UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE-FURG

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MÊCANICA

USO DO PROCESSO DE SOLDAGEM MIG NA LIGA DE ALÚMINIO-MAGNÉSIO 5086-H116

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

MICHEL ALVES DOS SANTOS

RIO GRANDE, RS

2022

MICHEL ALVES DOS SANTOS

USO DO PROCESSO DE SOLDAGEM MIG NA LIGA DE ALÚMINIO-MAGNÉSIO 5086-H116

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande- FURG - como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica – Área de Concentração: Engenharia de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Volcanoglo Biehl

RIO GRANDE, RS

2022

Ficha Catalográfica

S237u Santos, Michel Alves dos.
Uso do processo de soldagem MIG na liga de alúminio-magnésio 5086-H116 / Michel Alves dos Santos. – 2022.
80 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio Grande/RS, 2022.
Orientador: Dr. Luciano Volcanoglo Biehl.

1. Alumínio 2. Ligas de alumínio-magnésio 3. Soldagem MIG 4. Metal de adição I. Biehl, Luciano Volcanoglo II. Título.

CDU 621

Catalogação na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG

ESCOLA DE ENGENHARIA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

PPMec

Ata n° **13/2022** da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos dezoito dias do mês de novembro de dois mil e vinte e dois, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às nove horas, online via webconferência, a que se submeteu o mestrando **Michel Alves dos Santos**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa Engenharia de soldagem e materiais, com o seguinte título: **Uso do Processo de Soldagem Mig na Liga de Aluminio-Magnésio 5086-H116.** Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Luciano Volcanoglo Biehl, Jorge Luis Braz Medeiros e José de Souza, sob a presidência do Professor Luciano Volcanoglo Biehl. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Luciano Volcanoglo Biehl: Aprovado
2. Jorge Luis Braz Medeiros: Aprovado
3. Jose de Souza: Aprovado

Foi concedido um prazo de 30 dias para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

gov.br Documento assinado digitalmente
LUCIANO VOLCANOGLO BIEHL
Data: 18/11/2022 09:41:13-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

1. _____

CPF: 575.195.100-00

gov.br Documento assinado digitalmente
JORGE LUIS BRAZ MEDEIROS
Data: 18/11/2022 10:06:45-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

2. _____

CPF: 588.871.210-87

gov.br Documento assinado digitalmente
JOSE DE SOUZA
Data: 18/11/2022 09:59:36-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

3. _____

CPF: 914.626.140-00

gov.br Documento assinado digitalmente
MICHEL ALVES DOS SANTOS
Data: 18/11/2022 10:34:54-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

Michel Alves dos Santos: _____

DEDICÁTORIA

Dedico este trabalho a Deus, autor da criação, que permite ao ser humano desvendar um pouco da Sua sabedoria.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço à minha mãe, que sempre me incentivou a trilhar bons caminhos a fim de que eu alcançasse os melhores destinos na vida.

Ao meu tio Walter Luiz, engenheiro por natureza, que me ensinou como filho o ofício de pai.

A minha família, que teve de buscar alternativas para suprir a minha ausência durante o percurso deste estudo.

Aos amigos e familiares, pelas palavras de incentivo.

Ao meu orientador, Luciano Volcanoglo Biehl, por acreditar, incentivar, apoiar e seguir comigo até a conclusão deste trabalho.

Ao professor Jorge Braz, pelas mensagens, prontamente, respondidas com sugestões valiosas.

Aos demais professores, por compartilharem seus conhecimentos, que muito ajudaram na condução desta pesquisa.

À FURG (Universidade Federal do Rio Grande), por oportunizar esta pesquisa e disponibilizar os espaços necessários para a realização dos testes iniciais, no Laboratório de Metalografia.

À UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro), pelos testes conclusivos desta pesquisa nos Laboratórios de Aulas Práticas e Preparação de Amostras e de Microscopia Óptica.

Ao professor Leonardo Sales Araújo e ao técnico de laboratório Marcos Vinícius dos Santos, ambos da UFRJ, pela acolhida e apoio na conclusão deste estudo.

Tudo tem seu tempo. Há
um momento oportuno
para cada coisa debaixo
do céu”.

Eclesiastes 3.1

RESUMO

A partir das observações de trincas nas soldas de uma embarcação, esta pesquisa replicou o procedimento de soldagem MIG CC+ nos corpos de prova e, depois dessa etapa, por meio de ensaios realizados, inicialmente, no laboratório de metalografia da FURG (Universidade Federal do Rio Grande) com os primeiros lixamentos dos corpos de provas e, posteriormente, continuados e finalizados com as lixas 100, 220, 320 400, 600 e 1200 para metalografia, com os ensaios de macrografia, micrografia e de dureza Brinell, nos equipamentos OLYMPUS SZ61, LEICA DMRM, e WPM, respectivamente, nos laboratórios de aulas práticas e preparação de amostras e de microscopia óptica da UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro), as análises foram concluídas. Nos ensaios de macrografia, com ácido clorídrico puro e um tempo 30s, revelaram-se porosidades na zona fundida, ocultando a ZTA. Nas micrografias com metal de adição 5183, com zoom de 50x, pode-se analisar visualmente que na ZTA entre o metal base 5052F e a zona fundida 5183 ocorreram microfissuras na transição e porosidades na zona fundida, no entanto, na ZTA com o metal base 5086, na transição, não houve visualmente as microfissuras. Na micrografia, com metal de adição 5356, com zoom de 50x, pode-se analisar visualmente que na ZTA entre o metal base 5086 H116 e a zona fundida 5356 ocorreram microfissuras na transição e porosidades na zona fundida, mas, na ZTA com o metal base 5052F, na transição, não ocorreram visualmente as microfissuras. Nos ensaios de Dureza Brinell, com uma solda e o consumível 5183, os valores de dureza auferidos para o metal base 5052F foi de 115HB e para o metal base 5086, de 164HB, ou seja, além do surgimento dos poros nas ZTA´s, a dureza apresentada na ZTA 5052F ficou com 117HB e ZTA 5086, com 147HB. Com uma solda e a troca do consumível pelo ER 5356, as imagens demonstraram visualmente uma transição melhor entre as ZTA's, porém com presença de poros também. Soldagens com as características dos materiais desta pesquisa tornam-se, financeiramente, um investimento que acarretará em desperdício de material e, quanto à segurança, as falhas podem ocasionar perdas humanas, caso a porosidade se alinhe e rompa a parte reestruturada, pois, conforme a norma ISO 6520-1:1998, os resultados de todos os corpos de provas foram reprovados

Palavras-chave: **Alumínio; ligas de alumínio-magnésio, soldagem MIG; metal de adição**

ABSTRACT

Based on the observations of cracks in the welds on a ship, this research replicated the MIG CC+ welding procedure on the evidence materials and, after this stage, through tests initially carried out in the metallography laboratory of FURG (Universidade Federal do Rio Grande) with the first sanding of the proof materials and, later, continued and finalized with sandpaper 100, 220, 320 400, 600 and 1200 for metallography, with macrography, micrography and Brinell hardness tests, in OLYMPUS SZ61 equipment, LEICA DMRM, and WPM, respectively, in the laboratories of practical classes and sample preparation and optical microscopy at UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro), the analyzes were completed. In the macrograph tests, with pure hydrochloric acid and a time of 30s, porosities were revealed in the fused zone, hiding the HAZ. In the micrographs with filler metal 5183, with a 50x zoom, it can be visually analyzed that in the HAZ between the base metal 5052F and the fused zone 5183 there were microcracks in the transition and porosities in the fused zone, however, in the HAZ with MB 5086 , in the transition, there were no microcracks visually. In the micrograph, with filler metal 5356, with a zoom of 50x, it can be visually analyzed that in the HAZ between the base metal 5086 H116 and the cast zone 5356 there were microcracks in the transition and porosities in the cast zone, but in the HAZ with the metal base 5052F, in the transition, microcracks did not visually occur. In the Brinell Hardness tests, with a weld and consumable 5183, the hardness values obtained for the base metal 5052F was 115HB and for the base metal 5086, 164HB, that is, in addition to the appearance of pores in the HAZ's, the hardness presented in the HAZ 5052F was 117HB and in the 5086, with 147HB. With a weld and the replacement of the consumable by the ER 5356, the images visually demonstrated a better transition between the HAZ's, but with the presence of pores as well. Welding with the characteristics of the materials in this research becomes, financially, an investment that will result in material waste and, in terms of safety, failures can cause human losses, if the porosity aligns and breaks the restructured part, because, according to the ISO 6520-1:1998 standard, the results of all proof materials were disapproved.

Keywords: **Aluminum; aluminum-magnesium alloys, MIG welding; filler metal.**

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Propriedades físico-químicas do alumínio.....5

Figura 2 - Comparação da perda de massa com relação ao processo de soldagem MIG/MAG e TIG.....11

Figura 3 - Macroestrutura com regiões estruturais do cordão de solda do CP1 soldada com chanfro em I, passe na posição plana, tocha com angulação de deslocamento aproximado de 30º e deslocamento empurrando.....12

Figura 4 - Macroestrutura com regiões estruturais do cordão de solda do CP2 soldado com um chanfro com ângulo de 60º, onde cada bisel tem 30º e desbastado com um disco de lixa flap; sentido de deslocamento empurrando de 30º de ângulo.....13

Figura 5 - Macroestrutura com regiões estruturais do cordão de solda do CP3, com chanfro em ângulo de 60º, bisel de 30º, desbastado também através do disco de lixa flap e nariz com 1 mm de espessura..... 13

Figura 6 – Desenho esquemático do processo de soldagem GMAW..... 18

Figura 7 - Esquema das condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência para GMAW com um gás de proteção a base de argônio..... 20

Figura 8 - Limite de transição da transferência globular para a spray em função da alteração da corrente..... 22

Figura 9 - Diagrama esquemático de uma onda do tipo corrente pulsada e transferência do metal..... 22

Figura 10 - Principais processos de soldagens em junções dissimilares.....31

Figura 11 - Combinações similares e dissimilares das ligas preparadas com chanfro em ângulo de 45°. 5754 na espessura de 5 mm, a 5383 na espessura de 7 mm e a 6005 de 4 mm.....33

Figura 12 - Fotografia das amostras das ligas dissimilares 5754-6005 (a), 5383-6005 (b), 5754-5383 (c), após ensaio de dobramento.....33

Figura 13 - Efeito dos elementos de liga na solubilidade do hidrogênio no alumínio líquido em 1246 ºC e pressão parcial de hidrogênio de 1 atm.....35

Figura 14 - Efeito da recristalização e superaquecimento na microestrutura e dureza na ZTA e MB encruados sem transformação alotrópica.....36

Figura 15 – Defeitos túneis em soldagem por FSW.....37

Figura 16 - Micrografia óptica de metal de solda da junta AA6061 em P = 5 kW, S = 4m / min, Dd = 0, 15 l / min de argônio.....38

Figura 17 - Microscopia óptica do metal de solda na condição Ar+N2O+O2 (Aumento de 200X) 39

Figura 18 - Suscetibilidade à trinca de algumas ligas de alumínio.....40
Figura 19 - Rechupe de cratera.....41
Figura 20 - Seleção de material de adição para ligas de alumínio.....44
Figura 21 – Amostras dos corpos de prova.....45
Figura 22 – Amostras dos corpos de prova.....46
Figura 23 – Macrografia com 02 soldas (2S) e metal de adição ER 5356.....48
Figura 24 - Macrografia com 02 soldas (2S) e metal de adição ER 5183.....49
Figura 25 – Macrografia com 01 solda (1S) e metal de adição ER 5183.....49
Figura 26 – Macrografia com 01 solda (1S) e metal de adição ER 5356.....50
Figura 27 – Micrografia 1 solda 5052F 5183 ZF 50x.....51
Figura 28 – Micrografia 1 solda 5086 5183 ZF 50x.....51
Figura 29 – Micrografia 1 solda 5086 5356 ZF 50x.....52
Figura 30 - Micrografia 1 solda 5052F 5356 ZF 50x.....52
Figura 31 – Micrografia 2 soldas 5183 5086 ZF 50x.....53
Figura 32 - Micrografia 2 soldas 5052F 5356 ZF 50x.....54
Figura 33 - Micrografia 2 soldas 5356 5086 ZF 50x.....55
Figura 34 - Micrografia 2 soldas 5052F 5356 ZF 50x.....55
Figura 35 - Dureza Brinell com 01 solda 5052F MB.....57
Figura 36 – Dureza Brinell com 01 solda ER 5183 com 5052F ZTA.....57
Figura 37 – Dureza Brinell com 01 solda 5086 H116 MB.....58
Figura 38 – Dureza Brinell com 01 solda ER 5183 com 5086 H116 ZTA.....58
Figura 39 – Dureza Brinell com 01 solda ER 5183 ZF.....59
Figura 40 – Dureza Brinell com 01 solda ER 5356 com 5052F ZTA.....60
Figura 41 – Dureza Brinell com 01 solda 5052F MB.....60
Figura 42 – Dureza Brinell com 01 solda ER 5356 com 5086 H116 ZTA.....61
Figura 43 – Dureza Brinell com 01 solda 5086 H116 MB.....61
Figura 44 – Dureza Brinell com 01 solda ER 5356 ZF.....62
Figura 45 – Dureza Brinell com 02 soldas ER 5183 ZF.....63
Figura 46 – Dureza Brinell com 02 soldas 5086 H116 MB.....63
Figura 47 – Dureza Brinell com 02 solda 5052F MB.....64

Figura 48 – Dureza Brinell com 02 soldas ER 5183 com 5052F ZTA.....64
Figura 49 – Dureza Brinell com 02 soldas ER 5183 com 5086 H116 ZTA.....65
Figura 50 – Dureza Brinell com 02 soldas 5052F MB.....66
Figura 51 – Dureza Brinell com 02 soldas ER 5356 com 5052F ZTA.....66
Figura 52 – Dureza Brinell com 02 soldas ER 5356 ZF.....67
Figura 53 – Dureza Brinell com 02 soldas 5086 H116 MB.....67
Figura 54 – Dureza Brinell com duas soldas ER 5356 com 5086 H116 ZTA.....68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Complementação das principais designações, com três dígitos, das ligas após o tratamento H.....16

Tabela 2 - Características dos modos de transferência metálica na soldagem *GMAW*.....20

Tabela 3 - Tabela comparativa de dureza HB, KSI e LRT.....69

LISTA DE ABREVIATURAS

ASTM – American Society for Testing and Materials

ABAL – Associação Brasileira do Alumínio.

MIG – *Metal Inert Gas*.

MAG – *Metal Ative Gas*.

MIG-CA – *Metal Inert Gas* – Corrente Alternada.

MIG-P CC+ - *Metal Inert Gas*-Pulsado em Corrente Contínua positiva.

TIG – *Tungstênio Inert Gas*.

TIG-CA - *Tungstênio Inert Gas* – Corrente Alternada.

GMAW – *Gas Metal Arc Welding*.

GTAW – *Gas Tungsten Arc Welding*.

AA – *Aluminum Association*.

ZF – Zona Fundida.

ZTA – Zona Térmica Afetada.

MB – Metal Base ou Metal de Base

ZAC – Zona Afetada pelo Calor.

CP – Corpo de Prova.

AWS – *American Welding Society*.

ER - Eletrodo Revestido.

EN – Eletrodo em Negativo

UGPP – Uma Gota por Pulso.

MIG-AF – *Metal Inert Gas* – Arame Frio.

MIG-C – *Metal Inert Gas* – Convencional.

ZPM – Zona Parcialmente Misturada.

ISO – *International Organization for Standartization*.

MO - Microscopia óptica

MEV - Microscopia eletrônica de varredura

LISTA DE SÍMBOLOS

O_2 - Oxigênio.

Fe – Ferro.

Cu – Cobre.

Si – Silício.

Mn – Manganês.

Mg – Magnésio.

Cr – Cromo.

Zn – Zinco.

Ti – Titânio.

Ar – Argônio.

N_2O – Óxido nitroso

Atm – Atmosfera.

Al_2O_3 – Óxido de alumínio.

SiO_2 – Dióxido de alumínio.

FE_2O_3 – Óxido ferroso.

TiO_2 – Dióxido de titânio.

CO_2 – Dióxido de carboneto.

Al_3Mg_2 – Fase de equilíbrio Al - Mg

Al-Si – Alumínio-Silício.

Al-Cu – Alumínio-Cobre.

Al-Fe – Alumínio-Ferro.

Al-Zn – Alumínio-Zinco.

Al-Li – Alumínio-Lítio.

Al-Mg – Alumínio-Magnésio.

Al-Ti – Alumínio-Titânio.

°C – Graus Celsius.

% - porcentagem

≥ - Maior ou igual.

≤ - Menor ou igual.

α – Alfa

β – Beta

mm – Milímetros

ms – Milísegundos

l/min. – Litros por minuto.

m/min. – Metros por minuto.

CC+ - Corrente Contínua em polaridade positiva.

CC- - Corrente Contínua em polaridade negativa.

H_2O – Água destilada.

HNO_3 – Ácido nítrico.

HF - Ácido fluorídrico.

HCL – Ácido clorídrico.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....1

1.1 Objetivos gerais.....4

1.2 Objetivos específicos.....4

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....5

2.1 Características e soldabilidade do alumínio.....5

2.1.1 Sensibilidade à trinca.....6

2.1.2 Resistência.....6

2.1.3 Ductilidade.....6

2.1.4 Resistência à corrosão.....7

2.1.5 Serviço de temperatura elevada.....7

2.1.6 Anodização.....7

2.1.7 Tratamento térmico pós-solda.....7

2.1.8 Tenacidade.....8

2.2 Principais ligas de alumínio para o setor naval.....8

2.2.1 Ligas da série 5xxx.....8

2.2.2 As ligas 5086 e 5052.....9

2.2.2.1 5086.....10

2.2.2.2 5052.....11

2.2.3 – Têmperas.....14

2.3 Processo de soldagem MIG.....17

2.3.1 Métodos de transferência metálica.....19

2.3.1.1 Transferência por curto-circuito.....21

2.3.1.2 Transferência globular.....21

2.3.1.3 Transferência *Spray*.....21

2.3.1.4 Transferência pulsada.....22

2.3.2 Consumíveis.....23

2.3.2.1 Arames de adição.....23

2.3.2.2 Gás de proteção.....26

2.4 MIG em ligas de alumínio da série 5xxx.....29

2.5 Soldagem de ligas dissimilares.....30
2.5.1 MIG em ligas de alumínio dissimilares.....32
2.6 Falhas nas soldas em alumínio.....34
2.6.1 Trincas de solidificação.....39
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....43
3.1 Caracterização dos materiais.....43
3.1.1 Tabela de seleção de material de adição.....44
3.2 Métodos.....44
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....48
4.1 Ensaios.....48
4.1.1 Ensaios por Macrografia.....48
4.1.2 Ensaios por Micrografia.....50
4.1.3 Ensaios de Dureza Brinell.....56
4.1.4 Discussões.....69
5. CONCLUSÕES.....72
6. TRABALHOS FUTUROS.....73
7. REFERÊNCIAS.....74

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o décimo quinto produtor primário de alumínio e o quarto em produção da bauxita e, considerando que a necessidade de alumínio para os processos de produção interna aumenta assim como é notório o potencial do país na comercialização do metal (ABAL, 2019), essas características produtivas têm despertado estudos recentes com o alumínio em diferentes setores industriais. Para o presente estudo, as perspectivas estão centradas no segmento náutico visto que uma embarcação foi o propulsor que despertou o interesse pela investigação do assunto aqui apresentado.

Sendo assim, é viável resgatar um pouco da história desse metal: extraído da bauxita, rocha matéria-prima do alumínio, a identificação desse metal deu-se em 1821, na França. Foi isolado como metal em 1845 e o público passou a conhecê-lo em 1855. Apesar de sua abundância no planeta Terra, permaneceu desconhecido por longo tempo pelo fato de necessitar estar combinado a outro material, em geral, com o oxigênio (O_2) cuja mistura emerge o óxido de alumínio (Al_2O_3). Outras combinações como o sulfato de alumínio para a indústria química, o aluminoso para a indústria de abrasivos e cimento colaboram para que a bauxita seja amplamente empregada no mundo inteiro, no entanto, para o setor metalúrgico, onde se situa a atual pesquisa, essa matéria-prima necessita das seguintes especificações: mínimo de 55% de Al_2O_3 - óxido de alumínio (alumina), máximo de 7% de SiO_2 – dióxido de alumínio - reativa, 8% de Fe_2O_3 - óxido ferroso (hematita) e 4% de TiO_2 - dióxido de titânio (MÁRTIRES CÔRREA, 2001). Com essas combinações sendo descobertas, requerendo mais da introdução do alumínio no mercado industrial, no final do século XIX, ele deixou de ser apenas utilizado em artigos de luxo para participar do cotidiano das pessoas e valer-se das especificações acima para, no início do século XX, ter processos metalúrgicos mais elaborados como o trabalho com ligas de alumínio na busca por um material para indústria mecânica com mais qualidade em suas propriedades (ABAL, 2019). O interesse por esse material para o setor industrial foi devido a uma série de fatores, tais como suas propriedades de combinação com outros materiais; a viabilidade para o setor industrial; as novas pesquisas em processos de fabricação, soldagem e acabamento, que tem demonstrado o potencial de seu uso; e a própria indústria, que tem recomendado a utilização do alumínio.

Com essa recente industrialização, observando que estamos no século XXI, o alumínio passou a ter um aumento de produção de 5,4% ao ano, a partir de 2000. E a perspectiva mundial de crescimento da comercialização do produto continuará impulsionada, em especial, pela China que, além de apresentar elevada participação na produção, também faz o mesmo em relação ao consumo. Essas perspectivas são projetadas para até o ano de 2025, com uma projeção de aumento de 30% no consumo de alumínio para os próximos 10 anos, considerando apenas o setor automotivo (ABAL, 2017). Os principais setores que demandarão por mais alumínio em suas cadeias de produções são: transportes, construção civil e energia. E, como o objeto de estudo desta pesquisa é um meio aquático de transporte, valer-se desses dados para aprofundar a necessidade de pesquisas voltadas para os processos de fabricação desse setor, buscando soluções de produção mais eficientes e seguras, apropriando-se das características de leveza e resistência que esse metal proporciona é um dos objetivos do autor. Além disso, aplicando o conceito de produção sustentável, o alumínio é um metal 100% reciclável, isto é, uma vez descartado pode ser reutilizado infinitas vezes mais para a produção do mesmo ou outro material a que ele deu origem primeiramente. Todas essas peculiaridades atrai os pesquisadores para a conciliação de segurança, eficiência e sustentabilidade (uso inteligente dos recursos naturais disponíveis) com esse material nos processos de criação e inovação ou renovação. Por esse motivo, aborda-se adiante o processo de fabricação do alumínio a fim de esclarecer a diversidade do seu emprego nas indústrias. Depois do processamento da alumina, surge o alumínio líquido, que se fundem em lingotes de extrusão, laminação ou fundição.

No processo de extrusão, o alumínio aquecido flui, sob pressão, por um molde para ter o formato planejado. Esse pode ser considerado o processo mais empregado com o alumínio por permitir que o metal tome uma infinidade de formas. Além disso, substitui o plástico e o aço em diversos itens, permitindo um produto final resistente à corrosão; no de laminação, o metal passa por um processo de deformação numa máquina denominada laminador até torna-se uma folha (chapa) de diferentes espessuras, que por mais que seja fina, não permite que a luz, sabor ou aroma passe por ela. Existem dois processos: laminação a quente - na qual a peça passa diversas vezes pelo cilindro laminador, permitindo maior deformação do material; laminação a frio – utilizadas para operações finais quando há necessidade de acabamento

superficial superior. E, o de fundição, processo pelo qual produz-se um molde para o metal que após processos diversificados (injeção, pressão, precisão etc.) obtém-se, no final, peças em diferentes formatos e composições para a adequação à finalidade de uso. A partir desses processos, o alumínio é empregado em quase todos os tipos de união como a rebitagem, soldagem, brasagem e colagem. Sendo este estudo voltado para um processo de soldagem, vamos verificar as possibilidades de solda com o alumínio.

Dentre os vários processos de soldagem, em alumínio, dois métodos têm se destacado para esse fim: o MIG (*Metal Inert Gas*) e o TIG (*Tungsten Inert Gas*) (SANTOS, 2009). Esse processo de soldagem teve seu início, de fato, em 1948, no entanto, a consolidação do uso das máquinas de solda MIG deu-se, em 1953, quando o CO_2 (dióxido de carboneto) e outros gases tornaram-se acessíveis aos setores com escala industrial. Ele pode ser empregado em quase todos os tipos de metal e posições, possui um elevado acabamento, baixo custo, de fácil aplicação para o soldador, além de permitir sua aplicação em grandes reparos (LIMA, 2008; CORREIA, 2017). Nesse tipo de soldagem, a peça e o arame ou liga de alumínio são unidos por uma corrente contínua ou pulsada sob a pressão do gás inerte - argônio, hélio ou a mistura de ambos - no arco elétrico, que tem o eletrodo, em geral, com o polo positivo (SANTOS, 2009). O arco elétrico é o que transforma a energia elétrica em energia térmica, sendo ele a fonte de calor que funde os materiais metálicos nos processos de soldagem e os modos de operação podem ser semiautomático, automático ou mecanizado (SANTOS, 2009; TEIXEIRA, 2011). Paulatinamente, os modos de operação tendem a se tornar mais preciso devido à modernização dos processos de soldagem, introduzida pela indústria 4.0, em que as tecnologias são agregadas aos procedimentos de produção, trazendo inovações que, cada vez mais, facilitarão o trabalho do soldador, a precisão da soldagem, a conectividade dos equipamentos de solda, o aumento da produtividade e a eficiência nos custos gerados (A VOZ DA INDÚSTRIA, 2019). Enquanto as tecnologias mais avançadas vão conquistando o mercado em função da precisão nos resultados para que os processos de soldagem tanto para a fabricação quanto para a recuperação de peças metálicas, equipamentos e estruturas industriais (FELIZARDO, 2016) sejam mais eficientes, os estudos com a finalidade de analisar processos de soldagem existentes, como este sobre a solda MIG CC+ para reestruturar um motor, permanecerão contribuindo para que o mercado

do alumínio invista em procedimentos seguros para a vida humana, com redução no desperdício de material e na assertividade dos métodos empregados.

1.1 Objetivos gerais

- Averiguar a segurança da solda MIG CC+ realizada em uma chapa de alumínio 5086-H116 na reestruturação de um motor a fim de resguardar a vida no quesito segurança humana;
- Contribuir para que a soldagem seja mais segura para resguardar vidas humanas assim como mais viável financeiramente para indústria naval em relação aos investimentos em materiais de soldagem;
- Colaborar com processos mais adequados para área da soldagem, por meio da análise do procedimento adotado na soldagem das chapas deste estudo.

1.2 Objetivos específicos

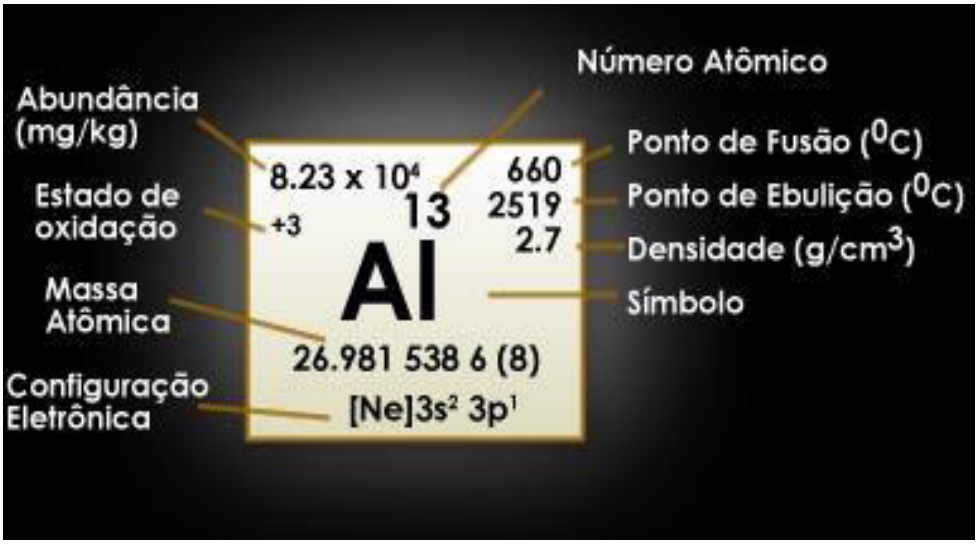
- Analisar o comportamento da solda com arame de adição ER5183 no processo de soldagem MIG CC+ na junção das chapas de liga de Al-Mg 5052-F e 5086-H116 na restruturação do motor de uma embarcação;
- Analisar o comportamento da solda com arame de adição ER5356 o processo de soldagem MIG CC+ na junção das chapas de liga de Al-Mg 5052-F e 5086-H116 na restruturação do motor de uma embarcação;
- Investigar o motivo da trinca na região da junta entre as chapas soldadas pelo processo MIG CC+;
- Mostrar que a soldagem MIG deve ser evitada em chapas de alumínio com as características estudadas nesta pesquisa;

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Características e soldabilidade do alumínio

Os profissionais que costumam utilizar vários metais no processo de soldagem, percebem como utilizar o alumínio para esse fim demonstra diferenças se comparados com os demais devido às suas propriedades (ALMEIDA, 2015). Isso se dá pelo fato de o alumínio apresentar peculiaridades que devem ser compreendidas pelos soldadores, pois, em relação a outros materiais, o alumínio demonstra características únicas quanto à composição química e a sensibilidade às rachaduras e, como o objetivo de uma soldagem é uma solda qualificada conforme as normas instituídas, conhecer a metalurgia e o comportamento térmico desse metal conduzirá a essa possibilidade. A seguir, são mostradas, **Figura 1,** as propriedades físico-químicas do alumínio para que se analise melhor algumas dessas singularidades.

Figura 1 - Propriedades físico-químicas do alumínio



Fonte: (QUIMLAB, 20--)

É um material não magnético, reciclável e por derreter a uma temperatura mais baixa que outros metais, tendo seu ponto de fusão a 660º, ele forma uma camada de oxidação mais resistente à corrosão e à abrasão, que podem surgir durante o processo de soldagem. Essa temperatura de fusão mais baixa também facilita a obtenção das ligas pelo fato de a energia para a fusão do material ser menor, aumentando, dessa forma, sua aplicabilidade para o setor industrial uma vez que, no estado puro, a dureza e resistência mecânica são baixas (COSTA, 2015). Além disso, o alto coeficiente de expansão linear, a alta condutividade térmica e a baixa resistividade elétrica são fatores que influenciam tanto no cordão de solda quanto na

formação de falhas e na altura do arco (SAVI, 2014). Por isso, escolher o material de preenchimento (arame) adequado é fator determinante para o processo de soldagem com alumínio e suas ligas assim como observar a seleção apropriada desses materiais para que haja a combinação adequada entre eles, o tipo de metal de base e o processo de soldagem requerido já que a zona térmica afetada (ZTA) terá suas características fundamentadas nessa triagem de materiais (SAVI, 2014). E é por meio da análise dos componentes dos materiais que se consegue essa compatibilidade entre as propriedades mais importantes das ligas e o arame de adição com a melhor característica para um determinado processo de soldagem, sendo necessário observar estes oitos requisitos: sensibilidade à trinca, resistência, ductilidade, resistência à corrosão, serviço de temperatura elevada, correspondência de cores após anodização, tratamento térmico pós-solda e tenacidade (*THE FABRICATOR*, 2018).

2.1.1 Sensibilidade à trinca – alguns elementos adicionados ao alumínio fazem com que haja solidificação em baixas temperaturas nas ligas enquanto outros, se soldados a arco, podem culminar em trincas a quente devido à combinação dos fatores mecânicos, térmicos e metalúrgicos, que influenciam essas rachaduras. Em função disso, vários tratamentos térmicos têm sido desenvolvidos para melhorar as propriedades das ligas de alumínio (ESAB, 20--).

2.1.2 Resistência – o alumínio precisa da adição de outros elementos ligados a ele para garantir as propriedades adequadas ao setor de destino, pois, em sua forma pura, ele tem baixo limite de resistência à tração (AZO MATERIALS, 2005).

2.1.3 Ductilidade – ductilidade é a capacidade de o material se deformar sem se romper, quando submetido à pressão estática (LOSEKANN, 2003). A estrutura cristalina do alumínio é a Cúbica de Face Centrada – CFC (quatro átomos por célula unitária e número de coordenação doze), ou seja, sua estrutura é típica de metais dúcteis e sua ductilidade é mantida mesmo em baixas temperaturas (-269 °C) (FERNANDES, 2016). Arames da série 4xxxx e ligas da série 6xxx apresentam considerada baixa ductilidade (ESAB, 20--).

2.1.4 Resistência à corrosão – a camada de óxido de alumínio, formada logo após a exposição ao ar, contribui para que o alumínio aumente a resistência à corrosão para a maioria de materiais ácidos (AZO MATERIALS, 2005). Mas, se a combinação entre arame de adição e liga de base estiver em discordância, havendo presença de eletrólito, a ação galvânica entre eles pode ocorrer e medidas de prevenção e proteção contra esses dois tipos de corrosão precisam ser consideradas em um projeto naval com alumínio (STUMP T. & VATAVUK, J., 2010).

2.1.5 Serviço de temperatura elevada – em ligas com magnésio acima de 3%, os limites dos grãos do material se aglomeram se expostos a temperaturas elevadas por um longo período (acima de 66º), ocasionando trincas por corrosão sob tensão, que é uma falha prematura da solda. Isso acontece com os arames de adição 5356, 5183, 5654 e 5556; já a liga 5554, que tem teor de magnésio inferior a 3%, pode ser empregada em aplicações com altas temperaturas por ter sido desenvolvida para esse fim (ESAB, 20--).

2.1.6 Anodização – algumas ligas de alumínio precisam ter a camada de óxido de alumínio aumentadas para melhorar a capacidade de resistência à corrosão e alteração da aparência, contudo, a quantidade de proteção desejada pode não acontecer para grupos determinados de ligas tanto quanto cores indesejadas podem surgir após o processo de anodização. As mais apropriadas para anodizar são as da série 5xxx, 6xxx e 7xxx (METALSUPERMARKETS, 2019).

2.1.7 Tratamento térmico pós-solda - as ligas tratáveis termicamente perdem, consideravelmente, as propriedades mecânicas de resistência depois da soldagem, necessitando de trabalhos pós-solda para retomar as propriedades perdidas (ESAB, 20--). Avaliar a liga de adição usada em relação à sua capacidade de responder ao tratamento térmico pode ser necessário, pois, as ligas comuns podem não responder ou até mesmo responder adversamente ao tratamento térmico pós-soldagem (ALCOTEC, 2015).

2.1.8 Tenacidade – mesmo em baixas temperaturas, o alumínio se mantem tenaz porque a estrutura cristalina Cúbica de Face Centrada (CFC) é, praticamente, imune à clivagem (STUMP T. & VATAVUK, J., 2010).

Ademais a essas observações, seguir as regras determinadas, limpar toda a base onde será manuseado o metal, remover a camada de óxido, armazenar adequadamente os materiais, observar as condições dos consumíveis e monitorar a temperatura, são as melhores atitudes em um processo de soldagem com alumínio (THE FABRICATOR, 2018), neste estudo, as ligas da série 5xxx.

2.2 Principais ligas de alumínio para o setor naval

O alumínio começou a alavancar seu lugar no setor naval a partir de 1890, com a construção do primeiro casco oceânico para um iate francês de 13 metros, intitulado *Mignon* (METALTHAGA, 2018) e, desde então, vem ganhando cada vez mais espaço no mercado naval, sendo que para esse setor, as ligas de magnésio das séries 5xxx (Al-Mg) e 6xxx (Al-Mg-Si) são as mais utilizadas.

No agrupamento geral, as ligas apresentam-se da série 1xxx a 9xxx. Cada série se qualifica para um setor industrial especificamente e, conforme a *Aluminum Association*, elas são classificadas em três aspectos: quanto à composição, em alumínio considerado puro e suas ligas (PEREIRA, 2010); quanto ao tratamento, em tratáveis termicamente - as que são endurecidas por precipitação; e, não- tratáveis termicamente – as que são endurecidas por deformação (MELADO, 2014; MARCO, 2014); e, quanto processamento, em ligas forjadas (*Wrought Alloys*) e ligas fundidas (*Cast Alloys*) (PEREIRA, 2010).

2.2.1 Ligas da série 5xxx

Encontradas em diferentes formas – folhas, chapas lisas ou corrugadas, bobinas e tiras (COSTA, 2015; METALTHAGA), as ligas da série 5xxx apresentam composições distintas, logo, empregabilidade diferente. Por esse motivo, dentre as ligas de Al-Mg, há ainda aquelas com mais demanda para o setor naval. Dentre elas, destacam-se as 5086,5083, 5356, 5456 e 5454 (METALTHAGA, 2018). A liga 5083

foi registrada em 1954 pela *Alumínio Association,* sendo considerada a liga principal para a indústria naval e as 5383 e 5059 incrementaram esse setor devido à resistência mecânica e ao impacto pela presença do zircônio (SAVI, 2014).

As ligas de alumínio da série 5xxx não são tratáveis termicamente, melhorando suas propriedades adicionando outros elementos como o manganês, ferro, silício, titânio e cromo (FERNANDES, 2016; SOUZA, 2017). A presença de boa quantidade de magnésio, que variam entre 0,6 a 6%, aliada às condições favoráveis de soldabilidade, resistência à corrosão, ductilidade fazem dessa série as mais empregadas em construções navais. Por ser o elemento principal da liga Al-Mg, o magnésio é o elemento que aumenta a resistência mecânica dessa liga sob o trabalho a frio. Quanto maior o teor de magnésio, maior será a resistência (MATA, 2017). Por esse motivo e aliada a boa soldabilidade, as ligas dessa série são amplamente empregadas nas partes das estruturas marítimas. Para esse fim, as com porcentagens de 4.5%, 4% e 5% de magnésio são mais utilizadas devido ao aumento da resistência por conformação plástica (METALTHAGA, 2018). Se o teor de magnésio exceder a 5%, aumenta a resistência, mas, por outro lado, deixa a liga mais suscetível à corrosão (FERNANDES, 2016).

No aspecto da soldabilidade, as ligas da série 5xxx podem ser soldadas tanto por fusão quanto por resistência elétrica caracterizadas por três regiões diferentes em relação à resistência mecânica e ductilidade, que são: ZF (Zona fundida ou metal de solda); ZTA (zona termicamente afetada); e MB (metal base) (MATA, 2017).

Em função das construções navais praticamente ter na soldagem o fundamento de seus trabalhos, é importante observar a ZTA durante todo o processo a fim de garantir a estabilidade da temperatura para que a oscilação térmica não comprometa as propriedades mecânicas do alumínio na zona trabalhada. Além disso, trincas a quente podem ocorrer se não observados os percentuais adequadas em peso de Mg nas ligas dessa série. Por exemplo, ligas de Mg entre 1% e 2.5%, se em soldas autógenas ou com arame eletrodo com composição dissimilar, podem culminar em trincas desse tipo (SANTOS, 2016; MATA, 2017).

2.2.2 As ligas 5086 e 5052

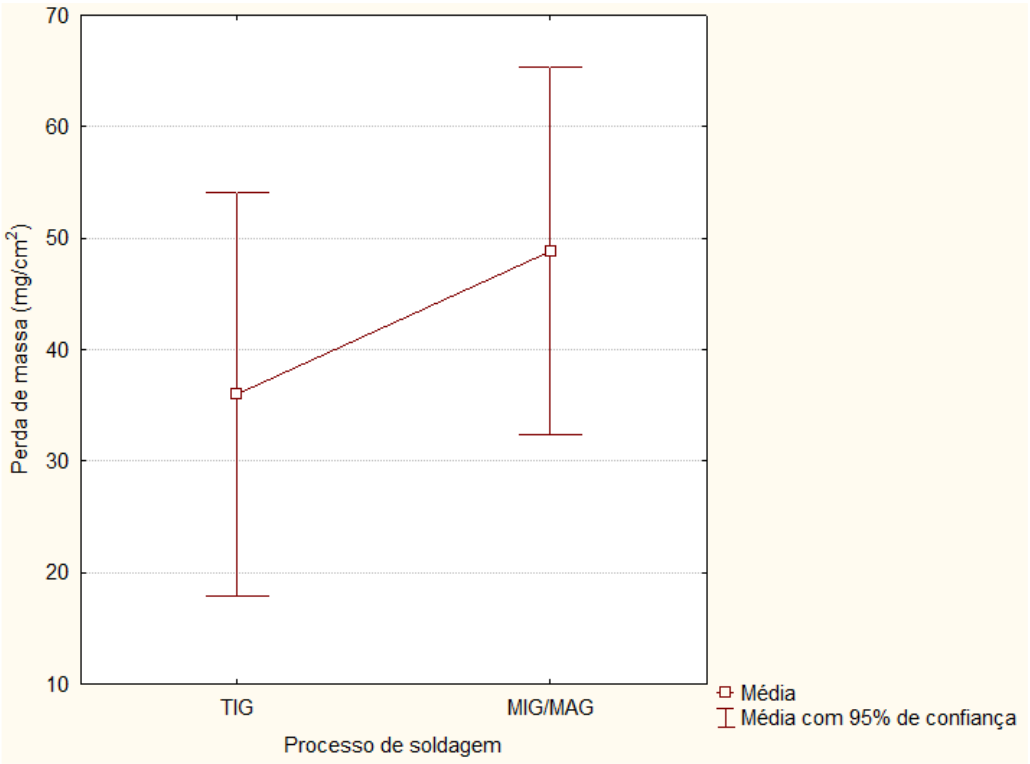
Neste estudo, o direcionamento da pesquisa englobou duas chapas de liga Al-Mg, que são 5086 e 5052. Sendo assim, será comparada ambas as características para melhor compreensão da empregabilidade de cada uma na soldagem.

2.2.2.1 5086 – com as propriedades de baixa densidade, resistência à corrosão, resistência mecânica e boa soldabilidade, essa liga é bastante empregada na indústria naval (COELHO, 2013). No entanto, pelo teor de magnésio (4,0 a 4,9%), essa liga pode precipitar nos contornos dos grãos devido a uma contínua rede Al_3Mg_2, formando uma estrutura suscetível a trincas por corrosão sob tensão em condições adversas. (VAN HORN, 1967 APUD MELADO, 2014). Trabalhada a frio, com aquecimento em torno de 120^0 e 180^0, são classificadas como termicamente não tratáveis, portanto, se essas ligas, muito encruadas, ficarem muito tempo em temperatura ambiente ou em temperaturas elevadas, ocorrerá precipitação. No primeiro caso, a precipitação será ao longo das bandas de deslizamento. No segundo, ao longo dos contornos dos grãos, em condições de recozimento. E, como não são endurecidas por precipitação, causando as peculiaridades citadas anteriormente, foi desenvolvida a têmpera H116 para as ligas 5086 a fim de eliminar ou reduzir esse problema. Em relação à resistência mecânica da solda, apresentam semelhança às outras ligas recozidas, entretanto, por seu teor de magnésio ser igual ou superior a 4%, tem menor soldabilidade (HACTH, 1999 APUD MELADO, 2014).

Coelho (2013) estudou a liga AA55086 para realizar uma análise de tratamentos termomecânicos a fim de verificar o efeito na resistência à corrosão, seguindo as normas ASTM G66, referente à corrosão por esfoliação e ASTM G67 em relação à suscetibilidade à corrosão intergranular, soldando 2 a 2, formando dois corpos de prova, um pelo processo TIG e o outro pelo MIG/MAG, com o arame de alumínio da ESAB AA5356.

Em relação aos aspectos de soldagem, embora as perdas de massa nas amostras MIG/MAG tenham sido maiores que pelo TIG, mesmo que visualmente pareça ser o contrário, ele não encontrou diferença significativa a um nível de 95 % de confiança entre os processos MIG/MAG e TIG quanto à resistência à corrosão, **figura 2.**

Figura 2 - Comparação da perda de massa com relação ao processo de soldagem.



Fonte: (COELHO, 2013)

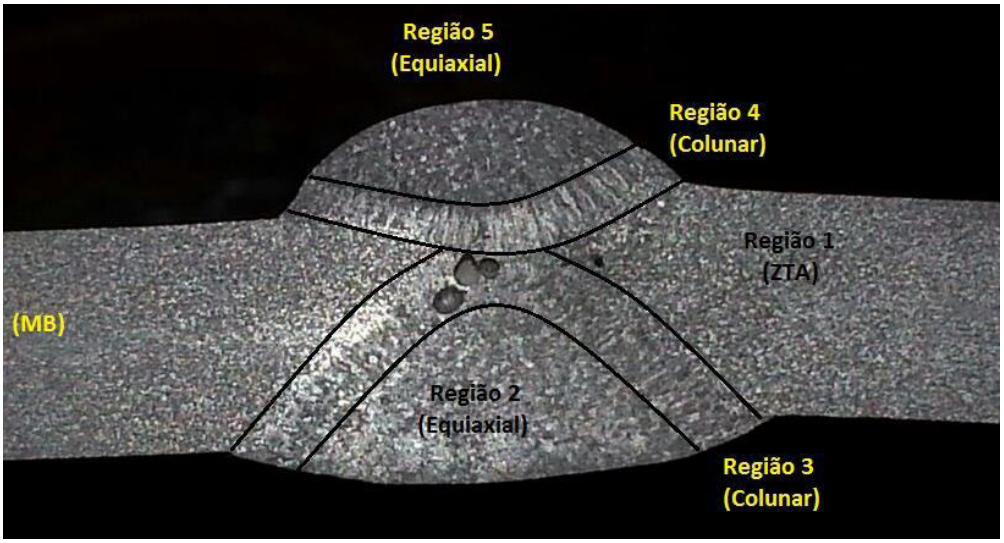
Nos corpos de prova soldados, a preferência de corrosão foi nas regiões da ZAC (zona afetada pelo calor) para os locais de relevância em perda de massa. Para esse fator, o autor aponta duas possibilidades: a taxa de resfriamento – maior das bordas para o centro, podendo resultar na difusão dos precipitados ou mesmo suas precipitações nas regiões onde mantem a temperatura elevada por mais tempo e a diferença de composição do metal de base (AA 5086) e metal de solda (AA5356).

2.2.2.2 5052 – Com boa soldabilidade tanto para processos a arco elétrico (*GMAW* ou *GTAW*) quanto para soldagem de ponto por resistência elétrica (SANTOS, 2016), boa resistência mecânica, alta resistência à corrosão e boa conformabilidade (MALTA, 2019), essa liga deve ter o teor de Mg entre 2,20% e 2,80%, que auxilia na formação de uma solução sólida de fases α e β (LÜ et al., 2010; TSAI, et al., 2003 APUD BARONY, 2019), e o cromo deve ser mantido entre 0,15% e 0,35%. O manganês, cobre e zinco também são acrescidos nela, porém, não podem ultrapassar a quantidade de 0,10%. A quantidade de ferro e silício (impurezas do processamento da liga) deve ser no máximo de 0,40% e 0,25%, respectivamente (ASTM B209M, 2014

APUD MATA, 2017). Essa liga pode apresentar dificuldade na soldagem, se o teor de Mg estiver próximo aos 2,5%, devido ao fato de ocorrer um pico de susceptibilidade à trinca, evitando isso com a escolha de um metal de adição que reduza o risco desse tipo de falha (RENCK, 2005 APUD COSTA, 2015).

Santos (2016) a fim de caracterizar estruturalmente e mecanicamente juntas soldadas em campo de chapas de alumínio naval 5052-F, na produção de lanchas escolares, utiliza o processo MIG pulsado com arame eletrodo da liga AWS ER 5356 (5% de magnésio) e 1,0 mm de diâmetro, soldando três pares de chapas de alumínio naval de liga 5052-F com um teor de 2,5% de magnésio e espessura de 4mm.

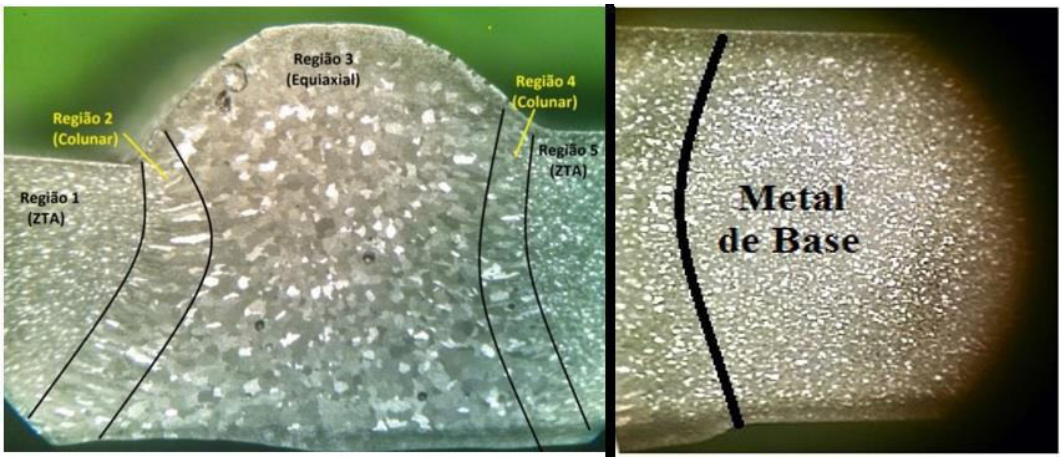
Figura 3 - Macroestrutura com regiões estruturais do cordão de solda do CP1 soldada com chanfro em I, passe na posição plana, tocha com angulação de deslocamento aproximado de 30º e deslocamento empurrando.



Fonte: (SANTOS, 2014).

O início da solidificação na poça de fusão ocorre principalmente pelo crescimento de grãos do metal de solda que está na linha de fusão (fronteira entre ZF e ZTA), assegurando a continuidade metalúrgica entre ZF e ZTA, indicando a alteração estrutural nessa área. Já o pequeno tamanho de grão observado no metal de base deve-se ao fato de o metal passar por um tratamento mecânico a frio após a fundição e a ZTA estreita é uma característica do processo de soldagem MIG em ligas de alumínio. Os diferentes tamanhos de zonas fundidas observados podem ser devido ao fato de que a ausência de chanfro no passe superior juntamente com a técnica utilizada para a realização do passe de reverso.

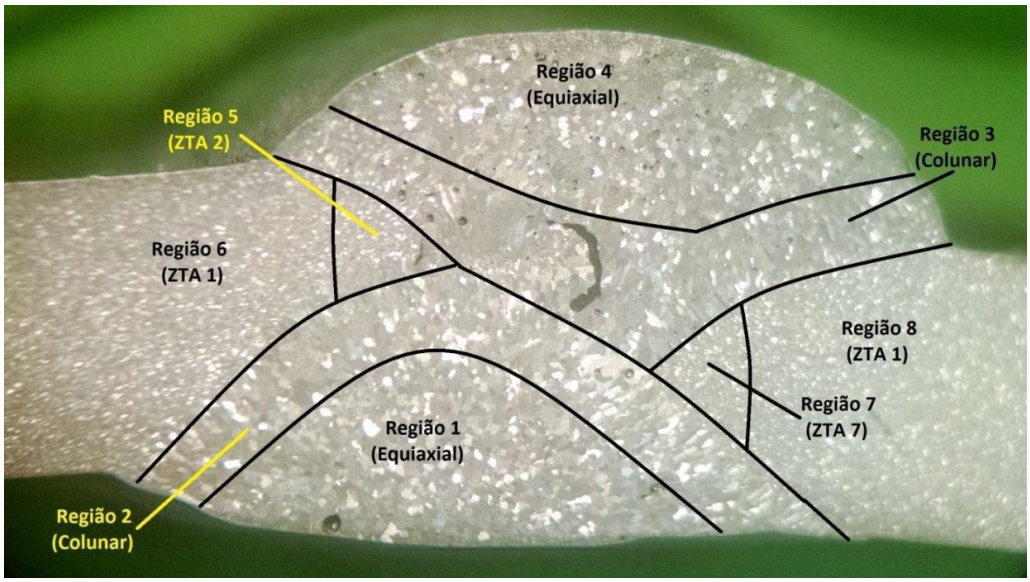
Figura 4 - Macroestrutura com regiões estruturais do cordão de solda do CP2 soldado com um chanfro com ângulode 60º, onde cada bisel tem 30º e desbastado com um disco de lixa *flap*; sentido de deslocamento empurrando de 30º de ângulo.



Fonte: (SANTOS, 2016)

Parte do metal de base foi absorvido pela zona fundida e solidificou em estrutura colunar, no início, e, depois, em estrutura equiaxial em toda região de solda do CP2, ocasionado pelo preenchimento em passe único na geometria do molde em V.

Figura 5 - Macroestrutura com regiões estruturais do cordão de solda do CP3, com chanfro em ângulo de 60º, bisel de 30º, desbastado também através do disco de lixa *flap* e nariz com 1 mm de espessura.



Fonte: (SANTOS, 2016)

A zona fundida superior demonstrou-se com uma região colunar mais estreita devido ao fato de ter sido realizado o passe de raiz e em seguida o segundo passe e a geometria semelhante ao chanfro, no mesmo local, ou seja, na ZF, deveu-se ao fato à presença de nariz de 1 mm de espessura.

Na ZTA, a série de ciclos térmicos que resultaram na em duas regiões: uma mais refinada e outra com grãos mais grosseiros logo após a região colunar como resultado do tratamento térmico gerado pela sobreposição de passes.

As chapas foram unidas em diferentes combinações quanto ao procedimento de soldagem, mas, demonstraram os mesmos aspectos para a zona fundida:

a) o pré-aquecimento do metal de base feito nos procedimentos de soldagem impediu que se formasse uma zona coquilhada e apresentou como macroestrutura inicial a orientação de grãos colunares;

b) a rejeição de solutos e impurezas, juntamente com uma extração de calor de forma aproximadamente igual em todas as direções na parte central da peça, facilitaram a ocorrência da nucleação de novos grãos, resultando na zona equiaxial central;

c) a estrutura colunar, que pela direção de crescimento dos grãos, alterada periodicamente pela ondulação na linha de fusão, dificultou a propagação de trincas a quente.

2.2.3 - Têmperas

As ligas, para complementar a classificação, depois do número, recebem uma designação em forma de letras com objetivo de caracterizá-las de acordo com o tratamento (térmico ou mecânico) pelo qual passaram, visando otimizar algumas das características mecânicas (METALTHAGA, 20--). Sendo esta pesquisa realizada com as ligas 5086 – H116 e 5052 – F, torna-se necessário a exposição destas designações, que são:

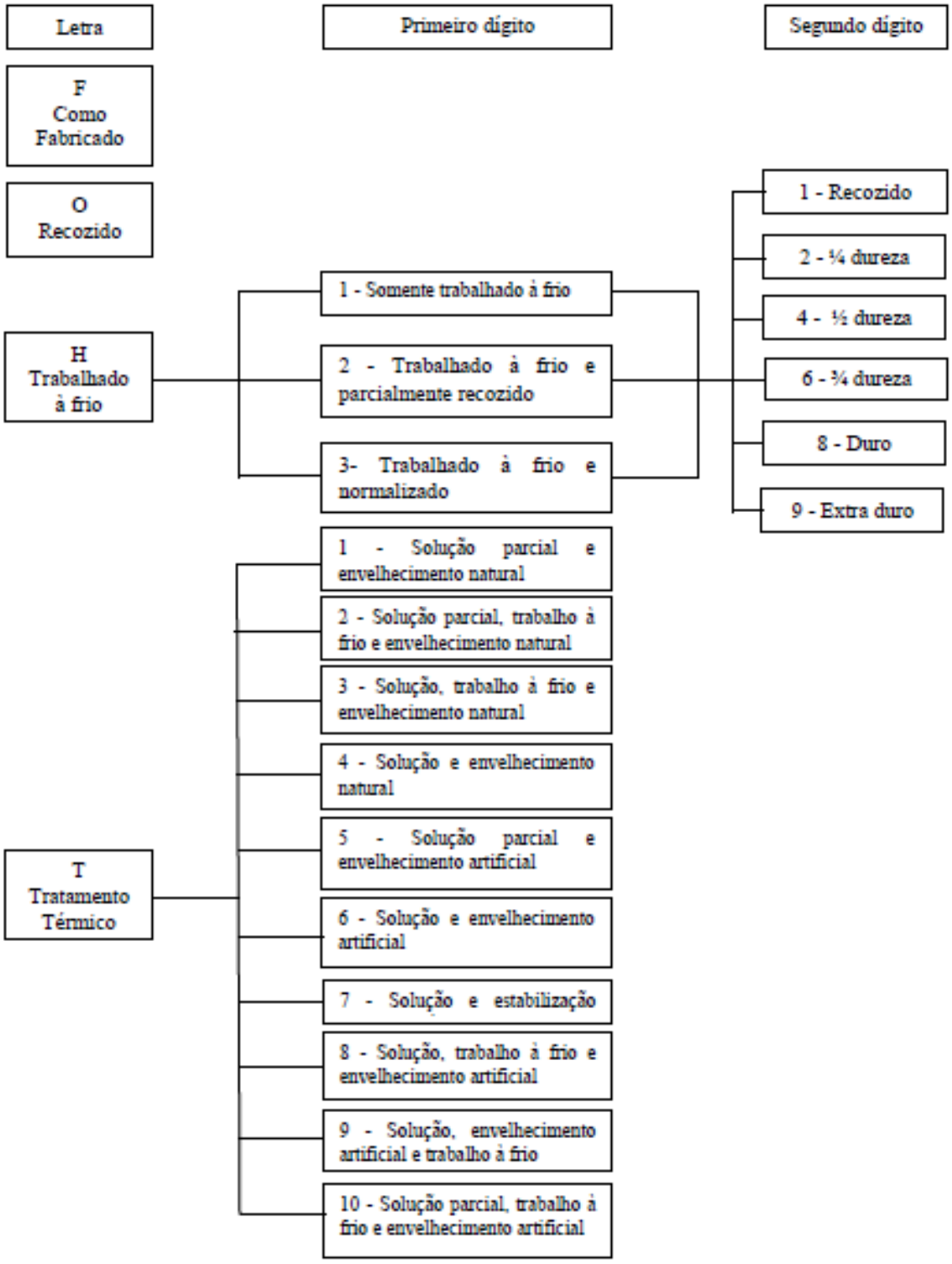
F (como fabricada) - não sofreram nenhum tratamento após o seu processo de fabricação, ou seja, sem controle sobre as condições termomecânicas para garantir propriedades específicas (COELHO, 2013);

O (recozida) - recozidas com o objetivo de homogeneizar a sua microestrutura e para o alívio de tensões;

H (encruadas) - endurecidas por deformação plástica, podendo ser complementadas por tratamentos térmicos para o alívio de tensões. Acrescentam-se a essas ligas dois ou mais dígitos numéricos para caracterizar melhor o tratamento;

T (tratada termicamente) – Tratáveis termicamente para produzir um endurecimento estável. Pode ser usado com ou sem encruamento complementar, sempre seguidos por um ou mais dígitos; e

W (solubilizada) – sujeitas a envelhecimento natural, precisa ser complementada com o tempo de envelhecimento. Por exemplo, W ½h (PEREIRA, 2010; SMITH, 1988; e BRITO & GORDO, 2004 APUD MELADO, 2014). O **fluxograma 1** demonstra, esquematicamente, os tratamentos térmicos e mecânicos das ligas de Al:



Fonte: (ASSIS, 2017 APUD SCABAROTTO, 2018)

A **tabela 1** complementa as principais designações, com três dígitos, das ligas após o tratamento H:

Subdivisões de H	Principal elemento de liga
HX11	Aplicado a produtos que sofreram um determinado nível de encruamento após o recozimento final. Não sendo classificados como recozidos puramente, mas, também não podem estar inclusos na classificação HX1.
H112	Aplicado a produtos que podem adquirir algum tratamento ao se trabalhar a uma temperatura elevada ou a partir de uma quantidade limitada de trabalho a frio e para os quais há limites de propriedades mecânicas.
H116	Aplicados a produtos, como os da série 5XXX contendo mais de 4% de magnésio, os quais necessitam de uma determinada resistência mecânica e uma boa resistência a corrosão por esfoliação.

Fonte: (COELHO, 2013)

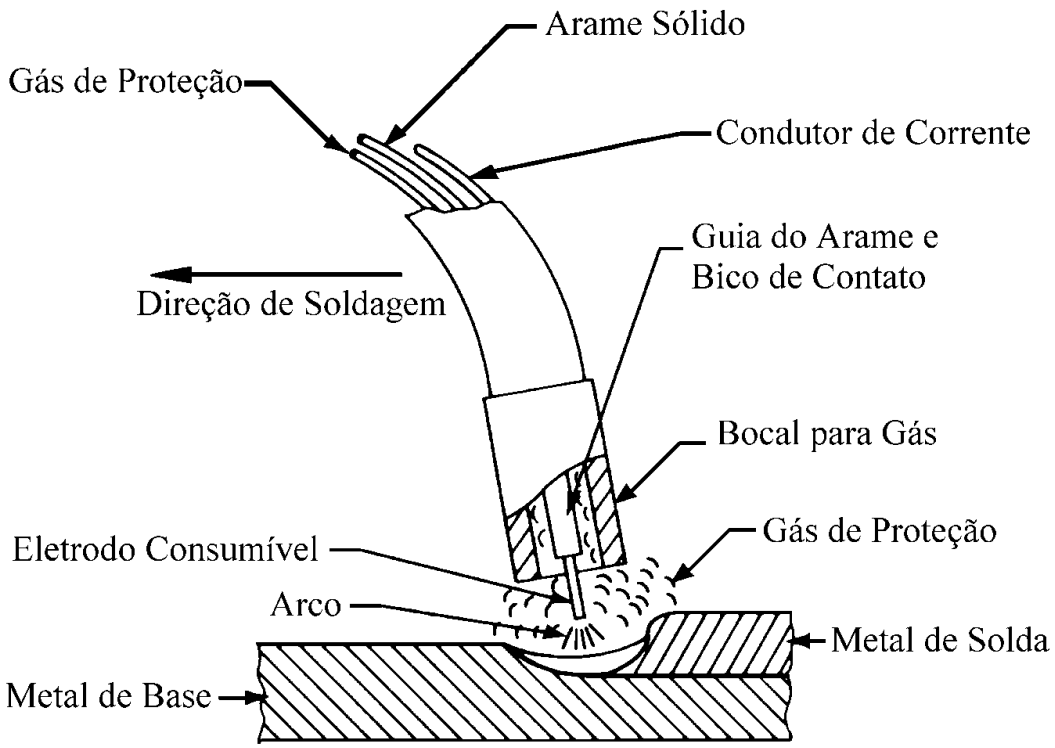
Englobando as têmperas, chegam-se as características das ligas deste estudo: a liga 5086- H116 e a liga 5052-F, respectivamente, soldadas pelo processo MIG, que será explanado na próxima seção.

2.3 Processo de soldagem MIG

Dentre os procedimentos de soldagem, o MIG é parte do grupo de processos a gás metal inerte, que são submetidos à fusão por arco elétrico (*GMAW*). A união dos metais é feita pelo aquecimento entre o eletrodo metálico continuo e consumível e a peça trabalhada, sendo a proteção do arco e da poça de fusão feita por um gás inerte ou pela mistura deles, tendo esse gás a função exclusiva de proteção da solda sem interferir na poça de fusão. Pela elevada taxa de deposição, versatilidade em relação ao material e espessuras que podem ser trabalhadas, ausência do fluxo de soldagem assim como da remoção de escória e limpeza apresenta vantagens se comparada com o processo por eletrodo revestido. Geralmente, nesse processo com o alumínio, a polaridade de uso é a CC+ porque confere maior estabilidade ao arco, melhora a geometria do cordão e remove a camada de óxido superficial (Al_2O_3), fator esse importante para a soldagem MIG. A polaridade CC-, apesar de ter sido banida por

algum tempo por causar instabilidade considerável quando a gota do material depositado se desprende, traz o benefício de aumento da taxa de fusão do arame e, consequentemente, maior produtividade e redução do calor em direção à peça (SAVI, 2014). Nas funções: manual; semiautomático, em que o soldador controla o momento de iniciar e de interromper o processo e o deslocamento da tocha ao longa da junta; e, automático, em que se pode conseguir soldas maiores e mais uniformes tanto quanto soldar grandes extensões sem interromper e reiniciar o processo (GOMES, 2017), apresenta a vantagem de ser aplicada a diferentes faixas de espessuras e em materiais ferrosos (MAG) e não-ferrosos (MIG) (MOURA, 2014; MATA, 2017).

Figura 6 – Desenho esquemático do processo de soldagem *GMAW*.



Fonte: (AWS, 1991 APUD MOURA, 2014)

Como observado na **figura 6**, a nomenclatura se refere ao processo de soldagem *GMAW*, comumente nomeada MIG/MAG no Brasil. A diferença entre os procedimentos é que na MAG, o gás é ativo e, além de proteger, influencia na poça de fusão, alterando de diferentes maneiras o produto final da soldagem (AVENTA, 2019). Esse esclarecimento torna-se fundamental visto que nas literaturas pesquisadas esses dois tipos de soldagem são sempre explanados em conjunto em

todos os seus aspectos, entretanto, para este estudo, é mencionada tipo MIG para caracterizar o método empregado, isto é, soldagem com gás inerte.

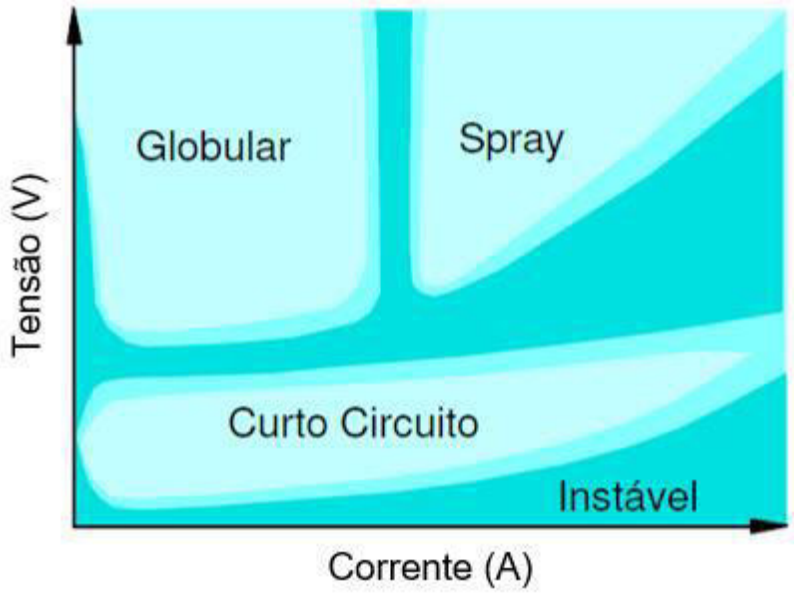
Um fator a ser considerado no processo de soldagem MIG é o modo de transferência metálica, em que as condições de correntes e tensões são diferentes de acordo com o modo pelo qual o metal líquido é transferido da ponta do eletrodo para a poça de fusão do metal de base. Existe uma relação entre a transferência metálica aplicada e os aspectos operacionais, como: eficiência na deposição do metal, possiblidades de posição de soldagem diferente da plana, na quantidade de respingos e fumos, formato dos cordões, estabilidade do arco, absorção dos gases pelo metal fundido e, nessa relação (MACHADO, 1996 APUD MARTINS, 2018) acrescenta, considerando-os como fatores principais, os seguintes aspectos: gás de proteção, polaridade, tipo e densidade da corrente, extensão após contato elétrico, composição química e diâmetro do eletrodo, fonte de processo e pressão do ambiente.

2.3.1 Métodos de transferência metálica

Embora haja subdivisões dos modos de transferir o metal liquido à peça, os três mais empregados com o MIG são: curto-circuito, globular ou spray, também denominado aerossol ou goticular (MOURA, 2014). No entanto, nas literaturas recentes (MARTINS, 2018; FERREIRA, 2018), observa-se um quarto modo: corrente pulsada.

Para acompanhar como ocorre a transferência metálica são analisados oscilogramas de corrente e tensão do processo ou por meio da filmagem da região do arco em alta velocidade assim como se pode fazer uso das duas formas citadas para essa finalidade (MOURA, 2014).

Figura 7 - Esquema das condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência para GMAW com um gás de proteção a base de argônio.



(MODENESI E BRACARENSE, 2007 apud FERREIRA, 2018)

Na transferência por curto-circuito, com gás argônio, baixos valores de tensão e ampla faixa de corrente, torna-a estável. Já para uma transferência globular, ocorre o inverso: aumentam-se os valores de tensão e diminui-se a faixa de corrente. No modo *spray*, tanto a tensão quanto a corrente devem estar aumentados.

Tabela 2: Características dos modos de transferência metálica na soldagem GMAW

Modo de Transferência	**Tensão no arco**	**Densidade de corrente**	**Energia de soldagem**	**Soldagem fora da posição**	**Penetração**
Curto-circuito	Baixa	Baixa	Baixa	Sim	Pequena
Globular	Média	Baixa	Média	Não	Média
Spray	Alta	Alta	Alta	Depende	Grande
Pulsada	Alta	Média	Média	Sim	Grande

(Adaptado de ACESITA, 2011 APUD FERREIRA, 2018)

A tabela 2 apresenta os diferentes modos de transferir o metal líquido (gota) ao metal de base no processo de soldagem MIG e a relação existente entre o emprego de cada uma delas e os aspectos operacionais demandados pela escolha da transferência adotada.

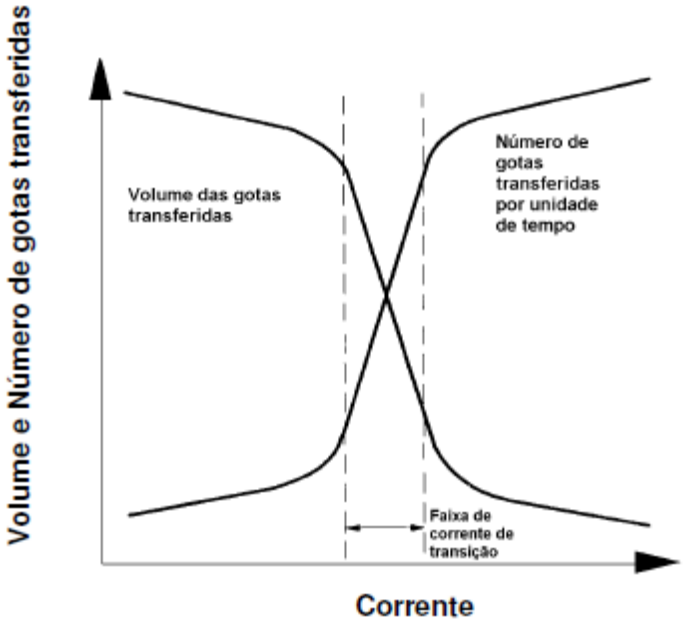
2.3.1.1 Transferência por curto-circuito – com baixos valores de tensão e corrente, esse método é utilizado quando se tem o objetivo de soldar peças com pequenas espessuras ou fora da posição plana, já que permite a soldagem em todas as posições. A transferência acontece quando o arame entra em contato com a poça de fusão, acionando o curto-circuito, extinguindo, então, o arco. Nesse tipo de transferência, a indutância tem papel relevante visto que pela elevação desta, o número de curto-circuito por segundo diminui, aumentando o tempo do arco aberto que, por fim, gera um cordão de solda liso e mais plano (MARTINS, 2018).

2.3.1.2 Transferência globular – nesse tipo, podem ser utilizados todos os tipos de gases de proteção, sendo que cada gás apresentará uma reação diferente durante o processo. A transferência das gotas de metal fundido para a poça de fusão ocorre, principalmente, pela força da gravidade, limitando o trabalho à posição plana. Quanto maior a corrente, menor o tamanho da gota, no entanto, gotas e diâmetro de eletrodo permanecem à mesma proporção; por outro lado, o diâmetro das gotas é maior que o do arame (FERREIRA, 2018). Em função do deslocamento das gotas não manterem estabilidade e por serem imprevisíveis, não é um método comumente utilizado para transferências do metal líquido (MARTINS, 2018).

2.3.1.3 Transferência *Spray* – surge a partir de uma corrente denominada “corrente de transição”, por necessitar do aumento da corrente de soldagem, diminuindo o diâmetro das gotas que são transferidas para a peça de fusão. As forças magnéticas agem sobre as gotas, ocasionando a diminuição de seu tamanho e a redução da sua aceleração que, por sua vez, aumenta o desprendimento das gotas do eletrodo. Com a boa estabilidade do arco, o resultado é um cordão de solda bem acabado e regular, embora com as correntes muito altas, esse método impede ou dificulta o trabalho com chapas finas em função do grande tamanho da poça de fusão e, também, em outras posições de soldagem diferente da plana (MODENESI, 2011). Entretanto, demonstra consideráveis aspectos operacionais em soldagem de juntas de maior espessura.

Essa transferência faz parte do grupo de transferência por voo livre, considerando os parâmetros do *Internacional Institute of Welding* (MOURA, 2014) e, ainda, tem subdivisão em três grupos conforme o desprendimento da gota: projetado, com alongamento e rotacional (FERREIRA, 2018).

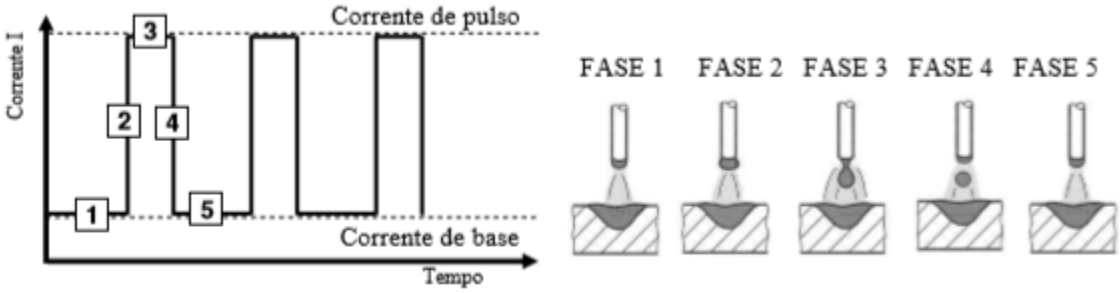
Figura 8 - limite de transição da transferência globular para a spray em função da alteração da corrente.



Fonte: (MARQUES, 1991 APUD FERREIRA, 2018)

2.3.1.4 Transferência pulsada – esse modo surgiu com a finalidade de corrigir os problemas causados com a soldagem pelos métodos convencionais, pois, consegue-se controlar a alteração da corrente durante o processo de soldagem, permitindo a transferência do metal fundido em chapas finas e em todas as posições em função das correntes médias em níveis menores do que a de transferência goticular. A corrente de pulso (I_p) e a corrente de base (I_b) e seus respectivos tempos de duração – T_p, T_b - evitam o curto-circuito e, com isso, a tensão não se torna tão baixa, permitindo o aumento da relação potência/velocidade do arame (MATA, 2017; MARTINS, 2018).

Figura 9 - Diagrama esquemático de uma onda do tipo corrente pulsada e transferência do metal.



Fonte: (FISCHER, 2011 APUD MARTINS, 2018)

Nesse processo, além de se observar parâmetros tais como gás, arame, MB, diâmetro, é essencial que haja o desprendimento de uma gota por pulso ao término da corrente de pulso.

2.3.2 Consumíveis

Nas soldas em alumínio, a definição do consumível é feita baseada nos seguintes aspectos: soldabilidade, resistência à trinca, tenacidade, resistência mecânica, resistência à corrosão, temperatura em serviço, e resultados de tratamento térmico e coloração (SUMIG, 2019) descritos no **capítulo 2.1**.

2.3.2.1 Arames de adição

Para que se possa selecionar o arame de adição correspondente ao processo de soldagem, é preciso compreender as finalidades de emprego desse arame, em quais e que propriedades têm os materiais em que eles serão aplicados (THE WELDER, 2014), ou seja, para a seleção do metal de adição devem ser consideradas as propriedades metalúrgicas e mecânicas da união e outros fatores como o gás de proteção, a transferência metálica, a posição da soldagem, o meio ambiente, o metal de base, o nível de constrangimento da junta. Além disso, dar atenção ao diâmetro do eletrodo, à espessura do metal de base, aos elementos que podem interferir na poça de fusão ou, até mesmo, na quantidade de energia da soldagem (MARTINS, 2018). A partir disso, a escolha correta do metal de preenchimento torna-se confiável, encaminhando a solda para um bom resultado como produto final.

Ao se soldar ligas de Al-Mg, por meio de processos de fusão, deve-se utilizar metal de adição, necessariamente, do mesmo grupo de ligas, preferencialmente, com elevado teor de magnésio, pois, assim, o metal de solda mantém maior resistência que o metal de base na ZAC - Zona Afetada pelo Calor (ASM v6, 1995 APUD SANTOS, 2016; GONZALEZ, 1991). Caso não haja classificação entre ligas de adição e metal base, não é recomendado que se faça a união dos materiais assim como devem ser analisadas as classificações em que ocorrerá tratamentos térmicos depois da soldagem (ALCOTEC, 2015).

Em uniões dissimilares, no momento da diluição mútua do material, pode ocorrer falta de magnésio e, assim, culminar em problemas de trincas. Essas falhas podem ser reduzidas empregando no processo de soldagem metais de adição mais resistentes como ligas de Al-Si e de Al-Mg. Além disso, a espessura da linha de soldagem deve ser capaz de resistir às tensões advindas das contrações típicas do processo (VICENTINI, 2013).

Da série 5xxx, os metais de adição AWS ER-5356 e AWS ER-5556 são bastante eficazes para a redução da possibilidade de trincas, para uniões com movimentos restritos e para aquelas em que haverá bastante diluição do metal de base (GONZALEZ, 1991). Nas soldas em que os materiais de base e adição são similares, a diluição não é um elemento preocupante, porém, nas uniões dissimilares é um aspecto de grande relevância porque se o material de adição for mais nobre que o de base, a diluição deverá ser a menor possível desde que respeite um limite mínimo, afinal, valores muito baixos de diluição podem ocasionar falta de fusão dos materiais soldados (SOUZA, 2019).

As ligas de adição - 5356 e 5183 – tem grande emprego no setor naval, sendo que o teor de manganês do consumível 5183 conduz a uma resistência mecânica do material depositado, sutilmente, maior que a do arame 5356 (SAVI, 2014). Quando se objetiva aumentar as propriedades mecânicas, seleciona-se o arame 5183. Caso a necessidade de soldas sejam ligas intermediárias, tais como a 5086 e 5083, utiliza-se o arame 5356. Para unir as ligas de maiores resistências da série 5xxx, as opções são os arames 5183, 5556 e 5087 (THE WELDER, 2014). Este último possui zircônio em sua composição, que refinam a microestrutura da solda por controlar o tamanho dos grãos, melhorando as propriedades mecânicas e de corrosão (SAVI, 2014). O metal de solda 5556 assim como o 5183 também tem acréscimo de manganês com o objetivo de aumentar a resistência, mas, é o teor de magnésio aumentado do arame 5356 que faz dele muito comum nos processos de soldagens em que haja necessidade de metal de preenchimento e para junções que serão anodizadas depois da soldagem (THE WELDER, 2014; ALCOTEC, 2015).

O metal de solda 5356 apresenta ductilidade, resistência ao cisalhamento e à tração superior se comparado com o arame de adição 4043. Outro fator relevante é que os metais de solda da série 4xxx tem restrições para o uso em algumas ligas de Al-Mg em função do alto teor de silício, pois, a combinação desse elemento com o

magnésio também elevado das ligas 5xxx forma o silicato de magnésio, composto intermetálico que fragiliza o material soldado, diminuindo a ductilidade e a tenacidade. No entanto, com o metal de base 5052, o arame de adição 4043 pode ser uma opção devido ao baixo teor de magnésio dessa liga de alumínio ou, como indicado pelas literaturas, usar um metal de adição do mesmo grupo, ou seja, da linha 5xxx como o arame 5554 e 5754 (THE WELDER, 2014).

As ligas de base 5052 são sensíveis a trincas pelo baixo teor de magnésio, portanto, selecionar ligas de adição com teor superior a 5%, por exemplo, a 5356, pode reduzir esse fator porque o alto teor de magnésio do arame injeta uma porcentagem mais alta desse elemento no momento da diluição do metal de solda. Isso é explicado pelo fato de quanto mais uma liga Al-Mg possuir magnésio, menor a possibilidade de rachaduras. Por isso, os metais de adição 5356, 5183 e 5556 – elevado teor de magnésio – são selecionados, normalmente, para fins de soldagem de ligas base de Al-Mg tanto fundida quanto forjada. Deve-se atentar, no entanto, que soldar com ligas de preenchimento da série 5xxx pode terminar com uma aparência escura e rugosa, em particular, nos processos *GMAW*, pelo fato das ligas desse grupo não serem tão fluidas, justamente, pela presença do magnésio (ALCOTEC, 2015).

Costa (2015) soldando a liga AA 5052 com os arames ER 5356 e ER 4043 constatou que o primeiro apresentou melhor desempenho nos processos MIG-P CC+ e TIG-A em função da presença do cromo, que refinou os grãos; e, pela presença do magnésio, que aumentou os valores de dureza tanto nos chanfros em V quanto em gola e, por fim, não foi verificada a presença de trincas de solidificação em nenhuma das soldas realizadas nos estudos.

Santos (2016) também com a liga 5052, apesar de não ter como foco de estudo o comportamento do arame de adição ER 5356, menciona as informações para a escolha do mesmo: a presença entre 4,5% e 5,5% em peso de magnésio para compensar as perdas da vaporização e dos respingos durante a soldagem; a presença do cobre a fim de melhorar a resistência mecânica do metal de solda; a presença de silício para reduzir os precipitados de cobre e magnésio nos contornos dos grãos.

Savi (2014) empregando os arames de adição ER 5183 e ER 5087, ambos com 1,2 mm de diâmetro para o processo MIG CMT por curto circuito teve bons resultados na soldagem de raiz da liga 5083-H116, de espessura de 6 mm, pois, os metais de

adição atenderam as normas, qualificando o processo com diferenças metalúrgicas mínimas, se comparadas as características da solda. Entretanto, a autora percebeu que o arame ER 5087 demonstrou valores com melhor desempenho, embora a diferença entre os metais de adição não tenha sido tão marcante, nos ensaios de tração.

Fagundes (2014), também, com a liga 5083, observou que o arame ER 5087 apresentou soldas com mais qualidade para os tipos de processos de soldagem e espessura dos corpos de prova de seus estudos assim como uma ZF mais uniforme com ambas versões de soldagem. Entretanto, quanto à formação de poros, os dois tipos de arame obtiveram níveis aceitáveis de porosidade.

Marco (2014) com a liga 5083 em estado recozido considerou que o metal de adição ER 5183 fragilizou as soldas, reprovando os todos os corpos de provas no ensaio de dobramento, em função da baixa tensão de escoamento e alongamento. Ele sugere que se escolha um metal de adição com maior resistência mecânica porque esse se demonstrou inferior ao metal de base. Semelhante fato relata (GONZALEZ, 1991) descrevendo que o metal de solda obteve, em seus estudos, valores inferiores em relação ao metal de base, ao longo do cordão de solda, no ensaio de dureza. Ele cita que a opção pelo arame de adição ER 5183 foi pelo fato de essa liga de enchimento proporcionar, no metal de base em estado recozido, uma união satisfatória com excelentes propriedades mecânicas e fácil soldabilidade.

Coelho (2013) supõe que a diferença de potencial gerada pela formação de uma pilha devido às discordâncias de composição entre o arame de adição AA 5356 e o metal de base AA 5086 seja uma das causas da preferência de corrosão nas áreas próximas da solda em seus estudos.

Os distintos elementos presentes nos arames de adição, além de soldar uma liga especifica de alumínio, têm a função de melhorar as propriedades da solda (SANTOS, 2016). Por isso, observar a combinação adequada entre liga de base e liga de adição é um fator preponderante para todo processo de soldagem em que haja necessidade de preenchimento.

2.3.2.2 Gás de proteção

Conforme Cecílio (2017), na soldagem MIG, o gás de proteção é um fator primordial, especialmente nas soldagens em alumínio, pois auxilia na quebra da camada de óxido na superfície do material. Sua principal função é evitar defeitos, como a porosidade, em soldagens com alumínio pelo fato da alta solubilidade do hidrogênio nesse metal quando fundido. A fim de melhorar o processo, deve-se dar atenção ao pré e pós-fluxo de gás, pois isso protege a poça de fusão, antes de ela se solidificar, do contato com gases atmosféricos, evitando que esses gases causem falhas na solda.

Para a proteção gasosa nos processos de soldagem, uma série de gases podem ser empregados, como o argônio, o hélio, o neônio, xenônio, criptônio etc. Esses gases inertes podem ser utilizados com o processo MIG em ligas de alumínio. Contudo, os mais comuns são o argônio e o hélio e, dentre os dois, o primeiro é o que tem uma vasta aplicação, na sua forma pura, nas diferentes pesquisas sobre soldagem. Ele pode ser misturado ao hélio com objetivo de melhorar as qualidades (SANTOS, 2009). O argônio por induzir a limpeza do arco, permitir boa penetração, finalizando com uma solda limpa O hélio por proporcionar um cordão de solda mais largo no contorno da penetração, reduzindo a porosidade nesse local (FIGUEIREDO, 2000; MARCO, 2014).

De acordo com Santos (2009), ao selecionar o gás de proteção deve-se considerar o material de base, a transferência metálica, o tipo de eletrodo e a posição da soldagem a ser realizada já que as diferentes características da solda depositada são resultantes das diferenças na condutividade térmica dos componentes do gás de proteção, ou seja, a maior condutividade térmica de um gás gera mais calor à peça e, consequentemente, a forma e o perfil de penetração da solda serão influenciados. Isso quer dizer que tanto a geometria quanto a microestrutura da junta terão aspectos distintos conforme o tipo de proteção gasosa empegado na soldagem.

A condutividade térmica é uma das três características principais de um gás de proteção. As outras duas são o potencial de ionização, que é transformar um elétron de um átomo de gás em um íon. Por possuir um potencial de ionização que facilita a transformação de átomos em íons, se comparado com o gás hélio, o argônio mantém o arco suave e estável (LYTTLE & STAPON, 1990 apud FIGUEIREDO, 2000; SANTOS, 2009; MELADO, 2014). Quanto ao potencial de oxidação, o desempenho e as propriedades do arco assim como o depósito no local da solda são afetados de

acordo com o potencial oxidante dos gases (MELADO, 2014). Sendo a capacidade de oxidar um metal durante o processo de soldagem, esse fator influencia na fluidez do metal líquido sobre o metal de base, alterando o volume de fumos, a tenacidade e a resistência do metal de solda, não devendo ser muito elevado nem muito baixo já que a formação de óxidos na superfície do metal de solda contribui para o fenômeno da emissão catódica (TESKE 2006 apud FERREIRA, 2018).

Melado (2014) avaliando a influência da proteção gasosa nas tensões residuais geradas pelo processo de soldagem, observou que tanto a mistura gasosa de argônio com hélio quanto a nova mistura (Ar + N2O + O2) proporcionaram juntas com melhor estado de tensões residuais se comparadas com a junta soldada com proteção de argônio. Acrescenta ainda que, dentre as duas melhores misturas, a nova (Ar + N2O + O2) apresentou melhores resultados de tensões residuais, principalmente no metal de solda, local esse em que as tensões longitudinais e transversais foram compressivas e, portanto, benéficas e, apesar de todas as uniões terem apresentado porosidade, mais uma vez, a mistura (Ar + N2O + O2) foi a de menor proporção, com grãos mais refinados no metal de solda e menos grosseiros na ZTA. Essa mistura também obteve melhor desempenho no limite de escoamento em relação à junta soldada assim como os valores de microdureza na ZTA e MS, próximos ao metal de base, apresentaram maior magnitude em comparação com as misturas de Ar e Ar + He.

Marco (2014) verificando a influência dos gases de proteção (100% Ar) e (75% Ar + 25% He), com e sem pré-aquecimento, nos corpos de provas soldados, concluiu que com 100% Ar e pré-aquecimento a 120ºC, os números de poros diminuíram, comparando com o Argônio a 100%, sem pré-aquecimento, porque o pré-aquecimento mantém o cordão de solda mais quente, promovendo a expulsão dos gases gerados na fusão, que reduz a solubilidade do hidrogênio no alumínio líquido e, por consequência, a porosidade é diminuída. Já a mistura de 75% Ar + 25% He, sem o pré-aquecimento a 120ºC, dentre todas as misturas, foi a que apresentou a menor quantidade de poros em função das propriedades do hélio de elevar a temperatura na poça de fusão. Por outro lado, a mistura de 75% Ar + 25% He, com pré-aquecimento, obteve a maior quantidade de poros, pois, segundo o autor, o emprego do pré-aquecimento para reduzir a solubilidade do hidrogênio, pode ter sido a principal causa pelo aumento da porosidade.

Figueiredo (2000) alterando o gás argônio comercialmente puro para uma mistura de Ar + 25% He, em seus estudos com o processo MIG, observou que a região da transferência globular foi aumentada tanto em velocidade do arame eletrodo como na tensão média de soldagem; no modo goticular, não se verificou aumento na tensão média de soldagem, houve apenas um deslocamento da região para maiores valores de alimentação; para a faixa de transição de transferência globular para goticular, teve aumento na corrente de transição e na frequência da gota; tanto no modo globular quanto goticular não se verificou mudanças significativas no comprimento do arco; o autor não obteve conclusões definidas em relação à transferência curto-circuito e globular/curto-circuito.

2.4 MIG aplicada em ligas da série 5xxx

O processo MIG e suas variações de soldagem tem sido aplicado em estudos para fins de produção de solda qualificada em ligas da série 5xxx tanto para embarcações quanto para automóveis. Alguns autores recentes encontrados na revisão de literatura que tiveram como foco esse processo foram: Gomes (2017) com o método convencional - CC+ - para a liga 5083-O (Al-Mg-Mn) com espessura de 7 mm, soldada em diferentes posições (1G, 2G, 3G, 4G) utilizando arame AWS ER5183 e cobre-junta (*backing*) para chapa de 400 x 200 mm de comprimento e largura, respectivamente.; Santos (2016) sob o procedimento pulsado com fonte sinérgica pulsada, na liga 5052-F (2,5%Mg), de 4 mm e 500 x 330 mm; Marco (2014) com a chapa 5083-O, espessura de 6,35 mm (1/4”), de 220 x 250 mm, com MIG automatizado; Savi (2014) pesquisando a chapa 5083-H116 com 6 mm de espessura com o processo CMT (*Cold Metal Transfer*). Além desses, Fagundes (2014), demonstra atenção ao processo MIG-P CA para uma liga de alumínio da série 5xxx, a AA5083, espessuras de 8 e 12 mm, a fim de avaliar qual é o arame mais viável para o preenchimento de chanfro dessa chapa. Esse autor compara com o processo MIG-CA, que ele denomina MIG-P CA, com o processo MIG-P CC+, empregando nos ensaios os arames ER5183 e o ER5087, com diâmetro de 1,2 mm. Sob o gás argônio puro numa vazão de 15 l/min com controle de fluxo, os corpos de prova tiveram as mesmas dimensões (400 x 200 mm) para evitar possíveis diferenciação de calor no

início dos ensaios, observando que a transferência aconteceu de uma gota por pulso, na forma esférica e com estabilidade do arco para ambos os arames.

Considerando a equação da taxa de fusão, a técnica com a MIG-P CA apresentou com maior velocidade de soldagem, maior produtividade em comparação ao procedimento CC+ para as chapas de 8 mm de espessura assim como não concentrou calor nas extremidades do chanfro com os dois arames, fato este associado pelo autor em função do deslocamento do passe de raiz e do aporte térmico do procedimento de soldagem.

Quanto ao cordão de solda, este se mostrou contínuo, com boa aparência, sem respingos e sem comprometimento da qualidade pelo teor de porosidade; para o arame ER5183, a área de fusão se demonstrou irregular e ZF obteve menor dureza em ambos os arames com o processo MIG-P CA.

Quanto às conclusões gerais, o autor descreve que:

- O processo MIG-P CA obteve maior produtividade quanto ao passe de enchimento comparado ao MIG-P CC+;
- Em relação à qualidade da solda, às espessuras e às técnicas de soldagem, o arame ER5087 teve melhores resultados que o ER5183;
- No comportamento macrográfico, o arame ER5087 apresentou melhor uniformidade na ZF, com ambas versões de soldagem;
- Com a soldagem MIG-P CC+, valores maiores de temperatura, durante a soldagem, influenciaram diretamente o comportamento indesejável do deslocamento do passe de raiz.

2.5 Soldagem de ligas dissimilares

Em geral, as junções de materiais são realizadas com materiais similares, ou seja, aqueles que possuem as mesmas propriedades químicas ou físicas. No entanto, estudos com materiais dissimilares vêm aumentando devido às demandas dos diferentes setores da indústria (ALVES, 2016).

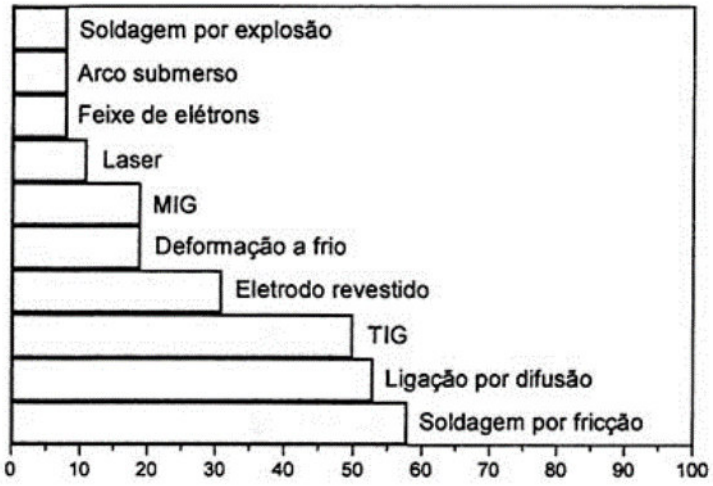
Ao soldar materiais dissimilares, por fusão, deve-se ter um controle rigoroso sobre a interação entre o metal sólido e o líquido durante as condições de soldagem (BUDKIN 2011 APUD MVOLA *et al*, 2014). Se o processo de soldagem não for bem controlado, defeitos como excesso de diluição, trincas e tensões residuais podem

comprometer o metal de solda, podendo ocasionar uma diminuição considerável nas propriedades desse local.

Além do processo de soldagem, os fundamentos de junções dissimilares, as considerações de serviço e a seleção do metal de adição, formam as principais análises a serem consideradas quando se objetiva unir materiais diferentes (MVOLA *et al*, 2014).

Para esse tipo de junção, a soldagem MIG não configura nas primeiras posições (**figura 10**), porém, como nesta pesquisa, ligas de alumínio dissimilares foram unidas por esse procedimento, adiante serão apresentados estudos para fins de análise do comportamento das estruturas e microestruturas das soldas.

Figura 10 - Principais processos de soldagens em junções dissimilares.



Fonte: (PIGORETTI 1999 APUD ALVES, 2016)

Mvola *et al* (2014) realizou um estudo de publicações sobre soldagem (*GMAW*), com metais não ferrosos dissimilares (alumínio-titânio, titânio-níquel, titânio-cobre, cobre-alumínio, ligas de cobre-níquel, magnésio-alumínio), tanto em processos convencionais quanto avançados, concluindo, entre outros aspectos, que embora a fusão desses metais seja difícil, na maioria das combinações, e o processo convencional finalize em junções pouco consistentes pela influência da qualidade do controle do aporte térmico e da estabilidade do arco, as versões mais avançadas proporcionam um controle melhor do processo, possibilitando a definição e o atendimento dos parâmetros de soldagens conforme a necessidade; os melhores resultados conseguidos são aqueles em que há uma redução significativa das

camadas dos compostos intermetálicos; visto que o calor afeta a diluição e a migração de elementos da liga, selecionar o processo de soldagem é um fator essencial quando se solda materiais não ferrosos dissimilares; os processos adaptativos permitem uma redução da diluição e das tensões residuais causadas pelas diferenças dos coeficientes térmicos devido a maior flexibilidade e sensibilidade desses tipos de procedimentos.

Santos (2012) estudou as características metalúrgicas do revestimento de dutos com o processo MIG convencional (MIG-C) e MIG- AF (arame frio) com ligas dissimilares de níquel e aço carbono, concluindo que, de forma geral, a diminuição da espessura da ZPM (zona parcialmente misturada) e da quantidade de Ferro nessa região que, consequentemente, diminuíram os valores de dureza foram, positivamente, influenciados pela energia de soldagem e pela adição do arame frio.

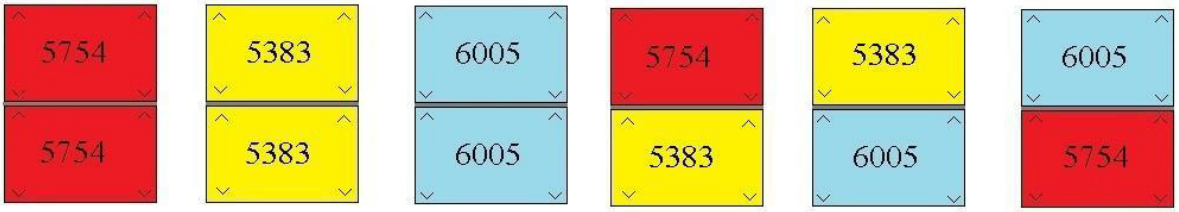
Os estudos citados acima auxiliam nas análises sobre ligas dissimilares de um modo geral, no entanto, para aprofundar o conhecimento em relação ao comportamento dessas junções, especificamente, com ligas de alumínio sob o processo MIG, a seguir, será apresentado o experimento de (CAGLIONI, 2017).

2.5.1 MIG em ligas de alumínio dissimilares

Como observado na **figura 10**, não há preferência do processo MIG para soldagens dissimilares com os diferentes tipos de materiais, o que viabiliza ainda mais esta pesquisa e a necessidade de se compreender as soldas dissimilares com esse metal.

Caglioni (2017) uniu as chapas das ligas Al-Mg 5383 H34, 5754 H34 e 6005 T6 de maneira similar e dissimilar pelo processo de solda MIG EN131 a fim de avaliar a relação entre as características macro e microestruturais e o comportamento mecânico da união, **figura 11**.

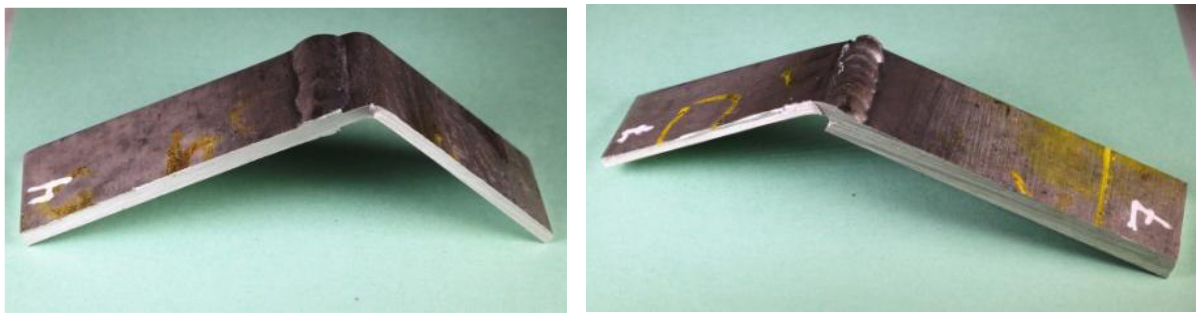
Figura 11 - Combinações similares e dissimilares das ligas preparadas com chanfro em ângulo de 45°. 5754 na espessura de 5 mm, a 5383 na espessura de 7 mm e a 6005 de 4 mm.



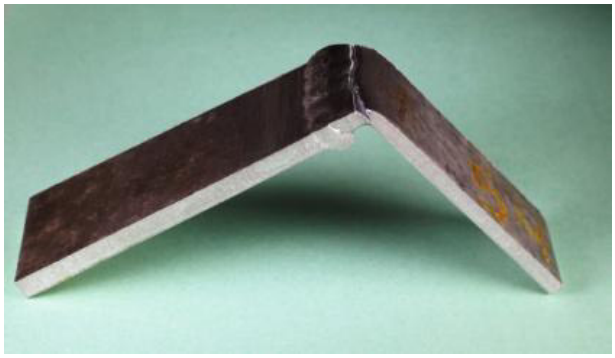
Fonte: (CAGLIONI, 2017).

O processo MIG utilizado foi duplo pulsado, somente em um lado das amostras e resfriadas a temperatura de 21°C, com ângulo da tocha a 60°, deslocando-se horizontalmente a favor da poça de fusão. O metal de adição usado foi o arame em 33 alumínio de acordo com a norma europeia AWS (*American Welding Society*) A5.10: ER5356, com 1,2 mm de diâmetro. A composição química é Si: 0,25%, Fe: 0,4%, Cu: 0,1%, Mn: 0,2%, Mg: 5,0%, Cr: 0,2%, Zn: 0,1%, Ti: 0,2%; ponto de fusão entre 571 e 635 °C e peso específico de 2,66 g/cm^3. O gás utilizado foi o argônio a 99,99% de pureza, à vazão de 23 l/min.

Figura 12 - Fotografia das amostras das ligas dissimilares 5754-6005 (a), 5383-6005 (b), 5754-5383 (c), após ensaio de dobramento.



a) b)



c)

Fonte: (CAGLIONI, 2017)

Nas ligas soldadas de forma dissimilar, **figuras 12a, 12b, 12c**, ocorreram dobras na liga de menor dureza e de menor espessura e as trincas surgidas ocorreram na linha de fusão porque esta é uma região onde o calor afeta a dureza, além de ser o mais próximo do cutelo, que não houve aumento da seção de área pelo metal de adição.

As ligas dissimilares obtiveram valores de tensão máxima e escoamento próximos aos das ligas soldadas de maneira similar, não havendo diferença significativa entre elas, levando a considerar que há uma equivalência entre a resistência do material da liga dissimilar e à resistência do material de menor resistência soldado de modo similar.

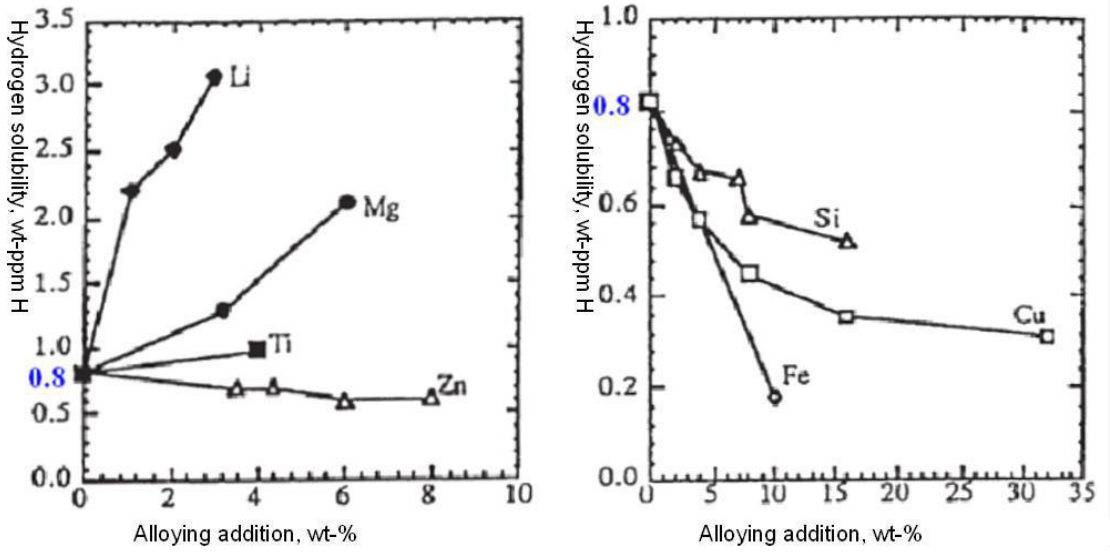
Houve alteração microestrutural depois da soldagem, diminuindo a resistência mecânica nas ligas 5754 H34, 5383 H34 e 6005 T6; também depois da solda, a linha de fusão na liga 5383 H34 e na ZTA das ligas 5754 H34 e 6005 T6 foram as regiões que apresentaram menor microdureza, sendo estes os pontos da junta mais susceptíveis a falhas. As falhas da solda na linha de fusão podem ser a explicação para a presença das trincas, sendo esse o local mais propício a falhas em situações de deformação por dobramento assim como uma possível deformação plástica poderia acontecer na ZTA na liga menos espessa.

2.6 Falhas nas soldas em alumínio

Segundo a *American Welding Sociaty*, as descontinuidades são divididas em três categorias básicas: descontinuidades dimensionais (distorção, dimensões incorretas da solda, e perfil incorreto do cordão de solda); descontinuidades estruturais (porosidade, inclusões, trincas, falta de fusão, falta de penetração, mordedura); e, propriedades inadequadas (propriedades mecânicas e propriedades químicas), sendo as descontinuidades estruturais, comumente, as que mais comprometem a solda (SAVI, 2014). Em relação ao alumínio, Savi (2014) destaca a falta de fusão, a falta de penetração, porosidades e trincas e Modenesi (2011) relata que os principais problemas metalúrgicos de soldabilidade do alumínio e suas ligas são a formação de porosidade pelo H2, a formação de trincas a alta temperatura, principalmente, solidificação e a perda de resistência mecânica quando se trata de metal base encruado ou endurecido por precipitação.

Como o alumínio reage com prontidão à presença do oxigênio, formando uma camada de óxido, denominada alumina (Al_2O_3), eleva o ponto de fusão e por impedir o contato e mistura do metal de base fundido ao metal de adição, pode ocasionar inclusões na solda. Caso essa mesma camada se torne mais expressiva, ela absorve umidade do ar que acrescida de outros componentes contamináveis, gera porosidade na zona fundida (FERNANDES, 2016). A contaminação do metal de adição durante o manuseio e/ou armazenagem e as condições da superfície do metal de base durante a soldagem são consideradas as fontes da porosidade pelo hidrogênio (COSTA, 2015). Deekhunthod (2014) salienta que as proporções de elementos ligados ao alumínio influenciam na redução ou no aumento da solubilidade do hidrogênio: as ligas Al-Si, Al-Cu, Al-Fe e Al-Zn reduzem a solubilidade do hidrogênio. Por outro lado, as ligas Al-Li, Al-Mg e Al-Ti proporcionam uma maior solubilidade. Já as ligas Al-Cu proporcionam uma grande redução da solubilidade do hidrogênio se a adição de Cu é superior a 3% em peso. Ligas Al-Mg fornecem uma solubilidade aumentada de hidrogênio. A 6% em peso de magnésio, a liga Al-Mg quase dobrou a solubilidade de hidrogênio em comparação com 0% em peso de Mg, **figura 13**.

Figura 13 - efeito dos elementos de liga na solubilidade do hidrogênio no alumínio líquido em 1246 ºC e pressão parcial de hidrogênio de 1 atm.

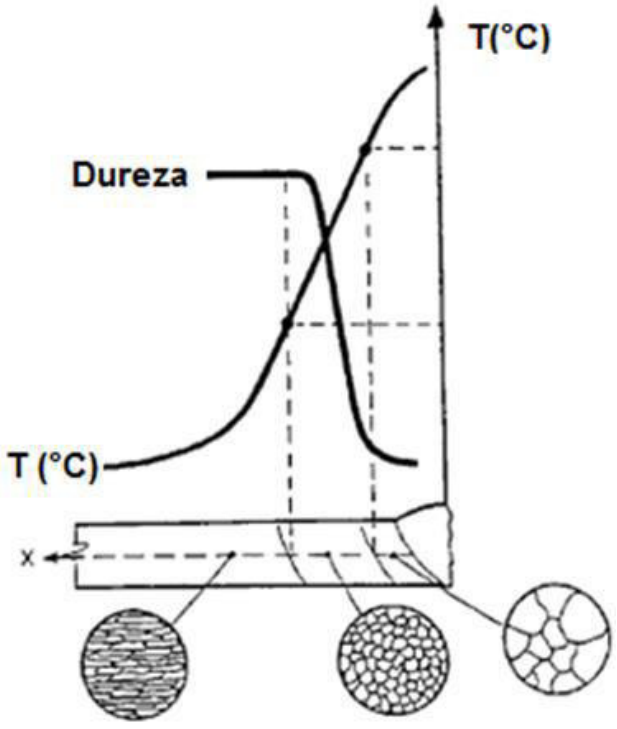


Fonte: (DEEKHUNTHOD, 2014)

Outro fator que culmina em soldas com falhas é a elevada condutividade térmica do alumínio que faz com que o calor se dissipe rapidamente, solidificando o

ponto de fusão, causando uma solda fora da posição plana. O elevado coeficiente de expansão, também é um fator que pode gerar trincas e distorções (FERNANDES, 2016; MARCO, 2014). Embora as trincas possam ser de vários tipos e a formação ter causas distintas, em geral, são a susceptibilidade do material e o ciclo térmico de submissão da liga que ocasionam tais falhas por elevar as tensões residuais na junta soldada em função da contração e expansão térmica (SAVI, 2014). A autora ainda informa que as ligas não tratáveis termicamente, que são sem transformação alotrópica, cedem lugar na ZTA a grãos equiaxiais crescentes conforme a proximidade da linha de fusão, no pico de temperatura, devido ao grão encruado pelo trabalho a frio do metal de base como visto na **figura 14**. Esse efeito endurecedor de encruamento pode desaparecer durante a soldagem, diminuindo a dureza e a resistência mecânica do metal de base deformado a frio.

Figura 14 - Efeito da recristalização e superaquecimento na microestrutura e dureza na ZTA e MB encruados sem transformação alotrópica.



Fonte: (SAVI, 2014)

Dependendo do processo utilizado na soldagem, algumas dessas falhas surgirão em maior ou em menor proporção. Souza (2010) demonstra que as mais comuns em soldagem *FSW* são falta de penetração, cavidade e *kissing bond* em

superfície de fratura. No seu estudo com a chapa 5052–F, encontrada comercialmente na forma de chapa laminada a quente, com dimensões de 1100 x 2000 x 6,35 mm (largura x comprimento x espessura), obteve em um dos resultados uma solda considerada rejeitada pela apresentação de uma descontinuidade de cavidade, presente no interior do cordão, podendo ter ocorrido pela falta de pressão em função do volume de material expulso pelo pino e acumulado sob o suporte; Com a liga 5182-O, também com a soldagem por fricção e mistura, (ALMEIDA, 2015) relata a presença de vazios na região da junta soldada do lado do avanço causado, possivelmente, pelo aporte térmico excessivo. Colaço (2019) cita que os defeitos superficiais como a porosidade e o “buraco de minhoca”, em soldagens por FSW, podem ocorrer pela inadequação dos parâmetros das variáveis de soldagem”. Esses “buracos”, também denominado de túneis, surgem e se intensificam em função das velocidades de translação e rotação da ferramenta (COSTA, 2018; PRABHU, S*. et al,* 2017).

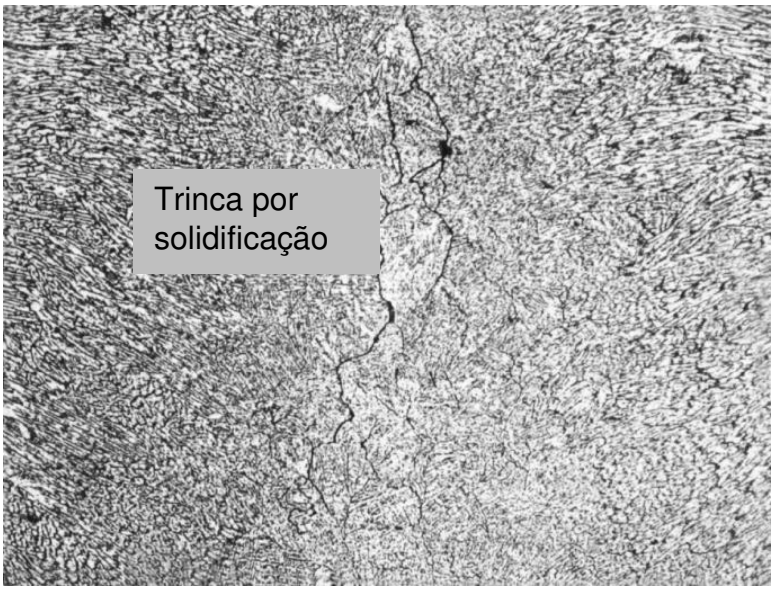
Figura 15 – Defeitos túneis em soldagem por FSW

Sl. No	Rotational Speed (rpm)	Welding speed (mm/min)	Macrostructure	Type of defect	Causes of Defect
1	<700	<40		Pin hole	Inadequate heat generation
2		>100		Worm hole	Insufficient heat generation and material transportation
3	>1500	<50		Tunnel hole	Excess heat input per unit length
4		>100		Tunnel hole	Excess heat input and poor consolidation

Fonte: (PRABHU, S. *ET AL,* 2017)

Nos estudos de Deekhunthod (2014) - **figura 16** - com MIG, na liga AA600A e os metais de adição AA4043 e AA5183 da norma EN 1011-4: 2000, poros apareceram nos resultados, mas, não houve trincas a quente nas amostras segundo o padrão EN ISO 10042: 2005 no nível de qualidade C. No entanto, o autor cita A. El-Batahgy & M. Kutsuna (2008), com as ligas AA5052-H12, AA5083-H12 e AA6061-T6, com MIG a laser, concluindo que todas as ligas investigadas apresentaram tendências para porosidade e trincas de solidificação, particularmente, em alta velocidade de soldagem (≥4m / min).

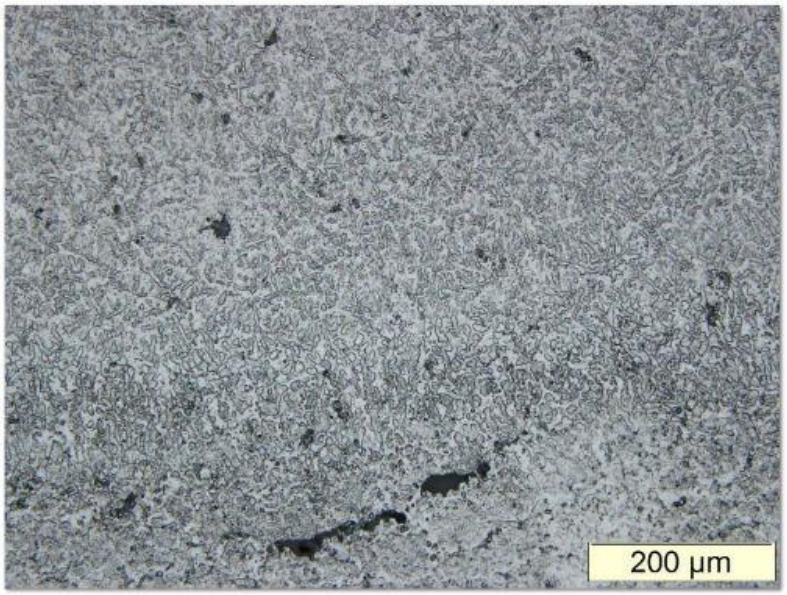
Figura 16 - Micrografia óptica de metal de solda da junta AA6061 em P = 5 kW, S = 4m / min, Dd = 0, 15 l / min de argônio.



Fonte: (DEEKHUNTHOD, 2014)

Embora, a soldagem *GTWA* seja relacionada a um modo de reduzir o surgimento de porosidade em função do resfriamento mais lento em comparação ao processo *GMAW* (MARCO, 2014), essa falha surge dentre os maiores problemas nas soldas em alumínio com tungstênio, que são: a oxidação, inclusão de tungstênio, porosidade e trinca como pode ser visto em (MELADO, 2014), com processo TIG-CA, com a liga AA5086, têmpera H-116, na forma de chapa de 6,35 mm de espessura, estudando as tensões residuais, bem como as propriedades mecânicas (resistência mecânica e microdureza), utilizando diferentes proteções gasosas, incluindo uma nova combinação patenteada. Duas dessas falhas surgem, na conclusão do autor, nas análises microestruturais, tanto por microscopia óptica (MO) como por microscopia eletrônica de varredura (MEV): porosidade no metal de solda em todas as juntas, sendo que na nova mistura (Ar + N_2O + O_2) proporcionou junta com menor porosidade, grãos mais refinados no metal de solda e menos grosseiros na ZTA; e, uma trinca, **Figura 17**, que pode ter surgido em função do alinhamento dos poros.

Figura 17 - Microscopia óptica do metal de solda na condição Ar+N_2O+O_2 (Aumento de 200X).



Fonte: Adaptado de (MELADO, 2014)

Por esse estudo ter como um dos objetivos descobrir as possíveis causas de trincas na junta soldada de uma embarcação e as trincas de solidificação serem falhas recorrentes em soldagens com alumínio, elas serão abordadas no próximo subtítulo.

2.6.1 – Trincas de solidificação - Para detectar essas falhas, além da inspeção visual, utiliza-se outros procedimentos como líquido penetrante, para as de superfície (externas) e raio-x, ultrassom e partícula magnética são necessários para se ter certeza da presença dessas fissuras, se elas forem internas (GOMES, 2017; LAGARES Jr, 20--).

Em relação aos fatores mecânicos que provocam essas falhas, estão as tensões de contração – contração térmica ou contração por mudança da fase líquida para a sólida ou ambas as possibilidades; e o grau de restrição da junta – função da geometria da junta e da espessura do material a ser soldado (MARTINS, 2000).

Quanto aos fatores metalúrgicos, (MARTINS, 2000; DEEKHUNTHOD, 2014), citam alguns que podem culminar em trincas de solidificação:

• A variação da temperatura de solidificação, que pode influenciar na formação de microsegregações;

• A quantidade e a distribuição do líquido na última etapa da solidificação, que também ocasiona a microsegregação;

• A fase primária de solidificação;

• A tensão superficial do líquido no contorno do grão;

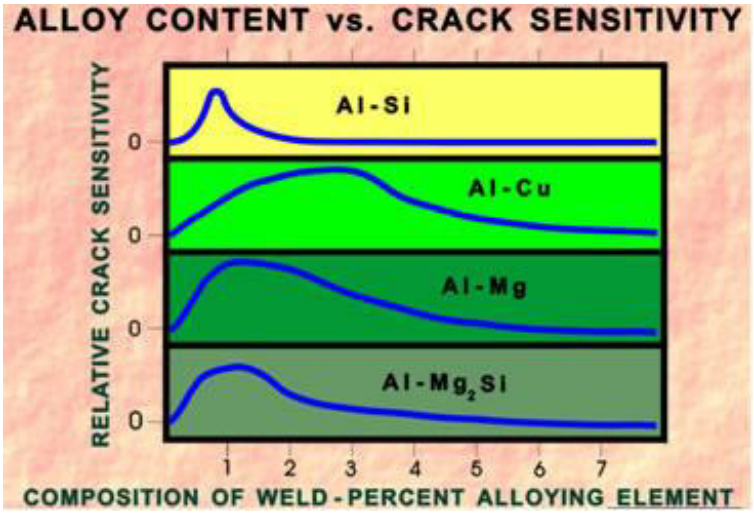
• A estrutura do grão na zona de fusão, pois, grãos colunares grosseiros são mais suscetíveis a trincas de solidificação que os grãos equiaxiais finos;

• A ductilidade de solidificação do material de solda;

• A tendência de contração do material de solda e o grau de restrição.

A trinca a quente, frequentemente, ocorre na interface sólido-líquido próxima à zona de fusão, na última etapa da solidificação, onde os dentritos já estão em forma de grãos. Eles são separados de cada outro por pequena quantidade de líquido na forma de filmes de contorno de grão. Os filmes líquidos podem culminar em trincas no material se, no momento em que a solda traciona devido as necessidades da soldagem, houver regiões ainda líquidas, pois, eles precisam estar livres para se mover durante o resfriamento já que, nesse momento, o metal apresenta-se fraco e suscetível a rachaduras em função das tensões induzidas na solda (H. ZHAO et al, 1999 APUD DEEKHUNTHOD 2014; GOMES, 2017). Elas surgem no metal de solda e a possibilidade de trincar dependerá da quantidade de elementos de liga (GOMES, 2017).

Figura 18 - Suscetibilidade à trinca de algumas ligas de alumínio.

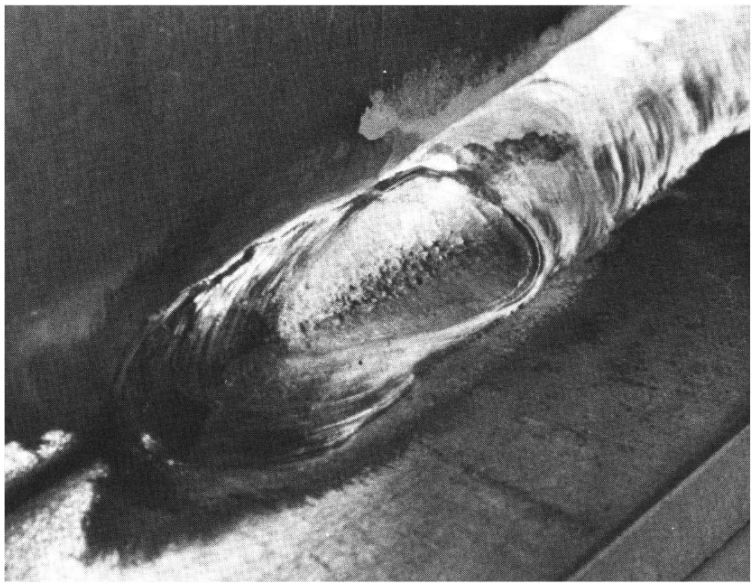


Fonte: (ALCOTEC, 2015)

As trincas de solidificação mais comuns são as de cratera, longitudinais e transversais no cordão de solda, mas, no alumínio, as de cratera, provocadas pela interrupção do arco voltaico, causando o fenômeno de rechupe enquanto a poça de fusão se solidifica são mais nítidas porque o alumínio fundido contrai 6% do seu

volume quando se solidifica; e as longitudinais, bastante comuns, pois, as tensões transversais na junta e a perda da resistência mecânica do metal de solda durante a solidificação resultam nesse tipo de trincas (COSTA, 2015).

Figura 19 - Rechupe de cratera.



Fonte: (SIMEI, 2012)

Os métodos para redução de problemas de trincas de solidificação, elencados por diversos autores nos estudos de Martins (2000) incluem escolha de metal de adição que formará, com o metal de base, uma zona fundida em que a composição química resulte em baixa possibilidade ao trincamento; nos casos em que não se pode modificar a zona fundida, a utilização de um metal de base cuja composição seja a menor de tendência à trinca; imposições de tensões compressivas ou alívio das tensões durante a solidificação a fim de diminuir o grau de restrição; aumento do insumo de calor e da velocidade de soldagem na estrutura de solidificação da ZF, gerando a diminuição do tempo de resfriamento da solda, contribuindo, assim, com estruturas com menor granulação e reduzindo o tempo da fase líquida intergranular; oscilação magnética do arco para alterar a estrutura de solidificação do cordão de solda em relação a como os grãos se unem, reduzindo a propagação de trincas; utilização de refinadores de grãos para formar grãos finos equiaxiais no centro do cordão; retirada do calor da solda para melhorar a microestrutura do cordão, que faz com que forme uma estrutura de grãos finos e diminui o tempo do filme líquido entre os grãos semisolidificados; e, por último, a pulsação do arco, que por variar a corrente

entre dois valores (corrente de pico e corrente de base), resulta, imediatamente, na diminuição do insumo de calor porque a corrente de pico se encarrega da maior parte de insumo de calor da solda e a corrente de base pela manutenção e estabilidade do arco entre os picos.

Ainda sobre os estudos de Martins (2000), sobre o surgimento de trincas de solidificação com a liga 5052, pois, segundo ele, esta liga mostra-se bastante suscetível a essas falhas, conforme as sugestões dos autores do seu estudo e das aplicações práticas feitas por ele, surgiram as seguintes conclusões: as trincas eram, realmente, de solidificação, caracterizada pela separação dos filmes líquidos; as trincas de solidificação foram minimizadas, substancialmente, pelo uso da corrente alternada pulsada com baixa frequência e onda retangular do processo *GTAW*; os fatores mecânicos tiveram maior influência que os fatores metalúrgicos em relação às trincas de solidificação, pois, a tensão tangencial aumentada diretamente proporcional foi o fator de maior influência sobre essas falhas; o autor desaconselha altos espaçamentos entre os pontos fundidos da solda em corrente alternada pulsada porque verificou que há presença de trincas internas nessas condições.

Para mais detalhes sobre os resultados dos estudos e o fenômeno de trincas por solidificação, sugere-se a leitura na íntegra da pesquisa do referido autor.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caracterização dos materiais

As espessuras do chapeamento do casco da embarcação analisada neste estudo, são: 3,00 mm (laterais superestrutura); 4,00 mm (convés principal); 4,00 mm (costado) e 6,00 mm (fundo). A estrutura da embarcação é composta por casco e cascaria com chapas de alumínio naval da liga 5086-H116 e perfilados da liga 6061 T-6. Para a junção da nova estrutura teve a adição da liga 5052-F. Por se tratar de mesmo material, isto é, ligas de alumínio da série 5xxx, a junção é classificada como levemente dissimilar (ALVES, 2016), afinal, o que altera entre elas é a composição química, neste caso, mais precisamente, a porcentagem dos elementos que compõem estas ligas de Al-Mg.

Ao se soldar ligas de Al-Mg, por meio de processos de fusão, deve-se utilizar metal de adição, necessariamente, do mesmo grupo de ligas, preferencialmente, com elevado teor de magnésio, pois, assim, o metal de solda mantém maior resistência que o metal de base na ZAC - Zona Afetada pelo Calor (ASM v6, 1995 APUD SANTOS, 2016; GONZALEZ, 1991). Caso não haja classificação entre ligas de adição e metal base, não é recomendado que se faça a união dos materiais assim como devem ser analisadas as classificações em que ocorrerá tratamentos térmicos depois da soldagem (ALCOTEC, 2015).

3.1.1 Seleção de material de adição

Figura 20 –Seleção de material de adição para ligas de alumínio

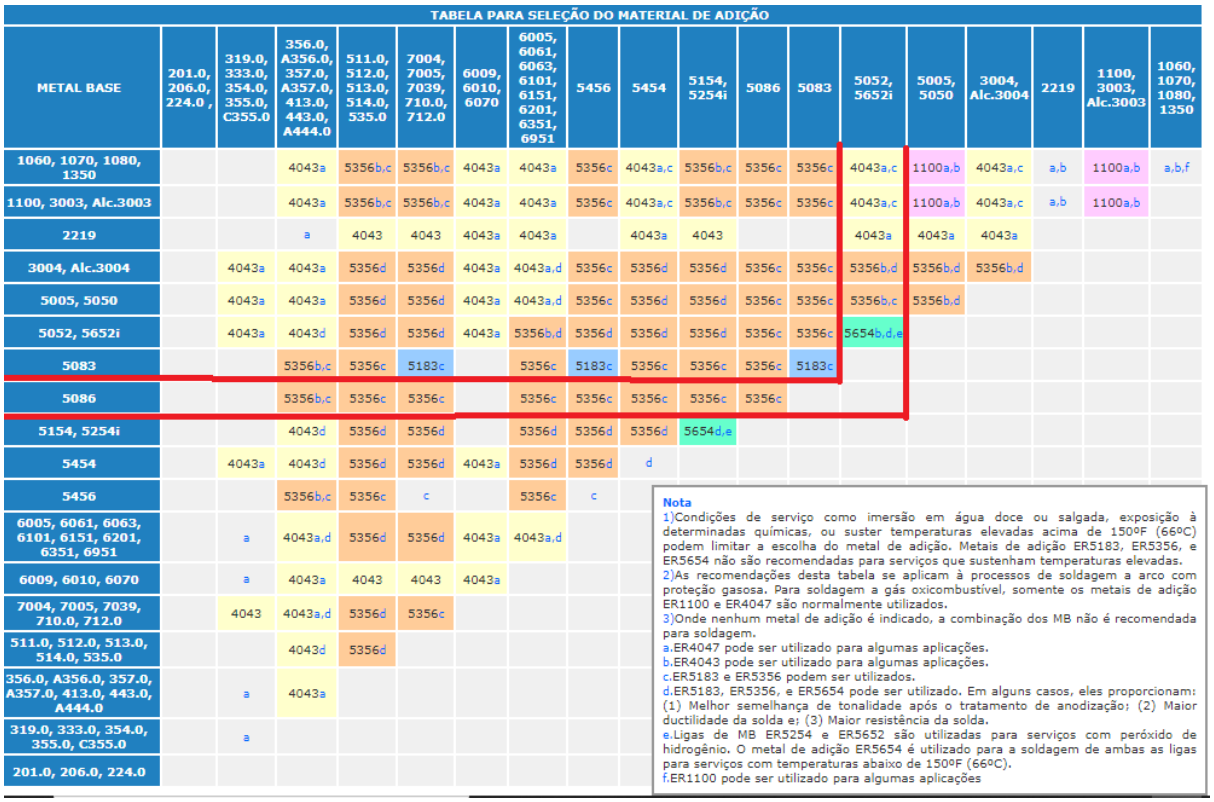


TABELA PARA SELEÇÃO DO MATERIAL DE ADIÇÃO

METAL BASE	201.0, 206.0, 224.0 ,	319.0, 333.0, 354.0, 355.0, C355.0	356.0, A356.0, 357.0, A357.0, 413.0, 443.0, A444.0	511.0, 512.0, 513.0, 514.0, 535.0	7004, 7005, 7039, 710.0, 712.0	6009, 6010, 6070	6005, 6061, 6063, 6101, 6151, 6201, 6351, 6951	5456	5454	5154, 5254i	5086	5083	5052, 5652i	5005, 5050	3004, Alc.3004	2219	1100, 3003, Alc.3003	1060, 1070, 1080, 1350
1060, 1070, 1080, 1350			4043a	5356b,c	5356b,c	4043a	4043a	5356c	4043a,c	5356b,c	5356c	5356c	4043a,c	1100a,b	4043a,c	a,b	1100a,b	a,b,f
1100, 3003, Alc.3003			4043a	5356b,c	5356b,c	4043a	4043a	5356c	4043a,c	5356b,c	5356c	5356c	4043a,c	1100a,b	4043a,c	a,b	1100a,b	
2219			a	4043	4043	4043a	4043a		4043a	4043			4043a	4043a	4043a			
3004, Alc.3004		4043a	4043a	5356d	5356d	4043a	4043a,d	5356c	5356d	5356d	5356c	5356c	5356b,d	5356b,d	5356b,d			
5005, 5050		4043a	4043a	5356d	5356d	4043a	4043a,d	5356c	5356d	5356d	5356c	5356c	5356b,c	5356b,d				
5052, 5652i		4043a	4043d	5356d	5356d	4043a	5356b,d	5356d	5356d	5356d	5356c	5356c	5654b,d,e					
5083			5356b,c	5356c	5183c		5356c	5183c	5356c	5356c	5356c	5183c						
5086			5356b,c	5356c	5356c		5356c	5356c	5356c	5356c	5356c							
5154, 5254i			4043d	5356d	5356d		5356d	5356d	5356d	5654d,e								
5454		4043a	4043d	5356d	5356d	4043a	5356d	5356d	d									
5456			5356b,c	5356c	c		5356c	c										
6005, 6061, 6063, 6101, 6151, 6201, 6351, 6951		a	4043a,d	5356d	5356d	4043a	4043a,d											
6009, 6010, 6070		a	4043a	4043	4043	4043a												
7004, 7005, 7039, 710.0, 712.0		4043	4043a,d	5356d	5356c													
511.0, 512.0, 513.0, 514.0, 535.0			4043d	5356d														
356.0, A356.0, 357.0, A357.0, 413.0, 443.0, A444.0		a	4043a															
319.0, 333.0, 354.0, 355.0, C355.0		a																
201.0, 206.0, 224.0																		

Nota

1)Condições de serviço como imersão em água doce ou salgada, exposição à determinadas químicas, ou suster temperaturas elevadas acima de 150ºF (66ºC) podem limitar a escolha do metal de adição. Metais de adição ER5183, ER5356, e ER5654 não são recomendadas para serviços que sustenham temperaturas elevadas.
2)As recomendações desta tabela se aplicam à processos de soldagem a arco com proteção gasosa. Para soldagem a gás oxicombustível, somente os metais de adição ER1100 e ER4047 são normalmente utilizados.
3)Onde nenhum metal de adição é indicado, a combinação dos MB não é recomendada para soldagem.
a.ER4047 pode ser utilizado para algumas aplicações.
b.ER4043 pode ser utilizado para algumas aplicações.
c.ER5183 e ER5356 podem ser utilizados.
d.ER5183, ER5356, e ER5654 pode ser utilizado. Em alguns casos, eles proporcionam: (1) Melhor semelhança de tonalidade após o tratamento de anodização; (2) Maior ductilidade da solda e; (3) Maior resistência da solda.
e.Ligas de MB ER5254 e ER5652 são utilizadas para serviços com peróxido de hidrogênio. O metal de adição ER5654 é utilizado para a soldagem de ambas as ligas para serviços com temperaturas abaixo de 150ºF (66ºC).
f.ER1100 pode ser utilizado para algumas aplicações

Fonte: (OXIGEN, 2022)

3.2 Métodos

A proposta deste estudo foi analisar a técnica de soldagem MIG CC+ na reestruturação de um motor de um transporte aquático que pelo aparecimento de trincas culminou nesse experimento a fim de observar o comportamento das chapas unidas com os arames de adição ER 5183 e ER 5356 vistos que, na revisão de literatura, não há indicação de combinação desse consumível para a união das chapas desta pesquisa **(figura 20)**. Desta maneira, foi necessário coletar informações do procedimento realizado e das características dos materiais empregados no processo para, com isso, transpor esses dados para os corpos de prova. Esses dados são: tipos de ligas envolvidas no procedimento, consumíveis, maquinário etc. Além disso, as quantidades e todos os procedimentos operacionais foram replicados neste experimento a fim de obter respostas mais próximas da realidade de soldagem aplicada nas chapas.

Após o processo de coletar as informações de soldagem, os corpos de prova foram preparados e soldados - **figuras 21 e 22.** Nas amostras temos as medidas L (largura) x C (comprimento):

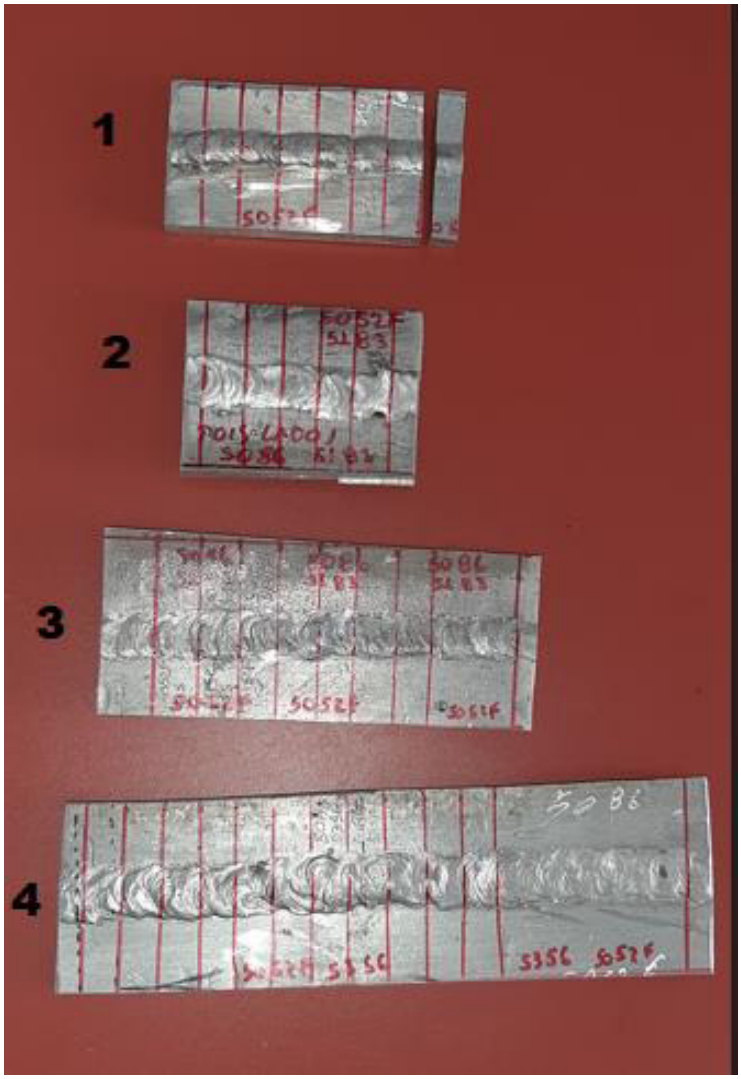
1 - 50mm x 80mm, e 2 cordões de soldas, um em cada lado da chapa com o consumível ER 5356;

2 - 50mm x 50mm, e 2 cordões de soldas, um em cada lado da chapa com o consumível ER 5183;

3 - 50mm x 70mm, e 1 cordão de solda, com o consumível ER 5183;

4 - 50mm x 110mm, e 1 cordão de solda, com o consumível ER 5356.

Figura 21 – Amostras do corpo de prova



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR,2021)

Figura 22 – Amostras dos corpos de prova

Fonte: (PRÓPRIO AUTOR,2021)

O processo adotado na reestruturação foi o MIG CC+. No entanto, como esse procedimento apresentou trincas, este estudo buscou averiguar se a alteração do tipo de consumível (arame) seria suficiente para garantir uma solda com limites confiáveis de imperfeições.

No processo de soldagem foram utilizados dois tipos de consumíveis:

- Liga de alumínio - 5Mn, AWS A 5.10 ER 5183 e diâmetro - 1.00 mm, esse usado no reparo da embarcação;
- Liga de alumínio – 0,10Mn, AWS A 5.10 ER 5356 e diâmetro - 1.00 mm, esse usado nos testes com as chapas no reparo da lancha.

O gás de proteção foi o argônio, sendo o processo de preenchimento na união das chapas em ângulo da tocha entre 30° a 35° graus em relação as chapas com chanfro de 30° graus. A transferência de metal foi a arco por spray.

Os ensaios foram realizados, inicialmente, no laboratório de metalografia da FURG (Universidade Federal do Rio Grande) com os primeiros lixamentos dos corpos de provas e, posteriormente, continuados e finalizados com as lixas 100, 220, 320 400, 600 e 1200 para metalografia e com os ensaios de macrografia, micrografia e de dureza Brinell, nos equipamentos OLYMPUS SZ61, LEICA DMRM, e WPM, respectivamente, nos laboratórios de aulas práticas e preparação de amostras e de microscopia óptica da UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro). O polimento contou com a pasta de polimento de 6, 3 e 1 microns. E o ataque foi com o reagente

de KELLER: H_2O + HNO_3 + HF+ HCL, na proporção de 95ml, 2,5ml, 1,0ml e 1,0ml respectivamente por 30 segundos.

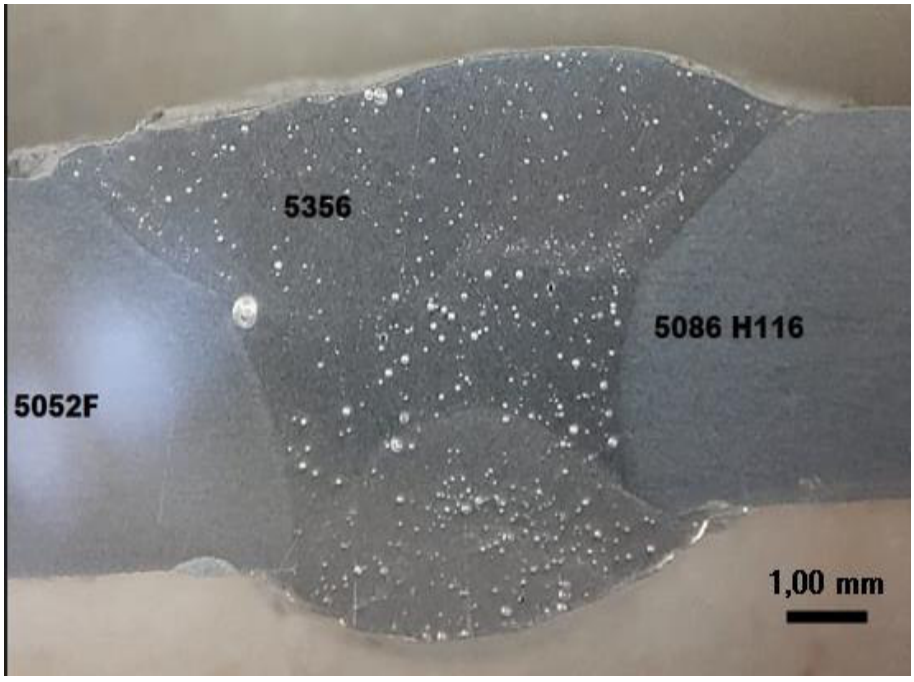
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Ensaios

Os estudos de ensaios com as ligas de alumínio auxiliam na análise das melhores condições de aplicações de materiais, impulsionando a projetos de engenharia com mais qualidade na relação materiais e métodos.

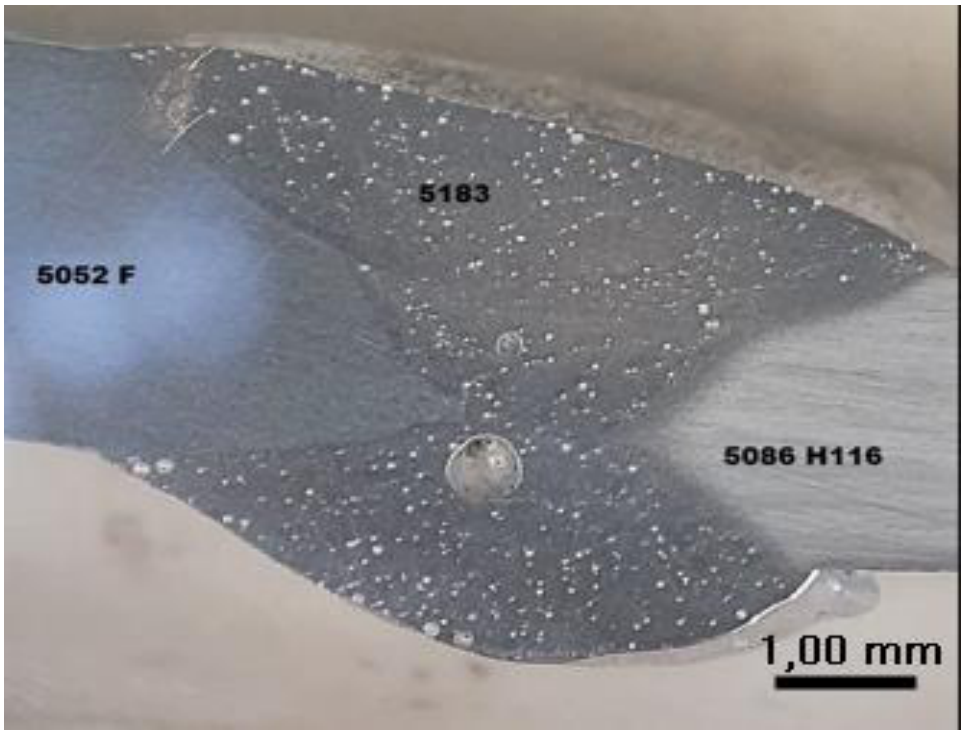
4.1.1 Ensaios por Macrografia

Figura 23 – Macrografia com duas soldas e metal de adição ER 5356.



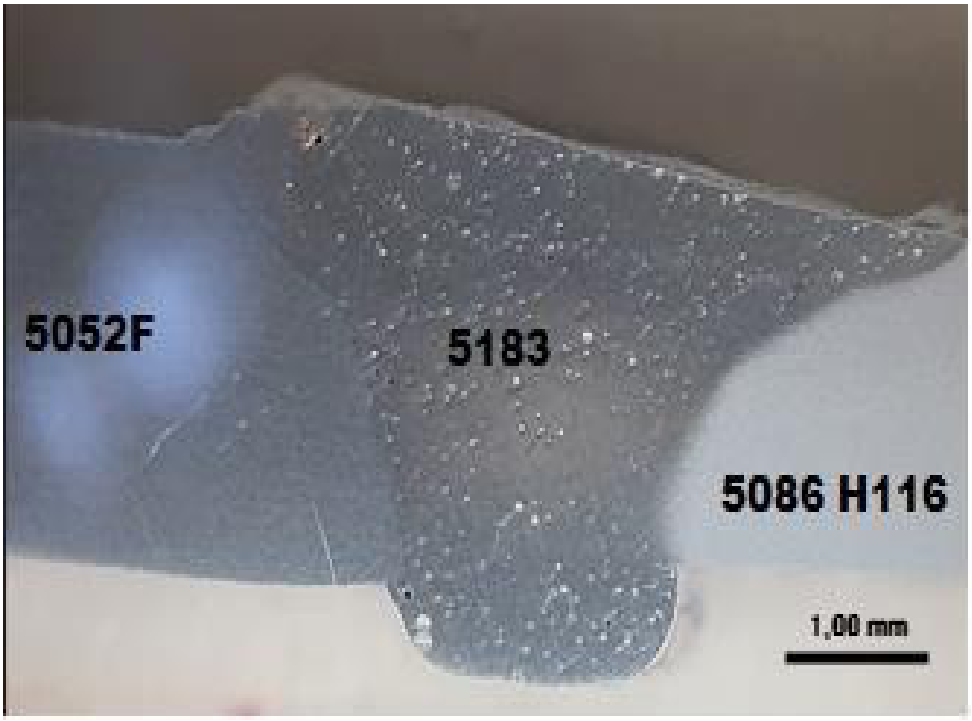
Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022)

Figura 24 – Macrografia com duas soldas e metal de adição ER 5183.



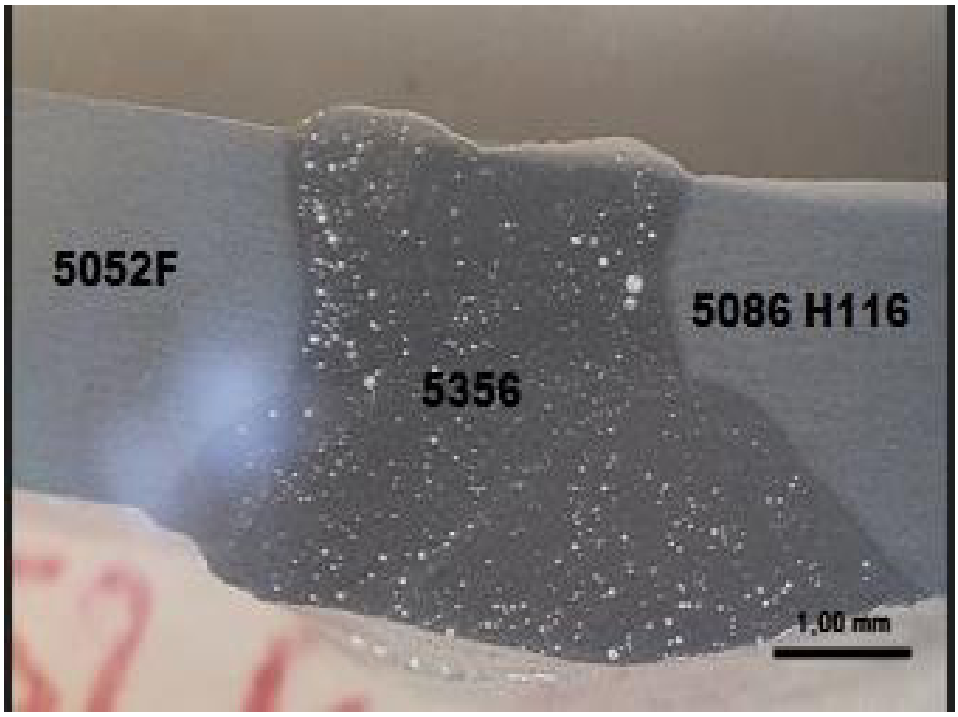
Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022)

Figura 25 – Macrografia com uma solda e metal de adição ER 5183.



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022)

Figura 26 – Macrografia com uma solda e metal de adição ER 5356.



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022)

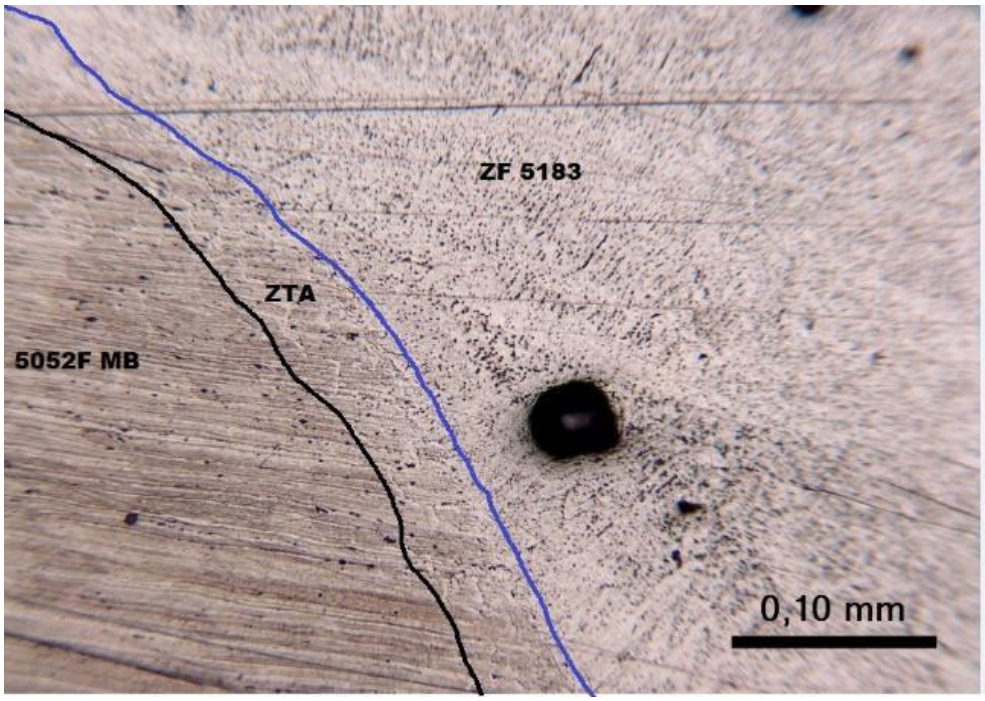
No ataque das amostras - **figuras 23 a 26** - com ácido clorídrico puro e um tempo 30s, revelaram-se porosidades na ZF, ocultando a ZTA.

Nas **figuras 23 e 26**, o arame ER 5356 apresentou um visual com menos porosidades ao contrário das **figuras 24 e 25**, que demonstraram maior incidência das mesmas, com o arame 5183.

Como no ambiente das soldas não ocorreu o controle apropriado da umidade, pois, na região do local de soldagem, ela se mantém superior a 50%, praticamente, ao longo de todo o ano, houve contaminação na zona fundida apresentando as porosidades verificadas nas imagens mencionadas acima.

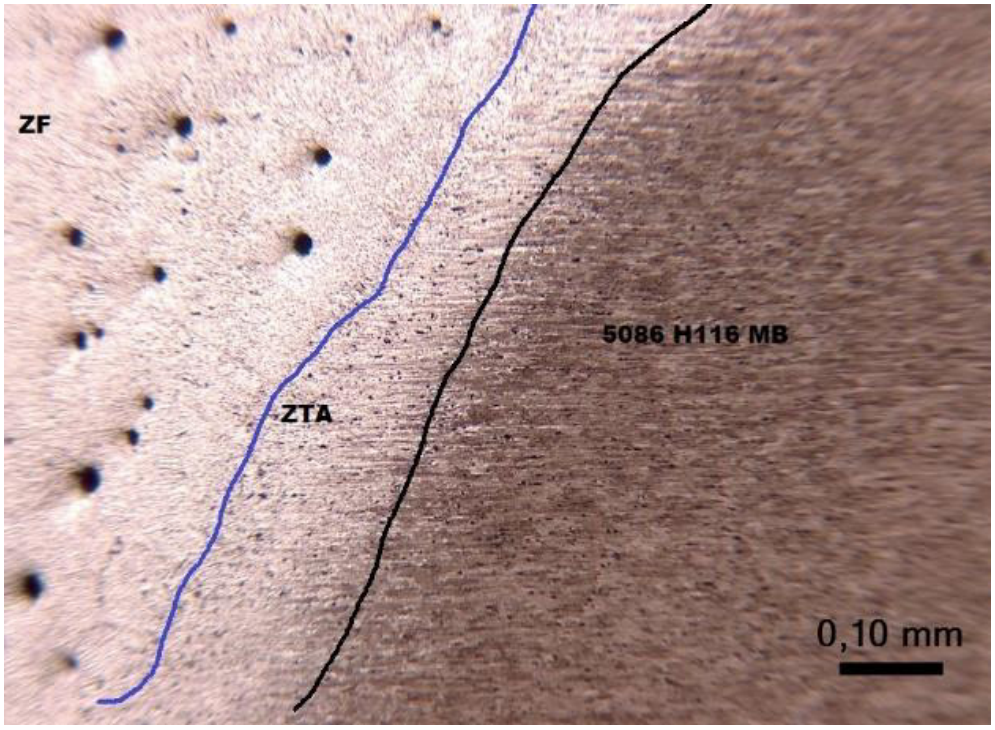
4.1.2 Ensaios por Micrografia

Figura 27 - Micrografia 1 solda 5052F 5183 ZF 50x



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022).

Figura 28 - Micrografia 1 solda 5086 5183 ZF 50x

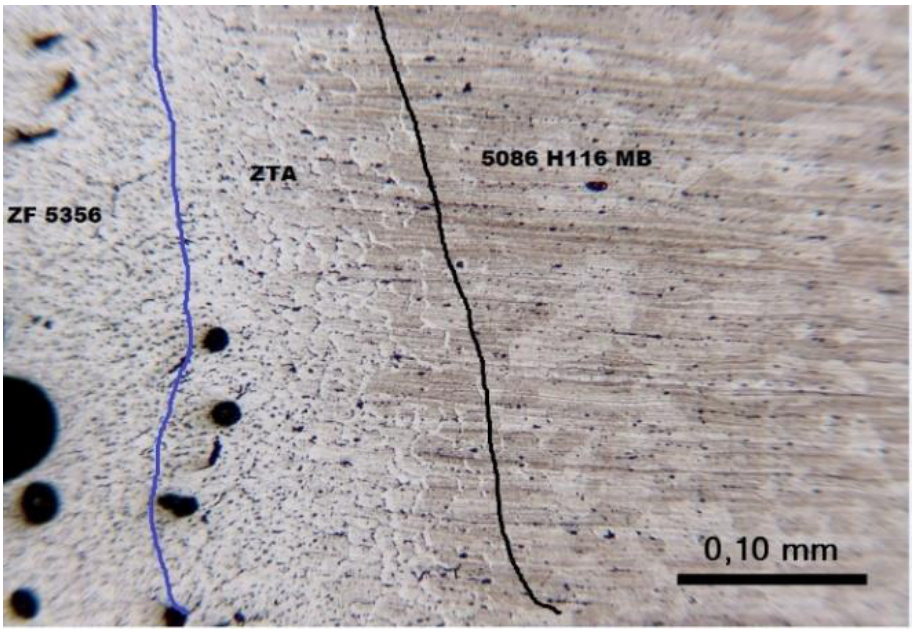


Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022).

Nas **figuras 27 e 28**, com zoom de 50x, pode-se analisar visualmente que na ZTA entre o MB 5052F e a ZF 5183 ocorreram microfissuras na transição e porosidades

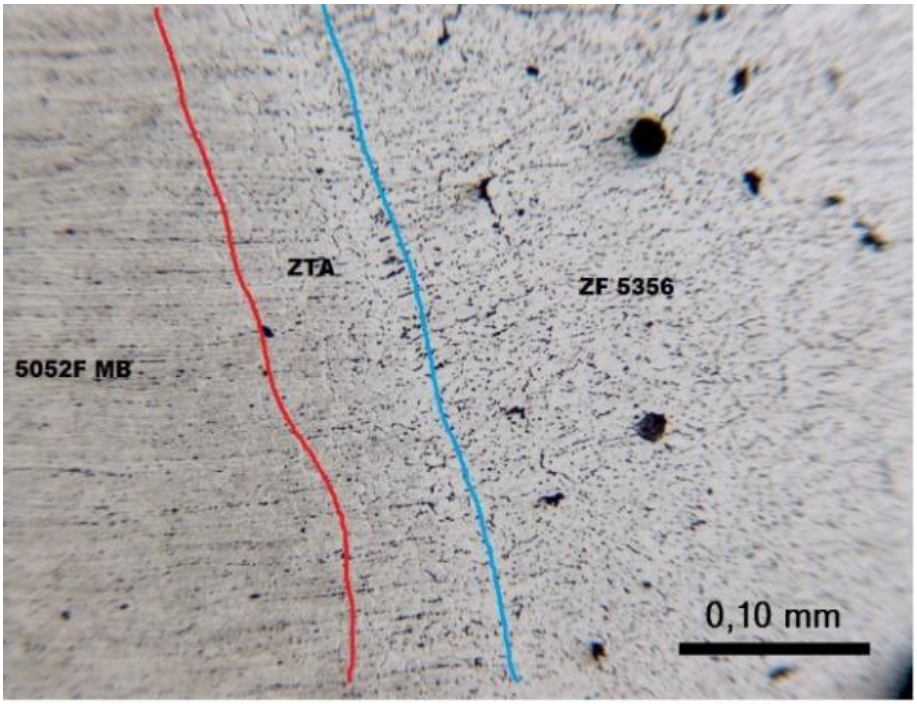
na zona fundida. Já na ZTA com o MB 5086, na transição, não houve visualmente as microfissuras. As porosidades se apresentaram de maneira distribuídas em ambas ZF conforme Fagundes (2010), causadas, provavelmente, pela penetração de hidrogênio no ambiente de soldagem.

Figura 29 - Micrografia 1 solda 5086 5356 ZF 50x



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022)

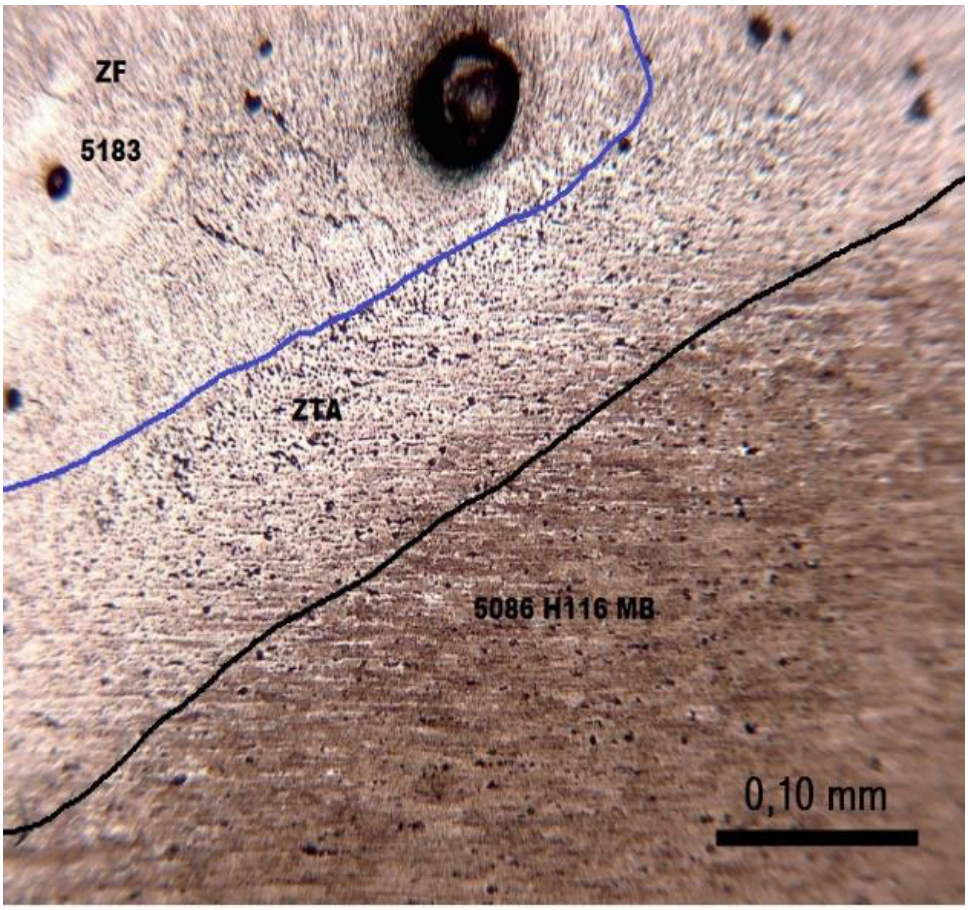
Figura 30 - Micrografia 1 solda 5052F 5356 ZF 50x



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022)

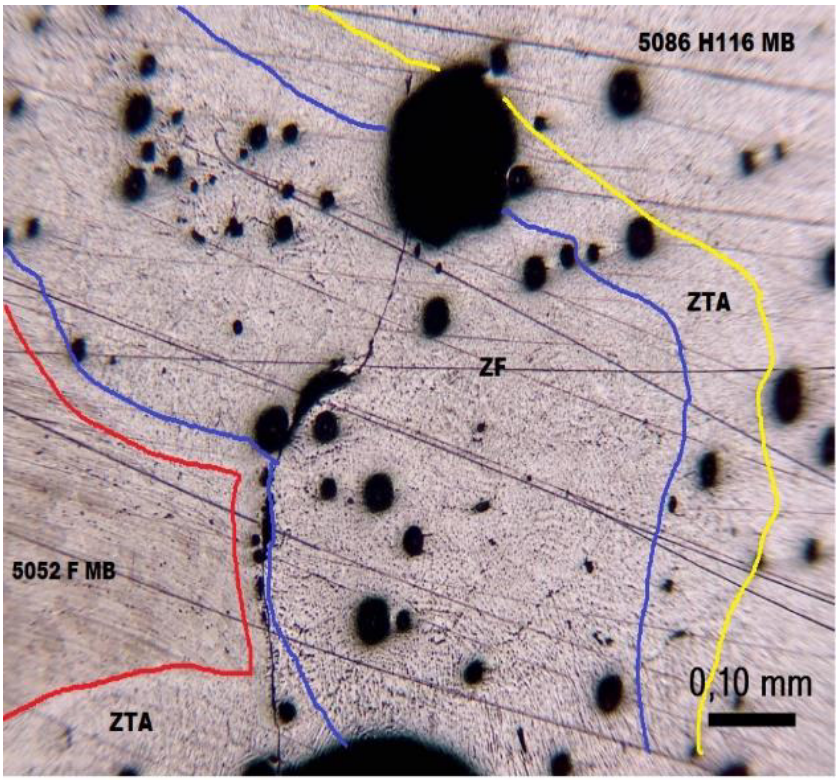
Nas **figuras 29 e 30**, com zoom de 50x, pode-se analisar visualmente que na ZTA entre o MB 5086 H116 e a ZF 5356 ocorreram microfissuras na transição e porosidades na zona fundida. Já na ZTA com o MB 5052F, na transição, não ocorreram visualmente as microfissuras. As porosidades se apresentaram de maneira distribuídas em ambas ZF conforme Fagundes (2010), causadas, provavelmente, pela penetração de hidrogênio no ambiente de solda. Fato inverso ocorrido nas **figuras 27 e 28.**

Figura 31 - Micrografia 2 soldas 5183 5086 ZF 50x



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022).

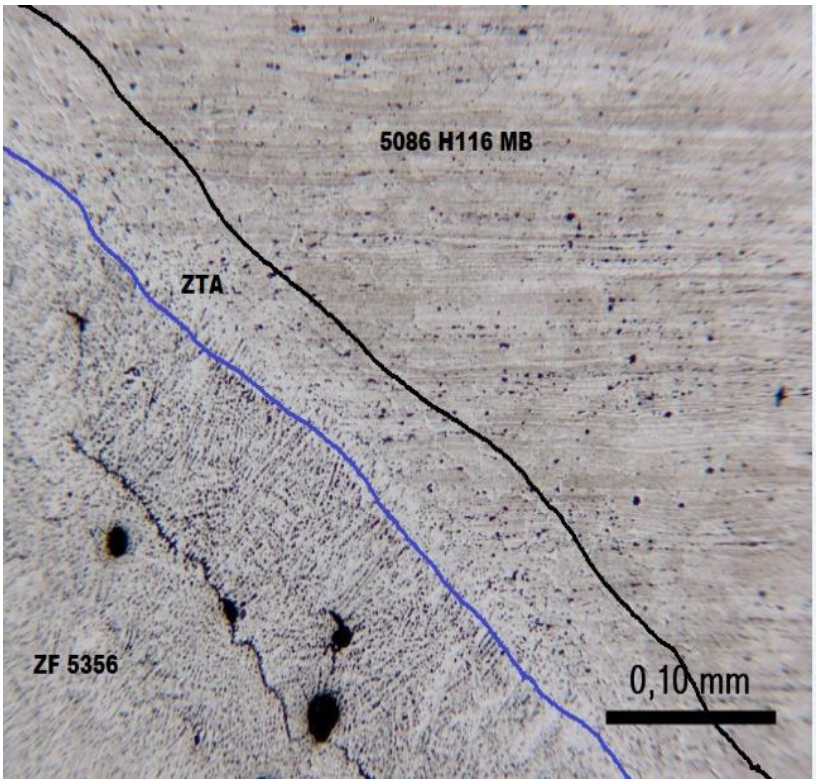
Figura 32- Micrografia 2 soldas 5052F 5356 ZF 50x



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022).

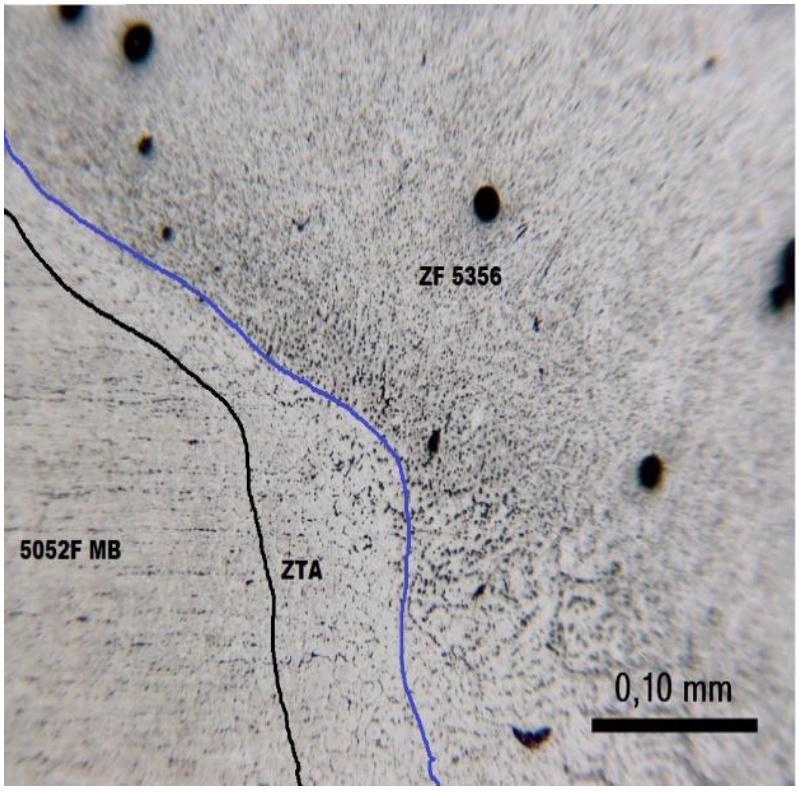
Na figura 31, com dois cordões de solda, tivemos visualmente uma boa transição da ZTA com o MB 5086 H116, mas na ZF podemos observar trincas e incrustações. E, **na figura 32**, houve uma transição com uma boa ótica do MB 5052F com o consumível 5356, no entanto, trincas se estenderam da ZTA ligando o poro desta zona até outro poro na ZF.

Figura 33- Micrografia 2 soldas 5356 5086 ZF 50x



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022)

Figura 34- Micrografia 2 soldas 5052F 5356 50x



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022)

Na figura 33, com dois cordões de solda, tivemos visualmente uma boa transição da ZTA também, com o MB 5086 H116 e consumível 5356, mas na ZF podemos observar novamente trincas e incrustações. E, **na figura 34**, houve uma boa ZTA visualmente com o MB 5052F e o consumível 5356, já na ZF houve a presença de poros na região.

4.1.3 Ensaios de Dureza Brinell

$$HB = \frac{2\mathrm{F}}{\pi.\,\mathrm{D}(\mathrm{D} - \sqrt{\mathrm{D2}} - \mathrm{d2})}$$

Sendo:

HB = Dureza dada em Brinell;

F = Carga aplicada sobre a esfera em kgf - (187,5 kgf);

D = Diâmetro da esfera em mm - (2,5 mm);

d = Diâmetro da calota em mm – (usado uma média dos valores);

σ_{LRT} = Limite de resistência a tração;

K = Constante;

σ_{LRT} = K * HB.

Figura 35- Dureza Brinell com 01 solda 5052F MB. Dureza Brinell = 115 HB

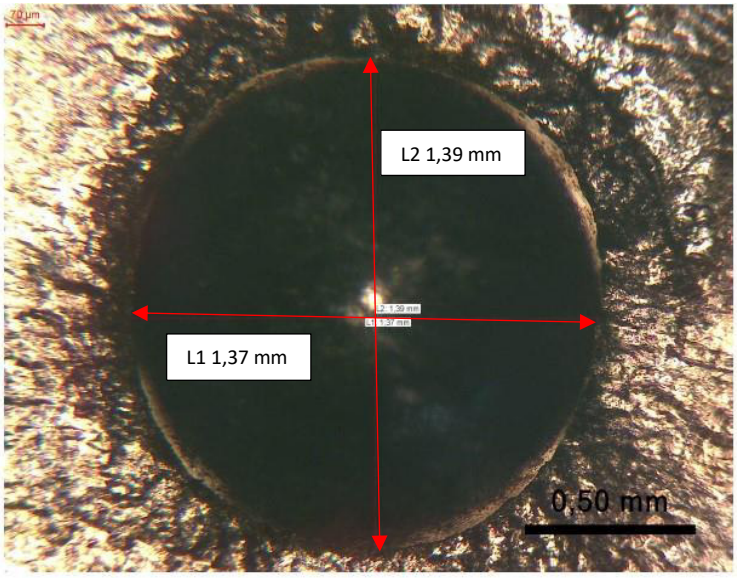


Fig1: Medições realizadas na imagem.

Linha	
L1	Comprimento: 1,37 mm
L2	Comprimento: 1,39 mm

Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022)

Figura 36 – Dureza Brinell com 01 solda ER 5183 com 5052F ZTA. Dureza Brinell = 117 HB

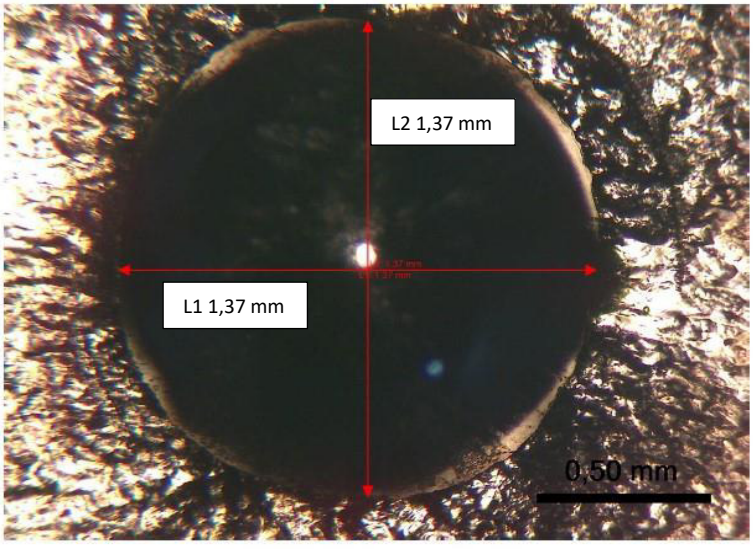


Fig1: Medições realizadas na imagem.

Linha	
L1	Comprimento: 1,37 mm
L2	Comprimento: 1,37 mm

Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022)

Figura 37 – Dureza Brinell com 01 solda 5086 H116 MB. Dureza Brinell = 164 HB

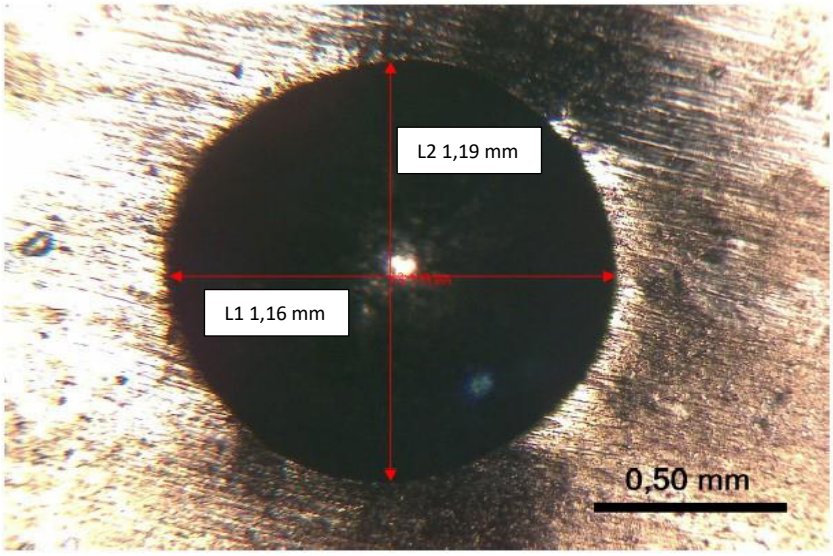


Fig1: Medições realizadas na imagem.

Linha	
L1	Comprimento: 1,16 mm
L2	Comprimento: 1,19 mm

Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022)

Figura 38 – Dureza Brinell com 01 solda ER 5183 com 5086 H116 ZTA. Dureza Brinell = 147 HB

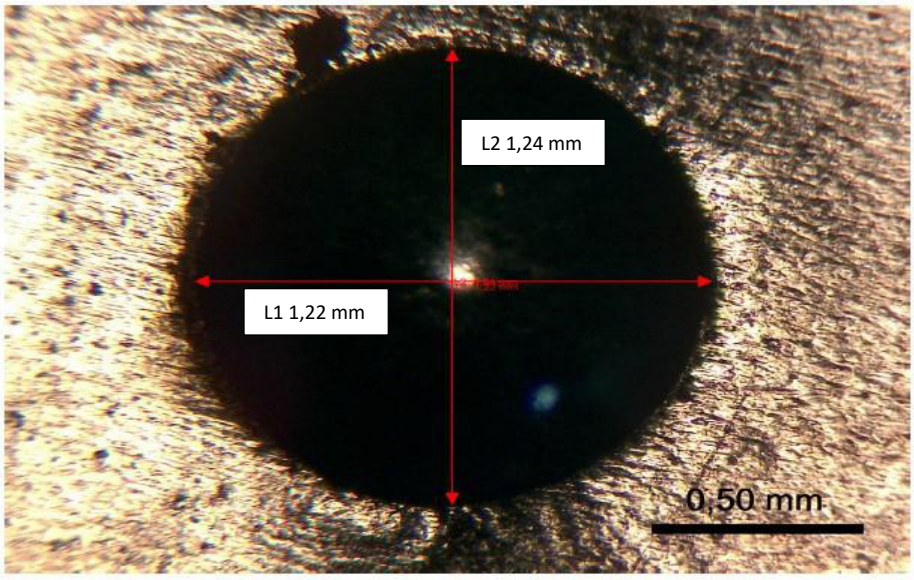


Fig1: Medições realizadas na imagem.

Linha	
L1	Comprimento: 1,22 mm
L2	Comprimento: 1,24 mm

Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022)

Figura 39 – Dureza Brinell com 01 solda ER 5183 ZF. Dureza Brinell = 124 HB

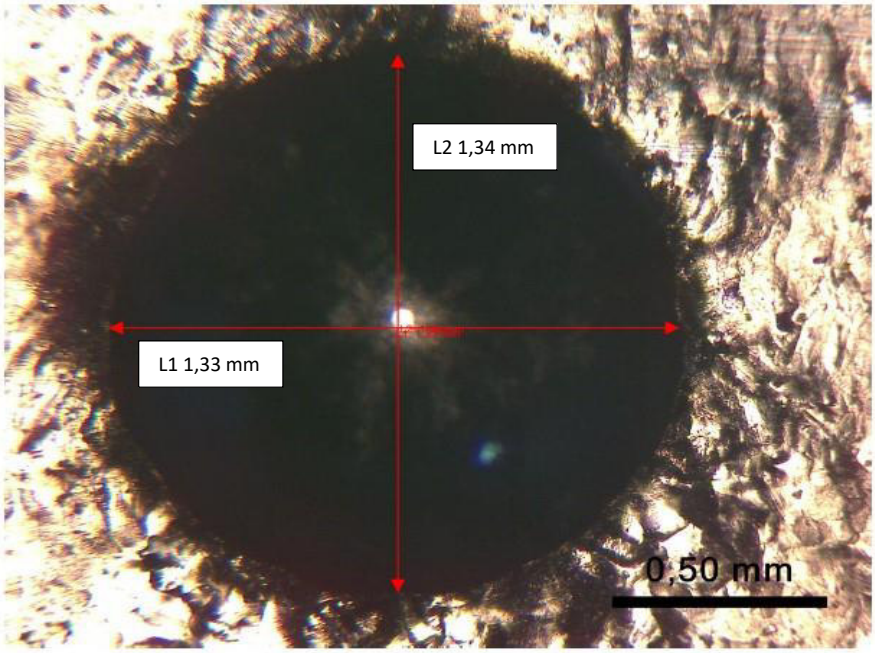


Fig1: Medições realizadas na imagem.

Linha	
L1	Comprimento: 1,33 mm
L2	Comprimento: 1,34 mm

Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022)

Nas **figuras de 35 a 39**, com uma solda e o consumível 5183, os valores de dureza auferidos para o metal base 5052F foi de 115HB e para o MB 5086 de 164HB, ou seja, além do surgimento dos poros nas ZTA´s, a dureza apresentada na ZTA 5052F ficou com 117HB e ZTA 5086, com 147HB; obteve-se valores diferentes em seus metais de base e, nesta última, houve o surgimento de trincas na sua transição. A ZF ER 5183 apresentou dureza de 124HB superior ao MB 5052F e inferior ao MB 5086.

Figura 40 – Dureza Brinell com 01 solda ER 5356 com 5052F ZTA. Dureza Brinell = 116 HB

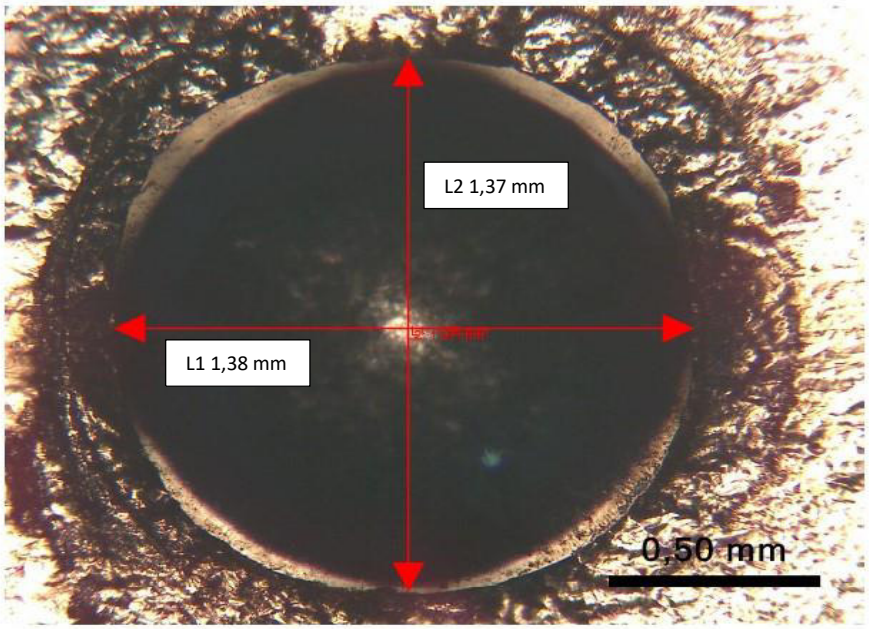


Fig1: Medições realizadas na imagem.

Linha	
L1	Comprimento: 1,38 mm
L2	Comprimento: 1,37 mm

Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022)

Figura 41 – Dureza Brinell com 01 solda 5052F MB. Dureza Brinell = 117 HBF

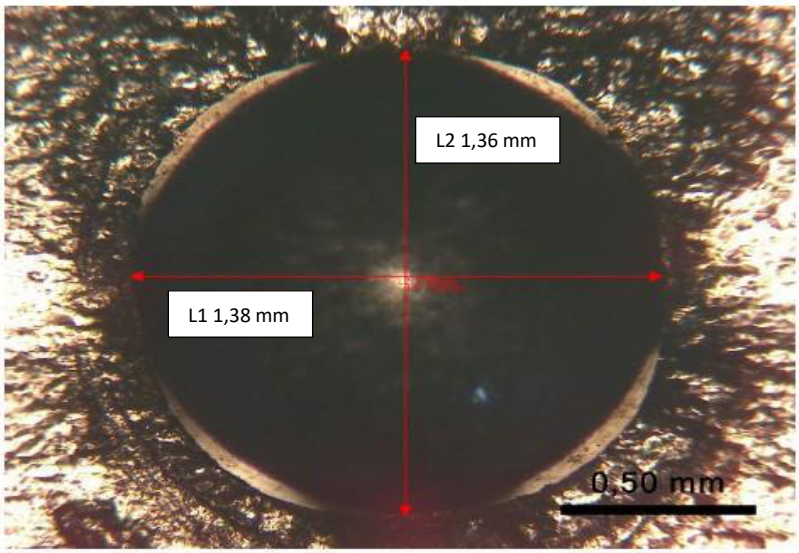


Fig1: Medições realizadas na imagem.

Linha	
L1	Comprimento: 1,38 mm
L2	Comprimento: 1,36 mm

Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022)

Figura 42 – Dureza Brinell com 01 solda ER 5356 com 5086 H116 ZTA. Dureza Brinell = 115 HB

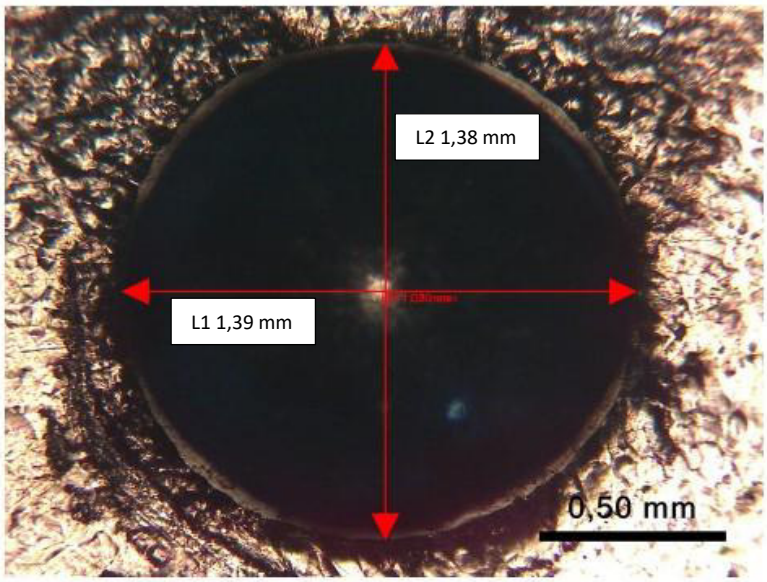


Fig1: Medições realizadas na imagem.

Linha	
L1	Comprimento: 1,39 mm
L2	Comprimento: 1,38 mm

Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022)

Figura 43 – Dureza Brinell com 01 solda 5086 H116 MB. Dureza Brinell = 113 HB

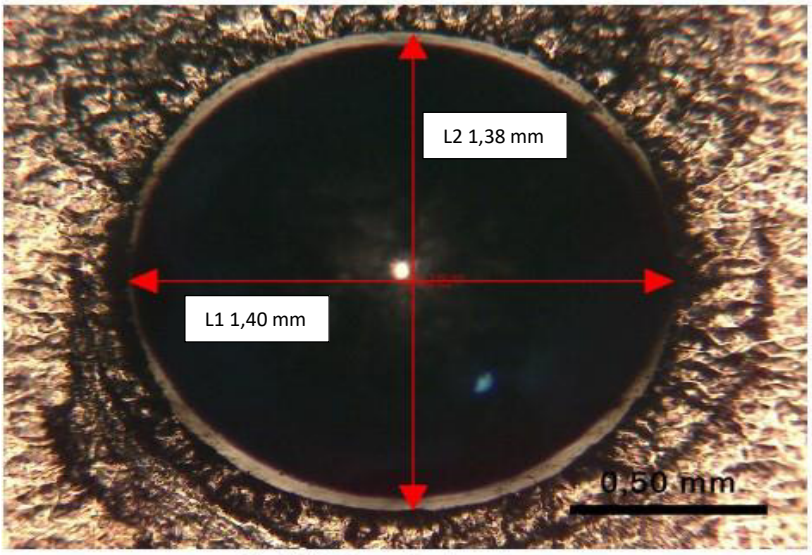


Fig1: Medições realizadas na imagem.

Linha	
L1	Comprimento: 1,40 mm
L2	Comprimento: 1,38 mm

Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022)

Figura 44 – Dureza Brinell com 01 solda ER 5356 ZF. Dureza Brinell = 115 HB

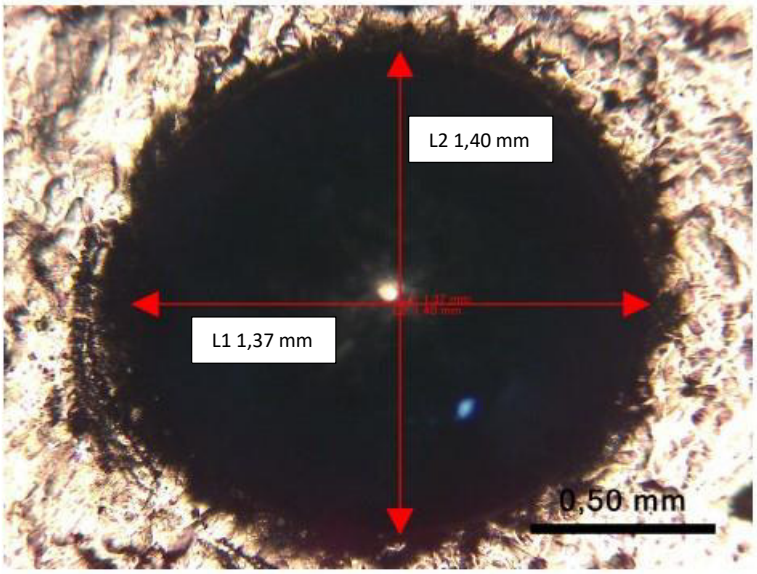


Fig1: Medições realizadas na imagem.

Linha	
L1	Comprimento: 1,37 mm
L2	Comprimento: 1,40 mm

Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022)

Nas **figuras de 40 a 44**, com uma solda e a troca do consumível pelo ER 5356, as imagens demonstraram visualmente uma transição melhor entre as ZTA´s, porém com presença de poros também. Com valores auferidos no metal base 5052F de 117HB e o MB 5086 com 113HB, a dureza apresentada na ZTA 5052F ficou com 116HB e ZTA 5086 com 115HB. Esta última obtendo valor menor ao MB 5052F e um aumento na ZTA 5086 em relação ao seu metal base. A ZF ER 5356 apresentou dureza de 115HB, valor inferior ao metal base 5052F e superior ao metal base 5086.

Figura 45 – Dureza Brinell com 02 soldas ER 5183 ZF. Dureza Brinell = 124 HB

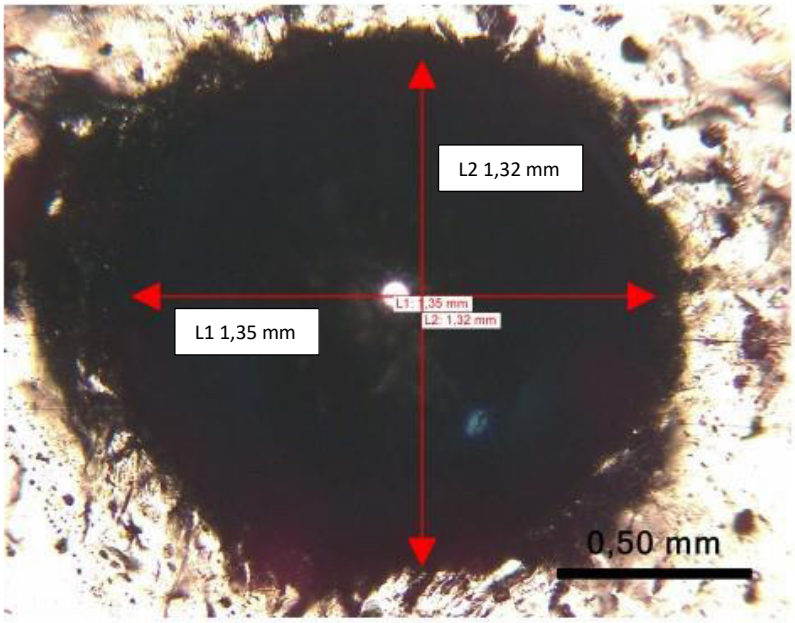


Fig1: Medições realizadas na imagem.

Linha	
L1	Comprimento: 1,35 mm
L2	Comprimento: 1,32 mm

Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022)

Figura 46 – Dureza Brinell com 02 soldas 5086 H116 MB. Dureza Brinell = 155 HB

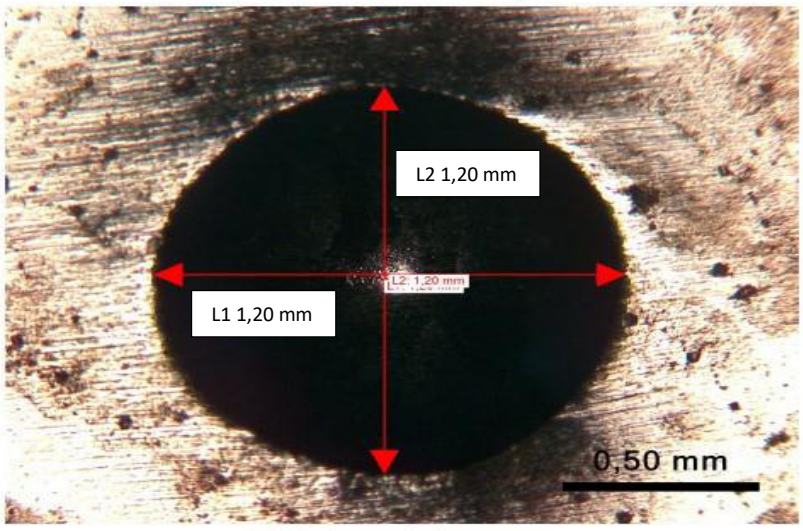


Fig1: Medições realizadas na imagem.

Linha	
L1	Comprimento: 1,20 mm
L2	Comprimento: 1,20 mm

Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022)

Figura 47 – Dureza Brinell com 02 solda 5052F MB. Dureza Brinell = 117 HB

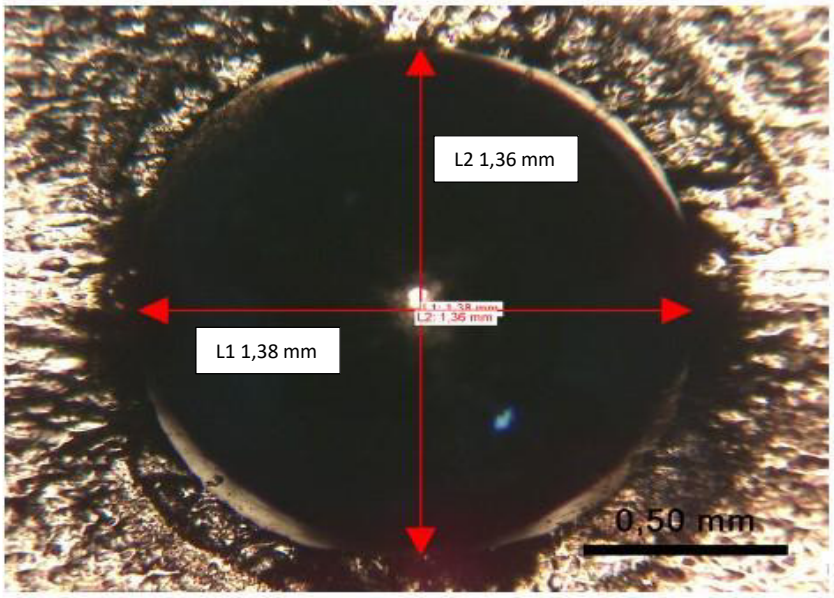


Fig1: Medições realizadas na imagem.

Linha	
L1	Comprimento: 1,38 mm
L2	Comprimento: 1,36 mm

Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022)

Figura 48 – Dureza Brinell com 02 soldas ER 5183 com 5052F ZTA. Dureza Brinell = 118 HB

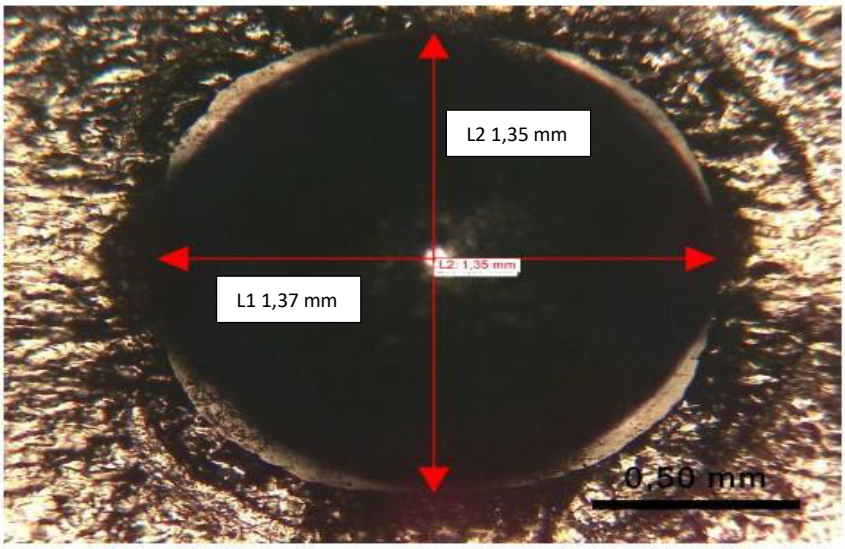


Fig1: Medições realizadas na imagem.

Linha	
L1	Comprimento: 1,37 mm
L2	Comprimento: 1,35 mm

Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022)

Figura 49 – Dureza Brinell com 02 soldas ER 5183 com 5086 H116 ZTA. Dureza Brinell = 150 HB

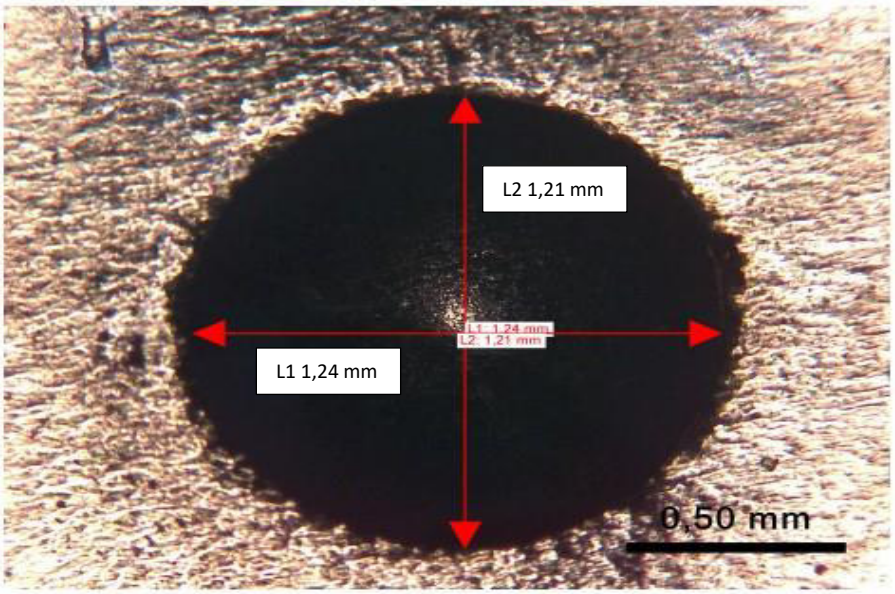


Fig1: Medições realizadas na imagem.

Linha	
L1	Comprimento: 1,24 mm
L2	Comprimento: 1,21 mm

Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022)

As figuras 45 a 49, com duas soldas e consumível ER 5183, apresentaram os mesmos resultados de poros e trincas das **figuras 40 a 44**, porém valores de durezas elevados na: ER 5183 ZF, com 124HB; 5086H116 MB, com 155HB; ZTA 5086, com 150; e ZTA 5052F, com 118HB, inferior ao seu MB, com 117HB; e ZTA 5086, com 150HB, também inferior ao seu MB, com 155HB.

Figura 50 – Dureza Brinell com 02 soldas 5052F MB. Dureza Brinell = 117 HB

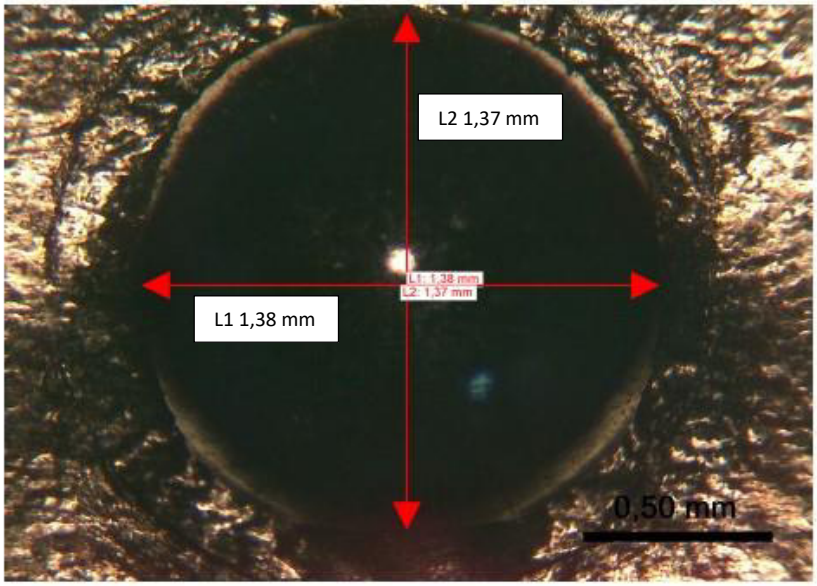


Fig1: Medições realizadas na imagem.

Linha	
L1	Comprimento: 1,38 mm
L2	Comprimento: 1,37 mm

Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022)

Figura 51 – Dureza Brinell com 02 soldas ER 5356 com 5052F ZTA. Dureza Brinell = 115 HB

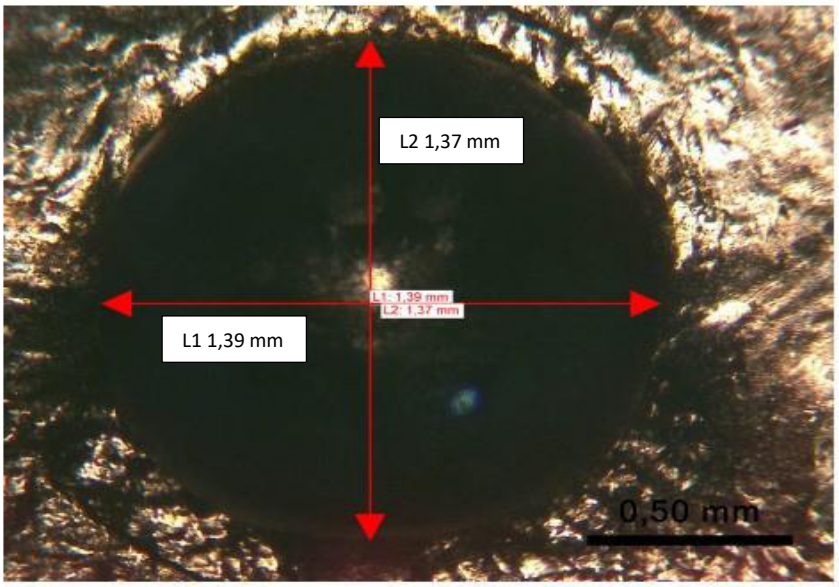


Fig1: Medições realizadas na imagem.

Linha	
L1	Comprimento: 1,39 mm
L2	Comprimento: 1,37 mm

Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022)

Figura 52 – Dureza Brinell com 02 soldas ER 5356 ZF. Dureza Brinell = 113 HB

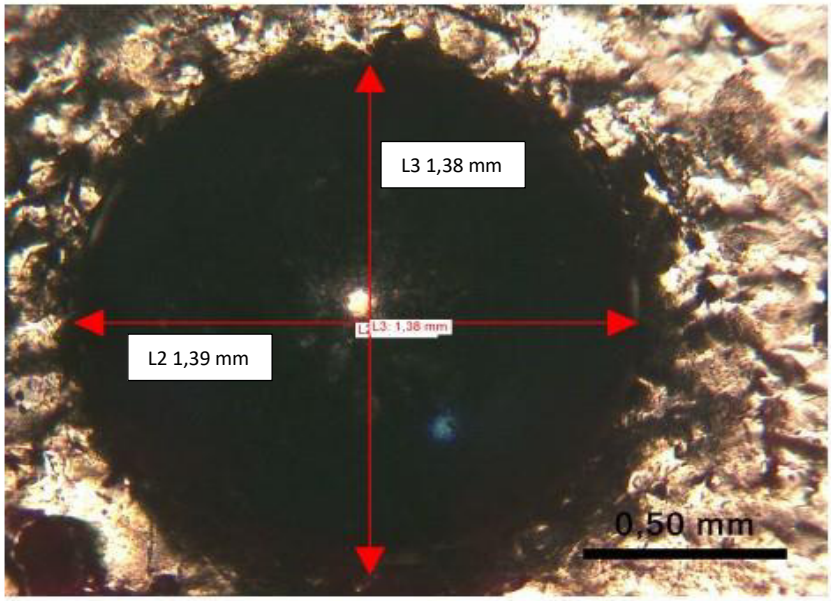


Fig1: Medições realizadas na imagem.

Linha	
L2	Comprimento: 1,39 mm
L3	Comprimento: 1,38 mm

Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022)

Figura 53 – Dureza Brinell com 02 soldas 5086 H116 MB. Dureza Brinell = 111 HB

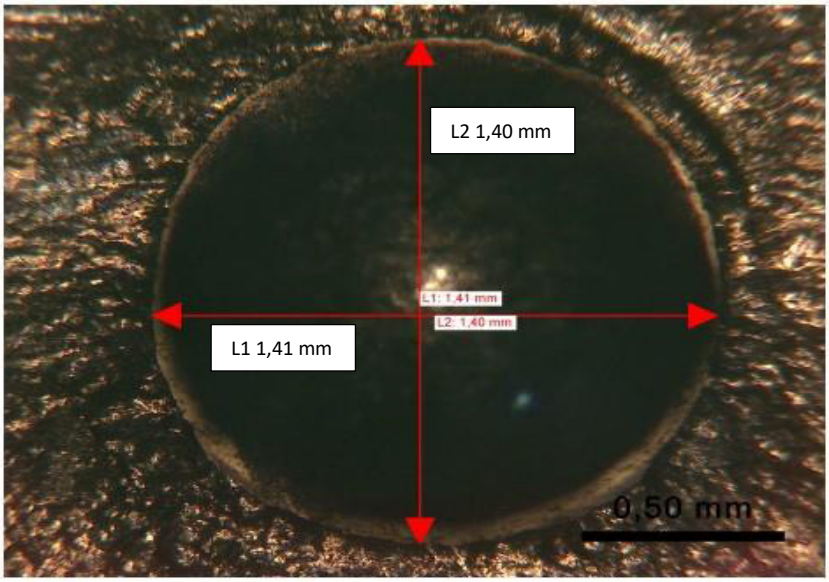


Fig1: Medições realizadas na imagem.

Linha	
L1	Comprimento: 1,41 mm
L2	Comprimento: 1,40 mm

Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022)

Figura 54 – Dureza Brinell com duas soldas ER 5356 com 5086 H116 ZTA. Dureza Brinell = 111 HB

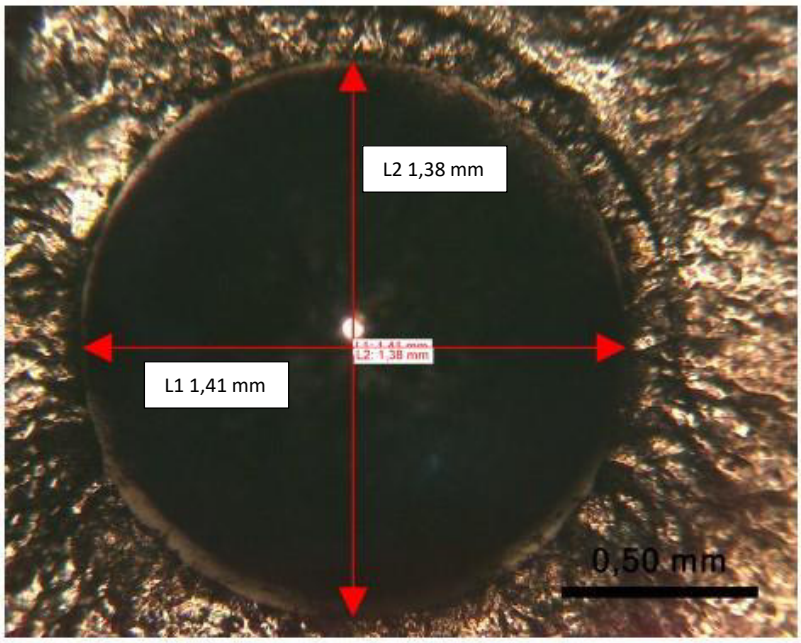


Fig1: Medições realizadas na imagem.

Linha	
L1	Comprimento: 1,41 mm
L2	Comprimento: 1,38 mm

Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022)

Já nas **figuras 50 a 54**, essas também com duas soldas e consumível ER 5356, as imagens exibiram os mesmos resultados de poros que as **figuras 45 a 49** e um número bastante reduzido de trincas, sendo os valores de dureza: ER 5356 ZF, com 113HB; 5086H116 MB, com 111HB; ER 5356 ZTA 5052F, com 115HB; ER 5356 ZTA 5086, com 111HB e 5052F MB, com 117HB. Sendo assim a dureza do MB e da ZTA do 5086 permaneceram iguais e a do MB 5052F foi superior a sua ZTA. E a ZF apresentou um valor de dureza intermediário, de 113HB.

Tabela 3 – Tabela comparativa de dureza HB, KSI e LRT

Ligas	Mpa	KSI	1 solda	2 soldas	MB	ZTA	ZF
5052F	220	64	X		115 HB	5183 / 117 HB 5356 / 116 HB	
5086 H116	290	84	X		164 HB	5183 / 147 HB 5356 / 115 HB	
5183	300	68	X				124 HB
5356	240	64	X				115 HB
5052F				X	117 HB	5183 / 118 HB 5356 / 115 HB	
5086 H116				X	155 HB	5183 / 150 HB 5356 / 111 HB	
5183				X			124 HB
5356				X			115 HB

Obs: Valores interpolados com associação das cargas de 187,5 kgf com esfera de 2,5 mm, carga de 3000 kgf e esfera de 10 mm e Referencia LRT dos metais ASTM 140.

Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2022)

4.1.4 Discussões

As soldas com o metal de adição ER 5356 que, embora não tenha indicação para união dos alumínios empregados na reestruturação da embarcação objeto de estudo desta pesquisa, mas, é compatível, isoladamente, com ambas as chapas, apresentaram uma melhora no processo de fusão, mas ainda com muita porosidade e sujeições de trincas conforme demonstrados nos ensaios de macrografia, micrografia e dureza Brinell em comparação com o ER 5183, que não é recomendado a nenhuma das chapas de alumínio deste estudo segundo a **figura 20**. Além disso, por ser uma região com clima muito úmido, a falta de controle do ambiente, provavelmente, permitiu a inclusão de hidrogênio e umidade no ambiente de soldagem, provocando as porosidades.

Como menciona Vicentini (2013) atenção dever ser dada às uniões dissimilares, pois, no momento da diluição mútua do material, pode ocorrer falta de magnésio e, assim, culminar em problemas de trincas. Essas falhas podem ser reduzidas empregando no processo de soldagem metais de adição mais resistentes como ligas de Al-Si e de Al-Mg. Além disso, a espessura da linha de soldagem deve

ser capaz de resistir às tensões advindas das contrações típicas do processo. Da série 5xxx, os metais de adição AWS ER-5356 e AWS ER-5556 são bastantes eficazes para a redução da possibilidade de trincas, para uniões com movimentos restritos e para aquelas em que haverá bastante diluição do metal de base (GONZALEZ, 1991).

Budkin (2011) apud Mvola *et al* (2014) relatam que ao soldar materiais dissimilares, por fusão, deve-se ter um controle rigoroso sobre a interação entre o metal sólido e o líquido durante as condições de soldagem. Se o processo de soldagem não for bem controlado, defeitos como excesso de diluição, trincas e tensões residuais podem comprometer o metal de solda, podendo ocasionar uma diminuição considerável nas propriedades desse local.

Em geral, as junções de materiais são realizadas com materiais similares, ou seja, aqueles que possuem as mesmas propriedades químicas ou físicas (ALVES, 2016) como Costa (2015) soldando a liga AA 5052 com os arames ER 5356 e ER 4043 constatou que o primeiro apresentou melhor desempenho nos processos MIG-P CC+ e TIG-A e, por fim, não foi verificada a presença de trincas de solidificação em nenhuma das soldas realizadas nos estudos; Marco (2014) com a liga 5083, em estado recozido, considerou que o metal de adição ER 5183 fragilizou as soldas, reprovando todos os corpos de provas no ensaio de dobramento, em função da baixa tensão de escoamento e alongamento. Ele sugere que se escolha um metal de adição com maior resistência mecânica porque esse se demonstrou inferior ao metal de base.

Os resultados desses autores corroboram que a seleção adequada é uma variável importante para o produto final de todo o processo de soldagem, pois, os metais de adição se qualificam às peculiaridades de cada liga de alumínio e os distintos elementos presentes neles têm a função de melhorar as propriedades da solda (SANTOS, 2016). Além disso, o processo de soldagem, os fundamentos de junções dissimilares, as considerações de serviço formam as principais análises a serem consideradas quando se objetiva unir materiais diferentes (MVOLA *et al*, 2014). E, para esse tipo de junção, a soldagem MIG não configura nas primeiras posições - **figura 10**.

Com o exposto acima, os aspectos apresentados nos ensaios indicam que, se houvesse, no momento da soldagem de reestruturação do motor da embarcação, um controle do ambiente, chapas similares com compatibilidade para o consumível ER 5356 no processo MIG CC+, teríamos um resultado dentro dos parâmetros

metalúrgicos e, portanto, confiável. Afinal, cada material possui características peculiares que necessitam de parâmetros corretos a serem seguidos para que haja um produto final de boa qualidade no que diz respeito à soldagem conforme Savi (2014). Com o alumínio não seria diferente. Embora para soldar alumínio os procedimentos possam parecer simples devido as suas propriedades físicas e químicas **(figura 1)**, que permitem o emprego desse metal em vários procedimentos de soldagem, a escolha do material de preenchimento, também, é um dos pontos principais para o manuseio eficiente dele. E, conforme a **figura 20** - seleção de materiais de adição para alumínio, o metal de adição utilizado no processo de soldagem foi inapropriado para soldar as ligas na reestruturação do motor.

5. CONCLUSÕES

Conforme os avanços nos estudos e pesquisas e, após, os ensaios de laboratório, concluiu-se que:

Averiguando a segurança da solda MIG CC+ realizada na chapa de alumínio 5086-H116 na reestruturação do motor a fim de resguardar a vida no quesito segurança humana e contribuindo para que a soldagem seja mais segura para resguardar vidas humanas, as chapas 5052 F e 5086 H116 não possuem metal de adição compatível para esse processo de soldagem levemente dissimilar e a porosidade, provavelmente, causada pela penetração de hidrogênio na umidade do ambiente de soldagem ocasionaram as trincas, que alinhadas em túneis ou “”buracos de minhoca”, pode ocasionar ruptura na parte reestruturada da embarcação.

Em relação aos investimentos em materiais de soldagem, financeiramente, acarretará em desperdício de material visto que as trincas precursoras deste estudo foram resultadas pela inadequação de todo o processo de soldagem: escolha de materiais, processo de soldagem e cuidado no ambiente de solda. Dessa forma, as análises desta pesquisa demonstram que evitar a combinação dos materiais e métodos ora aplicados colaboram para a busca de processos mais adequados de soldagens.

Nas análises dos arames de adição ER5183 e ER5356 no processo de soldagem MIG CC+ na junção das chapas de liga de Al-Mg 5052-F e 5086-H116 na restruturação do motor da embarcação, o metal de adição ER 5356, embora tenha melhorado o processo por ter apresentado uma zona fundida com menos porosidade, não permitiu uma solda confiável e segura, pois, conforme a norma ISO 6520-1:1998, todos os corpos de provas foram reprovados. Isso demonstra que a soldagem com o arame ER 5183 foi inadequado conforme a – **figura 20** - seleção de metal de adição.

6. TRABALHOS FUTUROS

- Como toda a verificação foi realizada sob o processo MIG CC+, seria produtivo experimentos com a soldagem MIG-CA e TIG-CA para um estudo comparativo sobre o comportamento dos materiais utilizados nesses estudos a fim de averiguar se, com esse tipo de soldagem, as chapas e arames apontam para uma solda mais segura e eficaz;
- Por se tratar de ligas dissimilares, soldar com processo por fricção (*FWS*);
- Realizar a soldagem comparativa com os processos MIG-CC+ e MIG-CA com ligas similares (5086-5086), com metal de adição ER 5356 conforme a **figura 20**.

7. REFERÊNCIAS

A VOZ DA INDÚSTRIA. **O futuro da soldagem**: soldas inteligentes e robotizadas ganham espaço. Maio, 2019. Disponível em <https://avozdaindustria.com.br/sem-categoria/o-futuro-da-soldagem-soldas-inteligentes-e-robotizadas-ganham-espaco>. Acesso em 20 abr. 2020

ALCOTEC. **Trouble Shooting for Aluminum Welding.** 2015. Disponível em <http://www.alcotec.com/us/en/education/knowledge/techknowledge/trouble-shooting-for-aluminum-welding.cfm>. Acesso em 13 jun. 2020

ALMEIDA, Diego Tolotti. **Análise microestrutural e avaliação mecânica de juntas soldadas por fricção e mistura mecânica (*FSW*) da liga de alumínio 5182-O**. 2015. 120 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre, 2015.

ALVES, Eder Paduan. **Caracterização mecânica e estudo do perfil térmico na soldagem por fricção rotativa de materiais dissimilares.** 2016. 182 p. Tese (Doutorado). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores. São José dos Campos, SP, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Alumínio Brasileiro**: soluções para uma vida sustentável. São Paulo, 2017. Disponível em <http://abal.org.br/downloads/publicacoes/aluminio-brasileiro-solucoes-para-uma-vida-sustentavel-port.pdf>. Acesso em 03 abr. 2020

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Alumínio**: processos de produção – Soldagem. 2019. Disponível em <http://abal.org.br/aluminio/processos-de-producao/soldagem/>. Acesso em 08 abr. 2020

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Perfil da Indústria Brasileira do Alumínio.** 2019. Disponível em <http://abal.org.br/estatisticas/nacionais/perfil-da-industria/>. Acesso em 07 abr. 2020

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNNIO. **Bauxita no Brasil**: mineração responsável e competitividade. São Paulo, 2017. Disponível em <http://www.abal.org.br/downloads/ABAL Relatorio Bauxita 2017 1.pdf>. Acesso em 03 abr. 2020

ASSOCIAÇÃO BRASILERIA DO ALUMÍNIO. **História da Indústria no Mundo**. 2019. Disponível em <http://abal.org.br/aluminio/historia-da-industria-do-aluminio/historia-da-industria-no-mundo/>. Acesso em 03 abr. 2020

AZO MATERIALS. **Aluminium - Specifications, Properties, Classifications and Classes.** Maio, 2005. Disponível em <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2863>. Acesso em 4 jun. 2020

BARONY, Natália Barros. **Avaliação Estrutural e Mecânica de Chapas das Ligas de Alumínio AA 5052 E AA 5050C.** 2019. 125 f. Dissertação (Mestrado) Instituto Militar de Engenharia, Departamento de Ciência e Tecnologia. Rio de Janeiro, 2019.

CAGLIONI, Christian. **Análise mecânica das ligas de alumínio 5383 H34, 5754 H34 e 6005 T6 soldadas por processo MIG - EN 131**. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Maringá, PR, 2017.

CECÍLIO, Vinícius Augusto Mantelo. **Testes de Soldadura MIG Standard e CMT Pulsado Robotizada em Liga de Alumínio 6082-T6 para Otimização de Penetração, Largura de Cordão e Reforço.** Dissertação (Mestrado). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Escola Superior de Tecnologia e Gestão. Instituto Politécnico de Bragança, 2017.

COELHO, Arthur César Miná Albuquerque, **Efeito do tratamento térmico na resistência à corrosão da liga de alumínio AA5086 H116**. Monografia (Engenharia Metalúrgica). 2013. 51 f. Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Fortaleza, Ceará, 2013.

COLAÇO, Déborah Brito. **Caracterização e avaliação das tensões residuais em juntas da liga de alumínio AA 5083-0 soldadas pelo processo FSW**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Ciências e Tecnologia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Campina Grande, 2019. 95 f.

CORREIA, Anderson Luís Garcia. **Soldagem MIG-MAG**: processo, consumíveis, técnicas e parâmetros, defeitos e causas. Instituto Federal de Santa Catarina, 2017.

COSTA, Lucas Queiroz Melo da. **Estudo e desenvolvimento de um processo de soldagem de ligas de alumínio AA2017 e AA5083 por fricção e mistura (FSW)**. TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Graduação em Engenharia Mecânica, 2018.

COSTA, Pedro Henrique Sales da. **Estudos dos processos TIG Alimentado e MIG-P CC+ aplicados ao passe de raiz na liga AA052.** 2015. 86 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Natal, RN, 2015.

DEEKHUNTHOD, Rujira. **Weld Quality in Aluminium Alloys.** Uppsala Universitet, 2014. Disponível em <https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:724173/FULLTEXT01.pdf>. Acesso em 2 de maio de 2020.

DORES, Priscila Branquinho das; LAGE, Elisa Salomão e PROCESSI, Lucas Duarte. **A retomada da indústria naval brasileira**. Biblioteca Digital. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2012. Disponível em <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/962/1/A%20retomada%20da%20ind%C3%BAstria%20naval%20brasileira_final_P.pdf>. Acesso em 18 mar. 2020

ESAB. **Filler Alloy Selection For Aluminum Welding.** Disponível em https://www.esabna.com/us/en/education/blog/filler-alloy-selection-for-aluminum-welding.cfm>. Acesso em 4 jun. 2020

ESAB. **Soldagem de Ligas de Alumínio com Qualidade.** Disponível em <https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/soldagem_das_ligas_aluminio_com_qualidade.cfm>. Acesso em jun. 2020

FAGUNDES, Ramon Fernandes. **Avaliação das técnicas de soldagem MIG-P CA e MIG-P CC+ aplicadas ao passe de enchimento em liga de alumínio AA5083.** Dissertação (Mestrado). 2014. 85 f. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais. Natal, RN, 2014.

FELIZARDO, Ivanilza. **Apostila** - tecnologia da soldagem. Departamento de Engenharia Mecânica. Centro Federal de Educação Tecnológica. Minas Gerais, 2016. Disponível em <http://www.dem.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/39/2017/09/Apostila-Tecnologia-da-Soldagem.pdf>. Acesso em 27 abr. 2020

FERNANDES, Camila Albuquerque. **Estudo do desempenho mecânico e microestrutural de uniões da liga de alumínio AA6061- T6, por solda a ponto por fricção (FSpW).** 2016. 101 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2016.

FERREIRA, Ana Carolina Maia. **Estudo de soldas obtidas pelo processo GMAW empregando o modo de transferência metálica por spray com misturas de proteção Ar+12%CO_2 e Ar+12%CO_2+0,4%C_3H_6.** Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados. Campos dos Goytacazes, RJ, 2018.

FIGUEIREDO, Kléber Mendes de. **Mapeamento dos modos de transferência metálica na soldagem Mig de alumínio**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2000.

GOMES, Davi Pegado. **Estudo de um procedimento de soldagem para liga de alumínio.** 2017. 69 f. Projeto de Graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Naval e Oceânica. Rio de Janeiro, RJ, 2017.

GONZALEZ, Arnaldo Rubén. **Propriedades mecânico/metalúrgicas de juntas de alumínio 5083-O soldadas pelo processo MIG**. 1991. 143 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais. Porto Alegre, RS, 1991.

KRELLING, Anael. **Laminação**. Instituto Federal de Santa Catarina, 20--.

LAGARES JR, Moisés Luiz. **Modos de transferência metálica MIG/MAG, defeitos em soldagem e ensaios não-destrutivos**. Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia.

LIMA, João Pedro do Rego. **Implementação de fios fluxados metal-cored em soldadura mecanizada.** Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.

LOSEKANN, Cláudio Roberto. **Tecnologia de Materiais:** materiais não ferrosos. Centro Federal de Educação Tecnológica. Florianópolis, SC, 2003.

MALTA, Maria Isabel Collasius. **Obtenção e caracterização de superfícies super-hidrofóbicas anticorrosivas em liga de alumínio 5052 a partir de diferentes filmes HDL e agentes redutores de energia de superfície**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2019.

MARCO, Carlos Gustavo de. **Caracterização de propriedades de uma unta soldada em ligas de alumínio AA 55083.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia e Arquitetura. Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo, 2014.

MARTINS, Fábio. **Minimização de trincas de solidificação em liga de alumínio soldada (GTAW) com corrente alternada pulsada**. 2000. 144 f. Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia de Fabricação. Campinas, SP, 2000.

MARTINS, Rúbia Zaidan. **Aplicabilidade de arame ultrafino na soldagem MIG/MAG de chapas finas.** 2018. 87 f. Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Uberlândia, MG, 2018.

MÁRTIRES CÔRREA, Raimundo Augusto. **Balanço Mineral Brasileiro 2001 – Alumínio**. Agência Nacional de Mineração. Disponível em <http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes-economia-mineral/arquivos/balanco-mineral-brasileiro-2001-aluminio.pdf/view>. Acesso em 03 de abr. 2020

MATA, S. I. D. **Análise do Processo MIG Pulsado-CA Aplicado à Soldagem do Alumínio 5052-H34.** 2017. 121 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Itajubá, MG, 2017.

MELADO, Marcos Caetano. **Estudos das tensões residuais e caracterização das propriedades mecânicas e microestruturais de juntas soldadas de liga de alumínio AA5086.** 2014. 86f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal Fluminense. Programa Francisco Eduardo Mourão Saboya de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFF. Niterói, RJ, 2014.

METALSUPERMARKETS. **What Aluminum Alloys Can Be Anodized?** Março, 2019. Disponível em https://www.metalsupermarkets.com/what-aluminum-alloys-can-be-anodized/. Acesso em 4 jun. 2020.

METALTHAGA. **Chapas de alumínio naval e seu uso na história.** Julho, 2018. Disponível em <https://metalthaga.com.br/artigos/chapas-de-aluminio-naval-e-seu-uso-na-historia/>. Acesso em 02 de maio de 2020

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Governo lança programa para monitorar a costa.** Março, 2018. Disponível em <https://www.mma.gov.br/informma/item/14684-noticia-acom-2018-03-2910.html>. Acesso em 02 abr. 2020

MODENESI P. J. **Soldabilidade de algumas ligas metálicas**. Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Janeiro, 2011.

MODENESI P. J; MARQUES, P. V; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem** – fundamentos e tecnologia. 3ª edição atualizada. Editora UFMG. Belo Horizonte, 2009.

MODENESI, Paulo J. **Introdução à Física do Arco Elétrico Soldagem I.** Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Belo Horizonte, 2012. Disponível em <https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/fundamentosfisicos1.pdf>. Acesso em 20 abr. 2020

MOURA, Márcio Luiz. **Análise dos efeitos dos semiângulos de fieira de trefilação utilizados na fabricação de arames sólidos na estabilidade do processo de soldagem GMAW.** 2014. 104 f. Dissertação (Mestrado). Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. Belo Horizonte, MG, 2014.

MVOLA, B, KAH, P & MARTIKAINEN, J. **Welding of dissimilar non-ferrous metals by GMAW processes.** 2014. Disponível em <https://doi.org/10.1186/s40712-014-0021-8>. Acesso em 1 jul. 2020.

MVOLA, B, KAH, P & MARTIKAINEN, J. **Welding of dissimilar non-ferrous metals by GMAW processes.** Disponível em <https://doi.org/10.1186/s40712-014-0021-8>. Acesso em 1 jul. 2020

OXIGEN. **Tabela para seleção do material de adição**. Disponível em < http://www.oxigen.com.br/produtos/aluminio/tabela_metal_base.htm>. Acesso em 20 ago. 2022

PEREIRA, Jorge Manuel Martins Vieira. **Estudo das ligas de alumínio aplicadas em construção naval nomeadamente na resistência à corrosão em estruturas navais soldadas.** 2010. 108 f. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Departamento de Ciência dos Materiais. Lisboa, Portugal, 2010.

PRABHU, R. S.; SHETTIGAR, A.; RAO, S.; HERBERT, M. **Influence of Welding Process Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Aluminium Matrix Composite**. Materials Science Forum, v. 880, p. 50-53. 2017.

REVISTA ALUMÍNIO. **Especial Mineração de Bauxita**: como é feita a extração e qual a importância da atividade para o Brasil. 2019. Disponível em<https://revistaaluminio.com.br/especial-mineracao-de-bauxita-como-e-feita-a-extracao-e-qual-a-importancia-da-atividade-para-o-brasil/>. Acesso em 03 abr.2020

SANTOS, Diego Gomes. **Caracterização mecânica e metalúrgica de juntas soldadas de alumínio naval da série 5052- F.** 2016. 97 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belém, 2016.

SANTOS, Flávio José dos. **Soldagem de alumínio: Influência dos parâmetros de pulso na distorção angular.** Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2009.

SANTOS, Marcio Wagner Batista dos. **Aspectos metalúrgicos de revestimentos em dutos depositados com a superliga de níquel Ernicrmo-4 pelos processos Mig convencional e Mig com adição de arame frio.** 2012. 97 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Belém, PA, 2012.

SAVI, Bruna Martinello**. Desenvolvimento tecnológico para soldagem MIG de ligas alumínio 5083 H116.** 2014. 101 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico. Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Florianópolis, SC, 2014.

SCABAROTTO, Mônica. **Estudo da corrosão nas ligas 3105 e 5052.** 2018. 113 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre, RS, 2018.

SOUZA, Daniel. **Avaliação do comportamento em corrosão e tribocorrosão de revestimentos de Inconel 625 depositados pelo processo de soldagem MIG/MAG.** Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Centro de Desenvolvimento Tecnológico. Universidade Federal de Pelotas, 2019.

SOUZA, Gismar Schilive. **Influência da geometria da ferramenta na soldagem da liga de alumínio 5052 pelo processo friction stir welding**. 2010. 145 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. Curitiba, PR, 2010.

SOUZA, José Raelson Pereira de. **Efeito da sinterização e da moagem de alta energia na microestrutura e nas propriedades mecânicas em ligas de alumínio recicladas a partir de latas de bebidas.** 2017. 70 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Natal, RN, 2017.

STUMP, Thierry; VATAVUK, Jan. **A construção naval em liga de alumínio.** Revista Mackenzie de Engenharia e Computação, 2010.

SUMIG. **Saiba quais cuidados você deve ter na soldagem do alumínio**. Abril, 2019. Disponível em < https://www.sumig.com/pt/blog/post/saiba-quais-cuidados-voce-deve-ter-na-soldagem-do-aluminio>. Acesso em 29 abr. 2020.

TEIXEIRA, Gustavo Simões. **Análise da influência dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão de solda depositado pelo processo de soldagem TIG – MAG em tandem**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Porto Alegre, 2011.

THE ALUMINUM ASSOCIATION. **Aluminum Alloys 101.** Disponível em <https://www.aluminum.org/resources/industry-standards/aluminum-alloys-101>. Acesso em 6 de maio de 2020

THE FABRICATOR. **Understanding aluminum welding compared to steel welding.** Julho, 2018. Disponível em <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/aluminumwelding/understanding-aluminum-welding-compared-to-steel-welding>. Acesso em 29 abr. 2020

THE WELDER. **Choosing the aluminum filler alloy:** factors to consider to achieve quality aluminum welds. Setembro, 2014. Disponível em <https://www.thefabricator.com/thewelder/article/consumables/choosing-the-right-aluminum-filler-alloy>. Acesso em 30 abr.2020

VICENTINI, Rogério. **Desenvolvimento de suporte cerâmico para aplicação em soldas unilaterais em ligas de alumínio.** Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados. Campos dos Goytacazes, 2013.