

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

GUSTAVO BIANCHI

**ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA OPERACIONAL ENTRE PROCESSO DE
SOLDAGEM MIG E A LASER: APLICAÇÃO EM QUEBRA-ONDAS DE TANQUES
DE COMBUSTÍVEL EM ALUMÍNIO**

CAXIAS DO SUL

2026

GUSTAVO BIANCHI

**ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA OPERACIONAL ENTRE PROCESSO DE
SOLDAGEM MIG E A LASER: APLICAÇÃO EM QUEBRA-ONDAS DE TANQUES
DE COMBUSTÍVEL EM ALUMÍNIO**

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado
ao curso de Engenharia Mecânica da
Universidade de Caxias do Sul, como requisito
parcial à obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador Prof. Me. Victor Hugo Velazquez
Acosta

CAXIAS DO SUL

2026

GUSTAVO BIANCHI

**ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA OPERACIONAL ENTRE PROCESSO DE
SOLDAGEM MIG E A LASER: APLICAÇÃO EM QUEBRA-ONDAS DE TANQUES
DE COMBUSTÍVEL EM ALUMÍNIO**

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador Prof. Me. Victor Hugo Velazquez Acosta

Aprovado em 06/07/2026

Banca Examinadora

Prof. Me. Victor Hugo Velazquez Acosta
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Me. Vagner Grison
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Carlos Eduardo Rheinheimer
Metalúrgica Engrenar Ltda.

Dedico este trabalho a meus pais, meu irmão e a minha noiva, pessoas que estão sempre ao meu lado me apoiando, que confiam em mim e que motivam, especialmente nessa reta final. Obrigado a todos!

AGRADECIMENTOS

A realização desse trabalho não seria possível sem a participação de muitas pessoas, dessa forma agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para esse estudo.

Quero agradecer em especial meu orientador, Prof. Me. Victor Hugo Velazquez Acosta, pois sua orientação precisa, conhecimento técnico, paciência e disponibilidade foram fundamentais para a condução deste trabalho. Obrigado por acreditar no potencial deste projeto e por me guiar com competência.

Desejo agradecer também a empresa parceira, Fabbof, por disponibilizar e permitir o uso das máquinas e materiais para a aplicação dos processos de soldagem no objeto de estudo.

E por último, agradecer as pessoas mais importantes para mim, que são meus pais, irmão e noiva, por toda a paciência, apoio, motivação e confiança.

“O sucesso é a soma de pequenos esforços repetidos dia após dia.”

Robert Collier

RESUMO

O processo atual de fixação dos quebra-ondas em tanques de combustível de alumínio é realizado por meio da soldagem MIG interna, o que gera marcas externas indesejadas decorrentes da ZTA, impactando negativamente a qualidade estética do produto final. O presente trabalho realizou uma análise técnica e econômica operacional comparativa entre os processos MIG e a soldagem a laser com e sem metal de adição, ambos aplicados de forma manual em juntas sobrepostas de chapas de alumínio na liga 5754 H22 com 2 mm de espessura. Os corpos de prova foram confeccionados e submetidos a inspeção visual dimensional da marca externa, ensaios de cisalhamento, análise macrográfica e mapeamento do perfil de dureza Vickers. Os resultados dos ensaios mecânicos indicaram que todos os nove conjuntos experimentais atenderam com margem de segurança ao esforço de projeto solicitado de 19,4 kN para o tanque real. Os conjuntos MIG apresentaram as maiores cargas de ruptura por cisalhamento com falha localizada na ZTA em dois dos três conjuntos. Em contrapartida, as amostras dos conjuntos soldados a laser e um dos conjuntos MIG, romperam diretamente na região fundida devido à presença de porosidades internas registradas nas macrografias. O perfil de dureza revelou um comportamento em formato de "U", com redução de dureza localizada na ZTA decorrente da redução do encruamento original da liga. Na avaliação estética, o processo a laser mostrou-se superior ao reduzir a largura da marca externa, devido à maior concentração de energia do feixe laser. Sob a perspectiva econômica operacional, um dos conjuntos laser com metal de adição consolidou-se como o cenário de maior competitividade global, registrando o menor custo por metro linear do estudo, uma vez que a junta estreita reduziu expressivamente o consumo de metal de adição, superando os custos operacionais da menor velocidade induzida pela curva de aprendizado do operador. Por fim, as parametrizações de laser autógeno resultaram nos maiores custos diretos em função da baixa velocidade de soldagem devido à falta de familiaridade com o processo. Conclui-se que a soldagem a laser com metal de adição apresenta-se como a opção mais viável para a otimização estética e financeira do componente, condicionada ao refino dos parâmetros operacionais para a mitigação de porosidades na zona fundida.

Palavras-chave: Soldagem MIG; Soldagem a laser; Alumínio 5754 H22; Zona termicamente afetada; Análise econômica.

ABSTRACT

The current process for securing baffles in aluminum fuel tanks is carried out via internal MIG welding, which generates undesired external marks resulting from the heat affected zone, negatively impacting the aesthetic quality of the final product. This study performed a comparative technical and operational economic analysis between MIG welding and laser welding with and without filler metal, manually applied to lap joints of 2 mm thick 5754 H22 aluminum alloy sheets. The specimens were fabricated and subjected to dimensional visual inspection of the external blemish, shear tests, macrographic analysis, and Vickers hardness profile mapping. Mechanical test results indicated that all nine experimental groups met the required design load of 19.4 kN for the actual tank with a safe margin. The MIG groups exhibited the highest shear failure loads, with fracture located in the heat affected zone for two of the three configurations. Conversely, specimens from the laser-welded groups and one of the MIG groups ruptured directly in the fusion zone due to the presence of internal porosities recorded in the macrographs. The hardness profile revealed a characteristic U shaped behavior, with localized hardness loss in the heat affected zone resulting from the reduction of the alloy's original work hardening. In the aesthetic evaluation, the laser process proved superior by significantly reducing the width of the external mark due to the higher energy density of the laser beam. From an operational economic perspective, one of the laser configurations with filler metal consolidated itself as the most globally competitive scenario, recording the lowest cost per linear meter in the study. This was achieved because the narrow joint drastically reduced filler metal consumption, overcoming the operational costs of the lower welding speed induced by the operator's learning curve. Finally, autogenous laser parameterizations resulted in the highest direct costs due to low welding speeds caused by a lack of familiarity with the process. It is concluded that laser welding with filler metal presents itself as the most viable option for the aesthetic and financial optimization of the component, conditioned upon the refinement of operational parameters to mitigate porosities in the fusion zone.

Keywords: MIG welding; Laser welding; Aluminum 5754 H22; Heat affected zone; Economic analysis.

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Figura 1 – Representação do objeto de estudo	15
Figura 2 – Tipos de proteção do arco	18
Figura 3 – Perfil e penetração de acordo com o gás de proteção	19
Figura 4 – Comparação entre as poças de fusão dos processos LBW e GMAW.....	20
Figura 5 – Seção transversal de uma solda e suas regiões.....	20
Figura 6 – Densidade de energia por processo de soldagem.....	21
Figura 7 – Macrografia da ZTA pelo processo GMAW	22
Figura 8 – Macrografia da ZTA pelo processo LBW.....	22
Figura 9 – Repartição térmica de materiais encruado e alteração da resistência mecânica	25
Figura 10 – Fluxograma da proposta de implementação.....	27
Figura 11 – Representação da junta soldada sobreposta	28
Figura 12 – Posicionamento do cordão de solda no tanque	29
Figura 13 – Máquina de solda MIG	30
Figura 14 – Largura da marca externa do processo MIG	31
Figura 15 – Máquina de solda laser.....	32
Figura 16 – Amostra preliminares	33
Figura 17 - Ilustração dos conjuntos para extração dos corpos de prova.....	35
Figura 18 – Fixação e geometria dos corpos de prova para ensaio de cisalhamento	36
Figura 19 – Corpo de prova embutido e perfil de dureza.....	38
Figura 20 – Amostras preliminares um e dois.....	42
Figura 21 – Inspeção visual dos conjuntos soldados.....	44
Figura 22 – Aporte térmico e largura da marca externa.....	45
Figura 23 – Ensaio de cisalhamento (força máxima suportada).....	46
Figura 24 – Zona de ruptura	47
Figura 25 – Análise macrográfica	49
Figura 26 – Resultado do mapeamento do perfil de dureza	50
Tabela 1 – Composição química do alumínio	30

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Parâmetros da solda MIG	31
Quadro 2 – Parâmetros recomendados para a solda a laser.....	32
Quadro 3 – Codificação dos corpos de prova.....	36
Quadro 4 – Resultado amostras preliminares soldagem MIG	41
Quadro 5 – Resultado das amostras preliminares soldagem laser	42
Quadro 6 – Parâmetros de soldagem e aporte térmico	43
Quadro 7 – Largura da marca externa dos conjuntos soldados	44
Quadro 8 – Resultado ensaio de cisalhamento	46
Quadro 9 – Custo por metro linear de solda.....	51

LISTA DE SIGLAS

ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
FSW	<i>Friction Stir Welding</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
LAMEC	Laboratório de Ensaios Mecânicos
LBW	<i>Laser Beam Welding</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MB	Metal de Base
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
UCS	Universidade de Caxias do Sul
ZAC	Zona Afetada pelo Calor
ZF	Zona Fundida
ZTA	Zona Termicamente Afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
η	Rendimento térmico
A	Ampere
Al	Alumínio
Ar	Argônio
cm/min	Centímetros por minuto
CO ₂	Dióxido de Carbono
Cr	Crômio
Cu	Cobre
Fe	Ferro
H	Energia absorvida pela junta soldada
He	Hélio
Hv	Dureza Vickers
Hz	Hertz
I	Corrente de soldagem
kN	Kilonewton
kW	Kilowatt
L/min	Litros por minuto
m/min	Metros por minuto
Mg	Magnésio
mm	Milímetros
Mn	Manganês
MPa	Megapascal
nm	Nanômetro
N/mm	Newton por milímetro
P	Potência do feixe laser
Si	Silício
Ti	Titânio
U	Tensão do arco
V	Volt
v	Velocidade de soldagem
W	Watt
W/m ²	Watts por metro quadrado
Zn	Zinco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	JUSTIFICATIVA	15
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Objetivo geral	16
1.2.2	Objetivos específicos	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	SOLDAGEM	17
2.2	PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW (MIG/MAG).....	18
2.3	PROCESSO DE SOLDAGEM A LASER (LBW).....	19
2.4	ZONA TERMICAMENTE AFETADA (ZTA)	20
2.4.1	Velocidade de soldagem.....	22
2.4.2	Aporte térmico	23
2.5	SOLDAGEM EM ALUMÍNIO	24
3	METODOLOGIA.....	27
3.1	OBJETO DE ESTUDO	28
3.1.1	Matéria prima do tanque de combustível.....	29
3.2	PROCESSO DE SOLDAGEM ATUAL (GMAW)	30
3.3	PROCESSO DE SOLDAGEM PROPOSTO (LBW).....	31
3.4	OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS E AMOSTRAS PRELIMINARES.....	33
3.5	PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	34
3.5.1	Codificação dos corpos de prova	36
3.6	ENSAIOS MECÂNICOS E METALOGRÁFICOS	37
3.6.1	Inspeção visual dimensional e estética	37
3.6.2	Ensaio de cisalhamento.....	37
3.6.3	Análise macrográfica e perfil de dureza	38
3.7	ANÁLISE ECONÔMICA OPERACIONAL	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
4.1	AMOSTRAS PRELIMINARES.....	40
4.1.1	Soldagem MIG	40

4.1.2	Soldagem a laser.....	41
4.2	CORPOS DE PROVA DE VALIDAÇÃO TÉCNICA.....	43
4.2.1	Parâmetros de soldagem e aporte térmico.....	43
4.2.2	Inspeção visual dimensional e qualidade estética	43
4.2.3	Ensaio de Cisalhamento	45
4.2.4	Análise macrográfica e perfil dureza	48
4.3	ANÁLISE ECONÔMICA OPERACIONAL	51
5	CONCLUSÃO	53
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	55
	REFERÊNCIAS	56
	APÊNDICE A	58
	APÊNDICE B.....	59
	APÊNDICE C	60
	APÊNDICE D	61
	ANEXO A.....	62

1 INTRODUÇÃO

A função do quebra-ondas dentro de um tanque de combustível é reduzir a movimentação do líquido nele armazenado. De acordo com Penteado (2009, p. 33-34), a utilização de quebra-ondas visa reduzir o efeito de turbilhamento do combustível e o impacto desse líquido contra as paredes do tanque, fenômenos que ocorrem durante acelerações ou desacelerações. E além de reduzir ruídos, esse componente é essencial em reservatórios de grande porte para evitar a formação de ondas que possam comprometer a estabilidade de veículo.

No que diz respeito ao objeto de estudo desse trabalho, além das funções apresentadas anteriormente, o quebra-ondas atua também como um reforço interno. Ele garante, que não haja deformação do tanque ao realizar o aperto das cintas fixadoras no suporte preso ao chassi do caminhão.

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2017, p. 1), a soldagem é o principal processo utilizado para união permanente de peças metálicas. Esse tipo de junta permite a montagem de conjuntos com rapidez, segurança e economia de material, ao contrário das juntas parafusadas ou rebitadas onde as peças precisam ser furadas, ocasionando uma perda de seção que deverá ser compensada por uma espessura maior das peças. Outro fator relevante é que as juntas soldadas, desde que executadas corretamente, são estanques, não demandando o uso de elementos de vedação adicional para esse fim.

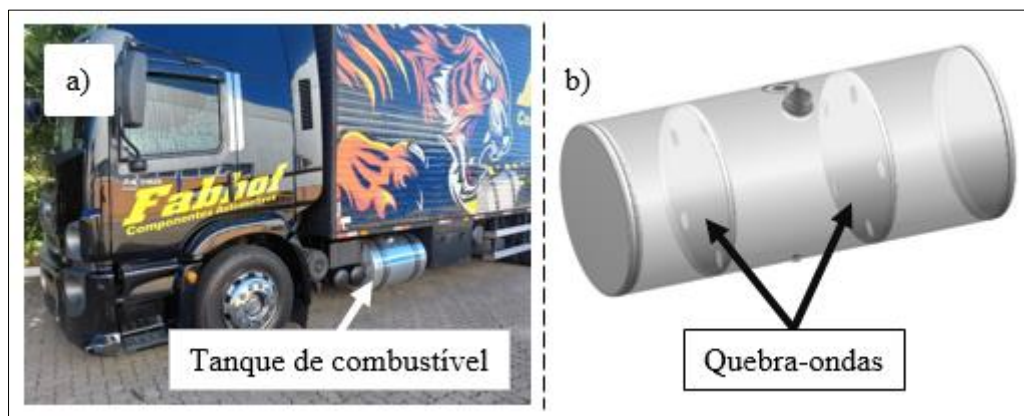
Um dos processos mais conhecidos na indústria se trata da soldagem MIG. Segundo Wainer, Brandi e Mello (1992, p. 99), o processo de soldagem MIG, *metal inert gas*, ocorre através do uso de uma fonte de calor gerada por um arco elétrico mantido entre um eletrodo consumível, alimentado de forma contínua, e a peça a ser soldada. A proteção da região de soldagem é feita aplicando um fluxo de gás inerte. O processo MIG, ganhou força após a Segunda Guerra Mundial, antes disso, no início dos anos 30, iniciavam-se os primeiros trabalhos com uso do gás ativo, conhecido como processo MAG, *metal active gas*.

Por sua vez, o processo de soldagem laser, mais recente, que segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2017, p. 305), caracteriza-se pela fusão localizada da junta, através do bombardeamento por feixe de luz concentrada e de alta intensidade.

Este trabalho se desenvolveu em parceria com a empresa Fabbof Indústria Metalúrgica Ltda. Fundada em 1997, a empresa conta com mais de 28 anos de atuação e é referência no mercado de peças, acessórios e componentes para reposição para o segmento de veículos pesados e semipesados.

A empresa possui uma ampla linha de produtos, dentre eles estão espelhos retrovisores, escapamentos, suspensões pneumáticas e tanques de combustível. Na Figura 1a está apresentado o tanque de combustível instalado em um caminhão, já a Figura 1b contém o modelo CAD do tanque com o sistema de quebra-ondas interno.

Figura 1 – Representação do objeto de estudo



Fonte: O Autor (2026).

O presente trabalho é composto por uma análise técnica e econômica operacional entre os processos de soldagem MIG e laser, especificamente aplicados a soldagem de quebra-ondas em tanques de combustível de alumínio, compreendendo tanques cilíndricos de diâmetro 660 mm com comprimentos que variam de 600 até 1600 mm, fabricados em chapas de alumínio na liga 5754 H22 com espessura de 2 mm.

Atualmente, o processo utilizado é o MIG, realizado de forma manual utilizando o metal de adição AWS A5.10: ER5183 de 1,2 mm, onde a soldagem é realizada por dentro do tanque, e acaba gerando marcas externas devido a zona termicamente afetada.

Dessa forma, esse trabalho visou identificar qual o processo de soldagem oferece a melhor eficiência operacional, buscando principalmente a qualidade estética da região soldada, mantendo a resistência mecânica dessa junta.

1.1 JUSTIFICATIVA

As buscas por eficiência, melhorias de processos e redução de custos, são atividades constantes de extrema importância na indústria. Cada aperfeiçoamento está diretamente

relacionado com a capacidade competitiva da empresa, ditando seu desempenho em um cenário de alta concorrência.

No presente trabalho, da soldagem de quebra-ondas em tanques de alumínio, a análise comparativa entre os processos de soldagem MIG e a laser, justificou-se pela necessidade de identificar e explorar a alternativa mais vantajosa principalmente em termos de qualidade estética, e de redução de custos devendo, entretanto, garantir a resistência mecânica da junta soldada.

Portanto, nesse âmbito, o presente trabalho buscou levantar os aspectos técnicos e econômicos operacionais necessários para a validação do processo de soldagem mais adequado para essa aplicação.

1.2 OBJETIVOS

A seguir, apresentam-se o objetivo geral e os objetivos específicos que orientaram o desenvolvimento desse trabalho.

1.2.1 Objetivo geral

Realizar uma análise técnica e econômica operacional comparativa entre os processos de soldagem MIG e a laser, aplicado em soldagem de quebra-ondas de tanques de combustível em alumínio, visando a melhoria estética e garantido a integridade estrutural da junta.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Estabelecer parâmetros de soldagem que influenciam a qualidade da junta soldada em cada processo;
- b) Comparar a resistência mecânica entre os dois processos de soldagem;
- c) Estabelecer um padrão estético com dados quantitativos a respeito da marca externa relativa a zona termicamente afetada pela solda;
- d) Avaliar economicamente os dois processos, considerando custos de operação, insumos e produtividade.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo aborda-se o referencial teórico, a fim de dar embasamento às informações que sustentam o desenvolvimento desse trabalho. Ele é composto por conceitos relacionados aos processos de soldagem, mais especificamente a solda MIG e a laser. Abordando características técnicas mecânicas, aplicadas a soldagem de alumínio na liga 5754 H22, material utilizado na confecção dos quebra-ondas e tanques de combustível.

2.1 SOLDAGEM

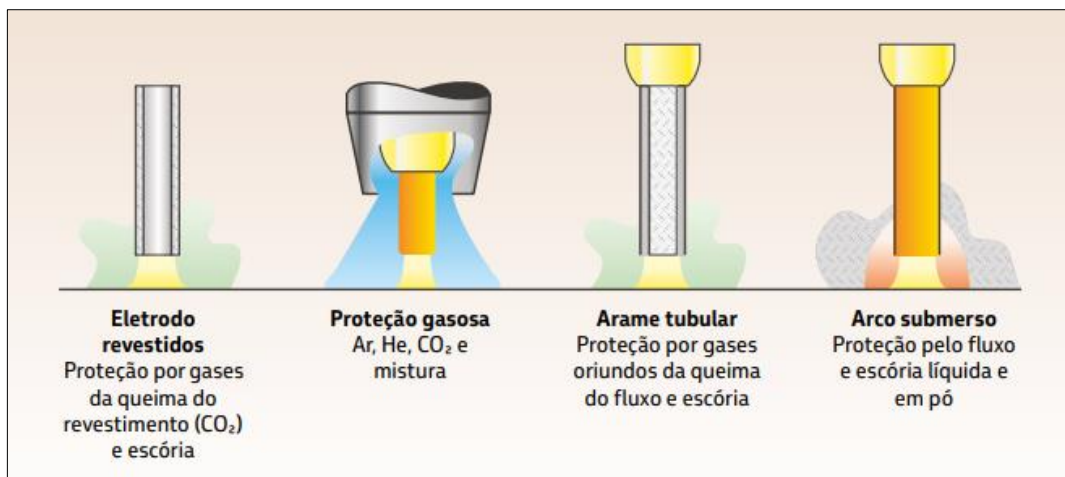
Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2017, p. 19-21), a união permanente entre superfícies metálicas enfrenta obstáculos, como irregularidades superficiais em escala nanométrica e a presença de camadas de óxidos, umidade ou contaminantes. Para superar tais impedimentos e viabilizar a ligação metálica, surgem dois métodos principais que originam os dois grandes grupos de processos de soldagem. O primeiro grupo consiste de deformar a superfície de forma a forçar uma aproximação da mesma, possibilitando a ligação dos átomos, esse processo é chamado de soldagem por pressão ou deformação, e esse grupo é composto por processos de soldagem por forjamento, ultrassom, fricção, difusão, explosão, dentre outros. Por sua vez, o segundo grupo consiste na aplicação localizada de calor na região a ser soldada, vindo a realizar a fusão das peças e do material de adição, quando utilizado. Como resultado dessa fusão, as superfícies entre as peças são unificadas, e com a solidificação desse material, ocorre a solda. Portanto, esse segundo grupo é chamado de soldagem por fusão, e como exemplo nesse grupo, temos os processos de soldagem GMAW e a laser, dentre vários outros processos.

De acordo com Rodrigues et al. (2022, p.11-13), cada processo de soldagem, deve ser capaz de fornecer a energia necessária para garantir a união das peças a serem soldadas, além de remover impurezas presentes nas superfícies das peças e evitar que o ambiente externo interfira e altere as propriedades do metal de solda. O correto controle das transformações de fases garante a qualidade da junta soldada. Os autores destacam que o metal fundido, em altíssimas temperaturas, reage com a atmosfera, e por conta disso, há a ocorrência de formações de óxidos e nitretos, os quais prejudicam as propriedades mecânicas e metalúrgicas do material de solda solidificado.

A partir disso, os mesmos autores trazem a importância da aplicação de uma atmosfera protetora, de forma a não permitir que os gases atmosféricos do meio, reajam com o metal

fundido. Essas formas de proteção ocorrem através da utilização de fluxos e revestimentos ou a adição de gases de proteção, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Tipos de proteção do arco



Fonte: Rodrigues et al. (2022, p.13).

2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW (MIG/MAG)

Segundo Rodrigues et al. (2022, p.122-123), o processo de soldagem GMAW, *gas metal arc welding*, ocorre através da utilização de calor obtido por um arco elétrico que aplicado entre um eletrodo nu consumível no formato de arame, e o metal de base, acaba gerando a fusão desses materiais, resultando na solda dos mesmos. O arame de solda, o eletrodo do processo, é alimentado continuamente, sem interrupção durante a soldagem.

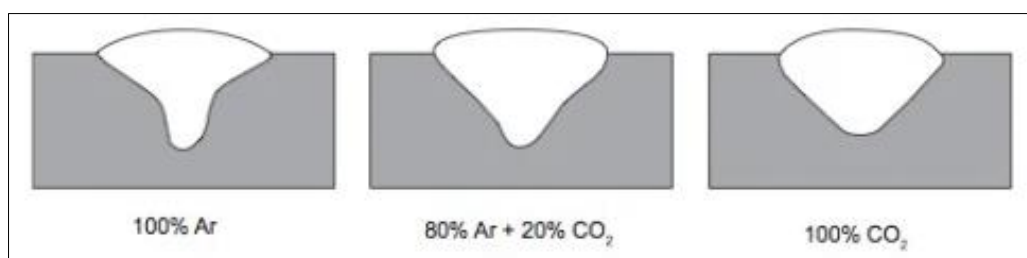
Os mesmos autores indicam que a proteção desse arco elétrico e a poça de fusão, é feita através de um gás, ou mistura de gases, e o mesmo é aplicado continuamente assim como o eletrodo. Esses gases podem ser do tipo inerte ou ativo, logo, o processo GMAW também é chamado de processo MIG/MAG, sendo o processo MIG, *metal inert gas*, quando é utilizado um gás inerte e MAG, *metal ative gas*, quando utilizado um gás ativo.

De acordo com Santos (2015, p.60-61), os gases responsáveis pela proteção gasosa do processo de soldagem, atuam como um meio ionizante, que confere ao arco elétrico uma melhor estabilidade na concentração de energia, controlando a transferência metálica do metal de adição a poça de fusão. Se tratando do processo MIG, os gases normalmente utilizados são o argônio (Ar) e o hélio (He), ou a mistura dos dois. Já para o processo MAG, utiliza de gases ativos que reagem de forma controlada com a poça de fusão, são exemplos, o dióxido de carbono (CO_2) puro ou a mistura de argônio e CO_2 . O autor ressalta que o CO_2 em temperatura

ambiente é inerte, entretanto, quando submetido a altas temperaturas características durante o processo de soldagem, ele acaba se tornando ativo por conta de sua decomposição química.

Conforme Santos (2015, p.62), o gás de proteção influencia na penetração e no perfil do cordão de solda. Isso acontece por conta das características da quantidade de elementos e elétrons de cada gás. Sob uma mesma energia de soldagem, a aparência macro de perfil do cordão e penetração se revela totalmente diferente. A Figura 3, ilustra essas diferenças.

Figura 3 – Perfil e penetração de acordo com o gás de proteção



Fonte: Santos (2015, p.62).

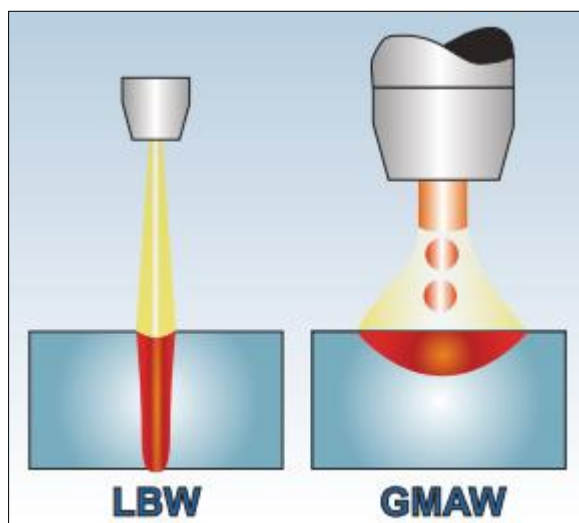
O mesmo autor, aponta as diferenças presentes no perfil de cordão e penetração da solda conforme ilustrado na Figura 4. Para Ar 100%, a penetração é profunda no centro e reduzida nas extremidades. Para mistura de 80% Ar com 20% de CO₂, a penetração é profunda no centro e maior nas laterais. Já para 100% CO₂, a penetração é profunda com alargamento lateral.

2.3 PROCESSO DE SOLDAGEM A LASER (LBW)

De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2017, p. 307-309), o processo de soldagem a laser LBW, *laser beam welding*, caracteriza-se pela fusão localizada da junta por meio de um bombardeamento de feixe de luz concentrada e de alta intensidade.

Os mesmos autores trazem que esse feixe de luz concentrado é capaz de fundir e até vaporizar parcialmente o material da junta em seu ponto de incidência, penetrando profundamente, podendo vir a causar perfuração no material. Considerando que a energia fornecida para o processo atua de forma concentrada, o volume de material afetado pelo calor da soldagem é reduzido. Na figura 4 é possível verificar uma ilustração comparando as poças de fusão dos processos LBW e GMAW.

Figura 4 – Comparação entre as poças de fusão dos processos LBW e GMAW



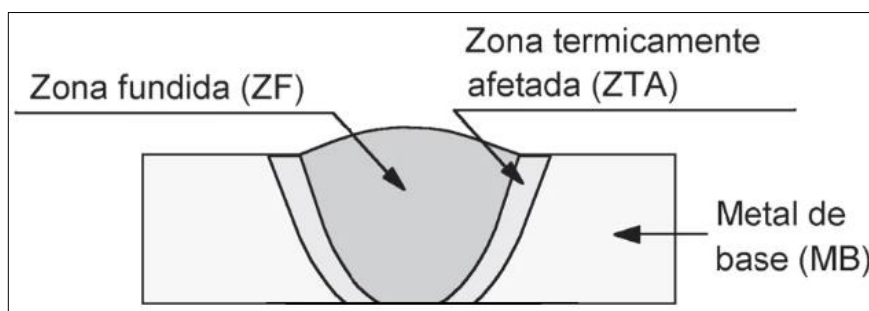
Fonte: Rodrigues et al. (2022, p.13).

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2017, p. 311), esse processo de soldagem normalmente é autógeno, ou seja, não há adição de material, contudo, o mesmo pode ser feito para compensar eventuais afundamentos na poça de fusão.

2.4 ZONA TERMICAMENTE AFETADA (ZTA)

De acordo com Rodrigues et al. (2022, p.18), a zona termicamente afetada (ZTA), também conhecida como zona afetada pelo calor (ZAC), é a região da junta soldada adjacente ao cordão de solda, onde as propriedades mecânicas e metalúrgicas sofrem alterações por conta do ciclo térmico desenvolvido pela aplicação de calor durante a operação de soldagem. Essa região pode ser verificada conforme Figura 5.

Figura 5 – Seção transversal de uma solda e suas regiões

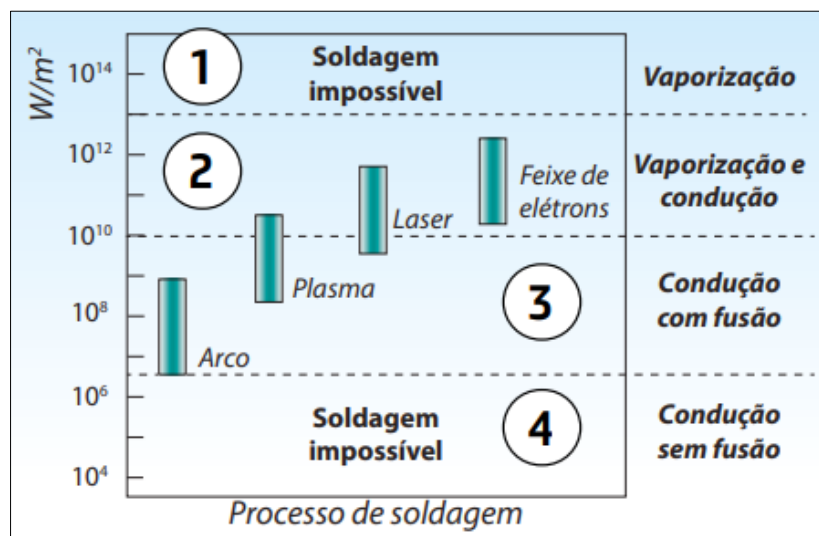


Fonte: Adaptado de Marques, Modenesi e Bracarense (2017, p. 33).

Marques, Modenesi e Bracarense (2017, p. 33) nos trazem que a zona termicamente afetada (ZTA) é uma das regiões que compõem a junta soldada, e está localizada entre a zona fundida (ZF) e o metal de base (MB). A ZF corresponde ao metal de solda, formado pela fusão do metal de base e do material de adição, se houver. Já o metal de base é a peça a ser unida, sendo que a região que sofre alterações de suas propriedades mecânicas em função do processo de soldagem é denominada ZTA.

Segundo Rodrigues et al. (2022, p.205), cada processo de soldagem possui uma determinada densidade de energia aplicada por unidade de área. Nos processos com baixa densidade de energia, a distribuição térmica é mais ampla, ocasionando maior dissipação de calor no material e resultando uma ZTA maior. Nesse sentido, os processos com alta densidade de energia concentram o calor em uma região menor, aquecendo um volume reduzido do material, tendo uma maior eficiência térmica na soldagem. Na Figura 6 é possível verificar uma comparação entre a densidade de energia por processos de soldagem.

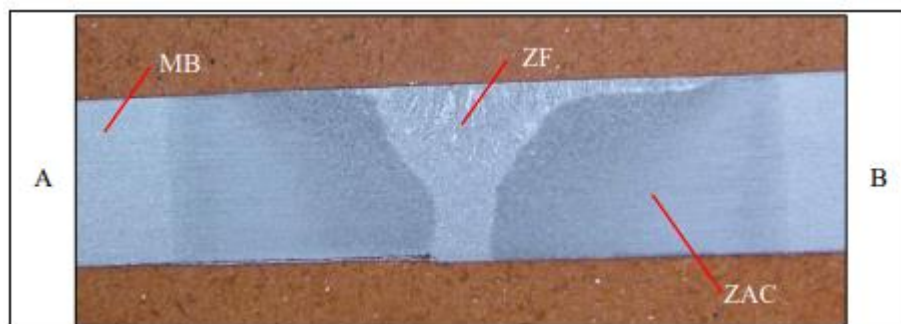
Figura 6 – Densidade de energia por processo de soldagem



Fonte: Rodrigues et al. (2022, p.205).

Sommacal (2015, p. 60-61), evidenciou experimentalmente em seu estudo as diferenças da ZTA entre os processos LBW e GMAW aplicados a soldagem de tubo mecânico ST52 BKW. Para o corpo de prova onde foi realizada a soldagem pelo processo GMAW, o autor verificou uma ZTA de face A e B de 6,77 mm e 2,24 mm respectivamente, assim como uma ZTA da raiz de A e B de 9,23 mm e 10,70 mm respectivamente, conforme pode ser visto na Figura 7.

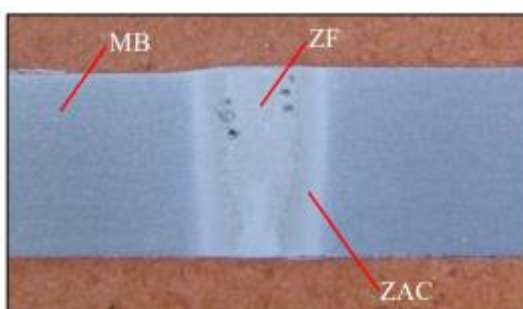
Figura 7 – Macrografia da ZTA pelo processo GMAW



Fonte: Sommacal (2015, p. 60).

Já para o processo LBW o mesmo autor verificou uma ZTA muito menor se comparada ao processo GMAW, de apenas 1 mm na face, conforme pode ser verificado na Figura 8.

Figura 8 – Macrografia da ZTA pelo processo LBW



Fonte: Sommacal (2015, p. 60).

2.4.1 Velocidade de soldagem

De acordo com Rodrigues et al. (2022, p.146), a velocidade do processo de soldagem está diretamente relacionado com a quantidade de energia aplicação a junta soldada. Quanto maior for a velocidade, menor é quantidade de calor aplicada a junta. O calor excessivo resultante de baixas velocidade pode causar alterações metalúrgicas no material, entretanto, velocidade muito altas podem causar descontinuidade, falta de fusão e de penetração na junta.

Como visto anteriormente na Figura 7, enquanto processos a arco operam na faixa de 10^6 a 10^9 W/m², o laser atinge densidades na ordem de 10^{10} a 10^{12} W/m². Essa alta concentração de energia é o fator que permite o laser atingir velocidades maiores se comparado ao processo de arco (GMAW). Rodrigues et al. (2022, p. 205-206), traz que processos de maior densidade de energia concentram o calor de forma mais eficiente, aquecendo uma quantidade menor de material. O calor, em vez de se dissipar pela peça, penetra profundamente na junta, o que

possibilita um aumento direto na velocidade de soldagem e na qualidade final da solda. Como consequência dessa eficiência, a ZTA se torna mais estreita, há menos danos à peça e a necessidade de múltiplos passes de solda é reduzida.

No estudo realizado por Bertinatto (2024, p. 77), onde o autor comparou os processos de soldagem MIG/MAG e a laser aplicados na união de chapas de baixo teor de carbono, o autor verificou que o processo de soldagem a laser resultou em ganho de produtividade, acabamento preciso e menor deformação térmica, apresentando uma junta de maior qualidade e tão resistente quanto aquelas produzidas pelo processo MIG/MAG.

Bertinatto (2024, p. 58), menciona em seu estudo que para soldagem de chapas de baixo teor de carbono com espessura de 2,65 mm, as velocidades de soldagem usuais coletadas durante sua análise é de 0,4 m/min para o processo MIG/MAG e de 0,6 m/min para o processo laser, evidenciando uma velocidade de soldagem 50% maior para o processo laser.

2.4.2 Aporte térmico

Segundo Rodrigues et al. (2022, p.202) a energia aplicada a junta é chamada de aporte térmico ou aporte de calor, e é definido como a relação entre a potência que a fonte introduz na peça e a velocidade de deslocamento dela, ou seja, é a quantidade de energia transferida à junta soldada por unidade de comprimento. Para o processo de soldagem MIG, o cálculo do aporte térmico é determinado pela Equação 1.

$$H = \frac{U \cdot I}{v} \cdot \eta \quad (1)$$

Em que:

H é a energia absorvida pela junta (J/mm);

U é a tensão do arco (V);

I é a corrente de soldagem (A);

v é velocidade de soldagem (mm/s);

η é o rendimento térmico (adimensional).

De acordo com Kou (2003, p.37), o aporte térmico relacionado ao processo de soldagem a laser, pode ser determinado através de um ajuste na Equação 1, substituindo os termos de tensão e corrente, pela potência do feixe laser, obtendo a Equação 2.

$$H = \frac{P}{v} \cdot \eta \quad (2)$$

Em que:

P é potência do feixe laser (W).

Conforme Kou (2003, p.37-43), o rendimento térmico representa a fração da energia total gerada pela fonte que é efetivamente absorvida pela peça durante a soldagem. O valor para essa eficiência sempre será menor que 1 ou 100%, pois parte dessa energia inevitavelmente será perdida para a vizinhança por radiação, condução ou convecção antes de atingir o material.

O mesmo autor traz que o processo MIG apresenta um rendimento térmico elevado, em torno de 0,8 ou 80%, pois o calor gerado no arco elétrico e o eletrodo consumível é transferido diretamente para a poça de fusão. Em contra partida, para o processo laser esse rendimento é menor e possui grande variação, com valores entre 0,05 ou 5%, e 0,6 ou 60%, devido à alta refletividade dos materiais que acabam impedindo que o laser penetre na peça.

Para o presente estudo, adotou-se o rendimento térmico igual a 1 ou 100% para ambos os processos. Dessa forma é possível uma comparação direta entre esses processos, permitindo quantificar o aporte térmico nominal entregue pelos equipamentos à junta, eliminando as incertezas associadas às taxas de refletividade do alumínio e as perdas térmicas para o ambiente.

2.5 SOLDAGEM EM ALUMÍNIO

Conforme Smith e Hashem (2012, p. 298-299), a família de ligas de alumínio da série 5000 tem o magnésio como o principal elemento de liga e são frequentemente submetidas ao processo de encruamento para elevar sua resistência mecânica.

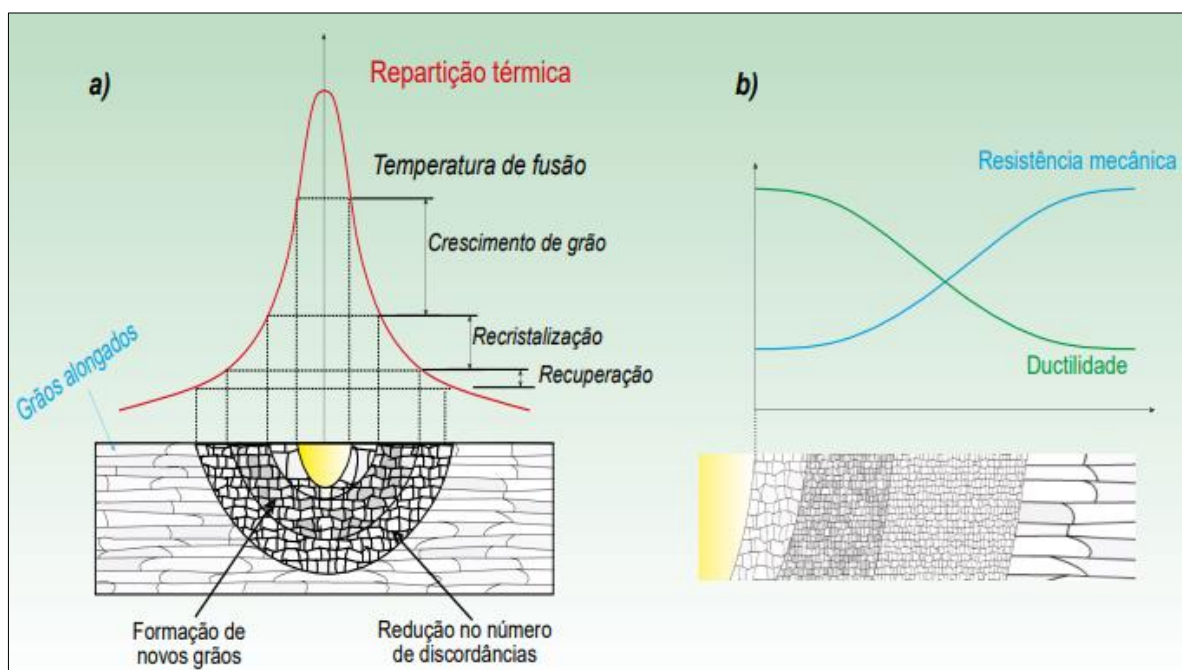
Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2017, p. 98), caso o material a ser soldado esteja encruado, a ZTA apresentará, além de uma região de crescimento de grão adjacente à ZF, uma região de recristalização no material de base.

De acordo com Callister Jr e Rethwisch (2016, p. 216), a recristalização é a formação de um novo conjunto de grãos equiaxiais e livres de deformação dentro de um metal que foi previamente trabalhado a frio, que foi encruado. Esse processo ocorre quando o material é aquecido a uma temperatura elevada, conhecida como temperatura de recristalização, e acaba resultando na redução da resistência e no aumento da ductilidade do material, por sua vez a recuperação, é um alívio de tensões internas sem alteração na estrutura de grãos com baixa

influência nas propriedades mecânicas com ligeira diminuição na resistência e um pequeno aumento na ductilidade, mantendo a maior parte do efeito de encruamento.

Rodrigues et al. (2022, p. 266-267) trazem que as ligas de alumínio são endurecidas através do processo de encruamento a frio para aumentar sua resistência mecânica. No entanto, o calor gerado durante a soldagem reverte esse efeito na ZTA. O aquecimento provoca a recuperação e a recristalização do material, o que altera a estrutura dos grãos e, consequentemente, reduz a resistência mecânica nessa região. A Figura 9 ilustra esse efeito, em 9a é possível verificar repartição térmica e em 9b a alteração da resistência mecânica.

Figura 9 – Repartição térmica de materiais encruado e alteração da resistência mecânica



Fonte: Rodrigues et al. (2022, p.267).

Vural et al. (2007, p. 49-54), observaram em seu estudo um efeito similar ao descrito anteriormente sobre o mecanismo de perda de resistência causado pelo calor que reverte o encruamento. Os autores evidenciaram esse efeito sob a análise de um processo de soldagem por atrito, *friction stir welding* (FSW), onde validaram o comportamento da perda da resistência da junta para a liga 5754 H22, atribuindo uma queda de resistência mecânica por conta do fenômeno de recristalização.

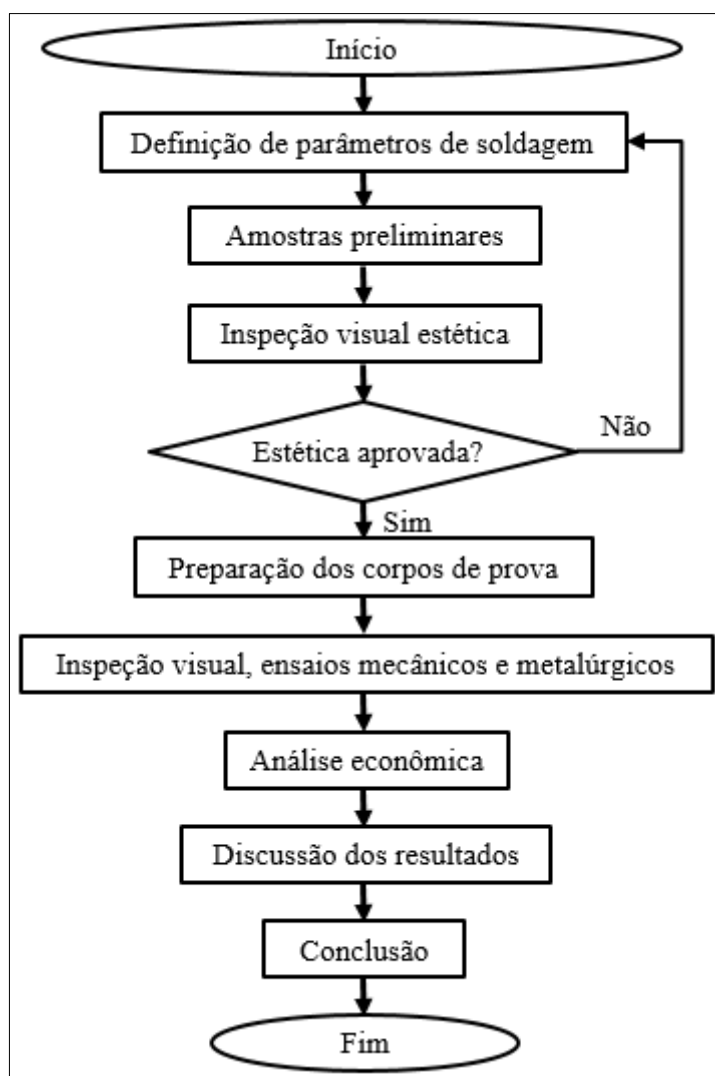
O mesmos autores trazem que essa perda de propriedade mecânica foi quantificada nos ensaios de tração do estudo, onde o metal de base na liga 5754-H22 apresentava uma resistência à tração de 235,17 MPa e após a soldagem, a resistência da junta caiu drasticamente para valores

entre 90,87 MPa e 134,53 MPa, resultando em uma eficiência de solda de apenas 38,64% a 57,21%. Também ficou evidente uma diminuição dos valores de dureza ao longo do perfil da junta soldada, variando entre 60 Hv 0,1 e 95 Hv 0,1.

3 METODOLOGIA

Este capítulo contém os procedimentos experimentais, métodos de análise e critérios de avaliação que foram empregados para realização da análise técnica e econômica comparativa entre os processos de soldagem MIG e a laser, partindo da fundamentação teórica, a fim de atender aos objetivos propostos previamente estabelecidos. A Figura 10 apresenta o fluxograma que deu direção à proposta de implementação do presente trabalho.

Figura 10 – Fluxograma da proposta de implementação



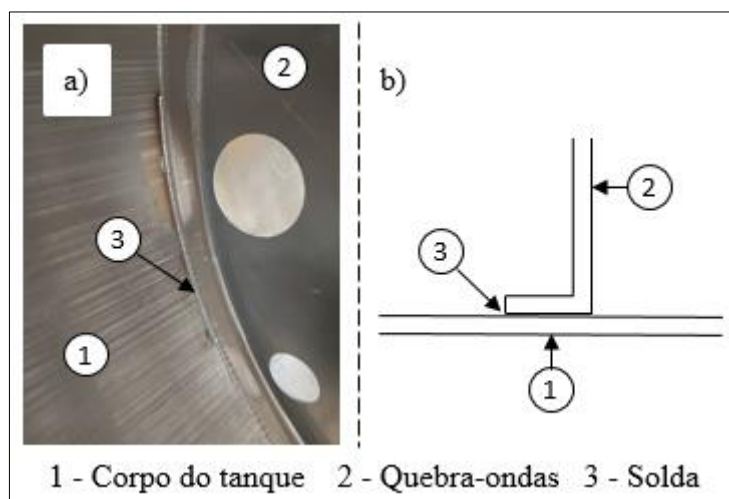
Fonte: O Autor (2026).

3.1 OBJETO DE ESTUDO

O objeto de estudo do presente trabalho é uma junta soldada aplicada para a fixação de quebra-ondas dentro de tanques de combustível para caminhões. Tanto o quebra-ondas como o corpo do tanque de combustível, são fabricados em chapas de alumínio na liga 5754 H22 com espessura de 2 mm.

A união do quebra-ondas no tanque é feita através de uma solda em junta sobreposta, a qual pode ser vista na Figura 11a, e na Figura 11b, uma ilustração de uma vista lateral.

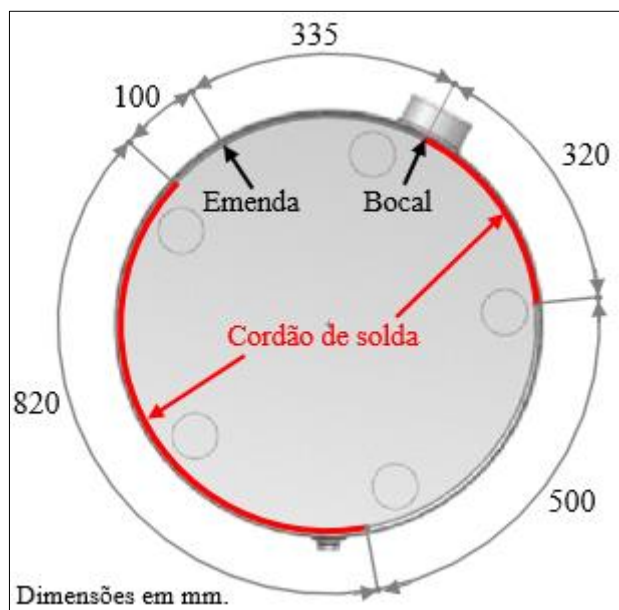
Figura 11 – Representação da junta soldada sobreposta



Fonte: O Autor (2026).

A fixação do quebra-ondas é feita através de dois cordões de solda com tamanhos e posições distintas, conforme Figura 12. Na mesma figura é possível localizar a região da emenda do tanque por conta do corpo calandrado e do bocal.

Figura 12 – Posicionamento do cordão de solda no tanque



Fonte: O Autor (2026).

3.1.1 Matéria prima do tanque de combustível

O presente trabalho utiliza como matéria prima do seu objeto de estudo o alumínio na liga 5754 H22. Conforme Smith e Hashem (2012, p. 298-299), a família de ligas de alumínio da série 5000 tem o magnésio como o principal elemento de liga, já a designação H22 que compões a descrição, é referente a resistência mecânica da mesma.

Os mesmos autores comentam que a letra “H” significa que o material foi endurecido por processo de deformação, conhecido como encruamento. Em seguida, o primeiro dígito após a letra “H” que nesse caso é o número 2, indica que a liga foi encruada e em seguida passou por um processo de recozimento parcial. Por último, o segundo dígito, que nesse caso é o número 2, indica o grau final de encruamento, correspondendo à condição de 1/4 endurecido. Na Tabela 1 é possível verificar a composição química do alumínio na liga em questão.

Tabela 1 – Composição química do alumínio

Al	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Zn %	Ti %
5754 -H22	0.40	0.40	0.10	0.50	2.6- 3.6	0.30	0.20	0.15

Fonte: Adaptado de Vural et al. (2007, p. 50).

3.2 PROCESSO DE SOLDAGEM ATUAL (GMAW)

O processo de solda atual é feito através de uma operação manual de soldagem por meio do processo MIG utilizando uma máquina de solda Cloos Qineo Pulse 600, conforme Figura 13.

Figura 13 – Máquina de solda MIG



Fonte: O Autor (2026).

Os parâmetros de soldagem atualmente utilizados estão listados no Quadro 1.

Quadro 1 – Parâmetros da solda MIG

Velocidade de avanço do arame (m/min)	Velocidade de soldagem (m/min)	Tensão (V)	Corrente (A)	Gás de proteção	Arame
3,9	0,6	15,9	66	Argônio 15 L/min	1,2 mm AWS A5.10: ER5183

Fonte: O Autor (2026).

O processo de soldagem realizado gera marcas externas decorrentes da zona termicamente afetada. No processo atual, a marca externa apresenta uma largura que pode chegar a aproximadamente 9 mm conforme pode ser vista na Figura 14.

Figura 14 – Largura da marca externa do processo MIG



Fonte: O Autor (2026).

O valor aferido com o auxílio de um paquímetro digital, evidencia a largura de aproximadamente 9 mm de marca externa. Esse valor serviu como referência para buscar marcas com menores dimensões, através do processo proposto de solda a laser.

3.3 PROCESSO DE SOLDAGEM PROPOSTO (LBW)

Para o processo proposto de soldagem LBW, foi utilizado uma máquina de solda a laser manual Bodor Welder 1500 Pro, um equipamento do tipo *fiber laser*, laser de fibra, conforme observada na Figura 15 com 1500 W de potência.

Figura 15 – Máquina de solda laser



Fonte: O Autor (2026).

Conforme Jinan Bodor CNC Machine Co. Ltd. ([202-?], p. 39), a potência define a intensidade da energia do feixe laser necessária para atingir a fusão do material. A amplitude determina a largura do movimento oscilatório do feixe sobre a junta, enquanto a frequência estabelece a velocidade desse ciclo de oscilação.

O ponto de partida foram parâmetros recomendados pelo próprio fabricante da máquina. O Quadro 2 apresenta os parâmetros sugeridos para a soldagem de alumínio com 2 mm de espessura.

Quadro 2 – Parâmetros recomendados para a solda a laser

Velocidade de avanço do arame (m/min)	Potência (W)	Frequência (Hz)	Amplitude (mm)	Gás de proteção	Arame
0,68	1050	60	3,5	Argônio 15 L/min	1,2 mm

Fonte: Adaptado de Jinan Bodor CNC Machine Co. Ltd. ([202-?], p. 38-39)

Como observado no Quadro 2, o arame recomendado é o de diâmetro 1,2 mm e nesse caso foi utilizado o mesmo arame presente no processo MIG, o AWS A5.10: ER5183.

3.4 OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS E AMOSTRAS PRELIMINARES

Visando atender o objetivo estético, reduzindo a marca externa da região soldada, a busca pela melhoria de parâmetros iniciou-se pela confecção de amostras preliminares onde foi testado o comportamento da largura da marca externa para os diferentes parâmetros de soldagem aplicados. Para isso, foram utilizados retalhos de chapa de alumínio na espessura 2 mm e realizada a soldagem em junta sobreposta conforme Figura 16.

Figura 16 – Amostra preliminares



Fonte: O Autor (2026).

Para o processo MIG, foram realizados testes variando a velocidade de soldagem. Além da velocidade padrão de 0,6 m/mim, foram testadas outras velocidades, com o objetivo de variar o aporte térmico sobre a chapa de alumínio.

Para o processo laser, testou-se amostras com metal de adição e de forma autógena. Primeiramente, com adição de arame, os parâmetros do Quadro 2 foram a configuração inicial. Para a solda autógena, aplicaram-se os mesmos parâmetros, mas com a alimentação de arame desligada. Nos dois casos, realizou-se uma variação dos parâmetros, alterando os valores da potência, mantendo a frequência e amplitude. Já a velocidade de soldagem, considerando um processo manual, foi mantida o mais constante possível pelo operador.

Para ambos processos de soldagem, cada configuração de parâmetros foi avaliada visualmente quanto à qualidade estética e ao final da etapa de amostras preliminares, conforme

fluxograma da Figura 11, foram selecionadas as melhores configurações. Estes conjuntos de parâmetros foram aplicados na preparação dos corpos de prova que seguiram para os ensaios mecânicos e metalúrgicos.

3.5 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

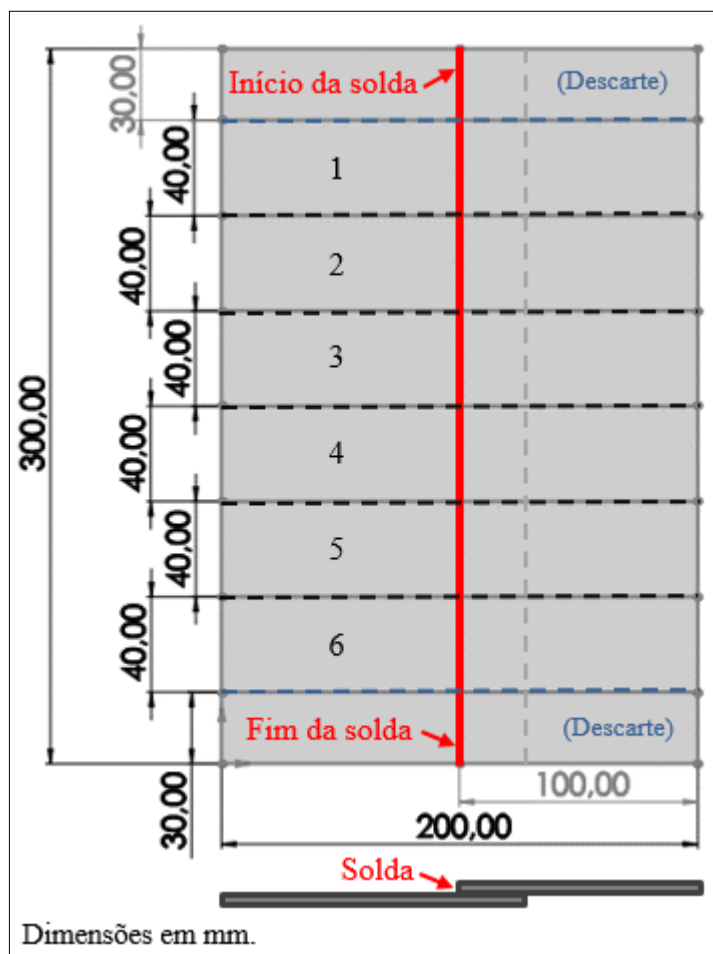
Para os ensaios mecânicos e metalúrgicos foram fabricados conjuntos de amostras divididos em dois grupos, que totalizaram nove conjuntos. O primeiro grupo é referente ao processo atual de soldagem (MIG), onde foram fabricados três conjuntos, servindo como referência para todas as comparações que foram feitas. Por sua vez, o segundo grupo é referente ao processo proposto (laser), fabricados seis conjuntos, sendo três deles com adição de arame e três de forma autógena, utilizando os parâmetros que tiveram melhor desempenho estético observados durante a confecção das amostras preliminares.

Todas as amostras foram fabricadas utilizando a mesma matéria prima, chapa de alumínio de 2 mm de espessura na liga 5754 H22, com a mesma geometria e junta sobreposta.

Para a obtenção dos corpos de prova, o corte e a montagem da junta seguiram as diretrizes para qualificação de procedimentos de soldagem estipuladas pela norma ASME IX referente a execução dos testes e a norma AWS D1.2 para a preparação e geometria das juntas, garantindo que a execução dos ensaios sob as mesmas condições.

Cada um dos nove conjuntos fabricados, produziram seis corpos de prova, ou seja, executou-se uma solda em junta sobreposta entre duas chapas retangulares e após isso, foram recortadas tiras que originaram os corpos de prova. Na Figura 17 é possível verificar a ilustração dos corpos de prova a fim de entender o procedimento adotado.

Figura 17 - Ilustração dos conjuntos para extração dos corpos de prova



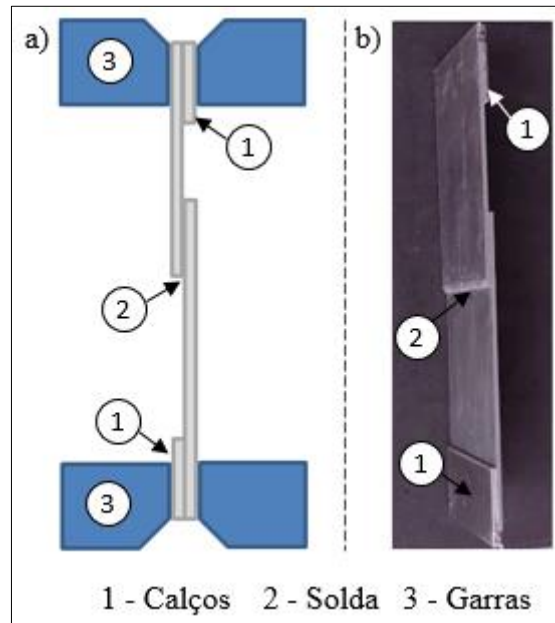
Fonte: O Autor (2026).

Na Figura 17, é possível verificar que os corpos de prova possuem 40 mm de largura e 200 mm de comprimento. A preparação das chapas e a posterior extração dos corpos de prova de cada conjunto soldado foram realizadas por corte de jato d'água, para evitar a introdução de novas fontes de calor que pudessem alterar a microestrutura do alumínio, garantindo que as propriedades mecânicas e metalúrgicas avaliadas na ZTA fossem decorrentes unicamente das condições de soldagem testadas.

Cada conjunto soldado teve 30 mm do início e do fim do cordão descartado, a fim de garantir uma região de regime estável do cordão de solda para conformidade dos ensaios.

Para a execução dos ensaios de cisalhamento, a fixação dos corpos de prova contam com calços compensadores em suas extremidades, que eliminam a excentricidade geométrica da junta sobreposta, garantindo que o cordão de solda seja submetido unicamente ao cisalhamento. A Figura 18a ilustra a fixação do corpos de prova na máquina de ensaio de cisalhamento e na Figura 18b verifica-se o corpo de prova pronto para o ensaio.

Figura 18 – Fixação e geometria dos corpos de prova para ensaio de cisalhamento



Fonte: O Autor (2026).

3.5.1 Codificação dos corpos de prova

A fim de garantir um controle e rastreabilidade de cada corpo de prova, foi estabelecido uma forma de codificação para os mesmos. Essa forma de codificação permite identificar de forma fácil a origem de cada corpo de prova, vinculado a seu processo de soldagem, MIG ou laser, ao conjunto de parâmetros e a sua finalidade, seja ela ensaio de cisalhamento, metalografia, ou de reserva. A estrutura de codificação adotada pode ser verificada conforme o Quadro 3.

Quadro 3 – Codificação dos corpos de prova (continua)

Conjunto	Processo de soldagem	Tipo	Corpo de prova	Finalidade
1	MIG	Não se aplica	1	Ensaio de cisalhamento
			2	
			3	
2			4	Análise macrográfica
3			5	Perfil de dureza
			6	Reserva
4	Laser	Com metal de adição	1	Ensaio de cisalhamento
2				
5			3	

(continuação)

			4	Análise macrográfica
6			5	Perfil de dureza
			6	Reserva
7	Laser	Sem metal de adição	1	Ensaio de cisalhamento
			2	
8			3	
			4	Análise macrográfica
9			5	Perfil de dureza
			6	Reserva

Fonte: O Autor (2026).

3.6 ENSAIOS MECÂNICOS E METALOGRÁFICOS

Os corpos de prova foram submetidos a ensaios mecânicos e metalográficos com o objetivo de comparar o desempenho dos dois processos de soldagem, avaliando as amostras sob os quesitos de resistência mecânica e de qualidade estética da marca externa da solda. Os procedimentos de execução dos ensaios foram realizados no LAMEC, laboratório de ensaios mecânicos da Universidade de Caxias do Sul, de acordo com a norma ASME IX e os critérios de avaliação serão estabelecidos pela norma AWS D1.2.

3.6.1 Inspeção visual dimensional e estética

A inspeção visual dimensional foi realizada através da utilização de um paquímetro digital, aferindo a largura da marca externa na região da solda. Os valores obtidos pelo processo de soldagem a laser foram comparados com a largura da marca atualmente existente no processo MIG. Também foi realizada a inspeção do cordão de solda em busca de discontinuidades de acordo com a norma AWS D1.2 que estabelece os critérios de aceitação.

3.6.2 Ensaio de cisalhamento

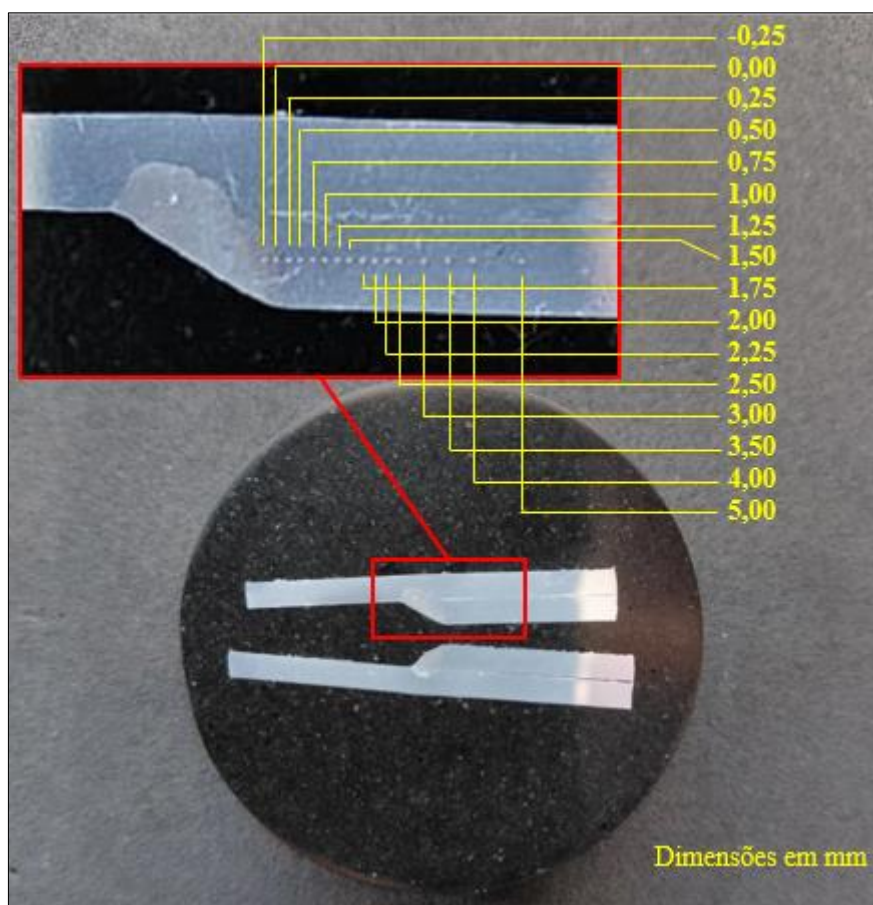
Para avaliar o desempenho mecânico das juntas soldadas, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de cisalhamento. Os corpos de prova retangulares de 40 mm de largura e 200 mm de comprimento, são tracionados até sua ruptura seguindo o procedimento da norma ASME IX. O critério de aceitação baseou-se na comparação entre os processos, utilizando os resultados obtidos pelo método MIG atual como referência. Dessa forma, buscou-se validar se

as configurações do processo a laser apresentam resistência equivalente ou superior ao padrão de produção atual, garantindo a integridade mecânica da junta conforme carga de projeto estimada em 19,4 kN presente no Apêndice A, onde considerando um cordão de solda de 1140 mm, representa um esforço de 17 N/mm.

3.6.3 Análise macrográfica e perfil de dureza

A avaliação macrográfica e de perfil de dureza iniciou-se pela extração de uma seção transversal da região soldada dos corpos de prova, os quais foram embutidos em resina de baquelite para posterior preparação superficial de lixamento e polimento. Após a preparação das amostras embutidas, realizou-se um ensaio de dureza Vickers transversal à junta soldada, efetuadas em intervalos definidos abrangendo o MB, ZTA e a ZF. Na Figura 19 verifica-se um corpo de prova embutido e o intervalo definido para o perfil de dureza.

Figura 19 – Corpo de prova embutido e perfil de dureza



Fonte: O Autor (2026).

Para avaliar as características internas da solda, foi realizado o procedimento macrográfico descrito pela norma ASME IX, a fim de verificar a geometria do cordão, verificação de descontinuidades como porosidade e falta de fusão e para realizar a comparação entre o tamanho da zona termicamente afetada entre os processos de soldagem MIG e a laser.

3.7 ANÁLISE ECONÔMICA OPERACIONAL

A fim de realizar a análise econômica operacional comparativa entre os processos de soldagem MIG e a laser, os principais custos de fabricação foram levantados durante a soldagem dos corpos de prova. O tempo e a velocidade de soldagem foram cronometrados para determinar a produtividade do processo, calculando o custo do operador como uma consequência desse desempenho produtivo. A massa de arame adicionado foi obtida pela pesagem dos conjuntos antes e depois da soldagem para verificar o metal de adição depositado por comprimento de cordão. Também foi considerado, o custo de gás de proteção (argônio), considerando a vazão de gás de 15 L/min para ambos os processos. E para o consumo de energia elétrica, foi utilizado um medidor de energia que permitiu registrar o consumo em kWh de cada máquina durante o processo de soldagem.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, apresentam-se os resultados obtidos por meio dos procedimentos experimentais detalhados na metodologia. Os dados coletados permitem realizar uma análise comparativa entre os processos de soldagem MIG e a laser, com foco na viabilidade técnica e econômica, atribuídos a qualidade estética da região soldada, mantendo a integridade mecânica da junta.

Essa abordagem foi estruturada seguindo uma ordem cronológica das etapas executadas, iniciando pelo desenvolvimento das amostras preliminares e obtenção dos corpos de prova, partindo para os ensaios mecânicos e finalizando com uma análise de custos e produtividade.

4.1 AMOSTRAS PRELIMINARES

O início da fase experimental se deu pela confecção de amostras preliminares do processo proposto de soldagem a laser. Essa etapa consistiu na soldagem de retalhos de chapa de alumínio na liga 5754 H22 com 2 mm de espessura em junta sobreposta, com o objetivo de observar o comportamento da largura da marca externa na região soldada.

Após a execução do processo de soldagem, foi realizada uma inspeção visual para quantificar a largura da marca externa gerada pela zona termicamente afetada, associando-a a um ensaio qualitativo manual de resistência mecânica para classificar a integridade preliminar da junta em:

- a) Rompeu, quando foi possível romper a junta manualmente;
- b) Não rompeu, quando não foi possível romper a junta manualmente.

Esse teste mecânico manual serviu para fundamentar a tomada de decisão quanto à escolha das melhores configurações de conjuntos, que posteriormente avançaram para a confecção dos corpos de prova definitivos.

4.1.1 Soldagem MIG

Para verificar a largura da marca externa referente ao processo atual, que serve como referência para o estudo, as amostras preliminares foram confeccionadas a partir da variação da velocidade de soldagem, parâmetro que está diretamente relacionado ao aporte térmico total

absorvido pela junta. No Quadro 4 verifica-se os resultados obtidos com a variação da velocidade de soldagem.

Quadro 4 – Resultado amostras preliminares soldagem MIG

CP	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade arame (m/min)	Velocidade soldagem (m/min)	Largura da marca (mm)	Qualidade da junta
1	15,9	66	3,9	0,49	4,71	Não rompeu
2	15,9	66	3,9	0,60	4,10	Não rompeu
3	15,9	66	3,9	0,71	3,39	Não rompeu
4	15,9	66	3,9	0,64	4,10	Não rompeu

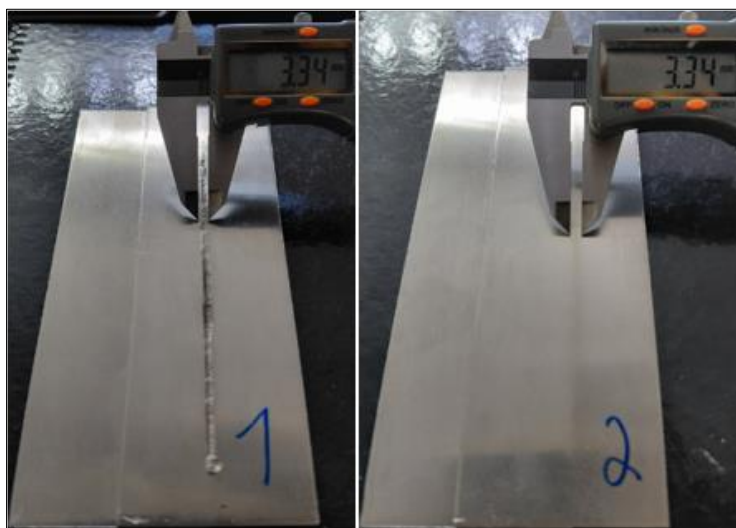
Fonte: O Autor (2026).

4.1.2 Soldagem a laser

Para o processo proposto de soldagem a laser, tomou-se como ponto de partida os parâmetros recomendados pelo fabricante da máquina. A partir dessa configuração inicial, realizou-se uma variação do conjunto de parâmetros afim de observar o comportamento da marca externa gerada pelo processo de soldagem.

Inicialmente aplicando a potência de 1050 W, foi obtido o primeiro corpo de prova. Entretanto, esse teste preliminar apresentou perfuração da chapa, ocasionando um escoamento do material fundido em direção à face oposta da junta sobreposta. Esse comportamento demonstrou a necessidade de reduzir a potência do equipamento a fim de reduzir o aporte térmico na junta. Reduzindo a potência para 975 W, originou-se o segundo corpo de prova que por sua vez não apresentou perfuração. Os corpos de prova de número um e dois são exibidos na Figura 20.

Figura 20 – Amostras preliminares um e dois



Fonte: O Autor (2026).

O Quadro 5 consolida alguns dos parâmetros testados, contendo os corpos de prova de número um ao quatro e de vinte e sete ao vinte e nove, com seus respectivos resultados estéticos e qualitativos. O quadro completo está presente no Apêndice B.

Quadro 5 – Resultado das amostras preliminares soldagem laser

CP	Potência (W)	Amplitude (mm)	Velocidade		Frequência (Hz)	Largura da marca (mm)	Tipo / Qualidade da junta
			Arame (m/min)	Soldagem (m/min)			
1	1050	3,5	68	0,65	60	3,34	Com arame / não rompeu
2	975	3,5	68	0,65	60	3,34	Com arame / não rompeu
3	900	3,5	68	0,65	60	3,05	Com arame / não rompeu
4	825	3,5	68	0,65	60	2,84	Com arame / não rompeu
27	1275	3,5	-	0,50	70	3,34	Sem arame / não rompeu
28	1350	3,5	-	0,50	70	3,46	Sem arame / não rompeu
29	1425	3,5	-	0,50	70	3,62	Sem arame / não rompeu

Fonte: O Autor (2026).

4.2 CORPOS DE PROVA DE VALIDAÇÃO TÉCNICA

Após finalizada a etapa experimental de amostras preliminares, foram confeccionados os corpos de prova para validação técnica, com base nos parâmetros de soldagem anteriormente testados.

4.2.1 Parâmetros de soldagem e aporte térmico

Os parâmetros de soldagem adotados, bem como o cálculo do aporte térmico, estão presentes no Quadro 6.

Quadro 6 – Parâmetros de soldagem e aporte térmico

Conjunto	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Método	Soldagem MIG			Soldagem laser com metal de adição			Soldagem laser sem metal de adição		
Tensão (V)	15,9	15,9	15,9						
Corrente (A)	66	66	66						
Potência (W)				975	900	825	1275	1350	1425
Amplitude (mm)				3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Frequência (Hz)				60	60	60	70	70	70
v arame (m/min)	3,9	3,9	3,9	0,68	0,68	0,68			
v soldagem (m/min)	0,61	0,76	0,81	0,75	0,56	0,69	0,51	0,46	0,50
v soldagem (mm/s)	10,19	12,73	13,50	12,50	9,38	11,54	8,57	7,69	8,33
Aporte térmico calculado (J/mm)	103,03	82,45	77,73	78,00	96,00	71,50	148,75	175,50	171,00

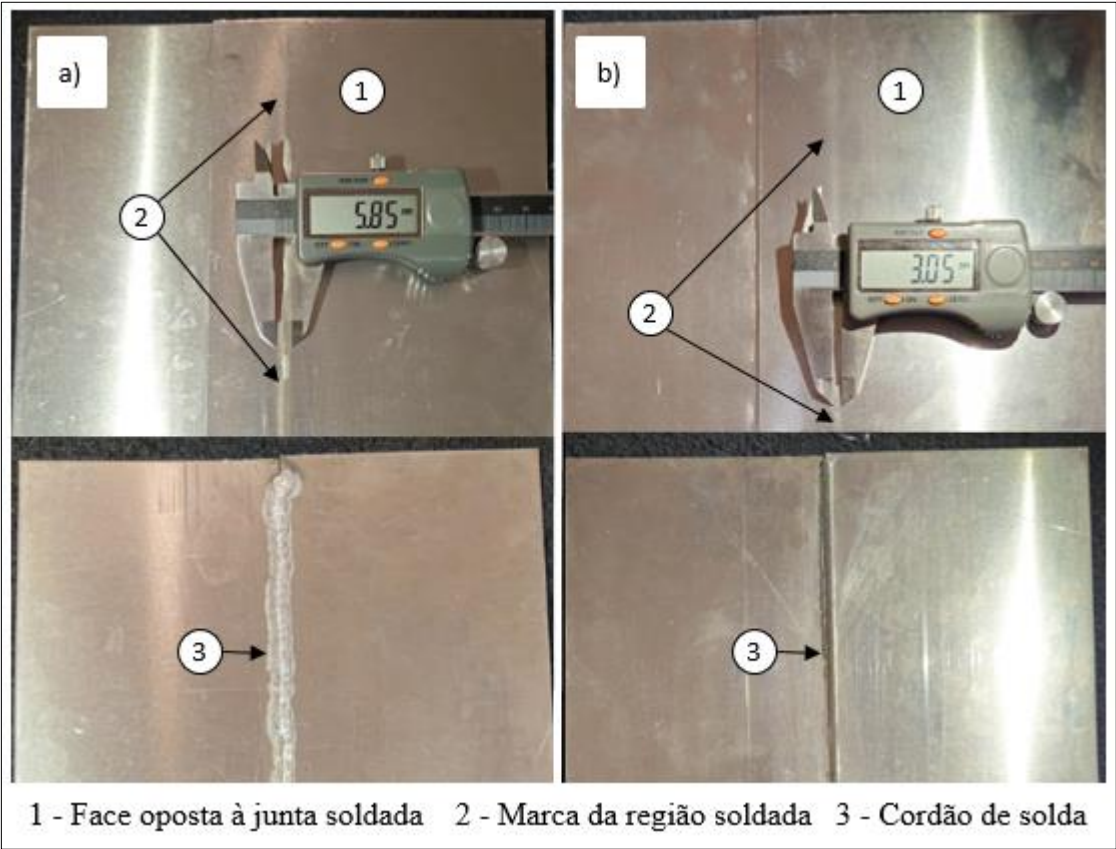
Fonte: O Autor (2026).

4.2.2 Inspeção visual dimensional e qualidade estética

A inspeção visual dimensional e de qualidade estética foi realizada com o propósito de quantificar a largura da marca externa gerada na face oposta à junta soldada e avaliar a integridade macroscópica do cordão de solda.

Nenhum dos conjuntos soldados, de ambos processos, apresentaram descontinuidades superficiais ou falta de fusão nessa análise inicial. Na Figura 21a e Figura 21b verifica-se os primeiros conjuntos soldados com os processos MIG e laser respectivamente.

Figura 21 – Inspeção visual dos conjuntos soldados



Fonte: O Autor (2026).

O Quadro 7 consolida as larguras da marca externa na face oposta à junta soldada obtidas através da medição de cada um dos nove conjuntos, relacionando-as com o respectivo aporte térmico nominal calculado em cada condição.

Quadro 7 – Largura da marca externa dos conjuntos soldados

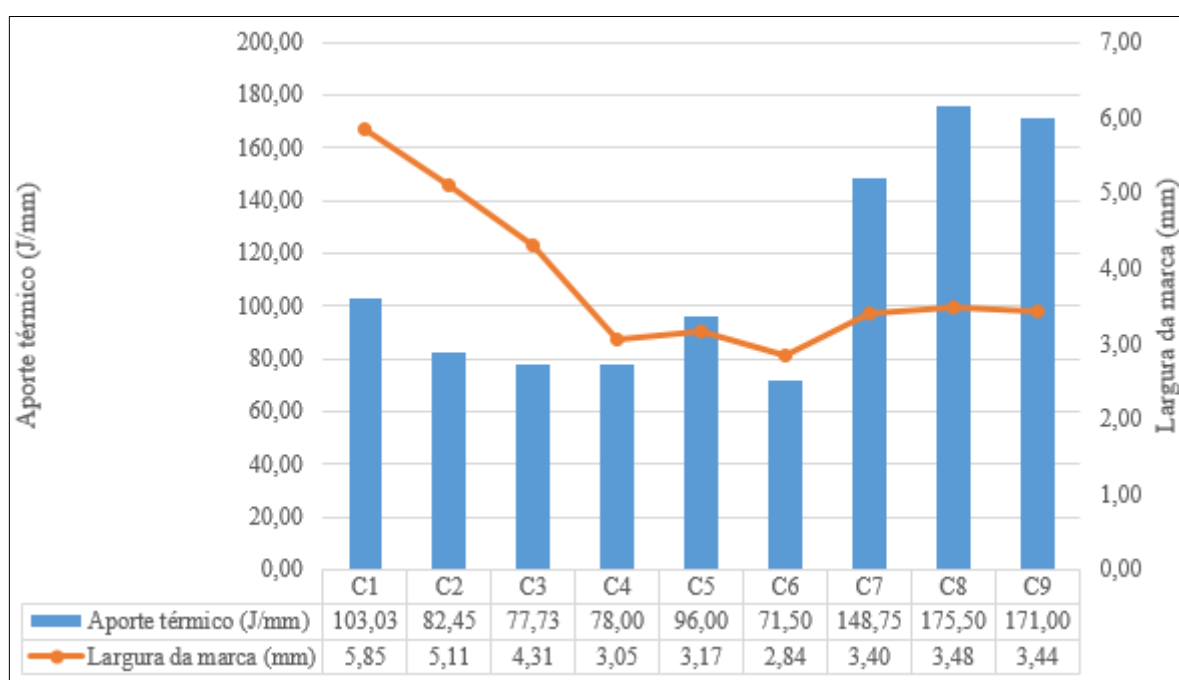
Conjunto	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Método	Soldagem MIG			Soldagem laser com arame			Soldagem laser sem arame		
Largura da marca externa (mm)	5,85	5,11	4,31	3,05	3,17	2,84	3,40	3,48	3,44
Aporte térmico calculado (J/mm)	103,03	82,45	77,73	78,00	96,00	71,50	148,75	175,50	171,00

Fonte: O Autor (2026).

Analisando os valores obtidos conforme Quadro 7, fica evidente a tendência de redução da largura da marca externa conforme a diminuição no aporte térmico dentro de um mesmo processo. Entretanto, observa-se um comportamento distinto entre as variantes do processo

laser. O processo laser sem metal de adição, mesmo apresentando um aporte térmico nominal superior ao processo com o metal de adição, resultou em larguras de marcas controladas e estreitas. Esse comportamento pode ser justificado pelo feixe laser concentrado, que acaba afetando uma faixa mais estreita de material, limitado a amplitude do feixe laser. A Figura 22 representa a largura da marca externa correlacionada com o aporte térmico.

Figura 22 – Aporte térmico e largura da marca externa



Fonte: O Autor (2026).

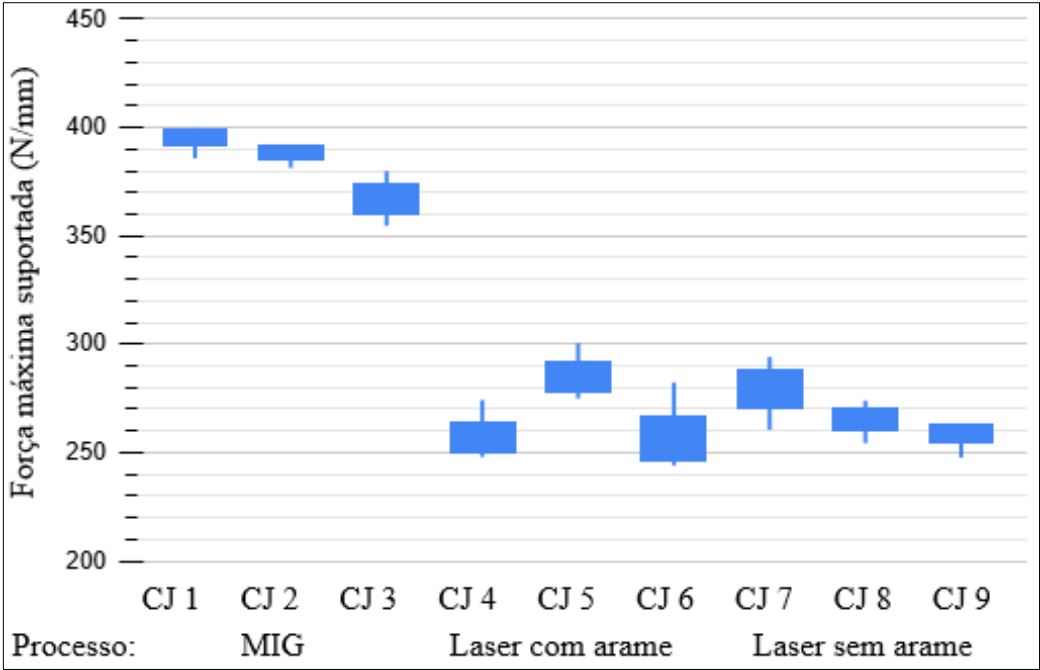
Outro ponto observado foi que a marca externa dos corpos de prova do processo MIG apresentaram uma largura inferior aos 9 mm medidos no produto conforme a Figura 14. Essa diferença pode estar associada a fatores como acessibilidade e ergonomia já que durante o processo fabril, o operador realiza a soldagem manualmente no interior do tanque calandrado com um espaço limitado se comparado às confecções dos corpos de prova que foram realizadas em uma posição plana sobre a bancada.

4.2.3 Ensaio de Cisalhamento

Os ensaios de cisalhamento em junta sobreposta sob carregamento de tração foram executados em três corpos de prova de cada um dos nove conjuntos soldados, com o intuito de observar a resistência mecânica máxima suportada por cada junta soldada. A Figura 23

apresenta as cargas máximas de ruptura obtidas em cada conjunto, com os corpos de prova com 40 mm de largura.

Figura 23 – Ensaio de cisalhamento (força máxima suportada)



Fonte: O Autor (2026).

Complementando a análise visual através da Figura 23, o Quadro 8 apresenta os resultados de resistência ao cisalhamento por milímetro de cordão soldado (N/mm). Isso permite a comparação entre a resistência mecânica suportada de cada conjunto soldado e a carga solicitada em projeto, determinando quais parâmetros validam a segurança do quebra-ondas.

Quadro 8 – Resultado ensaio de cisalhamento

Carga máxima suportada (N/mm)									
Conjunto	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Método	Soldagem MIG			Soldagem laser com arame			Soldagem laser sem arame		
CP 1	398	391	355	248	300	250	294	266	248
CP 2	400	392	380	274	275	244	260	274	262
CP 3	386	381	366	252	282	282	281	254	263
Média	395	388	367	258	286	259	278	265	258
Carga solicitada	17	17	17	17	17	17	17	17	17
Verificação	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende

Fonte: O Autor (2026).

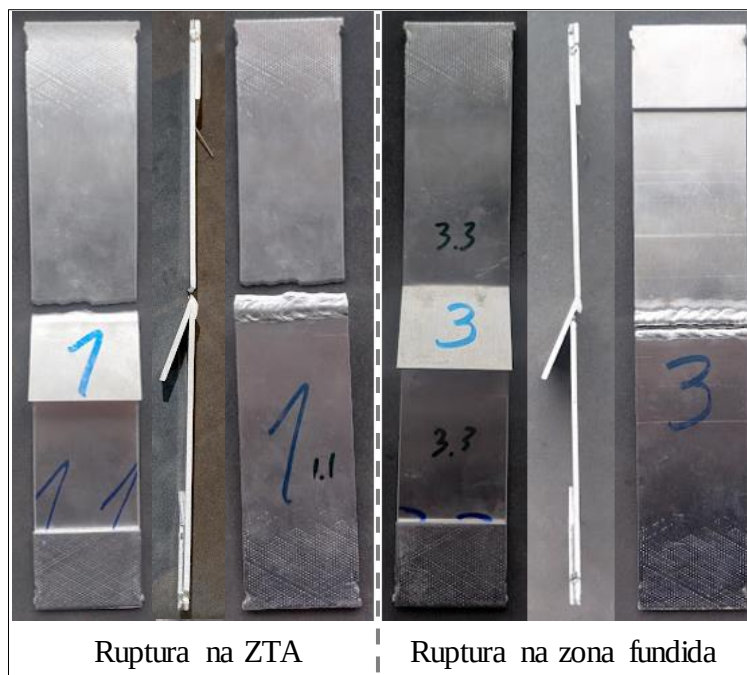
Após verificação das cargas de cisalhamento, realizou-se uma inspeção visual macroscópica das superfícies de fratura de cada corpo de prova.

Observou-se que nenhum corpo de prova de cada um dos nove conjuntos apresentou falta de fusão ou descontinuidade do cordão.

Constatou-se que os corpos de prova dos conjuntos 1 e 2 romperam na ZTA, imediatamente ao lado do cordão de solda. Esse comportamento indica que a região fundida, apresentou resistência mecânica superior à do material circundante. Desse modo, essa região apresentou ótima integridade mecânica, deslocando a falha para a ZTA que pode ter sofrido uma redução de dureza do material devido ao alívio do encruamento parcial da liga durante o ciclo térmico de soldagem.

Em contrapartida, todos os corpos de prova dos conjuntos 3 a 9, romperam diretamente na região fundida. A análise macroscópica dessas superfícies revelou a presença de poros na zona fundida. Esses poros, reduzem a área útil de solda na seção transversal, reduzindo a capacidade de carregamento, fragilizando a junta e tornando a região fundida o elo mais fraco dessa união, justificando o rompimento. A Figura 24 evidencia a região de ruptura ocorrida em cada um dos casos.

Figura 24 – Zona de ruptura



Fonte: O Autor (2026).

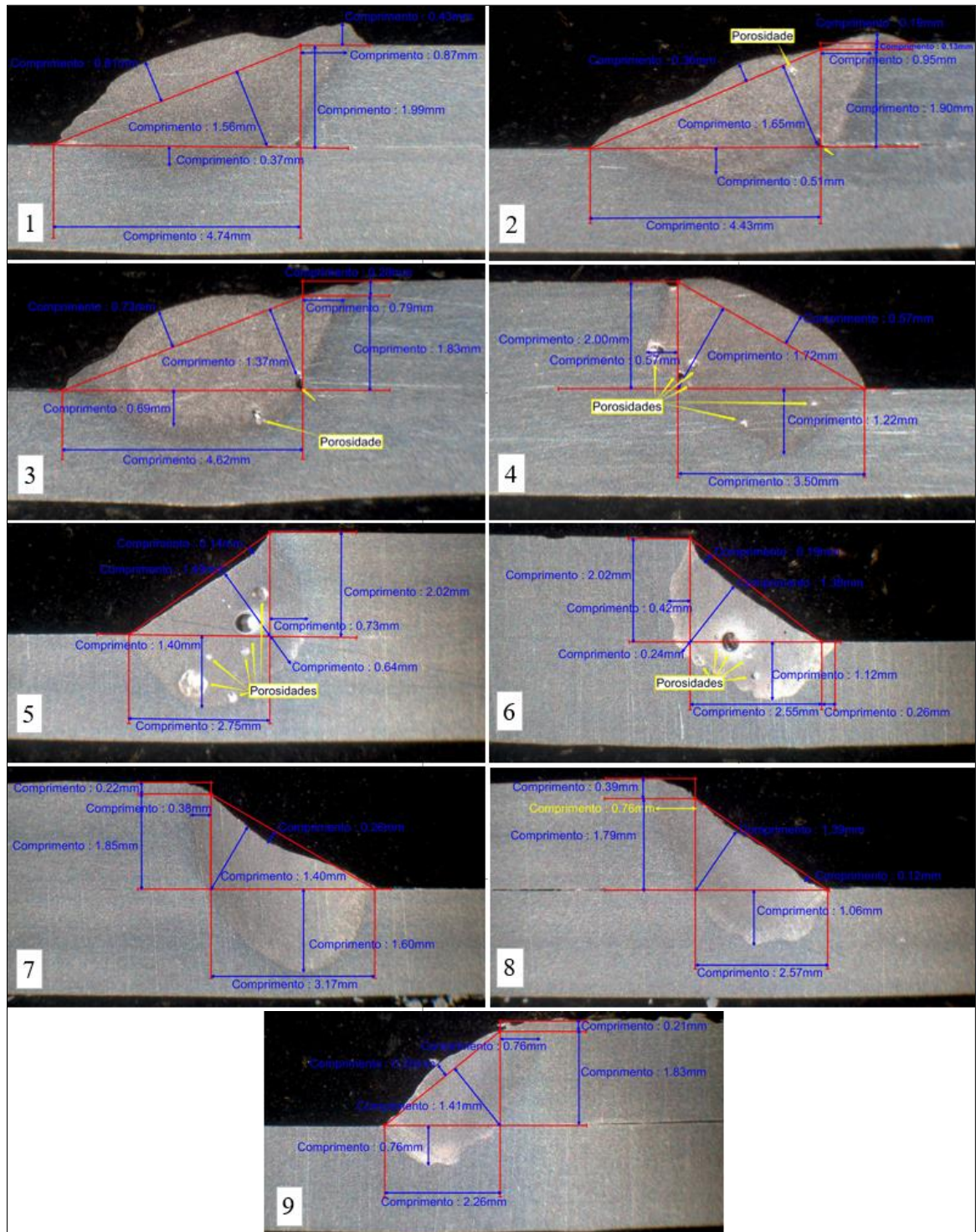
4.2.4 Análise macrográfica e perfil dureza

A análise macrográfica revelou perfis geométricos distintos e característicos para cada processo de soldagem.

Nas juntas soldadas pelo processo MIG, observou-se uma poça de fusão mais ampla e arredondada, com larguras compreendidas entre 4,43 e 4,74 mm. Já as junta soldadas a laser, apresentaram uma zona fundida mais estreita, profunda e concentrada, comportamento típico do processo onde se concentra o feixe laser, minimizando a quantidade de material afetado pelo calor, com larguras compreendidas entre 2,26 e 3,50 mm.

Por meio das imagens obtidas na análise macrográfica, constatou-se a ausência de falta de fusão ou penetração na zona fundida. Entretanto, observou-se a presença de poros conforme observado nas superfícies de fratura durante a análise visual dos ensaio de cisalhamento. As macrografias referentes aos conjuntos soldados são verificadas na Figura 25.

Figura 25 – Análise macrográfica



Fonte: O Autor (2026).

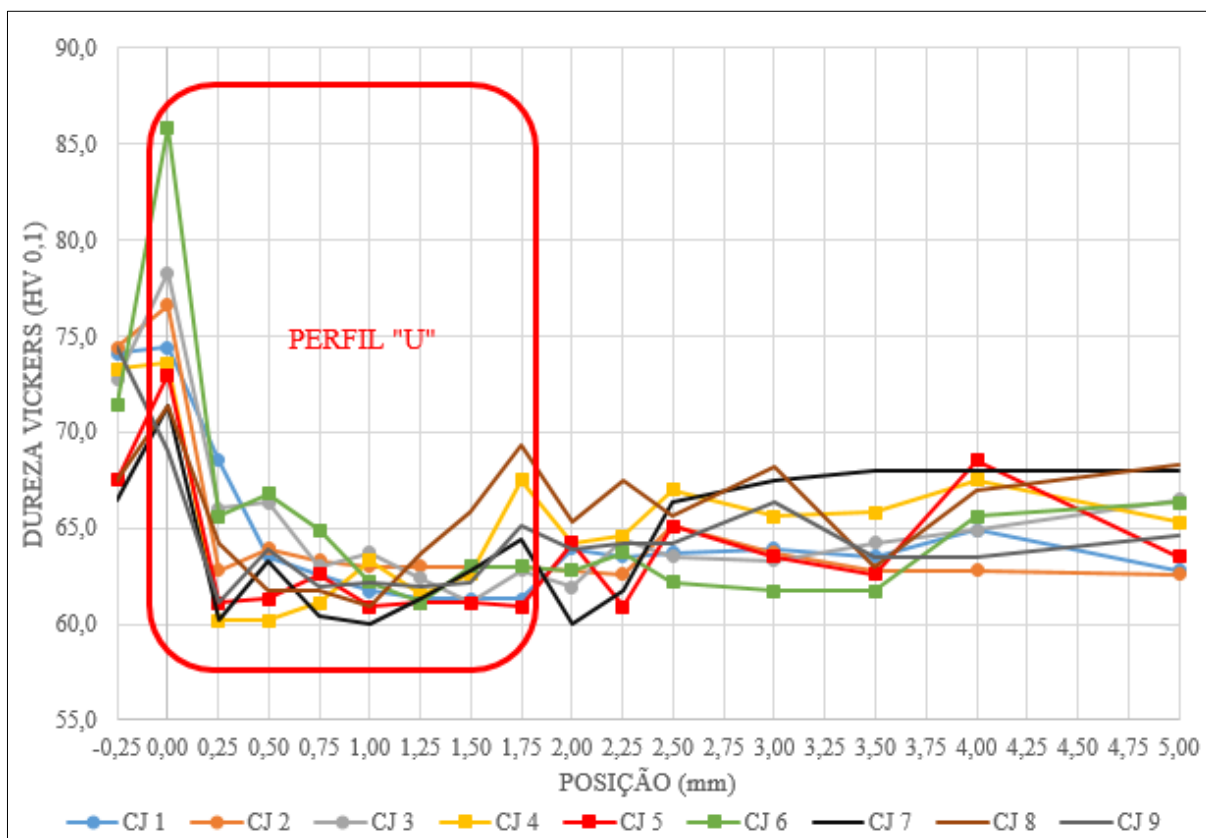
Os perfis de microdureza Vickers HV 0,1, obtidos de acordo com o mapeamento apresentado anteriormente na Figura 19, revelaram o comportamento esperado para essa liga de alumínio 5754 H22. Identificou-se um perfil em formato de “U”, onde o pico de dureza

média ocorre na linha de fusão 0,00 mm, atingindo 76,97 HV para os conjuntos com adição de arame e 70,60 HV para os conjuntos soldados sem adição de arame. Esse comportamento pode ser atribuído ao elevado teor de magnésio presente no material de adição, conforme Anexo A, enquanto os casos de soldagem autógena tendem a estar relacionado a elevada taxa de resfriamento do processo laser.

Na ZTA, compreendida entre as posições 0,25 e 1,50 mm, observa-se uma diminuição dos valores de dureza em todos conjuntos soldados, cujo valor mínimo médio é de 61,92 HV na posição 1,25 mm. Esse decréscimo localizado de dureza é justificado pelo ciclo térmico que reduz o encruamento original do estado H22 da liga.

A partir da posição 2,50 mm, a dureza estabiliza-se em média na faixa de 64,5 a 65,5 HV, valor que corresponde às propriedades nominais do material de base que não sofreu influência térmica pelo processo de soldagem. Os valores de dureza de cada ponto coletado nos nove conjuntos pode ser verificado no Apêndice C. A Figura 26 ilustra o comportamento do perfil de dureza.

Figura 26 – Resultado do mapeamento do perfil de dureza



Fonte: O Autor (2026).

4.3 ANÁLISE ECONÔMICA OPERACIONAL

Para consolidar a análise de viabilidade de substituição do processo de soldagem MIG pelo processo proposto a laser, realizou-se um levantamento dos principais custos diretos de fabricação. O Quadro 9 apresenta a composição de custos de fabricação convertidas em custo por metro linear de solda para cada conjunto soldado. A composição completa de cada custo está presente no Apêndice D.

Quadro 9 – Custo por metro linear de solda

Custo direto de fabricação por conjunto									
Conjunto	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Método	Soldagem MIG			Soldagem laser com arame			Soldagem laser sem arame		
Mão de obra (R\$/m)	2,782	2,226	2,099	2,267	3,022	2,456	3,306	3,683	3,400
Energia elétrica (R\$/m)	0,037	0,030	0,027	0,042	0,056	0,042	0,084	0,092	0,084
Gás de proteção (R\$/m)	0,736	0,589	0,556	0,600	0,800	0,650	0,875	0,975	0,900
Metal de adição (R\$/m)	1,945	1,529	1,189	0,713	0,713	0,713	0	0	0
Custo total (R\$/m)	5,50	4,37	3,87	3,62	4,59	3,86	4,26	4,75	4,38

Fonte: O Autor (2026).

A análise comparativa dos custos diretos de fabricação, consolidados no Quadro 9, revelou um comportamento que reflete tanto o planejamento metodológico experimental, quanto os desafios práticos de introdução de novos processo dentro da fábrica.

O conjunto 4 consolidou-se como o de maior competitividade econômica global, obtendo o menor custo por metro linear do estudo, R\$3,62 por metro. Esse resultado evidenciou uma das características do processo laser, a concentração do feixe laser que produz um cordão estreito, gerou uma junta que reduziu o custo referente ao material de adição. E embora a velocidade de avanço do operador de 0,75 m/min tenha sido ligeiramente inferior ao conjunto 3 do processo MIG que ficou em 0,81 m/min, a redução do material de adição acabou compensando os demais custos operacionais influenciados pela velocidade de soldagem.

No processo MIG, a variação de velocidade de soldagem consistiu em um parâmetro intencionalmente controlado conforme a metodologia definida para observar o seu efeito direto

sobre o aporte térmico na junta. Como resultado dessa variação, o conjunto 3 garantiu a melhor diluição dos custos dentro do processo MIG, obtendo um custo de R\$ 3,87 por metro linear.

Por sua vez, a falta de técnica do operador com o equipamento laser ficou nítida nos conjuntos soldados sem arame. Diante da menor familiaridade com o processo laser, a velocidade de solda acabou caindo para até 0,46 m/min no conjunto 8. Essa redução estendeu o tempo de soldagem, e acabou aumentando os custos de mão de obra direta e consumo de gás de proteção, tornando esse processo de laser autógeno o de maior custo da categoria, chegando a R\$ 4,75 por metro linear.

Para mensurar o impacto econômico da substituição do processo atual MIG pelo laser, considera-se um consumo médio mensal de soldagem de 150 quebra-ondas, onde cada peça demanda um comprimento linear de 1,14 metros, resultando numa produção total de 171 metros de cordão por mês. Conforme os dados apresentados no Quadro 9, a substituição do processo atual, representado pelo conjunto 1, pela configuração do processo laser com as configurações do conjunto 4, promove uma redução do custo do metro linear de R\$ 5,50 para R\$ 3,62, gerando uma economia de R\$ 1,88 por metro soldado. Financeiramente, o custo total mensal de fabricação é reduzido de R\$ 940,50 para R\$ 619,02, gerando uma economia de R\$ 321,48 que representa uma redução de 34,18% no custo mensal.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho promoveu uma análise técnica e econômica a respeito da viabilidade de substituição do processo de soldagem MIG manual pelo processo manual de soldagem a laser, na fixação de quebra-ondas em tanques de combustível de alumínio na liga 5754 H22.

Os ensaios de cisalhamento comprovaram que todos os nove conjuntos soldados atenderam com margem de segurança à carga de projeto solicitada de 1980 kgf para a aplicação real no tanque. Os conjuntos 1 e 2 apresentaram os maiores níveis de carregamento, rompendo a junta na ZTA.

Constatou-se que os conjuntos de 3 a 9 romperam diretamente na região fundida. As análises macrográficas, desses conjuntos, revelaram que esse comportamento pode ter ocorrido pela presença de poros na zona fundida, fragilizando o cordão de solda.

O mapeamento do perfil de dureza apresentou um comportamento de perfil em formato de “U” para todos os conjuntos. O ciclo térmico de soldagem promoveu uma redução de dureza localizada na ZTA que pode ter reduzido o encruamento original do estado H22 da liga, registrando uma média mínima de 61,92 HV na posição 1,25 mm.

A aplicação de soldagem laser manual superou o método atual MIG no quesito estético. Por ser um processo de alta densidade energética com feixe concentrado, a largura da marca externa na face oposta à região soldada foi reduzida entre 2,84 e 3,48 mm, melhorando o aspecto visual indesejado que chega atingir até 9 mm no processo MIG.

A metodologia experimental evidenciou que a variação intencional da velocidade de soldagem MIG e as oscilações de velocidade no processo laser por conta da curva de aprendizado do operador, moldaram a composição dos custos diretos. O conjunto 4, laser com adição de arame, consolidou-se como o cenário de maior eficiência econômica global do estudo atingindo o menor custo por metro linear, ficando em R\$ 3,62 por metro de cordão soldado. Esse resultado evidenciou que o cordão de solda estreito reduziu o consumo de adição de arame, compensando financeiramente a velocidade de soldagem que apresentou ser menor que a do processo MIG atual. Em contrapartida, os conjuntos soldados em laser sem adição de material, mostraram-se os mais onerosos devido à redução da velocidade de soldagem necessária para estabilizar o processo de soldagem de forma autógena sob a manipulação manual do operador em fase de aprendizado.

Ao considerar a diferença de custo por metro linear, aplicado a um lote mensal de soldagem de 150 quebra-ondas, substituindo o processo atual, representado pelo conjunto 1, pela soldagem laser do conjunto 4, foi obtida uma redução de R\$ 940,50 para R\$ 619,02. Essa

alteração gera uma economia de R\$ 321,48, representando uma redução de 34,18% nos gastos mensais de soldagem desse componente.

Por fim, a soldagem laser manual com adição de arame, com parâmetros do conjunto 4, apresenta-se no momento como a configuração mais viável para a melhora estética e financeira da soldagem do quebra-ondas, entretanto, sua aplicação definitiva fica condicionada ao refinamento dos parâmetros operacionais para o controle e redução das porosidades identificadas.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Desenvolvimento e implementação de sistema automatizado para soldagem laser da liga 5754 H22.

Análise do efeito do ciclo térmico da soldagem a laser sobre a microestrutura e tamanho de grão para a liga 5754 H22.

REFERÊNCIAS

- BERTINATTO, Igor. **Análise comparativa do processo produtivo e propriedades mecânicas resultantes dos processos de soldagem manual MIG/MAG e a LASER na união de chapas de aço com baixo teor de carbono para aplicação em máquinas agrícolas.** 2024. 86 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul Campus Ibirubá, Ibirubá, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ifrs.edu.br/handle/123456789/1891>. Acesso em: 11 out. 2025.
- MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: Fundamento e Tecnologia.** 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2017.
- CALLISTER JR, William D.; RETHWISCH, David G.. **Ciência e engenharia de materiais : uma introdução.** 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- FABBOF. **Fabbof Componentes Automotivos.** Disponível em: <https://www.fabbof.com.br/empresa>. Acesso em: 24 ago. 2025.
- FOX, Robert W. et al. **Introdução à Mecânica dos Fluidos.** 9. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2018.
- INMETRO. **Portaria INMETRO / ME número 134- de 24/03/2022.** Disponível em: http://www.inmetro.gov.br/legislacao/detalhe.asp?seq_classe=1&seq_ato=2945. Acesso em: 04 jun. 2026.
- JINAN BODOR CNC MACHINE CO. LTD. **Bodor Welder Series Handheld laser welding machine User Manual.** V1.1. Jinan: [202-?].
- KOU, Sindo. **WELDING METALLURGY.** 2. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2003.
- NORTON, Robert L.. **Projeto de máquina: Uma abordagem integrada.** 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- NOVAMETAL DO BRASIL. **Certificado de Qualidade: Código LS030730. Fio de liga de alumínio ER 5183 1,2mm.** Pindamonhangaba: Novametal do Brasil, 18 fev. 2026. Nota Fiscal n. 000109134. Documento técnico fornecido por Silversul Comércio e Representações Ltda.
- PENTEADO, Otávio Branda. **PROJETO E INSTALAÇÃO DE TANQUE DE COMBUSTÍVEL FLEXÍVEL EM AUTOMÓVEIS DE PASSEIO.** 2009. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Engenharia Automotiva, Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: <https://automotiva-poliusp.org.br/wp-content/uploads/2013/08/Penteado-Otavio-Branda.pdf>. Acesso em: 02 set. 2025.
- RODRIGUES, Clóvis Ribeiro et al. **Soldagem na Indústria do Petróleo.** Rio de Janeiro: Programa Petrobras de Editoração de Livros Didáticos, 2022. Disponível em: <https://publicacoesup.petrobras.com.br/peld/catalog/view/7/10/36>. Acesso em: 20 set. 2025.
- SANTOS, Carlos Eduardo Figueiredo dos. **Processos de Soldagem - Conceitos, Equipamentos e Normas de Segurança.** São Paulo: Érica, 2015.

SMITH, William F.; HASHEM, Javad. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. 5. ed. Porto Alegre: Amgh, 2012.

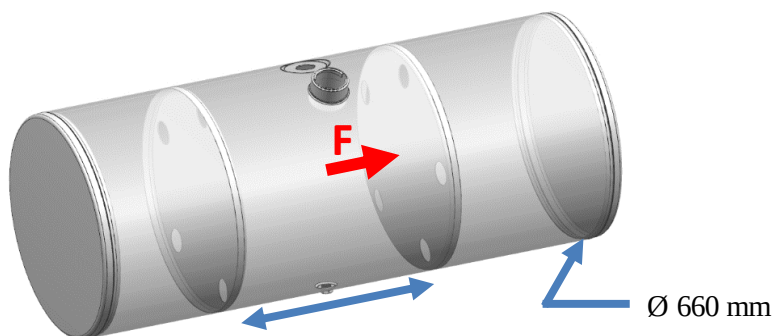
SOMMACAL, Luciano Gotardo. **ANÁLISE DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM GMAW, LASER E FRICÇÃO APLICADOS NO REAPROVEITAMENTO DE TUBOS MECÂNICOS PARA FABRICAÇÃO DE CILINDROS HIDRÁULICOS**. 2015. 80 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/xmlui/bitstream/handle/11338/2668/TCC%20Luciano%20Gotardo%20Sommacal.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 05 out. 2025.

VURAL, Murat et al. **On the friction stir welding of aluminium alloys EN AW 2024-0 and EN AW 5754-H22**. Archives Of Materials Science And Engineering, [S.L.], v. 28, n. 1, p. 49-54, jan. 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Murat-Vural-4/publication/40625036_On_the_friction_stir_welding_of_aluminium_alloys_EN_AW_2024-0_and_EN_AW_5754-H22/links/57fbc47a08aea0db5a3f5dd6/On-the-friction-stir-welding-of-aluminium-alloys-EN-AW-2024-0-and-EN-AW-5754-H22.pdf?_sg%5B0%5D=started_experiment_milestone&origin=journalDetail. Acesso em: 20 out. 2025.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem Processos e metalurgia**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1992.

APÊNDICE A

Cálculo do carregamento dinâmico aplicado ao quebra ondas em caso de impacto repentino.



$$L \text{ máximo} = 850 \text{ mm}$$

$$D = 0,660 \text{ m}$$

$$Volume = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L$$

$$L = 0,850 \text{ m}$$

$$Volume = 0,29080 \text{ metros cúbicos}$$

$$\text{Volume} = 290,80 \text{ litros}$$

$$\rho \text{ diesel} = 0,85 \text{ kg/litro}$$

$$\text{massa de diesel} = 247,18 \text{ kg}$$

De acordo com Fox et al. (2018, p. 8), a Segunda Lei de Newton é aplicada para quantificar a força da massa do fluido.

$$F = m \cdot a$$

Onde: F é força em Newton; m é massa; a é aceleração.

Conforme a Portaria INMETRO / ME número 134- de 24/03/2022 (p. 35), a definição da aceleração de projeto baseia-se no item 2.3.3 do Anexo H, que determina que o cálculo estrutural de tanques de carga rodoviários deve contemplar o carregamento dinâmico resultante de uma desaceleração longitudinal de 2G.

Segundo Norton (2013, p. 109), o impacto repentino ocorre quando a carga é liberada instantaneamente sobre uma estrutura. Embora o método analítico da energia preveja teoricamente uma força igual a o dobro do carregamento estático, o autor menciona adotar de forma conservadora um fator entre 3 e 4 em projetos de engenharia para absorver os picos reais de tensão e as incertezas físicas.

Portanto, a Segunda Lei de Newton ajustada para o impacto repentino, considerando uma desaceleração de 2G é:

$$F = (m \cdot 2a) \cdot 4$$

$$\text{Sendo } a = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$F = 19398,79 \text{ N}$$

$$F = 19,40 \text{ kN}$$

Dessa forma, estima-se que o quebra-ondas sofra uma força de aproximadamente 19,4 kN em casos de desaceleração repentina.

APÊNDICE B

Resultado das amostras preliminares soldagem a laser							
CP	Potência (W)	Amplitude (mm)	Velocidade		Frequência (Hz)	Largura da marca (mm)	Tipo / Qualidade da junta
			Arame (m/min)	Soldagem (m/min)			
1	1050	3,5	68	0,65	60	3,34	Com arame / não rompeu
2	975	3,5	68	0,65	60	3,34	Com arame / não rompeu
3	900	3,5	68	0,65	60	3,05	Com arame / não rompeu
4	825	3,5	68	0,65	60	2,84	Com arame / não rompeu
5	750	3,5	68	0,65	60	2,35	Com arame / não rompeu
6	675	3,5	68	0,65	60	1,61	Com arame / não rompeu
7	600	3,5	68	0,65	60	1,44	Com arame / não rompeu
8	600	3,5	50	0,65	60	1,46	Com arame / não rompeu
9	600	3,5	55	0,65	60	1,37	Com arame / não rompeu
10	600	3,5	55	0,65	65	1,12	Com arame / não rompeu
11	600	3,5	55	0,65	70	1,12	Com arame / não rompeu
12	675	3,5	55	0,65	70	1,21	Com arame / não rompeu
13	750	3,5	55	0,65	70	1,45	Com arame / não rompeu
14	750	4	55	0,65	70	1,45	Com arame / não rompeu
15	750	3	55	0,65	70	1,45	Com arame / não rompeu
16	600	4	55	0,65	70	1,44	Com arame / rompeu
17	600	4,5	55	0,65	70	1,44	Com arame / rompeu
18	600	5	55	0,65	70	1,44	Com arame / rompeu
19	750	4	-		70	1,76	Sem arame / rompeu
20	750	4,5	-		70	2,32	Sem arame / rompeu
21	750	5	-		70	2,91	Sem arame / rompeu
22	825	3,5	-		70	2,52	Sem arame / rompeu
23	900	3,5	-		70	2,52	Sem arame / não rompeu
24	975	3,5	-		70	2,82	Sem arame / não rompeu
25	1050	3,5	-		70	2,95	Sem arame / não rompeu
26	1125	3,5	-		70	3,00	Sem arame / não rompeu
27	1275	3,5	-		70	3,34	Sem arame / não rompeu
28	1350	3,5	-		70	3,46	Sem arame / não rompeu
29	1425	3,5	-		70	3,62	Sem arame / não rompeu

Fonte: O Autor (2026).

APÊNDICE C

Leituras de dureza Vickers (HV 0,1)													
CONJUNTO	CJ 1	CJ 2	CJ 3	CJ 4	CJ 5	CJ 6	CJ 7	CJ 8	CJ 9	Média	Máximo	Mínimo	
-0,25	74,1	74,4	72,7	73,3	67,5	71,4	66,5	67,5	74,4	71,31	74,4	66,5	
0,00	74,4	76,6	78,3	73,6	73,0	85,9	71,4	71,4	69,0	74,84	85,9	69,0	
0,25	68,5	62,8	66,0	60,2	61,1	65,6	60,2	64,2	61,1	63,30	68,5	60,2	
0,50	63,5	63,9	66,3	60,2	61,3	66,8	63,3	61,7	63,9	63,43	66,8	60,2	
0,75	62,6	63,3	63,0	61,1	62,6	64,9	60,4	61,7	61,9	62,39	64,9	60,4	
1,00	61,7	63,0	63,7	63,3	60,9	62,2	60,0	60,9	62,2	61,99	63,7	60,0	
1,25	61,3	63,0	62,4	61,5	61,1	61,1	61,3	63,7	61,9	61,92	63,7	61,1	
1,50	61,3	63,0	61,1	62,6	61,1	63,0	62,8	65,8	62,2	62,54	65,8	61,1	
1,75	61,3	63,0	62,8	67,5	60,9	63,0	64,4	69,3	65,1	64,14	69,3	60,9	
2,00	63,9	62,8	61,9	64,2	64,2	62,8	60,0	65,3	63,9	63,22	65,3	60,0	
2,25	63,5	62,6	64,4	64,6	60,9	63,7	61,7	67,5	64,2	63,68	67,5	60,9	
2,50	63,7	65,1	63,5	67,0	65,1	62,2	66,3	65,6	64,2	64,74	67,0	62,2	
3,00	63,9	63,7	63,3	65,6	63,5	61,7	67,5	68,2	66,3	64,86	68,2	61,7	
3,50	63,5	62,8	64,2	65,8	62,6	61,7	68,0	63,0	63,5	63,90	68,0	61,7	
4,00	64,9	62,8	64,9	67,5	68,5	65,6	68,0	67,0	63,5	65,86	68,5	62,8	
5,00	62,8	62,6	66,5	65,3	63,5	66,3	68,0	68,3	64,6	65,32	68,3	62,6	

Fonte: O Autor (2026).

APÊNDICE D

ANÁLISE ECONÔMICA DOS CUSTOS DIRETOS DE FABRICAÇÃO PARA COMPOSIÇÃO DO CUSTO POR METRO LINEAR DE SOLDA EM CADA CONJUNTO																
Processo	CJ	Compriment o do cordão de solda (m)	Velocidade de solda (m/min)	Energia elétrica			Mão de obra			Gás de proteção			Adição de arame			TOTAL R\$/m
				Energia consumid a (kWh)	Custo do R\$/kWh	Custo R\$/m	Custo R\$/min	Custo R\$/m	Consumo (L/min)	Custo R\$/litro	Custo R\$/min	Qtd (kg)	Custo R\$/kg	Custo total R\$/m	Custo R\$/m	
MIG	1	0,275	0,61	0,017	0,60	R\$ 0,037	R\$ 1,70	R\$ 2,782	15	R\$ 0,03	R\$ 0,45	0,005	R\$ 107,00	R\$ 0,535	R\$ 1,945	R\$ 5,50
	2	0,280	0,76	0,014	0,60	R\$ 0,030	R\$ 1,70	R\$ 2,226	15	R\$ 0,03	R\$ 0,45	0,004	R\$ 107,00	R\$ 0,428	R\$ 1,529	R\$ 4,37
	3	0,270	0,81	0,012	0,60	R\$ 0,027	R\$ 1,70	R\$ 2,099	15	R\$ 0,03	R\$ 0,45	0,003	R\$ 107,00	R\$ 0,321	R\$ 1,189	R\$ 3,87
LBW - com aramé	4	0,300	0,75	0,021	0,60	R\$ 0,042	R\$ 1,70	R\$ 2,267	15	R\$ 0,03	R\$ 0,45	0,002	R\$ 107,00	R\$ 0,214	R\$ 0,713	R\$ 3,62
	5	0,300	0,56	0,028	0,60	R\$ 0,056	R\$ 1,70	R\$ 3,022	15	R\$ 0,03	R\$ 0,45	0,002	R\$ 107,00	R\$ 0,214	R\$ 0,713	R\$ 4,59
	6	0,300	0,69	0,021	0,60	R\$ 0,042	R\$ 1,70	R\$ 2,456	15	R\$ 0,03	R\$ 0,45	0,002	R\$ 107,00	R\$ 0,214	R\$ 0,713	R\$ 3,86
LBW - sem aramé	7	0,300	0,51	0,042	0,60	R\$ 0,084	R\$ 1,70	R\$ 3,306	15	R\$ 0,03	R\$ 0,45	0	R\$ 107,00	R\$ -	R\$ -	R\$ 4,26
	8	0,300	0,46	0,046	0,60	R\$ 0,092	R\$ 1,70	R\$ 3,683	15	R\$ 0,03	R\$ 0,45	0	R\$ 107,00	R\$ -	R\$ -	R\$ 4,75
	9	0,300	0,50	0,042	0,60	R\$ 0,084	R\$ 1,70	R\$ 3,400	15	R\$ 0,03	R\$ 0,45	0	R\$ 107,00	R\$ -	R\$ -	R\$ 4,38

Fonte: O Autor (2026).

ANEXO A

CERTIFICADO DE QUALIDADE

Código: LS030730

Dt. Emissão: 18/02/2026

NF.: 000109134

ENDEREÇO DE ENTREGA

Cód. Client: 01481 /01

SILVERSUL COMERCIO E REPRESENTACOES LTDA

RUA VINTE DE SETEMBRO, 1675

95.020-450 CENTRO - CAXIAS DO SUL/RS

CLIENTE FATURAMENTO

Cód. Client: 01481 /01

SILVERSUL COMERCIO E REPRESENTACOES LTDA

RUA VINTE DE SETEMBRO, 1675

95.020-450 CENTRO - CAXIAS DO SUL/RS

ITEM	PEDIDO	PRODUTO	DESCRIÇÃO	DIAM./COMP (mm)	QUANTIDADE(kg)	VS. PEDIDO				
003	219039/03	A5183 A8 L AWS A5.10	FIO DE LIGA DE ALUMINIO ER 5183 1,2MM	1,20 / 0,0000	126,00	E-MAIL 06.01				
Norma: AWS A5.10 / ASME SFA 5.10										
Obs.:										
Análise Química - LOT / W.O.: 337556 RNA79018										
AL.	BE	CR	CU	FE	MG	MIN	SI	TI	V	ZN
Rem	0,0001	0,0977	0,0020	0,1187	4,7864	0,6174	0,0358	0,0775	0,0000	0,0034
Resultados das Provas Mecânicas										
ASPECTO SUPERFICIAL							DIAMETRO			
APROVADO							1,200MM			

O Material atende aos requisitos da especificação do pedido

Ferrite segundo WRC-1992. O valor é indicativo

*=SEMELHANTE

Nota: Reclamações serão aceitas no máximo até 90 dias da data de fornecimento. Devoluções poderão ser efetuadas após consulta e autorização do Departamento de Qualidade

Note: Complaints only accepted up 90 days after B.L. date. Material return only will be after consulting and authorization of quality department.



Controle de Qualidade

NOVAMETAL DO BRASIL - AV ALEXANDRINA DAS CHAGAS MOREIRA, 695

PINDAMONHANGABA - SP Tel: (12) 36444500 / Fax: (12) 36444501 - CEP: 12412-800

site: www.novametal.com.br

Pag.3