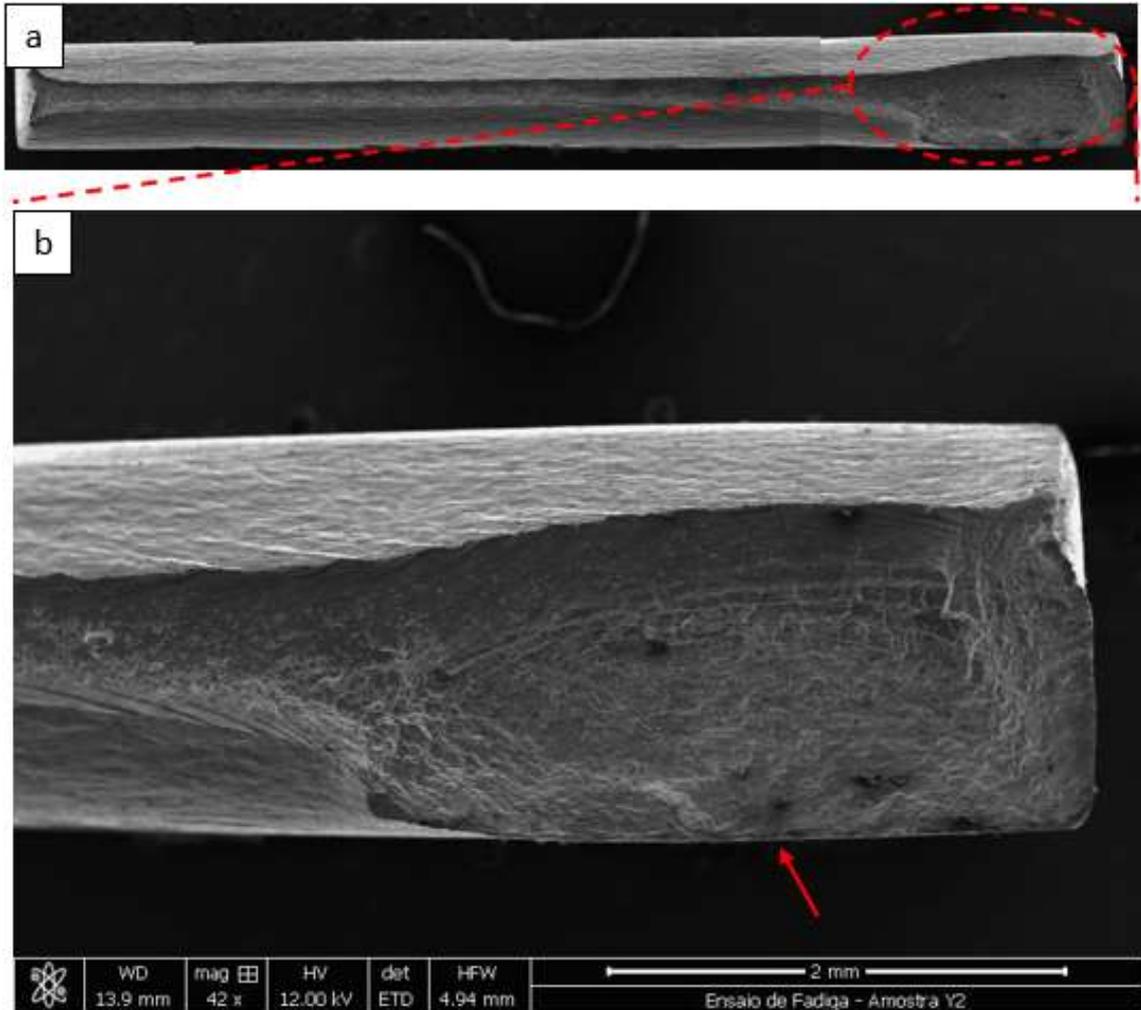
Figura 60 – Superfície de fratura do CP 5 do metal base 3104 ensaiado com nível de tensão de 200 MPa. a) Composição de imagens para mostrar superfície completa. b) Imagem ampliada na região destacada. MEV.



Fonte: O autor.

Observa-se que a trinca se iniciou na superfície do corpo de prova, indicado pela seta vermelha, e a frente de trinca se propagou de forma semielíptica. O outro lado do CP fraturou por sobrecarga próximo ao canto da amostra por excesso de deformação plástica.

Figura 61 –Superfície de fratura do CP 2 do metal base 5052 ensaiado com nível de tensão de 200 MPa. a) Composição de imagens para mostrar superfície completa. b) Imagem ampliada na região destacada. MEV.



Fonte: O autor.

Observa-se que a trinca também se iniciou na superfície do corpo de prova, próxima ao canto da amostra, e a frente de trinca também se propagou de forma semielíptica. O outro lado fraturou por sobrecarga por excesso de deformação plástica.

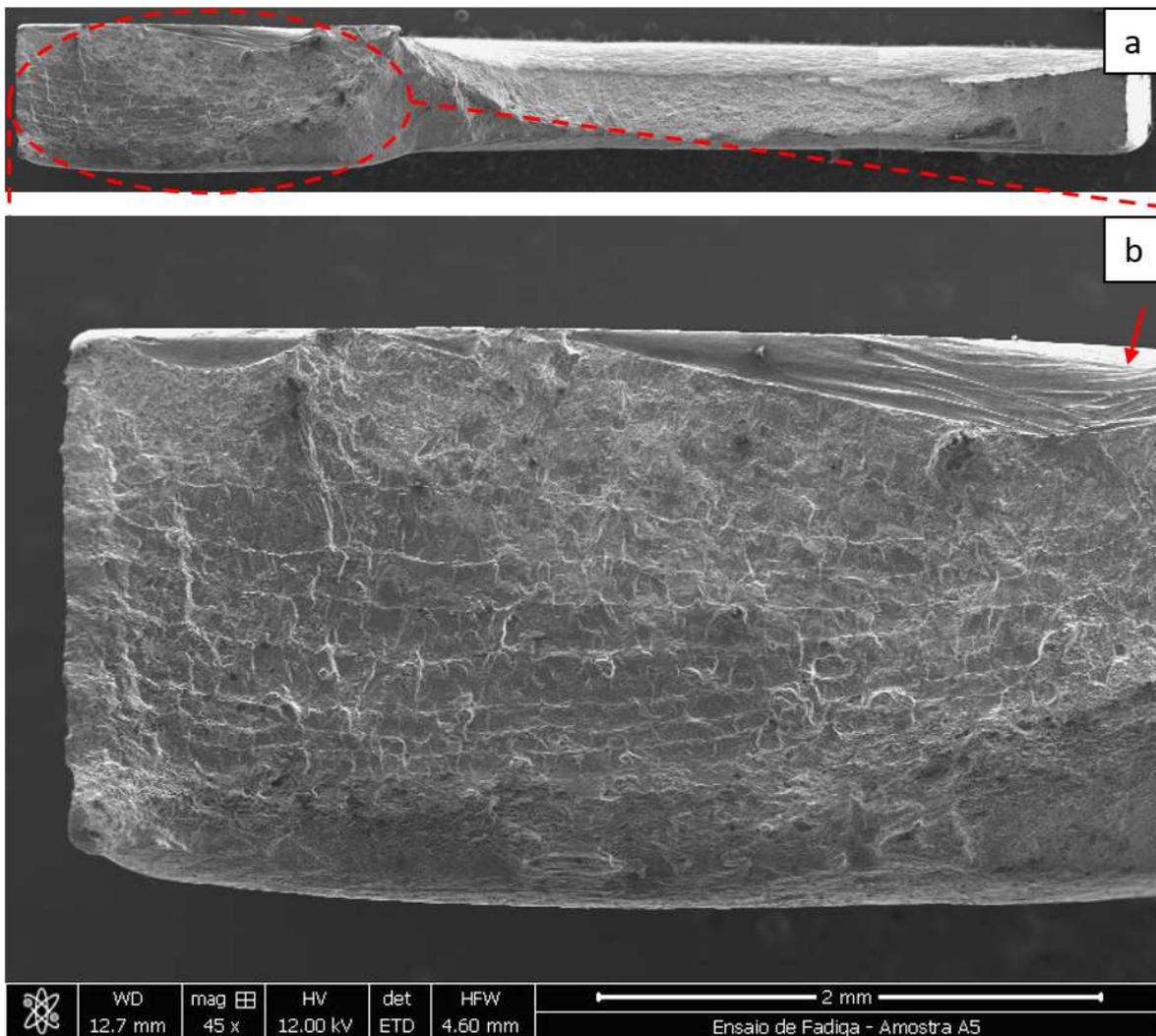
5.5.2 Juntas Soldadas

Para as juntas soldadas, foram selecionados CP's que tiveram as 2 condições de fratura mencionadas anteriormente, sendo ZTA, quando a fratura se iniciou e terminou na zona termicamente afetada e SOLDA, quando a fratura se iniciou no cordão de solda.

5.5.2.1 Junta 3104-3104 – CP's A1 a A14

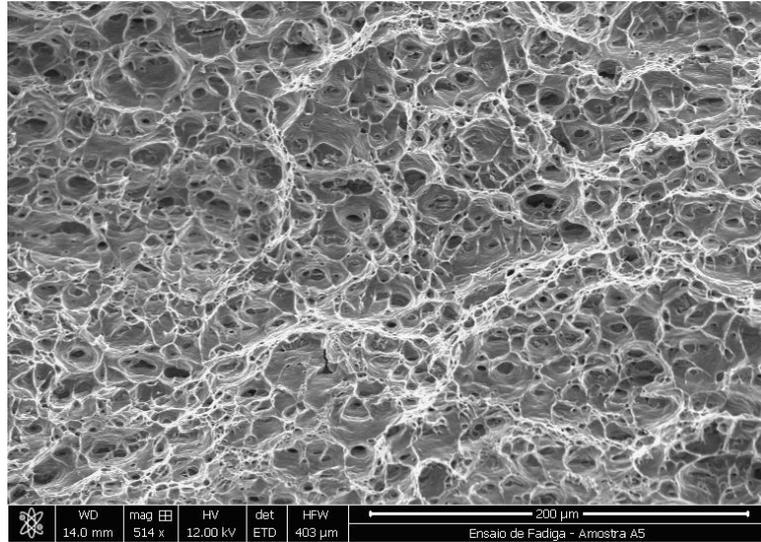
A Figura 62 apresenta a superfície de fratura do CP A5 da junta 3104-3104, ensaiado a um nível de tensão de 160 MPa e que se rompeu na região da solda com 7.003 ciclos. A Figura 63 apresenta uma imagem ampliada mostrando os *dimples* na região fraturada.

Figura 62 – Superfície de fratura do CP A5 da junta 3104-3104 ensaiado a 160 MPa. Local da Fratura: Solda. a) Composição de imagens para mostrar superfície completa. b) Imagem ampliada na região destacada. MEV.



Fonte: O autor.

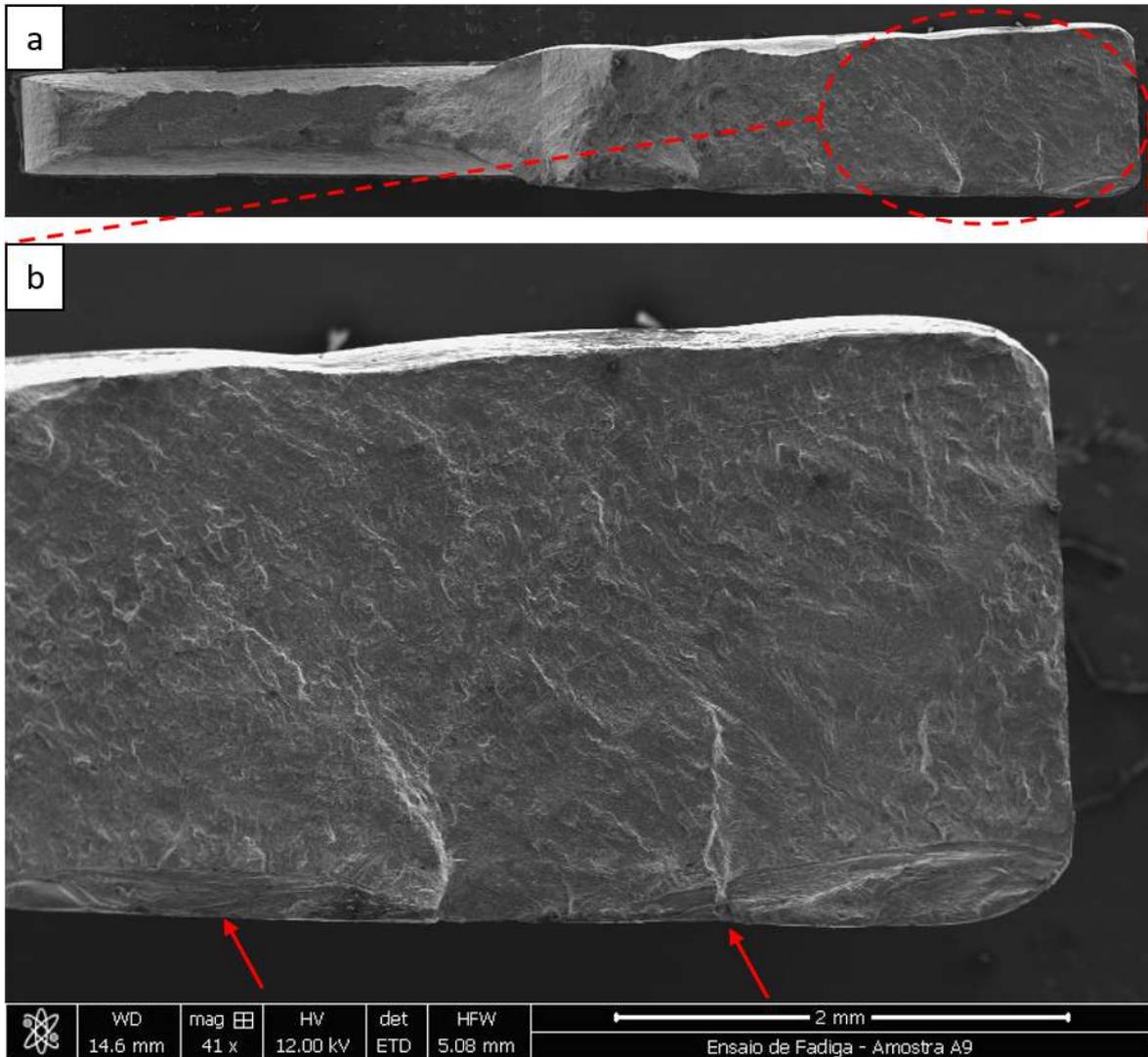
Figura 63 – Região de fratura do CP A5 ampliada com magnitude de 514X. MEV.



Fonte: O autor.

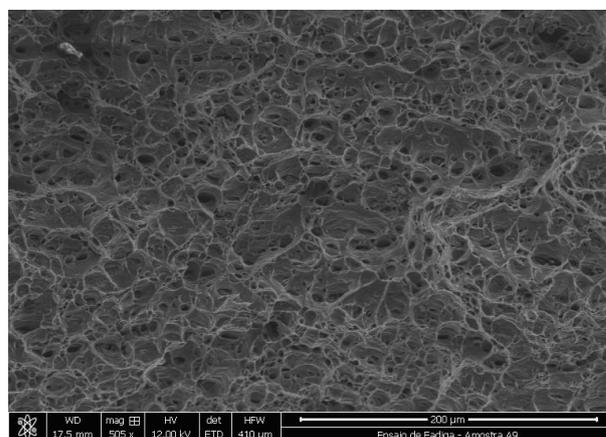
A Figura 64 apresenta a superfície de fratura do CP A9 da junta 3104-3104, ensaiado a um nível de tensão de 140 MPa e que se rompeu na região da solda com 55.016 ciclos. A Figura 65 apresenta uma imagem ampliada mostrando os *dimples* na região fraturada.

Figura 64 – Superfície de fratura do CP A9 da junta 3104-3104 ensaiado a 140 MPa. Local da Fratura: Solda. a) Composição de imagens para mostrar superfície completa. b) Imagem ampliada na região destacada.MEV.



Fonte: O autor.

Figura 65 – Região de fratura do CP A9 ampliada com magnitude de 505X. MEV



Fonte: O autor.

As Figuras 62b e 64b dos CP's A5 e A9, respectivamente, que fraturaram na região do cordão, mostram a frente de trinca crescendo a partir dos defeitos de solda indicados com setas vermelhas. Na Figura 41b, que mostra a raiz da solda nos corpos de prova da junta 3104-3104, pode-se observar que houve falta de penetração de solda nessa região. Como comentado anteriormente, para todas as configurações de juntas soldadas, observou-se que no terço final do processo de soldagem as chapas iam se fechando devido ao calor das peças e a penetração da solda era menor nessa parte. Esses corpos são provenientes dessa região.

A Figura 66 apresenta a superfície de fratura do CP A11 da junta 3104-3104, ensaiado a um nível de tensão de 130 MPa e que se rompeu na região da ZTA com 843.817 ciclos. A Figura 67 apresenta uma imagem ampliada mostrando a região central fraturada.

Figura 66 – Superfície de fratura do CP A11 da junta 3104-3104 ensaiado a 130 MPa. Local da Fratura: ZTA. a) Composição de imagens para mostrar superfície completa. b) Imagem ampliada na região destacada. MEV.

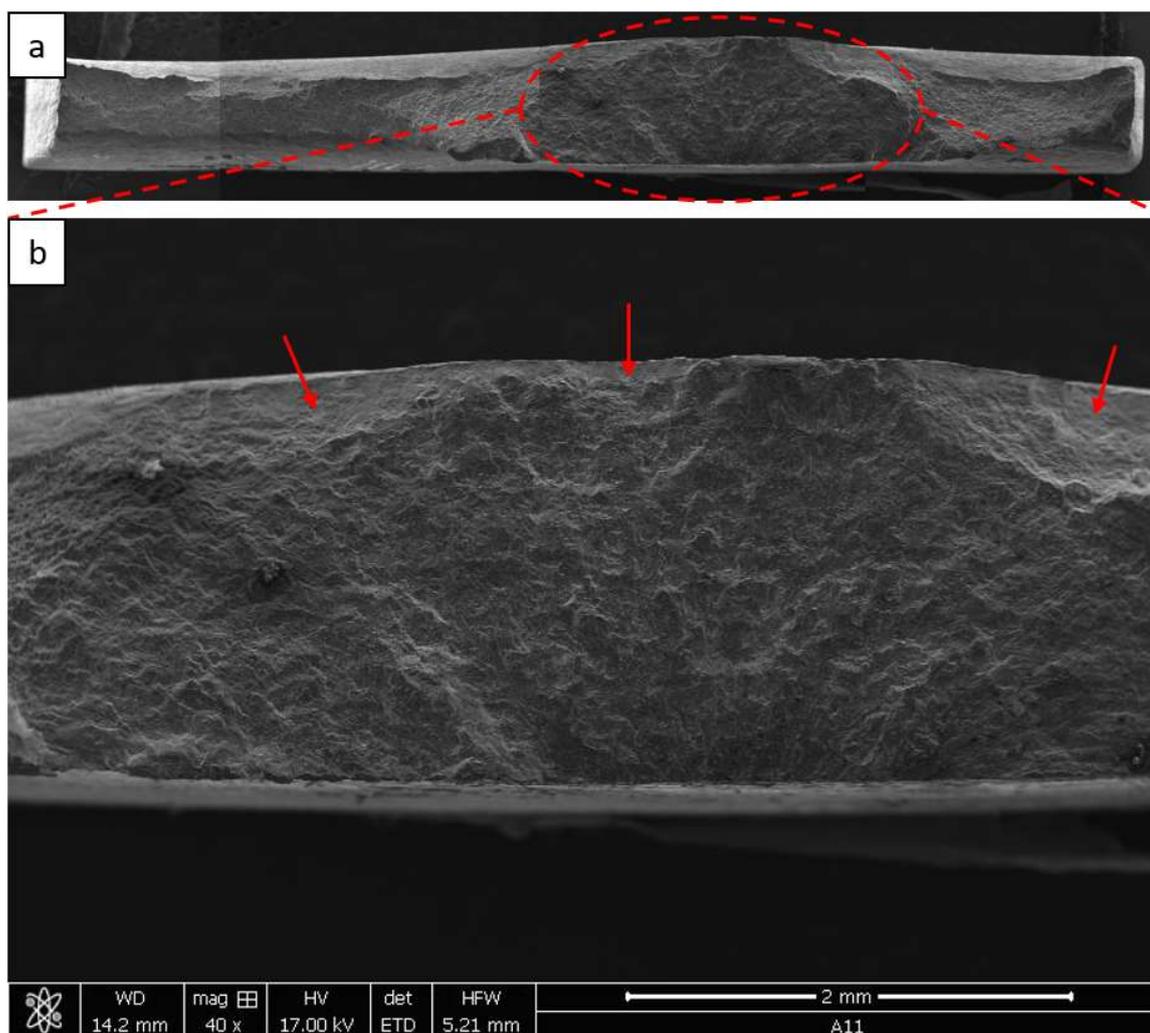
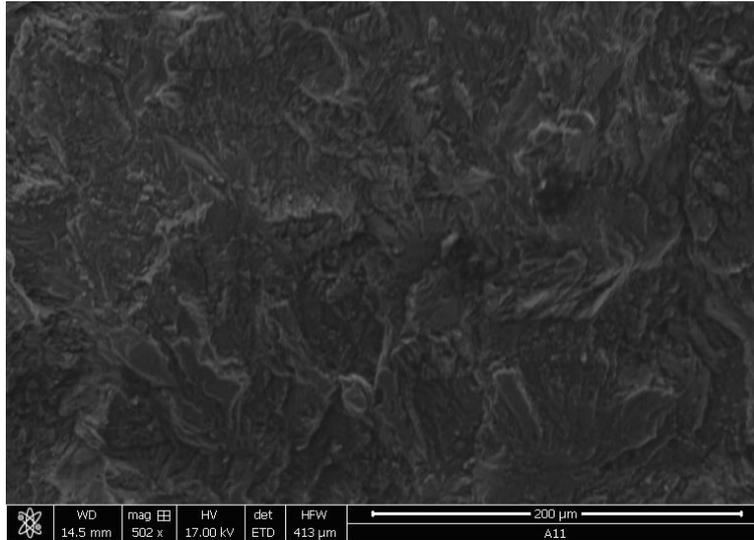


Figura 67 – Região central de fratura do CP A11 ampliada com magnitude de 502X. MEV.



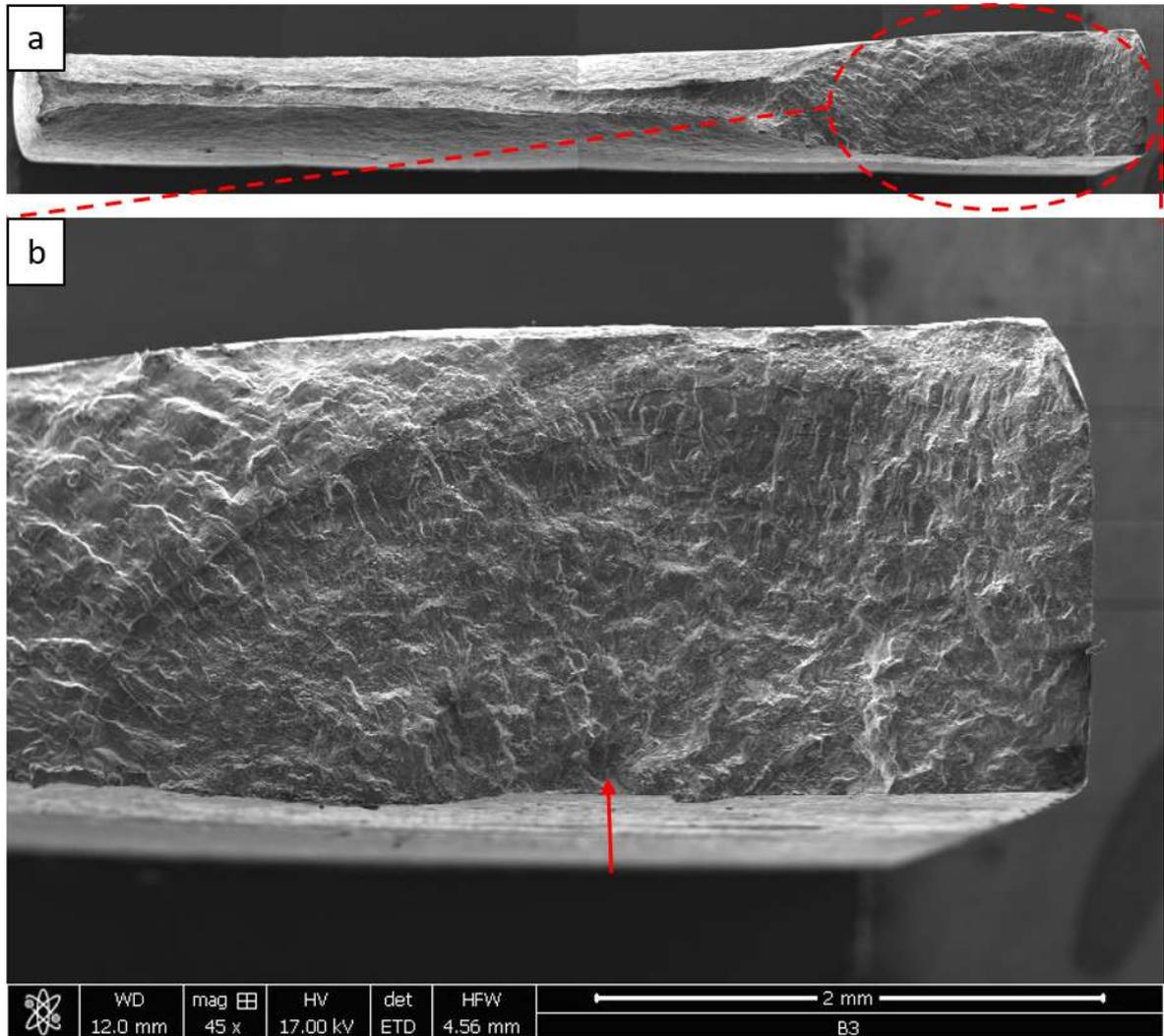
Fonte: O autor

A Figura 66b, referente ao CP A11, que atingiu o maior número de ciclos dentre todos os CP's da junta 3104-3104, apresenta os potenciais pontos de iniciação das trincas indicados pelas setas vermelhas. Observa-se que diferentemente dos CP's que romperam na região da solda, as linhas de propagação das trincas não são tão evidentes, e as outras regiões da amostra fraturaram por sobrecarga por excesso de deformação plástica.

5.5.2.2 Junta 5052-5052 – CP's B1 a B14

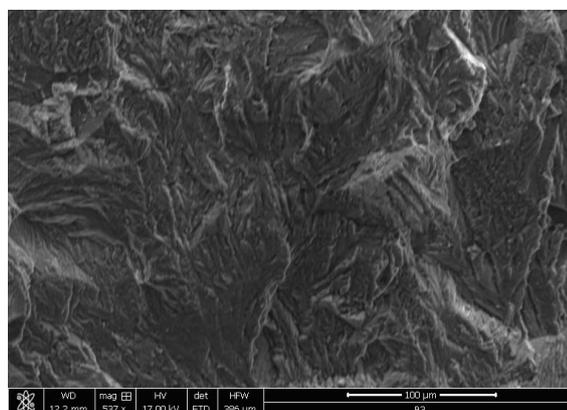
A Figura 68 apresenta a superfície de fratura do CP B3 da junta 5052-5052, ensaiado com um nível de tensão de 130 MPa e que se rompeu na região da ZTA com 432.820 ciclos. A Figura 69 apresenta uma imagem ampliada, mostrando a região fraturada.

Figura 68 – Superfície de fratura do CP B3 da junta 5052-5052 ensaiado a 130 MPa. Local da Fratura: ZTA. a) Composição de imagens para mostrar superfície completa. b) Imagem ampliada na região destacada. MEV.



Fonte: O autor.

Figura 69 – Região de fratura do CP B3 ampliada com magnitude de 537X. MEV.

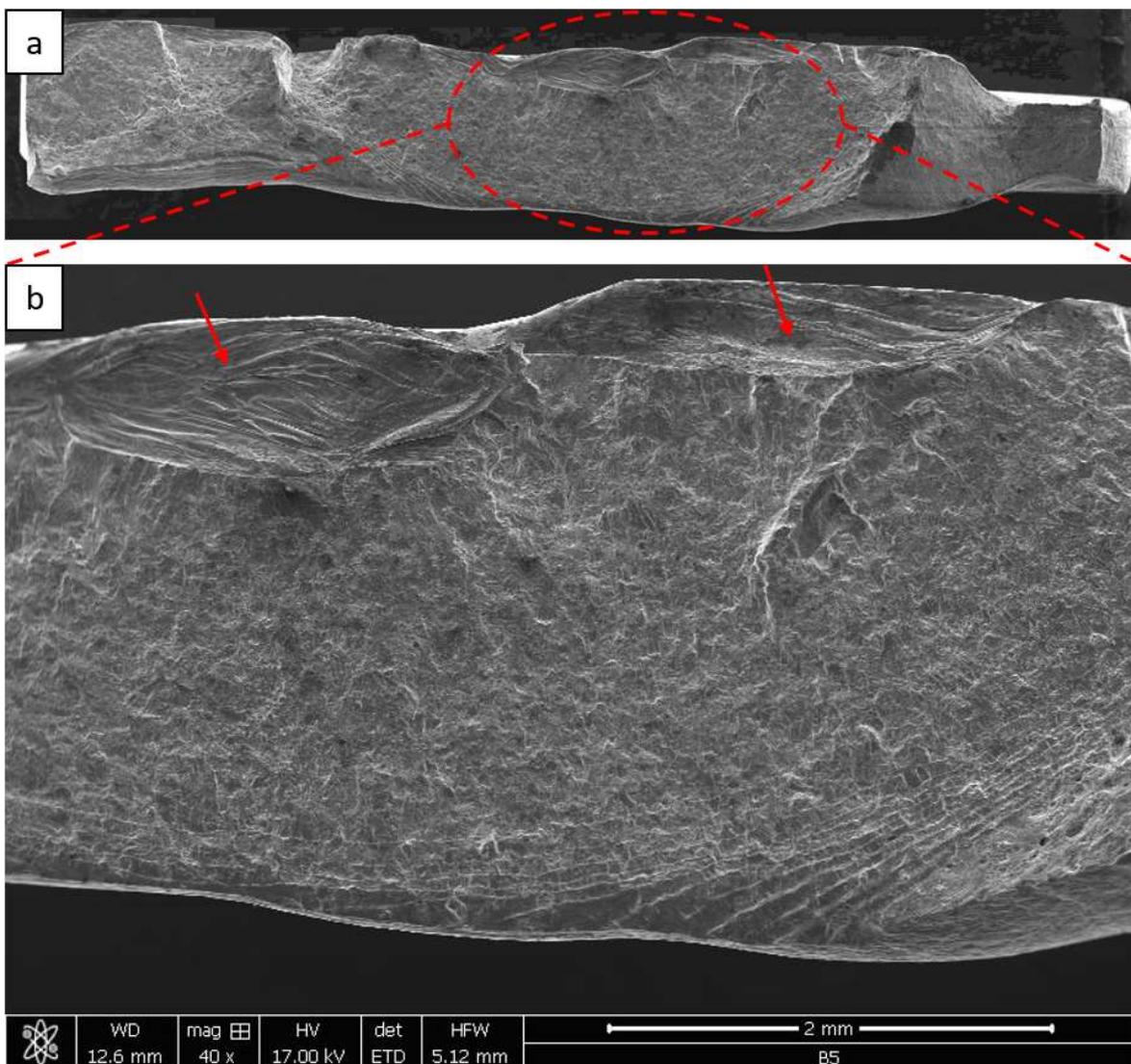


Fonte: O autor.

Observa-se que a trinca se iniciou na superfície da amostra, indicado pela seta vermelha, e se propagou de forma semielíptica. As demais regiões se romperam por sobrecarga por excesso de deformação plástica.

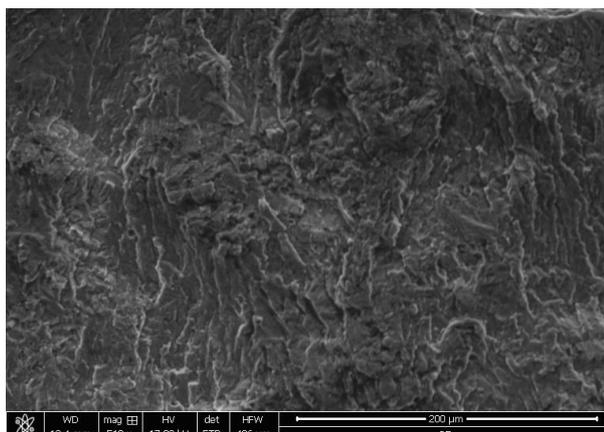
A Figura 70 apresenta a superfície de fratura do CP B5 da junta 5052-5052, ensaiado com um nível de tensão de 130 MPa e que se rompeu na região da solda com 27.136 ciclos. A Figura 71 apresenta uma imagem ampliada mostrando a região fraturada.

Figura 70 – Superfície de fratura do CP B5 da junta 5052-5052 ensaiado a 130 MPa. Local da Fratura: Solda. a) Composição de imagens para mostrar superfície completa. b) Imagem ampliada na região destacada. MEV.



Fonte: O autor.

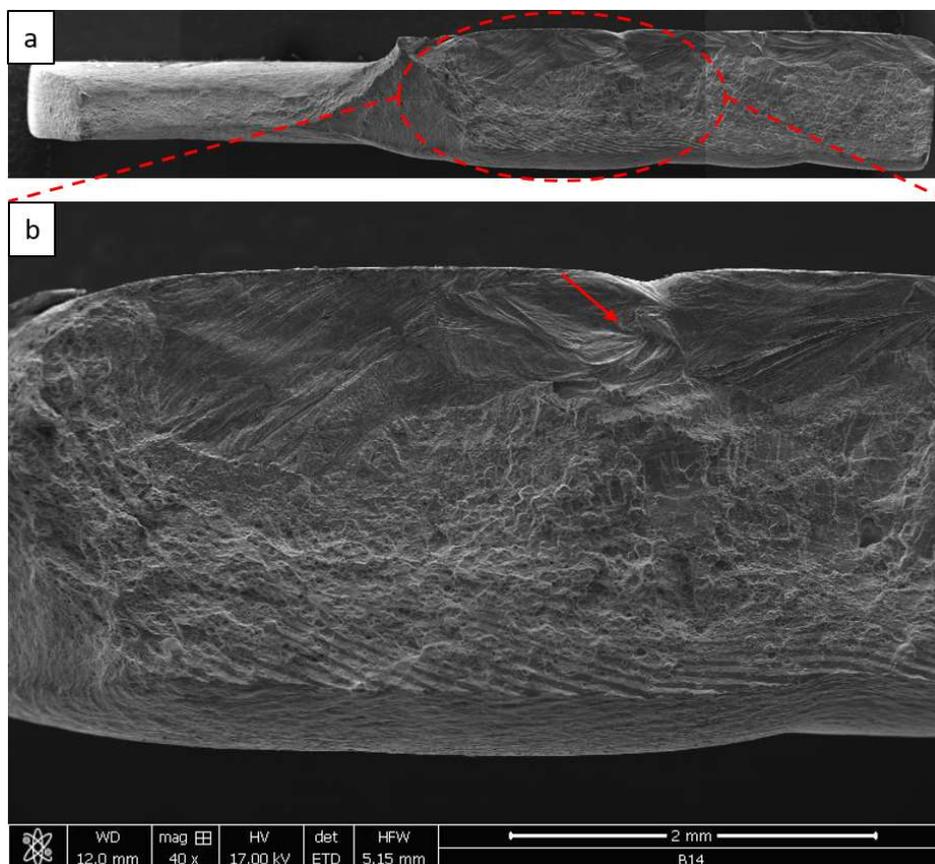
Figura 71 – Região de fratura do CP B5 ampliada com magnitude de 510X. MEV.



Fonte: O autor.

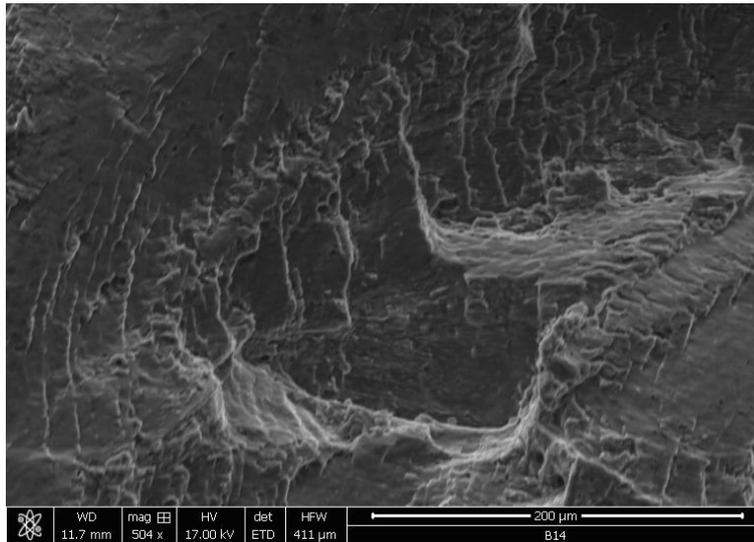
A Figura 72 apresenta a superfície de fratura do CP B14 da junta 5052-5052, ensaiado com um nível de tensão de 130 MPa e que se rompeu na região da solda com 4.341 ciclos. A Figura 73 apresenta uma imagem ampliada, mostrando a região fraturada.

Figura 72 – Superfície de fratura do CP B14 da junta 5052-5052 ensaiado a 130 MPa. Local da Fratura: Solda. a) Composição de imagens para mostrar superfície completa. b) Imagem ampliada na região destacada. MEV.



Fonte: O autor.

Figura 73 – Região de fratura do CP B14 ampliada com magnitude de 504X. MEV.



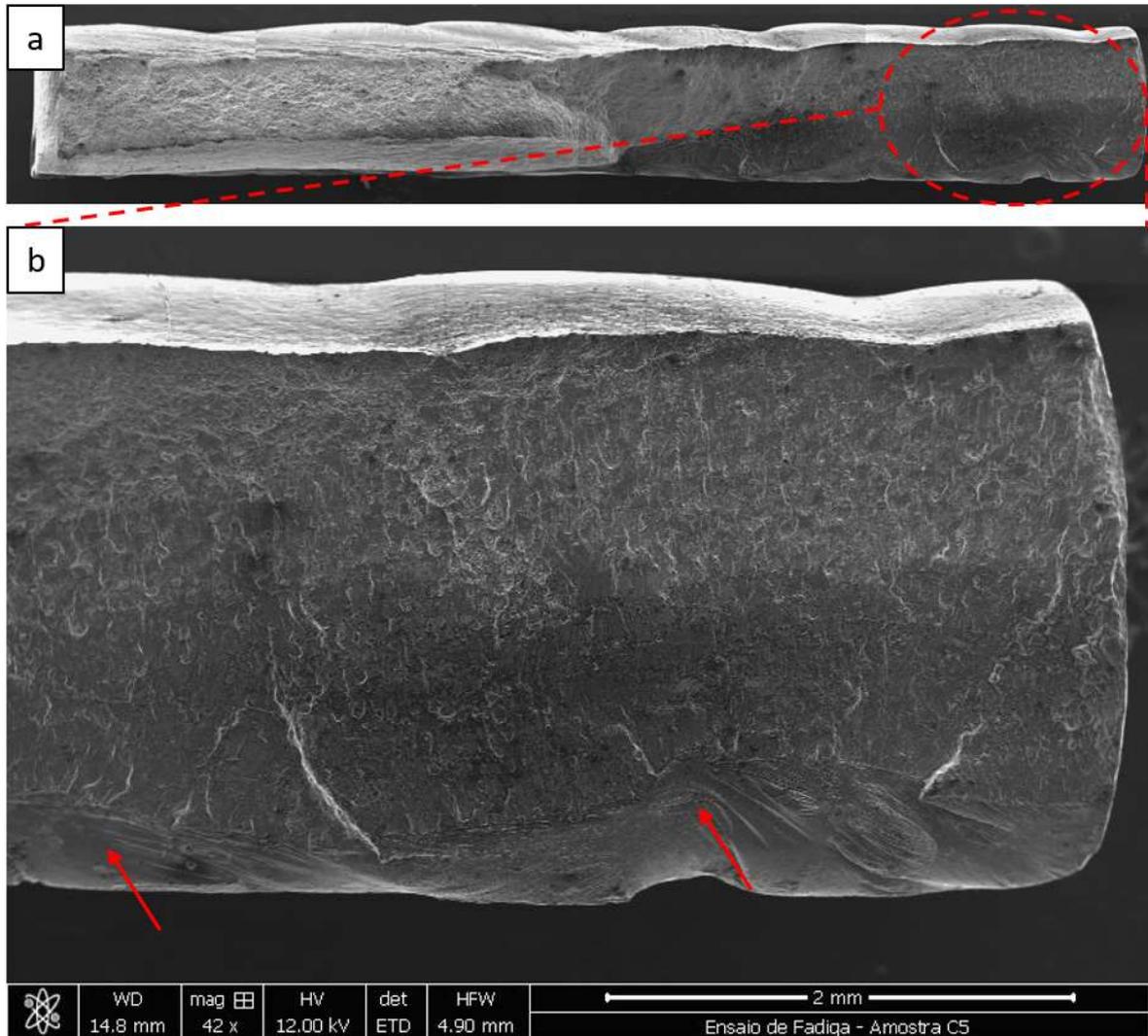
Fonte: O autor.

As Figuras 70b e 72b dos CP's B5 e B14, respectivamente, que fraturaram na região do cordão, mostram a frente de trinca crescendo a partir dos defeitos de solda indicados com setas vermelhas. Na Figura 42b, que mostra a raiz da solda nos corpos de prova da Junta 5052-5052, pode-se observar que houve falta de penetração da solda nesses corpos de prova.

5.5.2.3 Junta 3104-5052 – CP's C1 a C14

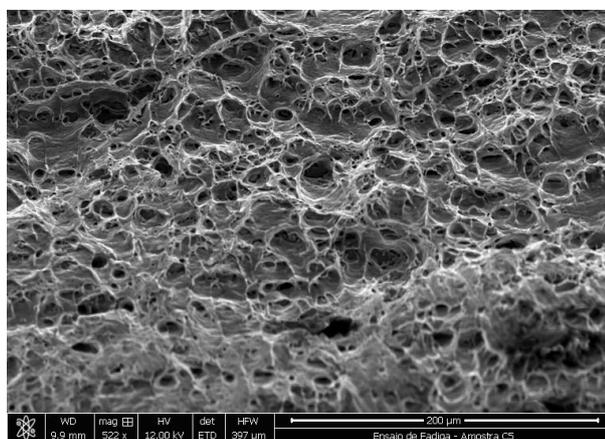
A Figura 74 apresenta a superfície de fratura do CP C5 da junta dissimilar 3104-5052, ensaiado a um nível de tensão de 130 MPa e que se rompeu na região da solda com 7.840 ciclos. A Figura 75 apresenta uma imagem ampliada da região fraturada.

Figura 74 – Superfície de fratura do CP C5 da junta 3104-5052 ensaiado a 130 MPa. Local da Fratura: Solda. a) Composição de imagens para mostrar superfície completa. b) Imagem ampliada na região destacada. MEV.



Fonte: O autor.

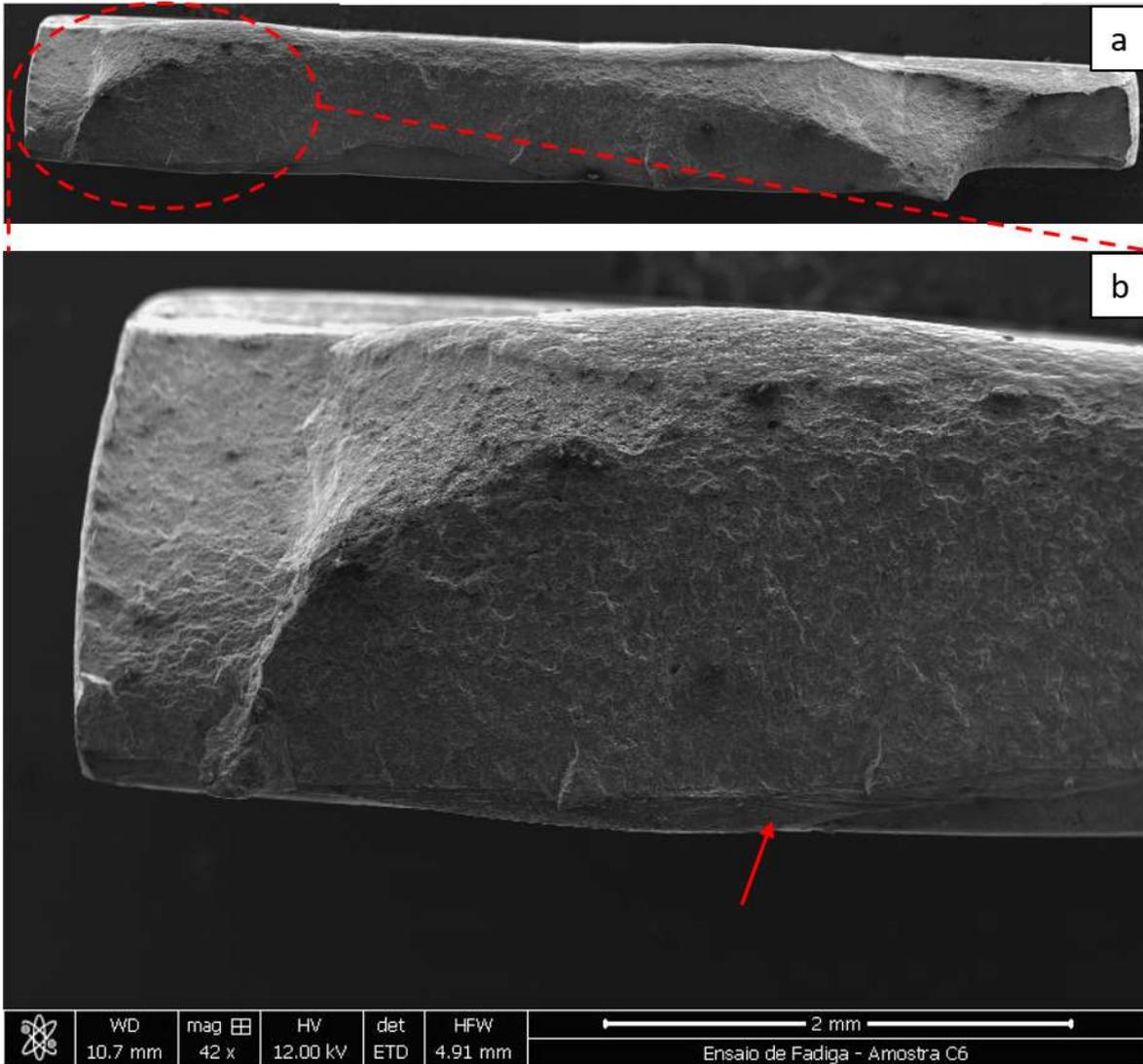
Figura 75 – Região de fratura do CP C5 ampliada com magnitude de 522X. MEV.



Fonte: O autor.

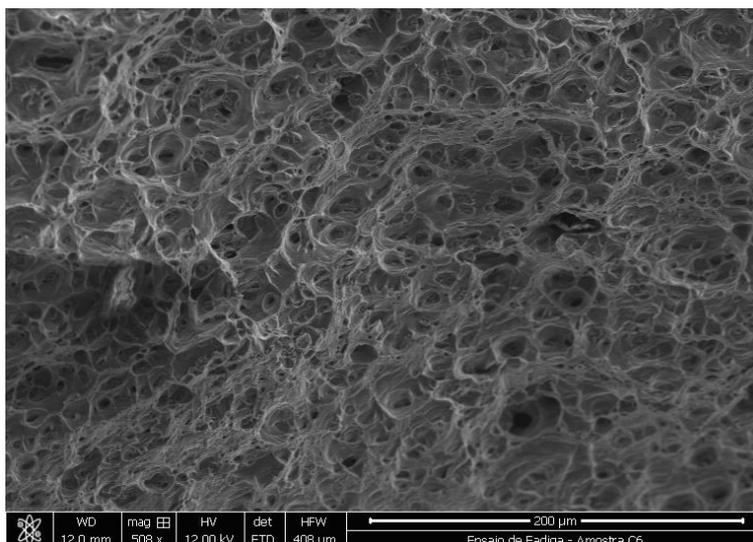
A Figura 76 apresenta a superfície de fratura do CP C6, ensaiado a um nível de tensão de 130 MPa e que se rompeu na região da solda com 9.716 ciclos. A Figura 77 apresenta uma imagem ampliada da região fraturada.

Figura 76 – Superfície de fratura do CP C6 da junta 3104-5052 ensaiado a 130 MPa. Local da Fratura: Solda. a) Composição de imagens para mostrar superfície completa. b) Imagem ampliada na região destacada. MEV.



Fonte: O autor.

Figura 77 – Região de fratura do CP C6 ampliada com magnitude de 508X. MEV.

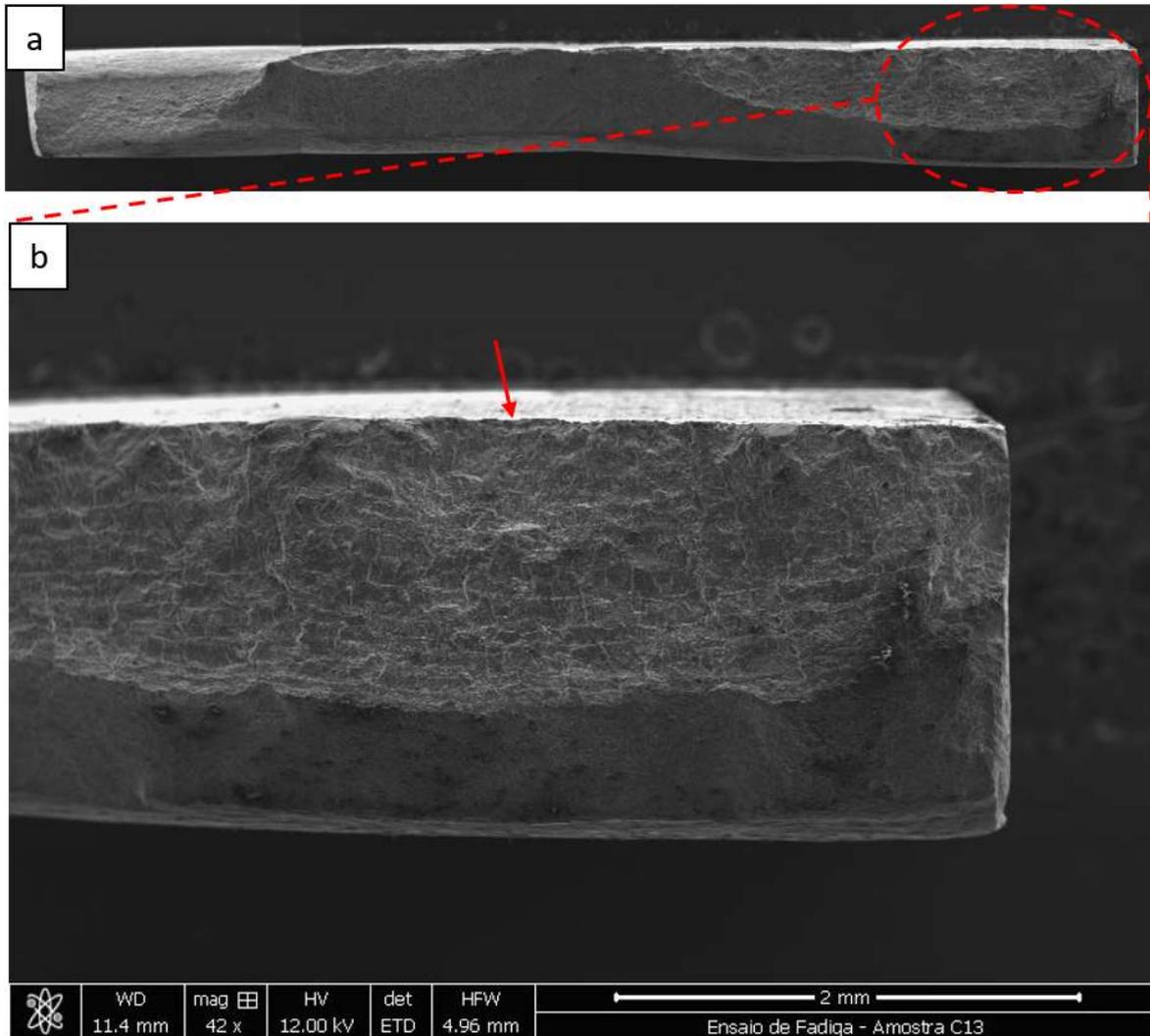


Fonte: O autor.

As Figuras 74b e 76b referentes aos CP's C5 e C6, respectivamente, mostram a frente de trinca crescendo a partir dos defeitos de solda indicados com setas vermelhas. Na Figura 43b, que mostra a raiz da solda nos corpos de prova da junta 3104-5052, pode-se observar que houve falta de penetração da solda nesses corpos de prova.

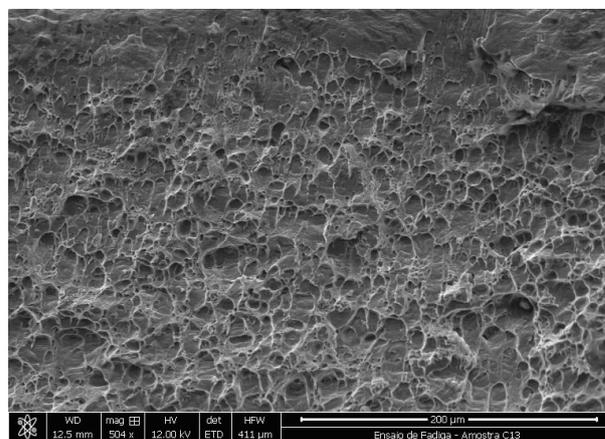
A Figura 78 apresenta a superfície de fratura do CP C13, ensaiado a um nível de tensão de 140 MPa e que se rompeu na região da ZTA com 423.631 ciclos. A Figura 79 apresenta uma imagem ampliada da região fraturada.

Figura 78 – Superfície de fratura do CP C13 da junta 3104-5052 ensaiado a 140 MPa. Local da Fratura: ZTA. a) Composição de imagens para mostrar superfície completa. b) Imagem ampliada na região destacada. MEV.



Fonte: O autor.

Figura 79 – Região de fratura do CP C13 ampliada com magnitude de 504X. MEV.



Fonte: O autor.

De acordo com a Figura 78b, observa-se que a trinca se iniciou na superfície da amostra, indicado pela seta vermelha, e se propagou de forma semielíptica. As demais regiões se romperam por sobrecarga por excesso de deformação plástica.

6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados encontrados pôde-se concluir que:

- O tamanho médio de grão medido no centro do cordão para todas as configurações de juntas soldadas (3104, 5052 e dissimilares) foi de 7,0 ASTM;
- O L.R.T dos metais base foi de 215 MPa para a liga 3104 e 229 MPa para a 5052. Para as juntas soldadas, em todas as configurações, variou entre 183 e 189 MPa, ou seja, resultados muito próximos;
- A perda de L.R.T nas juntas 3104-3104 e 3104-5052 com relação aos metais base ficou entre 17% e 18%. Já a junta 5052-5052 apresentou uma perda de 21%. Essa perda pode ser explicada pela recristalização na região da ZTA, que ocorreu porque a têmpera H32 está na condição recuperada, ou seja, possui energia interna armazenada na forma de defeitos;
- As medidas de dureza para os metais base 3104 e 5052 foram 69 e 72 HV respectivamente, valores similares às durezas encontradas nas amostras de juntas soldadas ultrapassavam 14 mm de distância a partir do centro do cordão;
- Para as 3 condições de juntas soldadas, a ZTA ficou entre 12 e 14 mm a partir do centro cordão de solda. Isso pode ser explicado pela utilização dos mesmos parâmetros de solda para todas as configurações;
- Durante o processo de soldagem, em todas as configurações de juntas, ocorreu o efeito de distorção rotacional, mesmo com as chapas estando presas aos sargentos. Esse efeito causou falta de penetração no terço final das chapas soldadas;
- A falta de penetração tem papel importante na redução da vida em fadiga dos materiais, causando o rompimento prematuro de alguns corpos de prova na região do cordão de solda;

- Para cada liga, para um determinado nível de tensão máxima, a vida em fadiga do metal base com razão de carga $R = 0,1$ teve uma queda abrupta, caracterizando fadiga de baixo ciclo. No caso da liga 3104 essa tensão ficou entre 215 e 217 MPa, e para a liga 5052, entre 225 e 232 MPa. Esses valores são próximos aos valores de L.R.T encontrados nos ensaios de tração, indicando que nessa faixa de tensão, a fadiga passa de alto ciclo para baixo ciclo;

- Para as três configurações de juntas observou-se uma queda no limite de resistência à fadiga considerando 2 milhões de ciclos. Para a junta 3104-3104 a queda foi de 41% e para as juntas 5052-5052 e 3104-5052, a queda foi de 48%.

- Observou-se que as duas ligas têm comportamentos muito semelhantes em todos os aspectos avaliados, indicando que uma liga pode substituir a outra em aplicações específicas, como é o caso do segmento de transportes.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se considerar:

- Realizar a soldagem dos materiais variando alguns parâmetros como velocidade de soldagem, corrente, vazão de argônio e abertura da raiz, com o intuito de evitar o problema de falta de penetração da solda no terço final da soldagem e evitar a falha prematura dos materiais;
- Realizar os ensaios utilizando também o metal de adição ER4043 para fazer um comparativo do comportamento nas duas condições. A liga ER4043 tem o silício como elemento principal, o que causa a redução do ponto de fusão e permite trabalhar com menor aporte térmico durante a soldagem;
- Fazer uma investigação mais aprofundada para entender o motivo da diferença de dureza no centro do cordão para as juntas 3104-3104 e 3104-5052 com relação à junta 5052-5052, quando soldadas com metal de adição ER5356.

REFERÊNCIAS

ABAL. **ANUÁRIO Estatístico 2021**. São Paulo, 2022.

ABRALATAS. **Relatório consolidado de práticas ESG - Setor dos fabricantes de latas de alumínio do Brasil - 2020-2021**. Disponível em: https://www.abralatas.org.br/wp-content/uploads/2022/12/relatorio_ESG_ABRALATAS_2022.pdf. Acesso em: 20 nov. 2022.

ALCAN. **Manual de soldagem**. São Paulo, 2001.

THE ALUMINUM ASSOCIATION, AA. **International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys**. Virginia, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS, ASM. **Metals Handbook 9th ed. Welding, Brazing and Soldering**. Ohio, 1983. v.6.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E112-21: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size**. Pensilvania, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E384-17: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials**. Pensilvania, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E466-07: Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials**. Pensilvania, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E739-10: Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data**. Pensilvania, 2010.

AMERICAN WELDING SOCIETY, AWS. **Welding Handbook, Materials and Applications – Part 1**, 8th ed. Miami: AWS, 1996. v.3.

AMERICAN WELDING SOCIETY, AWS. **Welding Handbook, Welding Science & Technology**, 9th ed. Miami: AWS, 2001. v.1.

ANTONINI, J.M. **Health Effects Associated with Welding**. Morgantown: Elsevier, 2014.

ASM HANDBOOK. **Failure analysis and prevention**. 9th ed. Metals Park: ASM International, 1986. v. 11.

ASM HANDBOOK. **Fatigue and Fracture**. 9th ed. ASM International, 1996. v.9, 1057p., ISBN 0-87170-385-8.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7823: Alumínio e suas ligas – Chapas – Propriedades mecânicas**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 2107: Alumínio e suas ligas - Designação das têmperas**. Rio de Janeiro, 2008.

BABU, N. *et al.* Evaluating mechanical and metallurgical properties of GTAW AA 5059 aluminium alloy joints. **Materials Today: Proceedings**. v.22, p. 353-363, 2020.

BARTER, S. A.; MOLENT, L.; WANHILL, R. J. H. Typical fatigue-initiating discontinuities in metallic aircraft structures. **International Journal of Fatigue**, v. 41, p. 11- 22, 2012.

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 8.ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2012.

DOWLING, E. M. **Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for deformation, fracture, and fatigue**. 4th ed. New Jersey: Pearson, 2007.

HOBART. **Guide for Aluminum Welding**. Disponível em: https://www.hobartbrothers.com/wp-content/uploads/2020/09/Aluminum_Welding_Guide.pdf. Acesso em: 05 ago. 2022.

HOBBACHER, A. **Recommendations for fatigue design of welded joints and components**. 2nd ed. Switzerland: Springer, 2016. 143 p.

LUKÁS, P.; KUNZ, L. Cyclic slip localisation and fatigue crack initiation in fcc single crystals. **Materials Science and Engineering**. v.314, p. 75-80, 2001.

MATHERS, G. **The welding of aluminium and its alloys**. Florida: CRC Press, 2002.

MILA, J. **Aluminum welding: A complete guide for aluminum welding**. 2021. ISBN 979-8753788092.

NORTON, R. **Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 1055 p.

NOVELIS DO BRASIL LTDA. **Novelis anuncia novas metas globais de sustentabilidade e compromisso em zerar a emissão de carbono até 2050**. Disponível em: https://pt-br.novelis.com/wp-content/uploads/2021/04/Release_Plataforma-de-Sustentabilidade-Novelis.pdf. Acesso em: 20 set. 2021.

RAABE, D. *et al.* Making sustainable aluminum by recycling scrap: The science of “dirty” alloys. **Progress in Materials Science**. v.128, p. 100947, 2022.

REED-HILL, R. E. **Princípios de metalurgia física**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982.

REVISTA ALUMINIO. **Grupo Ibrap e Elfer desenvolvem soluções para aplicação do alumínio no setor de transportes**. Disponível em: <https://revistaaluminio.com.br/grupo-ibrap-e-elfer-desenvolvem-solucoes-para-aplicacao-do-aluminio-no-setor-de-transportes/>. Acesso em: 27 set. 2021.

STEPHENS, R. I.; FATEMI, A.; STEPHENS, R. R.; FUCHS, H. O. **Metal fatigue in engineering**, 2nd ed. New York: John Wiley, 2001.

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

WEMAN, K. **Welding Processes Handbook**. 2nd ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012.

XU, S. *et al.* Fatigue strength evaluation of 5059 aluminum alloy welded joints considering welding deformation and residual stress. **International Journal of Fatigue**. v.162, p. 106988, 2022.

YELAMASETI, B. *et al.* Optimization of GTAW parameters for the development of dissimilar AA5052 and AA6061 joints. **Materials Today: Proceedings**. v.47, p. 4350-4356, 2021.