

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

TAIRINI SANTANA DE SOUZA OBALSKI

**DESENVOLVIMENTO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM PARA A UNIÃO DE
CHAPAS FINAS DE AÇO CARBONO ZINCADAS EM ESTRUTURAS METÁLICAS
TUBULARES VISANDO REDUÇÃO DE MASSA VEICULAR**

FLORIANÓPOLIS, 2026.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

TAIRINI SANTANA DE SOUZA OBALSKI

**DESENVOLVIMENTO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM PARA A UNIÃO DE
CHAPAS FINAS DE AÇO CARBONO ZINCADAS EM ESTRUTURAS METÁLICAS
TUBULARES VISANDO REDUÇÃO DE MASSA VEICULAR**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Mecatrônica em 2026.

Orientador:
Prof. Nelso Gauze Bonarcoso, Doutor

FLORIANÓPOLIS, 2026.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Santana de Souza Obalski, Tairini
**DESENVOLVIMENTO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM PARA A
UNIÃO DE CHAPAS FINAS DE AÇO CARBONO ZINCADAS EM ESTRUTURAS
METÁLICAS TUBULARES VISANDO REDUÇÃO DE MASSA VEICULAR**
/ Tairini Santana de Souza Obalski; orientação
de Nelso Gauze Bonarcoso. - Florianópolis, SC, 2026.

57 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Mecatrônica. Departamento
Acadêmico de Metal Mecânica.
Inclui Referências.

**1. Soldagem de sobreposição autógena. 2. Processo
laser. 3. Redução de custos. 4. Estruturas metálicas
veiculares. 5. Procedimento de união. I. Gauze Bonarcoso,
Nelso. II. Instituto Federal de Santa Catarina.
III. DESENVOLVIMENTO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM PARA
A UNIÃO DE CHAPAS FINAS DE AÇO CARBONO ZINCADAS EM ESTRUTURAS**

DESENVOLVIMENTO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM PARA A UNIÃO DE
CHAPAS FINAS DE AÇO CARBONO ZINCADAS EM ESTRUTURAS METÁLICAS
TUBULARES VISANDO REDUÇÃO DE MASSA VEICULAR

TAIRINI SANTANA DE SOUZA OBALSKI

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheira em 2026 e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 08 de julho de 2026.

Banca Examinadora:

Nelso Gauze Bonacorso, Doutor

Erwin Werner Teichmann, Doutor

Cassiano Bonin, Mestre

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder saúde, força e determinação para superar os desafios enfrentados ao longo desta jornada acadêmica.

Aos meus pais, familiares e amigos, pelo apoio, incentivo e compreensão durante todo o período de graduação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Nelso, pela orientação, dedicação, confiança e pelos valiosos ensinamentos compartilhados durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu coorientador, Dr. Erwin, pelo suporte técnico, pelas contribuições fundamentais, pela disponibilidade em auxiliar na condução dos experimentos e pelo compartilhamento de conhecimentos que enriqueceram esta pesquisa.

Aos professores do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), pelos conhecimentos transmitidos ao longo do curso, que foram essenciais para minha formação acadêmica e profissional.

À equipe do IFSC e a todos os colegas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, seja por meio de apoio técnico, sugestões ou incentivo.

Por fim, agradeço a todos que fizeram parte desta trajetória e contribuíram para a concretização deste importante objetivo em minha vida pessoal e profissional.

Muito obrigada.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo validar um processo de soldagem manual autógena aplicado à união de chapas finas de aço carbono zincadas em perfis tubulares utilizados em estruturas metálicas veiculares, visando possibilitar a redução das espessuras das chapas e, conseqüentemente, a diminuição da massa estrutural e dos custos de fabricação. O estudo está sendo desenvolvido em parceria com a empresa Comil Carrocerias e Ônibus S.A., a qual busca otimizar seu atual processo produtivo de união por soldagem GMAW de sobreposição que usa chapas de maior espessura para não comprometer a resistência mecânica e a integridade estrutural das uniões. Esse atual tipo de união por soldagem apresenta desafios significativos, como a vaporização do revestimento de zinco, a formação de porosidade, a instabilidade do arco elétrico e a ocorrência de deformações térmicas, fatores que dificultam a aplicação de espessuras reduzidas. Nesse contexto, foi investigado e avaliado pela Norma Renault 01-50-903 o uso do processo de soldagem laser que tem um menor aporte térmico para a união de chapas de aço carbono zincadas de três diferentes espessuras (0,35 mm, 0,65 mm e 0,95 mm) a perfis tubulares de aço carbono zincados de quatro diferentes espessuras (1,55 mm, 1,95 mm, 2,70 mm e 4,25 mm), gerando um total de doze combinações de uniões. Os resultados demonstraram que todas as combinações de uniões com as chapas de 0,35 mm e de 0,65 mm atenderam aos critérios de aprovação da Norma. Para a chapa de 0,95 mm, apenas as combinações de uniões com tubos de espessuras 2,70 mm e 4,25 mm atenderam aos critérios de aprovação. Conclui-se que a soldagem laser manual autógena apresenta potencial para aplicação em chapas galvanizadas finas, possibilitando a redução da massa estrutural e dos custos de fabricação.

Palavras-chave: Soldagem de sobreposição autógena. Processo laser. Redução de custos. Estruturas metálicas veiculares. Procedimento de união.

ABSTRACT

The present study aims to validate a manual autogenous welding process applied to the joining of thin galvanized carbon steel sheets to tubular profiles used in vehicle structural components, with the objective of enabling a reduction in sheet thickness and, consequently, decreasing structural weight and manufacturing costs. The study was conducted in partnership with Comil Bus and Coach Bodies S.A., which seeks to optimize its current GMAW lap welding process that requires thicker sheets to ensure the mechanical strength and structural integrity of the joints. This current welding method presents significant challenges, such as zinc coating vaporization, porosity formation, arc instability, and thermal distortion, all of which hinder the application of thinner sheets. In this context, the use of the laser welding process, which provides lower heat input, was investigated and evaluated according to Renault Standard 01-50-903 for joining galvanized carbon steel sheets of three different thicknesses (0,35 mm, 0,65 mm, and 0,95 mm) to galvanized carbon steel tubular profiles of four different thicknesses (1,55 mm, 1,95 mm, 2,70 mm, and 4,25 mm), resulting in a total of twelve joint combinations. The results demonstrated that all joint combinations using the 0.35 mm and 0.65 mm sheets met the acceptance criteria established by the standard. For the 0.95 mm sheet, only the combinations with tubular profiles of 2.70 mm and 4.25 mm thickness satisfied the acceptance criteria. It is concluded that manual autogenous laser welding has significant potential for application in thin galvanized steel sheets, enabling reductions in both structural weight and manufacturing costs.

Keywords: Autogenous lap welding. Laser process. Cost reduction. Vehicle metal structures. Joining procedure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Caracterização das uniões em CAD entre chapas e perfis.	13
Figura 2 – Uniões entre chapa e perfis pelo processo de soldagem GMAW. . .	14
Figura 3 – Evolução dos processos de soldagem.	17
Figura 4 – Princípio de funcionamento de um sistema laser.	23
Figura 5 – Representação esquemática da formação da cavidade de vaporização (<i>keyhole</i>) durante a soldagem a laser.	24
Figura 6 – Princípio simplificado de funcionamento de um laser de fibra. . . .	25
Figura 7 – Diâmetro do núcleo de uma solda ponto como critério de qualidade.	26
Figura 8 – Fonte de soldagem laser por fibra óptica modelo Qilin BWT16. . . .	30
Figura 9 – Interface de configuração dos parâmetros operacionais da fonte laser.	31
Figura 10 – Equipamentos utilizados na preparação das amostras: (a) guilhotina mecânica; (b) dobradeira manual.	32
Figura 11 – Fixação entre chapa e perfil durante os testes preliminares de soldagem.	33
Figura 12 – Etapas de desenvolvimento do dispositivo auxiliar: (a) modelo CAD; (b) protótipo fabricado por impressão 3D; (c) peça usinada em alumínio.	35
Figura 13 – Medidor digital de ângulo para auxiliar o operador na inclinação da tocha durante a execução do ponto de solda. Ajuste da inclinação de 30° da tocha com auxílio de medidor digital de ângulo.	35
Figura 14 – (a) Aparato usado nos ensaios preliminares de arrancamento dos pontos de solda arrancamento; (b) Ensaio preliminar de arrancamento realizado nos pontos de solda.	36
Figura 15 – Rotina de programação no terminal de programação do robô LBBBD para determinar o tempo de soldagem laser do ponto.	39
Figura 16 – Gabarito construído em alumínio de 450x380x90mm para fixação dos corpos de prova na posição horizontal de soldagem.. . . .	40
Figura 17 – Ajuste do cabeçote de soldagem na posição 10 da escala de regulação.	41
Figura 18 – Interface do equipamento laser e os parâmetros dos ensaios de validação.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades térmicas do aço e do zinco	18
Tabela 2 – Diâmetros médios mínimos de referência adotados para os pontos de solda.	37
Tabela 3 – Parâmetros iniciais utilizados nos ensaios de soldagem laser manual com controle automatizado do tempo de emissão.	43
Tabela 4 – Parâmetros validados para obtenção do ponto mínimo de solda laser.	46
Tabela 5 – Resultados obtidos para união da chapa de 0,35 mm nos tubos de espessuras 1,55 mm, 1,95 mm, 2,70 mm e 4,25 mm.	47
Tabela 6 – Resultados obtidos para união da chapa de 0,65 mm nos tubos de espessuras 1,55 mm, 1,95 mm, 2,70 mm e 4,25 mm.	48
Tabela 7 – Resultados obtidos para união da chapa de 0,95 mm nos tubos de espessuras 1,55 mm, 1,95 mm, 2,70 mm e 4,25 mm.	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	Computer-Aided Design
CO ₂	Dióxido de Carbono
GMAW	Gas Metal Arc Welding
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
MOP	Máquinas e Operatrizes
Nd:YAG	Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet
RSW	Resistance Spot Welding
TCP	Tool Center Point
TIG	Tungsten Inert Gas
ZTA	Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Justificativa	12
1.2	Definição do Problema	12
1.3	Objetivo Geral	14
1.4	Objetivos Específicos	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Soldagem: Conceitos Fundamentais	16
2.2	Desafio da Soldagem de Chapas Finas de Aço Zincado	17
2.2.1	Propriedades do Material e do Revestimento	17
2.2.2	Defeitos Associados à Vaporização do Zinco	18
2.2.3	Aporte Térmico em Chapas Finas	19
2.3	Alternativas para Soldagem de Chapas Finas e Zincadas	20
2.3.1	Otimização do Processo GMAW	20
2.3.2	Soldagem MIG Braze	20
2.3.3	Soldagem por Resistência a Ponto (RSW)	21
2.4	Soldagem a Laser	21
2.4.1	Princípios Físicos do Processo	22
2.4.2	Tipos de Laser em Soldagem	24
2.5	CrITÉrios de Qualidade para Soldagem por Ponto	26
3	METODOLOGIA	28
3.1	Materiais e Equipamentos	28
3.2	Ensaio Preliminares de Soldagem Laser Manual	29
3.3	Preparação dos Corpos de Prova	31
3.4	Problemas Identificados nos Ensaio Iniciais	33
3.4.1	Desenvolvimento do Dispositivo Auxiliar da Tocha	34
3.5	Ensaio Preliminares de Arrancamento	36
3.6	CrITÉrios de Validação da Solda	36
3.7	Duração da Solda Ponto Laser	38
3.8	Desenvolvimento do Gabarito para Execução dos Pontos de Solda	39
3.9	Tipos de Corpos de Prova	40
3.9.1	Determinação dos Parâmetros Iniciais de Soldagem	40
4	RESULTADOS	44
4.1	Parâmetros Validados de Soldagem	44
4.2	Resultados para Chapa de 0,35 mm	46
4.3	Resultados para Chapa de 0,65 mm	48
4.4	Resultados para Chapa de 0,95 mm	49
4.5	Discussão Geral dos Resultados	51
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	54
	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

A busca por soluções que conciliam eficiência estrutural, leveza e sustentabilidade tem impulsionado a modernização dos processos de fabricação no setor metalmeccânico. A indústria automotiva, em especial, tem investido fortemente na redução de massa veicular, uma vez que estruturas mais leves contribuem diretamente para a diminuição do consumo de combustível, a redução das emissões de poluentes e o melhor desempenho dinâmico dos veículos.

Nesse contexto, a utilização de chapas finas de aço zincadas vem se destacando como uma alternativa eficiente, pois apresenta boa resistência mecânica, baixo custo e elevada resistência à corrosão. Entretanto, a união dessas chapas com perfis de aço carbono ainda representa um desafio técnico relevante. A presença do revestimento de zinco pode ocasionar vaporização, porosidade e enfraquecimento das juntas, exigindo o controle rigoroso dos parâmetros de soldagem para evitar falhas estruturais.

O cerne desse desafio reside na drástica diferença entre as propriedades térmicas dos materiais: o revestimento de zinco possui um ponto de ebulição (aproximadamente 907 °C) muito inferior ao ponto de fusão do aço (acima de 1500 °C) (HOBART BROTHERS, 2024). Durante a soldagem a arco, como o processo MIG/MAG, o intenso calor da poça de fusão faz com que o zinco vaporize de forma intensa. Esse vapor, ao tentar escapar, gera instabilidade no arco elétrico e pode ficar aprisionado no metal de solda durante a solidificação. Como resultado, a junta soldada fica suscetível a uma série de defeitos, como porosidade excessiva, inclusões de óxido de zinco e "canais de verme" (worm tracking), que comprometem a integridade estrutural e a resistência mecânica da união (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

Segundo Brandão (2005), a redução de massa em elementos estruturais automotivos é uma das estratégias mais eficazes para aumentar a eficiência energética, desde que aliada à aplicação de aços de alta resistência e técnicas adequadas de fabricação. Nesse sentido, aprimorar os processos de soldagem que possibilitam a união de materiais distintos torna-se um fator essencial para a competitividade da indústria nacional.

Atualmente o processo de soldagem GMAW por sobreposição é o utilizado pela empresa Comil Carrocerias e Ônibus S.A., a qual enfrenta dificuldades na soldagem de chapas finas de aço zincadas em perfis tubulares de aço carbono, especialmente no que diz respeito à qualidade metalúrgica, deformações térmicas e manutenção do revestimento protetor após o processo térmico. A inexistência de um procedimento otimizado e validado tem resultado em retrabalhos, aumento de custos e perda de produtividade na linha de montagem.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo validar um processo de soldagem que possibilite a união eficiente de chapas finas de aço zincadas com perfis de aço carbono, garantindo resistência mecânica adequada, controle de deformações e redução de massa, de modo a contribuir para a melhoria do processo produtivo da empresa Comil e para o avanço tecnológico da manufatura de estruturas automotivas.

1.1 Justificativa

A soldagem de chapas finas de aço zincadas representa um tema de grande relevância industrial e acadêmica, sobretudo diante das exigências atuais por soluções estruturais mais leves, duráveis e sustentáveis. A redução de peso em componentes metálicos não apenas diminui o consumo energético dos veículos, mas também promove otimização de custos e eficiência produtiva, tornando o produto final mais competitivo no mercado.

Na Comil Carrocerias e Ônibus, essa demanda está diretamente relacionada ao desenvolvimento de novos modelos de carrocerias com menor massa total, sem comprometer a resistência estrutural e a segurança dos passageiros. Contudo, o revestimento de zinco das chapas impõe limitações importantes durante a soldagem, podendo gerar porosidade, respingos e falhas de aderência, além de comprometer o acabamento superficial e a durabilidade da união.

Assim, a validação de um processo de soldagem adequado, capaz de minimizar os efeitos térmicos e preservar a integridade do revestimento, é fundamental para a melhoria do desempenho estrutural e estético das carrocerias produzidas. Além disso, o estudo contribui para a formação de conhecimento técnico-científico aplicável, reforçando a importância da integração entre academia e indústria no desenvolvimento de soluções inovadoras e sustentáveis.

1.2 Definição do Problema

O processo de soldagem GMAW de sobreposição utiliza atualmente como material de adição o arame ER70S-6 com diâmetro de 1,0 mm e gás de proteção composto por uma mistura de 80% de argônio e 20% de CO₂. As chapas empregadas no processo apresentam espessuras variando de 0,65 mm (Aluzinc ASTM A792) até 1,95 mm (Z100/Z275) e são unidas a tubos com espessuras entre 1,55 mm (ZAR230) e 4,25 mm (SAE 1008) por meio de pontos de solda realizados em furos previamente definidos nas chapas. A posição horizontal de soldagem 2G é a predominante durante a execução das uniões por soldagem, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 2 – Uniões entre chapa e perfis pelo processo de soldagem GMAW.



Fonte: Adaptado de Comil Carrocerias e Ônibus S.A. (2026).

1.3 Objetivo Geral

Validar um processo de soldagem que possibilite a união de chapas finas de aço zincadas com perfis tubulares de aço carbono, utilizando os materiais atualmente empregados, mas permitindo a redução de espessura para diminuição de peso e custo, garantindo a qualidade estrutural e minimizando deformações.

1.4 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) **Validação da Soldagem a Laser:** Desenvolver e validar um procedimento de soldagem a laser para a união de chapas finas de aço zincado com perfis tubulares de aço carbono, visando garantir a integridade da junta soldada.
- b) **Otimização dos Parâmetros de Processo:** Determinar os parâmetros adequados de potência, tempo de aplicação, frequência e posicionamento focal do feixe laser para cada tipo de união entre chapa e tubo.

- c) **Avaliação Mecânica das Juntas Soldadas:** Realizar ensaios mecânicos de arrancamento dos pontos produzidas, avaliando o comportamento da união e os tipos de descontinuidades apresentados.
- d) **Validação Conforme Critérios Renault:** Verificar a conformidade das juntas soldadas por meio da medição do diâmetro do núcleo fundido e do diâmetro remanescente após o ensaio de arrancamento, utilizando como referência os critérios estabelecidos pela Norma Renault 01-50-903.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A soldagem de chapas finas de aço zincado apresenta desafios relacionados ao controle do aporte térmico e à vaporização do revestimento de zinco, fatores que podem comprometer a qualidade da junta soldada. Nesse contexto, a soldagem a laser destaca-se por proporcionar elevada concentração de energia, reduzida zona termicamente afetada e maior controle do processo.

Este capítulo apresenta os conceitos fundamentais relacionados à soldagem, às características dos aços zincados, aos princípios da soldagem a laser e aos critérios de qualidade utilizados para a avaliação das juntas produzidas.

2.1 Soldagem: Conceitos Fundamentais

A soldagem é um dos processos de fabricação mais amplamente utilizados na indústria metalmeccânica moderna, permitindo a união permanente de componentes metálicos por meio da aplicação de calor, pressão ou ambos. Segundo Ribeiro (2004), soldagem é o processo de união entre duas ou mais partes em que se obtém continuidade física e metalúrgica entre os materiais envolvidos, resultando em uma junta com propriedades mecânicas semelhantes ou compatíveis com o metal de base.

A soldagem ocupa um papel estratégico em setores como construção naval, indústria automotiva, fabricação de estruturas metálicas, tubulações, vasos de pressão e até mesmo em aplicações de precisão, como a indústria aeroespacial. Sua versatilidade deriva do grande número de processos existentes, que podem ser classificados conforme a forma de geração de calor, modo de proteção da poça de fusão, tipo de eletrodo e grau de automação.

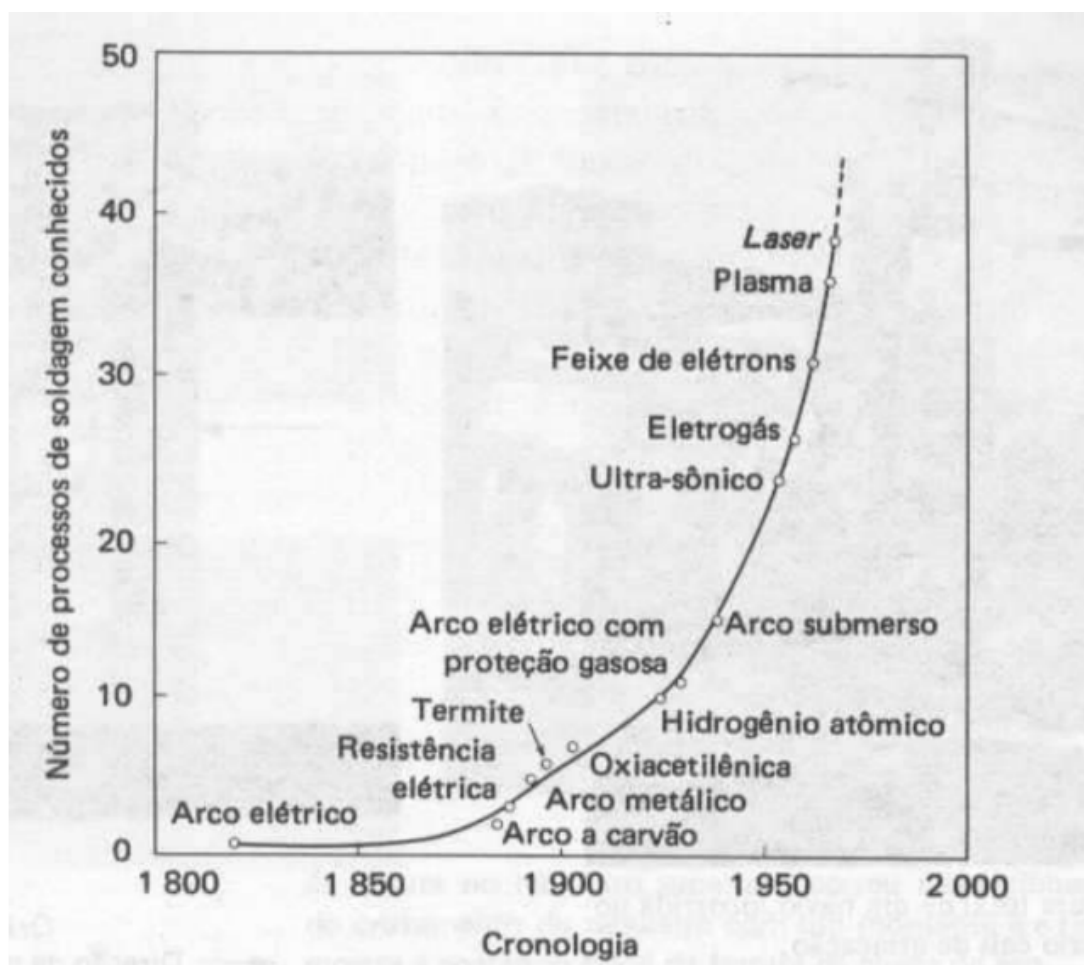
Ao executar uma junta soldada, aplicam-se conhecimentos de diversas áreas física, química, metalurgia, resistência dos materiais e elétrica. Por esse motivo, a soldagem, embora eficiente e amplamente difundida, pode introduzir alterações metalúrgicas significativas, exigindo controle rigoroso de parâmetros e procedimentos.

A prática de união de metais remonta às civilizações antigas, nas quais processos rudimentares de brasagem eram utilizados para unir ligas de cobre, ouro, chumbo e estanho, conforme registrado em escritos históricos datados de 3000 a 4000 a.C.

A soldagem moderna, com arco elétrico e fusão localizada do material, consolidou-se apenas no final do século XIX, evoluindo significativamente no século XX devido à industrialização, à construção de navios e ao esforço bélico das Guerras Mundiais. Entretanto, foi também nesse período que surgiram problemas de fratura frágil em estruturas soldadas, impulsionando estudos profundos em metalurgia da soldagem. Na Figura 3, é possível observar a evolução do processo de soldagem ao

longo dos anos.

Figura 3 – Evolução dos processos de soldagem.



Fonte: RIBEIRO, Hélio Ormeu. *Soldagem*. Florianópolis, 2004, p. 4.

2.2 Desafio da Soldagem de Chapas Finas de Aço Zincado

Os desafios na soldagem de chapas de aço zincado estão diretamente associados às propriedades do material base e do revestimento de zinco. Além disso, destaca-se a problemática da vaporização do zinco, outro fator relevante é o controle do aporte térmico, uma vez que chapas finas são mais suscetíveis a deformações, perfurações e falhas de fusão.

2.2.1 Propriedades do Material e do Revestimento

O aço zincado é amplamente empregado devido à sua alta resistência à corrosão, alcançada pela camada protetora de zinco. No entanto, essa camada é o principal complicador no processo de soldagem a arco.

No processo de soldagem GMAW, o arco elétrico gera um plasma de alta temperatura, que pode atingir valores da ordem de 6000 °C, dependendo dos parâme-

tros operacionais e da composição do gás de proteção (MODENESI; BRACARENSE; MARQUES, 2012). Essa temperatura é significativamente superior ao ponto de ebulição do zinco, de aproximadamente 907 °C, conforme apresentado na Tabela 1. Como consequência, o revestimento tende a vaporizar antes da fusão completa do aço. A expansão e a liberação desses vapores podem causar instabilidade do arco e, quando os gases permanecem aprisionados durante a solidificação da poça de fusão, favorecer a formação de porosidades e outras descontinuidades na junta soldada.

Tabela 1 – Propriedades térmicas do aço e do zinco

Material	Ponto de Fusão (°C)	Ponto de Ebulição (°C)
Aço	>1500	>3000
Zinco	~420	~907

Fonte: Autoria própria (2026).

2.2.2 Defeitos Associados à Vaporização do Zinco

Em juntas de transpasse (sobrepostas), onde o revestimento de zinco permanece aprisionado entre as chapas, o vapor gerado durante o processo de soldagem não encontra uma rota de fuga adequada. Como consequência, o vapor de zinco tende a escapar através da poça de fusão, resultando em descontinuidades que podem comprometer a integridade estrutural da junta soldada. As principais descontinuidades a esse fenômeno são:

- **Porosidade:** O vapor de zinco aprisionado, ao solidificar, gera vazios arredondados (poros) no cordão de solda. A presença excessiva de poros reduz significativamente a área efetiva metálica, comprometendo a resistência mecânica da junta.
- **Respingos:** A intensa liberação de vapor metálico provoca perturbações no plasma do arco elétrico, resultando em instabilidade do arco e aumento da quantidade de respingos. Isso dificulta a obtenção de um cordão de solda uniforme e de boa qualidade superficial.
- **Inclusões de Óxido de Zinco:** Durante o processo, o vapor de zinco reage com o oxigênio presente na atmosfera, formando óxido de zinco. Esse composto pode ficar retido na poça de fusão, originando inclusões que prejudicam a qualidade metalúrgica da junta.
- **Canais de Verme (“Worm Tracking”):** Em situações mais severas, a liberação intensa do vapor pode gerar canais alongados no interior do cordão de solda. Esse defeito é considerado crítico, pois afeta diretamente a integridade estrutural e a confiabilidade da junta.

2.2.3 Aporte Térmico em Chapas Finas

Para chapas de espessura reduzida (abaixo de 2,0 mm), o aporte térmico excessivo é um problema inerente aos processos de soldagem a arco convencionais. O aporte térmico (H) é a energia imposta ao processo por unidade de comprimento da junta e pode ser calculado, desprezando o rendimento térmico η pela equação:

$$H = \frac{UI}{V_s} \quad (1)$$

onde:

- H – aporte térmico (J/mm);
- U – tensão (V);
- I – corrente (A);
- V_s – velocidade de soldagem (mm/s).

A equação anterior é válida para condições em que corrente e tensão podem ser consideradas constantes ao longo do processo. Entretanto, em processos nos quais esses parâmetros variam com o tempo, como na soldagem pulsada e em outros modos de transferência metálica não estacionários, o aporte térmico deve ser calculado a partir da integração da potência instantânea do arco elétrico, equação (2):

$$H = \frac{\eta}{v} \int_{t_0}^{t_f} U(t) I(t) dt \quad (2)$$

onde:

- η – eficiência térmica do processo;
- v – velocidade de soldagem (mm/s);
- $U(t)$ – equação da tensão no tempo (V);
- $I(t)$ – equação da corrente no tempo (A);
- t_0 e t_f – instantes inicial e final da integração.

Nessa formulação (2), a potência instantânea do arco é dada pelo produto entre a tensão e a corrente em cada instante de tempo, permitindo uma estimativa mais precisa da energia efetivamente fornecida ao processo quando há variações dos parâmetros elétricos ao longo da soldagem (KOU, 2003).

O uso de um aporte térmico alto em chapas finas provoca:

- **Deformações térmicas (empenamentos):** O resfriamento irregular de uma região superaquecida causa tensões de contração que resultam em distorções geométricas;
- **Perfuração (burn-through):** Fusão excessiva do material, gerando furos na chapa fina;
- **Fragilização:** Ciclos térmicos severos podem induzir microestruturas indesejadas e crescimento de grão na Zona Termicamente Afetada (ZTA), especialmente em aços carbono.

O processo MAG convencional com arame de 1,00 mm e gás 20% CO₂ e 80% Ar (uma mistura ativa com CO₂, que aumenta o calor do arco) tende a operar com alto aporte de calor, sendo inadequado para a união de chapas tão finas.

2.3 Alternativas para Soldagem de Chapas Finas e Zincadas

A união de chapas finas de aço zincado apresenta desafios relacionados ao controle do aporte térmico e à vaporização do revestimento de zinco. Dessa forma, diferentes tecnologias têm sido desenvolvidas para minimizar defeitos como porosidade, perfuração da chapa e instabilidade do processo (INVERNIZZI, 2017).

2.3.1 Otimização do Processo GMAW

O processo GMAW pode ser adaptado para a soldagem de chapas finas por meio da utilização de variantes de baixo aporte térmico, como os processos de curto-circuito controlado e a soldagem pulsada. Essas tecnologias permitem maior controle da transferência metálica e redução da energia introduzida na junta, contribuindo para a diminuição de deformações e defeitos relacionados à vaporização do zinco.

Além disso, ajustes nos consumíveis, como a utilização de arames de menor diâmetro e misturas gasosas com menor teor de dióxido de carbono, podem auxiliar na redução do aporte térmico e na melhoria da estabilidade do processo, conforme descrito por Modenesi, Bracarense e Marques (2012).

2.3.2 Soldagem MIG Braze

A soldagem MIG Braze (brasagem MIG) é um processo que utiliza arco elétrico associado a um metal de adição de baixo ponto de fusão, geralmente arames de bronze à base de cobre-silício (CuSi3), em vez do arame de aço convencional (ER70S-6). Por operar com temperaturas de fusão inferiores às do aço, esse processo reduz significativamente o aporte térmico transferido à peça, preservando o revestimento de zinco nas regiões adjacentes ao cordão e minimizando a vaporização do revestimento (MODENESI; BRACARENSE; MARQUES, 2012).

Entre suas principais vantagens destacam-se a menor distorção térmica, a boa molhabilidade sobre superfícies galvanizadas e a manutenção parcial da proteção anticorrosiva na zona termicamente afetada. Por esses motivos, a soldagem MIG Braze é amplamente empregada na união de chapas finas zincadas, sobretudo nas indústrias automotiva e de eletrodomésticos, configurando-se como mais uma alternativa tecnológica à soldagem GMAW convencional para o enfrentamento dos desafios associados ao revestimento de zinco.

2.3.3 Soldagem por Resistência a Ponto (RSW)

A soldagem por resistência a ponto é amplamente utilizada na indústria automotiva para a união de chapas finas. Nesse processo, o aquecimento ocorre pela passagem de corrente elétrica através dos materiais, associado à aplicação de pressão pelos eletrodos.

Entre suas principais vantagens destacam-se o baixo aporte térmico, a elevada produtividade e a reduzida deformação das chapas. Entretanto, trata-se de um processo que depende do acesso físico simultâneo aos dois lados da junta, por meio de eletrodos posicionados em ambas as faces do material (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992). No caso específico das uniões avaliadas neste trabalho, essa exigência inviabiliza tecnicamente a aplicação do RSW, uma vez que a chapa é soldada sobre a face externa de um perfil tubular fechado, não havendo acesso ao lado interno do tubo para o posicionamento do eletrodo oposto. Por esse motivo, o RSW foi descartado como alternativa viável para a geometria de junta estudada, reforçando a busca por processos capazes de operar com acesso unilateral.

Diante das limitações dos processos convencionais, a soldagem a laser surge como uma alternativa capaz de combinar elevada produtividade, baixo aporte térmico e maior controle da energia aplicada, características particularmente importantes para a união de chapas finas zincadas.

2.4 Soldagem a Laser

A soldagem a laser é um processo de união que utiliza um feixe concentrado de luz coerente como fonte térmica para fundir metais com elevada precisão e baixo aporte térmico. Por sua capacidade de gerar soldas estreitas, profundas e com mínima distorção, tornou-se uma das tecnologias mais avançadas e estratégicas para a indústria moderna, especialmente nos setores automotivo, aeroespacial, eletrônico e biomédico.

Diferentemente dos processos convencionais como MIG/MAG e TIG, o laser concentra grande quantidade de energia em um ponto extremamente reduzido, atingindo densidades energéticas superiores a 10^6 W/cm^2 . Isso permite altas veloci-

dades de soldagem, zonas termicamente afetadas estreitas e aplicação eficiente em chapas finas, materiais sensíveis ao calor e uniões de elevada precisão dimensional.

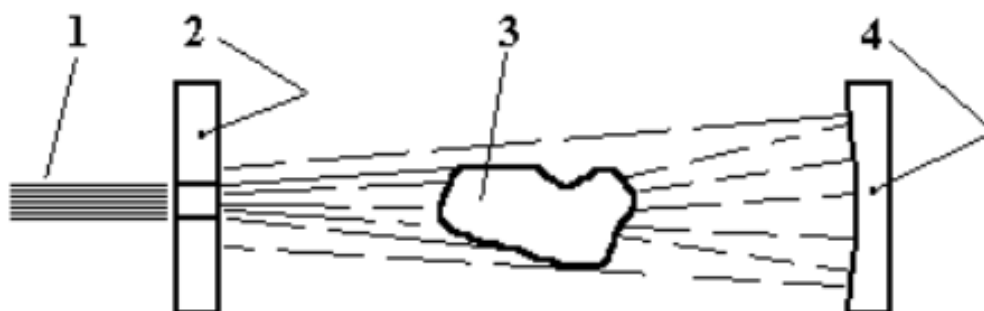
2.4.1 Princípios Físicos do Processo

O laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) baseia-se no fenômeno da emissão estimulada de radiação. O feixe gerado apresenta características que o diferenciam de outras fontes de energia, destacando-se por ser:

- Monocromático (um único comprimento de onda);
- Coerente (ondas com mesma fase);
- Direcional (baixa divergência);
- Altamente focalizável (elevada densidade de potência).

Essas características permitem concentrar grandes quantidades de energia em áreas muito reduzidas, tornando o laser uma fonte de calor altamente eficiente para processos de soldagem.

Conforme ilustrado na Figura 4, um sistema laser é composto por uma fonte de alimentação responsável pela excitação do meio ativo, pelo próprio meio ativo onde ocorre a amplificação da radiação e por uma cavidade ressonante formada por espelhos que promovem a amplificação e o direcionamento do feixe. A cavidade ressonante desempenha papel fundamental na obtenção de um feixe altamente colimado, coerente e com elevada densidade de energia, características essenciais para aplicações de soldagem e processamento de materiais (Gimenes Jr.; RAMALHO, 2006).

Figura 4 – Princípio de funcionamento de um sistema laser.

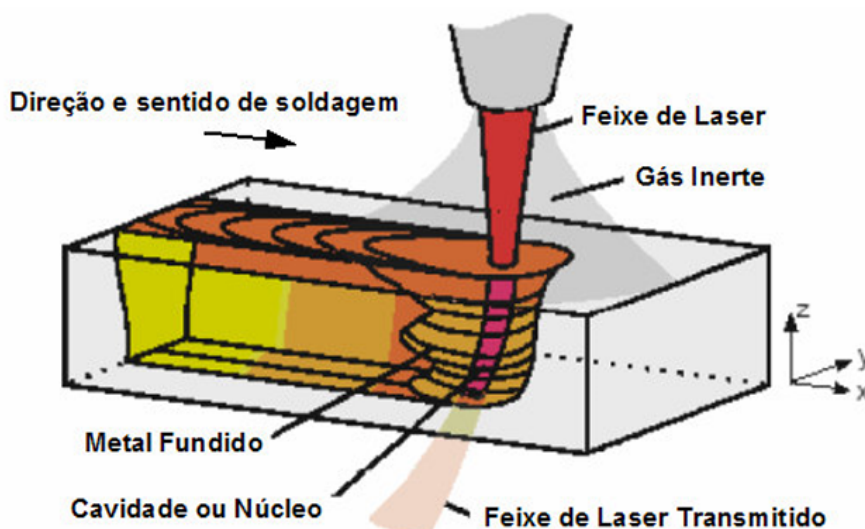
- 1 - feixe LASER**
- 2 - lente plana e espelhada com furo**
- 3 - meio ativo**
- 4 - lente concava**

Fonte: Adaptado de Gimenes Jr. e Ramalho (s.d.).

Quando o feixe laser incide sobre a superfície metálica, parte da energia é absorvida e convertida em calor, promovendo aquecimento localizado, fusão e, em determinadas condições, vaporização do material. A elevada concentração de energia característica do processo permite a obtenção de cordões estreitos, reduzida zona termicamente afetada e elevados níveis de penetração.

Em condições de elevada densidade de potência, ocorre a vaporização localizada do material, formando uma cavidade estreita e profunda denominada *keyhole*, Figura 5. Essa cavidade permite que o feixe laser penetre mais profundamente no material, aumentando a eficiência da transferência de energia e possibilitando a obtenção de soldas com elevada relação profundidade/largura.

Figura 5 – Representação esquemática da formação da cavidade de vaporização (*keyhole*) durante a soldagem a laser.



Fonte: Adaptado de Ribolla, Damoulis e Batalha (2004).

A formação do *keyhole* é uma das principais características que diferenciam a soldagem a laser dos processos convencionais de soldagem por arco elétrico, permitindo a obtenção de maiores profundidades de penetração com menor aporte térmico e reduzida zona termicamente afetada.

2.4.2 Tipos de Laser em Soldagem

A soldagem a laser pode ser realizada utilizando diferentes tipos de lasers industriais, cada qual com propriedades de emissão, eficiência e qualidade de feixe que influenciam diretamente o comportamento da solda.

Entre as fontes mais tradicionais encontra-se o laser de dióxido de carbono (CO_2), que opera em comprimento de onda de $10,6 \mu\text{m}$ e se destaca por sua elevada potência e grande profundidade de penetração. Ele é largamente utilizado na soldagem de aços estruturais e em aplicações que exigem elevada energia térmica. No entanto, é um sistema que depende do uso de espelhos e gases específicos para sua operação e não apresenta compatibilidade plena com transmissão por fibra óptica, o que limita sua integração com células robotizadas modernas (BERRETTA, 2005).

Outro tipo importante é o laser Nd:YAG (*Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet*), um laser de estado sólido cujo meio ativo consiste em um cristal de granada de ítrio e alumínio dopado com íons de neodímio (Nd^{3+}). O Nd:YAG destaca-se pela elevada qualidade óptica, boa condutividade térmica e emissão em comprimento de onda de aproximadamente 1064 nm , características que contribuíram para sua ampla utilização em aplicações industriais de soldagem e processamento de materiais (PINTO, 2014).

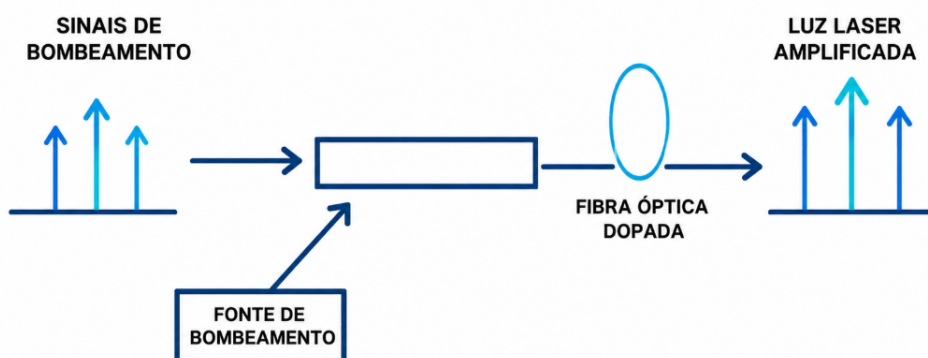
Uma de suas principais vantagens é a possibilidade de transmissão do feixe por fibra óptica, permitindo sua utilização em sistemas robotizados e em regiões de difícil acesso. Além disso, pode operar em modo contínuo ou pulsado, sendo empregado em aplicações que exigem elevada precisão e controle térmico. Embora tenha sido amplamente utilizado durante décadas, sua aplicação vem sendo gradualmente substituída pelos lasers de fibra, que apresentam maior eficiência energética e melhor desempenho operacional.

Os lasers de fibra representam hoje a tecnologia mais moderna e eficiente para soldagem industrial. São amplamente utilizados na indústria automotiva, metal-mecânica e em linhas de produção altamente automatizadas. Esses lasers utilizam fibras ópticas dopadas como meio ativo e apresentam elevada eficiência energética, tipicamente entre 40% e 50%, além de excelente qualidade do feixe laser (PACHECO, 2023).

Os lasers de fibra utilizam uma fibra óptica dopada como meio ativo para amplificação da radiação. Nesse sistema, a energia proveniente de diodos de bombeamento é transferida para a fibra, promovendo a excitação dos íons dopantes e a geração de um feixe laser de alta potência e elevada qualidade.

Conforme ilustrado na Figura 6, a luz proveniente dos diodos de bombeamento é acoplada à fibra óptica dopada, onde ocorre a amplificação da radiação por emissão estimulada. O resultado é a geração de um feixe laser altamente concentrado, caracterizado por elevada eficiência energética e excelente qualidade óptica.

Figura 6 – Princípio simplificado de funcionamento de um laser de fibra.



Fonte: Adaptado de Laser Project (2024).

Além disso, os lasers de fibra produzem um feixe de baixa divergência e elevada capacidade de focalização, permitindo a obtenção de cordões estreitos e profundos. Essa característica torna essa tecnologia especialmente adequada para a sol-

dagem de chapas finas galvanizadas, reduzindo a evaporação do zinco e minimizando defeitos como porosidade e instabilidade do processo. Sua compatibilidade com sistemas robotizados e equipamentos de alta produtividade consolidou os lasers de fibra como uma das principais tecnologias empregadas na manufatura moderna.

Devido à elevada eficiência energética, à excelente qualidade do feixe e à facilidade de integração com sistemas automatizados, os lasers de fibra tornaram-se a principal tecnologia empregada nos processos modernos de soldagem industrial.

A escolha dessa tecnologia para os ensaios realizados neste trabalho está diretamente relacionada à sua elevada eficiência energética, alta qualidade do feixe e facilidade de integração, características presentes no equipamento de soldagem a laser de fibra utilizado nos experimentos.

2.5 Critérios de Qualidade para Soldagem por Ponto

A avaliação da qualidade de juntas produzidas por soldagem a ponto pode ser realizada por meio de ensaios mecânicos de arrancamento. Nesse procedimento, as chapas são separadas mecanicamente e a região soldada é analisada quanto à sua capacidade de suportar esforços sem falha prematura.

Após o ensaio, são avaliados parâmetros geométricos associados à região fundida, como o diâmetro do núcleo, Figura 7. Esse parâmetro apresenta relação direta com a resistência mecânica do ponto e constitui um importante indicador de qualidade.

Figura 7 – Diâmetro do núcleo de uma solda ponto como critério de qualidade.



Fonte: Autoria própria (2026).

No âmbito internacional, a norma ISO 14273 estabelece procedimentos de ensaio mecânico destrutivo (arrancamento e corte) para juntas soldadas por resistência a ponto, sendo uma referência amplamente utilizada na indústria (International Organization for Standardization, 2016). Entretanto, como a empresa em que este trabalho foi desenvolvido não possuía uma norma interna para a validação desse tipo de união soldada, adotou-se como referência a norma Renault 01-50-903 (REGIE NATIONALE DES USINES RENAULT S.A., 1996). Essa norma estabelece critérios dimensionais mais rigorosos que os previstos na ISO 14273, proporcionando uma avaliação mais criteriosa da qualidade das juntas soldadas.

Dessa forma, a validação das juntas produzidas neste trabalho será realizada com base nos critérios estabelecidos pela norma Renault 01-50-903. A adoção dessa metodologia permite comparar os resultados obtidos experimentalmente com requisitos consolidados da indústria automotiva, fornecendo uma base objetiva e confiável para a avaliação da qualidade das soldas e da viabilidade do processo estudado.

3 METODOLOGIA

Esta seção descreve os procedimentos, materiais e equipamentos utilizados para a validação do processo de soldagem a laser em pontos entre chapas finas de aço zincado e perfis tubulares de aço carbono. O estudo caracteriza-se como uma pesquisa experimental de caráter aplicado, desenvolvida no Laboratório de Automação da Soldagem e Laser (WAL²Lab – Welding Automation and Laser Laboratory) do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) e no laboratório MOP, onde foram realizados os ensaios preliminares e ajustes de processo.

3.1 Materiais e Equipamentos

Para a realização dos experimentos, foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

- **Metal de Base:** Chapas de aço carbono galvanizadas fornecidas pela empresa Comil Carrocerias e Ônibus S.A., nas espessuras de 0,35 mm, 0,65 mm e 0,95 mm, além de perfis tubulares de aço carbono com espessuras de 1,55 mm, 1,95 mm, 2,70 mm e 4,25 mm.
- **Sistema de Soldagem Preliminar (Manual):** Sistema portátil de soldagem a laser por fibra óptica *Qilin BWT16*, com potência de 1500 W, composto por fonte laser, unidade de controle e cabeçote manual com sistema de oscilação do feixe (*wobble*).
- **Fonte Laser Utilizada nos Ensaios de Validação:** Fonte laser de fibra óptica com potência nominal de 3000 W, utilizada para a execução dos pontos de solda durante os ensaios de validação. A fonte foi operada com cabeçote manual de soldagem, mantendo o caráter manual do processo, enquanto os parâmetros de potência e tempo de emissão foram ajustados conforme a combinação de espessuras avaliada.
- **Sistema auxiliar de controle temporal:** Sistema automatizado empregado exclusivamente para controlar o acionamento e o tempo de emissão do feixe laser durante os ensaios de validação. O posicionamento do cabeçote e a definição das condições de soldagem permaneceram associados ao processo manual.
- **Equipamentos de Corte e Conformação:** Guilhotina mecânica para corte das chapas e dobradeira manual para conformação geométrica dos corpos de prova.
- **Sistema de Fixação:** Grampos mecânicos tipo “C” e dispositivos metálicos auxiliares para posicionamento e fixação das juntas durante a soldagem.

- **Gás de Proteção:** Argônio comercial puro, utilizado durante a soldagem, com vazão ajustada para 10 L/min.
- **Instrumentos de Medição e Análise:** Paquímetro digital calibrado, com resolução de 0,01 mm, utilizado para determinação do diâmetro do ponto de solda, após o ensaio de arrancamento das juntas.

Os ensaios foram conduzidos em conformidade com os requisitos de segurança estabelecidos pela norma IEC 60825-1 – *Safety of laser products*, que define a classificação de produtos a laser e as medidas de proteção aplicáveis a operadores em ambiente industrial, incluindo o uso de equipamentos de proteção individual (óculos com filtro específico para o comprimento de onda do laser de fibra) (International Electrotechnical Commission, 2014).

3.2 Ensaio Preliminares de Soldagem Laser Manual

Os ensaios preliminares foram realizados utilizando a fonte de soldagem laser por fibra óptica modelo Qilin BWT16, com potência nominal de 1500 W e tocha manual, Figura 8. O referido equipamento foi empregado com o objetivo de avaliar o comportamento inicial do processo na união entre chapas finas galvanizadas e perfis tubulares de aço carbono, permitindo identificar dificuldades operacionais e estabelecer uma base inicial para a obtenção do procedimento de soldagem.

Figura 8 – Fonte de soldagem laser por fibra óptica modelo Qilin BWT16.

Fonte: Autoria própria (2026).

O equipamento permite o ajuste de parâmetros como potência, frequência, ciclo de trabalho (*duty cycle*), largura de oscilação e oscilação do feixe (*wobble*). O controle dessas variáveis é fundamental na soldagem de chapas finas galvanizadas, pois o aporte térmico deve ser ajustado de forma a evitar perfuração, deformações excessivas e instabilidades associadas à vaporização do revestimento de zinco.

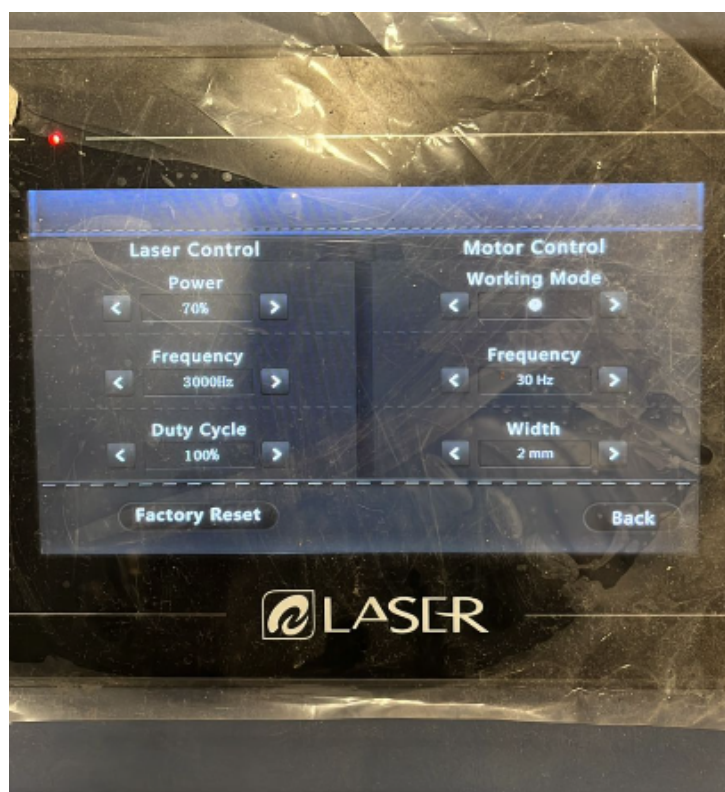
As principais funcionalidades exploradas durante os ensaios preliminares foram:

- **Oscilação do Feixe (*Wobble*):** utilizada para distribuir a energia do feixe sobre uma área maior e favorecer a formação do ponto de solda.
- **Controle de Potência:** utilizado para ajustar a intensidade do feixe laser aplicado à junta.
- **Controle de Frequência:** utilizado para ajustar a frequência de modulação do laser durante a emissão do feixe.

- **Ciclo de Trabalho (*Duty Cycle*):** utilizado para determinar o percentual em que o feixe permanece ativo durante o ciclo de operação.
- **Largura de Oscilação:** utilizada para definir a amplitude de movimentação do feixe e influenciar a dimensão superficial do ponto soldado.

A interface de configuração utilizada para ajuste dos parâmetros operacionais da fonte laser é apresentada na Figura 9.

Figura 9 – Interface de configuração dos parâmetros operacionais da fonte laser.

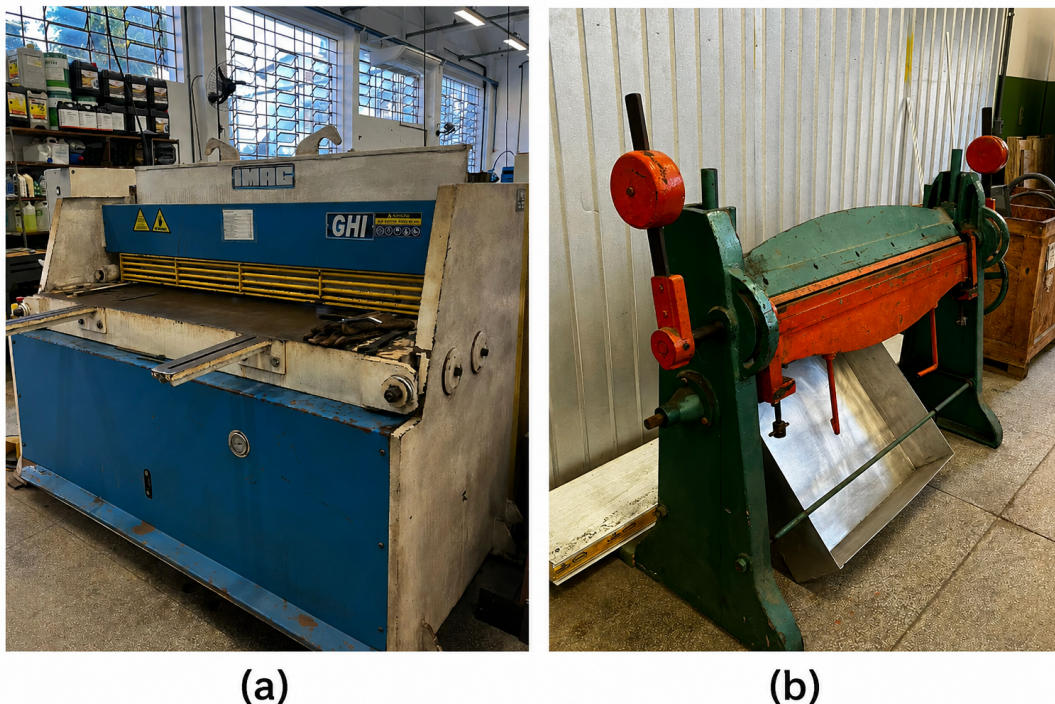


Fonte: Autoria própria (2026).

3.3 Preparação dos Corpos de Prova

Inicialmente, as chapas foram cortadas utilizando guilhotina mecânica, Figura 10(a), buscando garantir uniformidade dimensional entre as amostras. Posteriormente, parte das chapas foi conformada em dobradeira manual, Figura 10(b), para obtenção da geometria necessária aos ensaios experimentais.

Figura 10 – Equipamentos utilizados na preparação das amostras: (a) guilhotina mecânica; (b) dobradeira manual.



Fonte: Autoria própria (2026).

Os corpos de prova foram preparados em configuração de junta sobreposta entre chapas galvanizadas e perfis tubulares de aço carbono, reproduzindo condições similares às encontradas em estruturas metálicas veiculares.

Após a preparação geométrica, as amostras foram posicionadas e fixadas mecanicamente com grampos tipo “C”, buscando minimizar movimentações durante a soldagem e garantir contato adequado entre chapa e tubo, Figura 11.

Figura 11 – Fixação entre chapa e perfil durante os testes preliminares de soldagem.



Fonte: Autoria própria (2026).

3.4 Problemas Identificados nos Ensaios Iniciais

Durante os ensaios preliminares, observou-se a reflexão do feixe laser sobre a superfície das chapas zincadas. Parte da radiação refletida era direcionada ao conjunto óptico do cabeçote, provocando aquecimento e contaminação da lente de proteção. Esse comportamento foi associado às características refletivas da superfície zincada e ao posicionamento inicial da tocha em relação à junta.

Além de aumentar o risco de danos aos componentes ópticos, a variação manual da inclinação da tocha dificultava a manutenção de uma condição geométrica constante entre os pontos de solda. Dessa forma, tornou-se necessário estabelecer um ângulo de trabalho que direcionasse a radiação refletida para uma região afastada do cabeçote e que pudesse ser mantido durante os ensaios.

Após a análise do comportamento do processo, adotou-se uma inclinação de aproximadamente 30° entre a tocha e a superfície da junta. Essa condição contribuiu para reduzir o retorno da radiação ao conjunto óptico, proporcionando maior estabilidade durante a execução dos pontos e menor ocorrência de aquecimento e contaminação da lente de proteção.

Também se observou que a oscilação do feixe (*wobble*) favoreceu a distri-

buição da energia sobre a região de soldagem, reduzindo sua concentração em uma área restrita da chapa. Entretanto, como a manutenção manual do ângulo ainda estava sujeita a variações, foi desenvolvido um dispositivo auxiliar para fixar a posição angular da tocha em relação ao vetor normal do plano da chapa.

3.4.1 Desenvolvimento do Dispositivo Auxiliar da Tocha

Com o objetivo de manter constante a inclinação do laser nos ensaios, foi desenvolvido um dispositivo auxiliar para ser acoplado ao bocal da tocha. A proposta inicial consistia em utilizar uma ferramenta física que servisse como referência geométrica para o operador, mantendo a tocha orientada com inclinação aproximada de 30° em relação ao vetor normal do plano da chapa durante a execução dos pontos de solda.

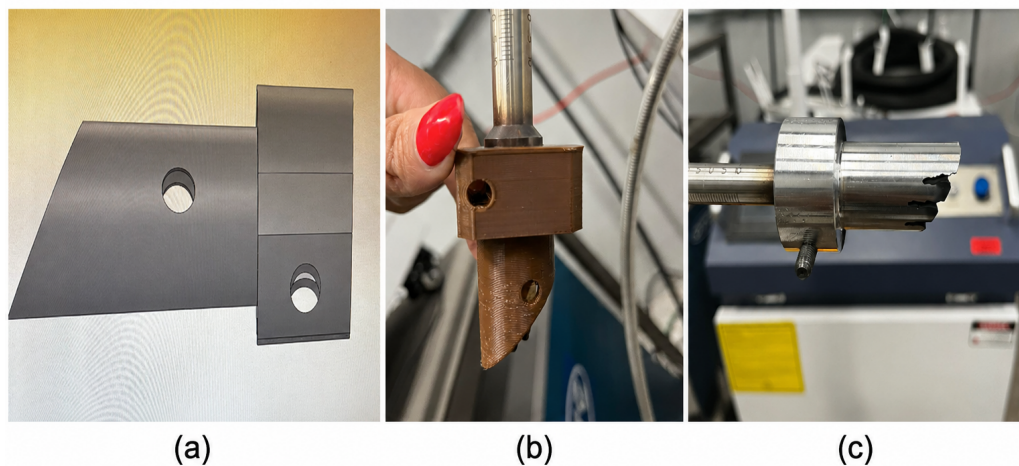
O dispositivo foi inicialmente projetado no software SolidWorks, a Figura 12(a) com geometria definida para permitir o acoplamento ao bocal da tocha e orientar durante a soldagem. A partir do modelo desenvolvido, foi fabricado um primeiro protótipo por impressão 3D, Figura 12(b), com o objetivo de avaliar a geometria da peça, sua adaptação ao bocal e sua funcionalidade durante os ensaios preliminares.

Entretanto, durante os testes com o protótipo impresso em 3D, verificou-se que a proximidade com a região de soldagem e o aquecimento gerado pelo processo provocaram deformação térmica e derretimento parcial do material polimérico. Dessa forma, essa versão não apresentou rigidez suficiente para ser utilizada de maneira contínua nos ensaios.

Com o objetivo de eliminar o problema térmico do dispositivo, foi desenvolvida posteriormente uma nova versão usinada em alumínio. Mesmo com a realização de furos na peça, Figura 12(c), buscando permitir a passagem e o escoamento dos gases gerados durante a soldagem, observou-se que o dispositivo dificultava a saída adequada dos gases na região próxima ao bocal. Como consequência, ocorreu aquecimento excessivo da ferramenta, geração de fumaça e escurecimento da superfície interna do dispositivo e da região próxima à tocha.

Além disso, a presença do dispositivo usinado interferiu nas condições de soldagem, favorecendo o acúmulo de calor e o derretimento do terminal metálico de contato da tocha. Por esse motivo, a versão em alumínio também não foi utilizada nos ensaios de validação.

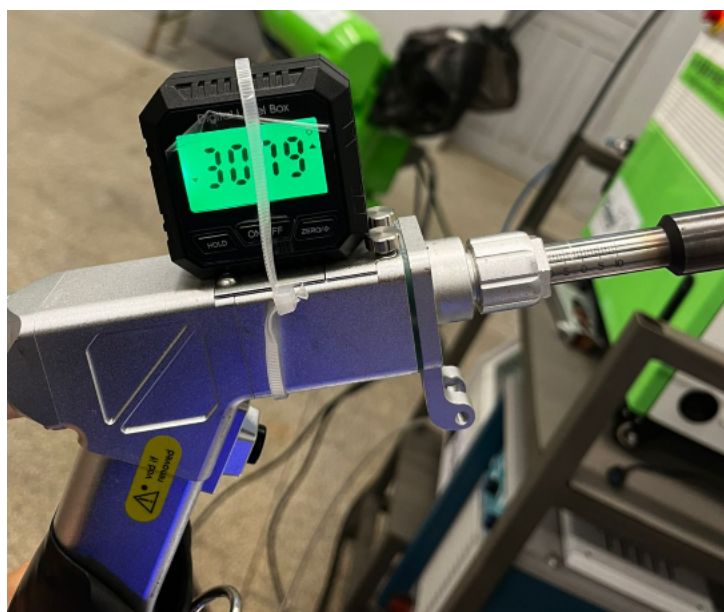
Figura 12 – Etapas de desenvolvimento do dispositivo auxiliar: (a) modelo CAD; (b) protótipo fabricado por impressão 3D; (c) peça usinada em alumínio.



Fonte: Autoria própria (2026).

Em função das limitações observadas nas versões fabricadas, optou-se por ajustar a inclinação da tocha em relação a chapa com auxílio de um medidor digital de ângulo, Figura 13.

Figura 13 – Medidor digital de ângulo para auxiliar o operador na inclinação da tocha durante a execução do ponto de solda. Ajuste da inclinação de 30° da tocha com auxílio de medidor digital de ângulo.



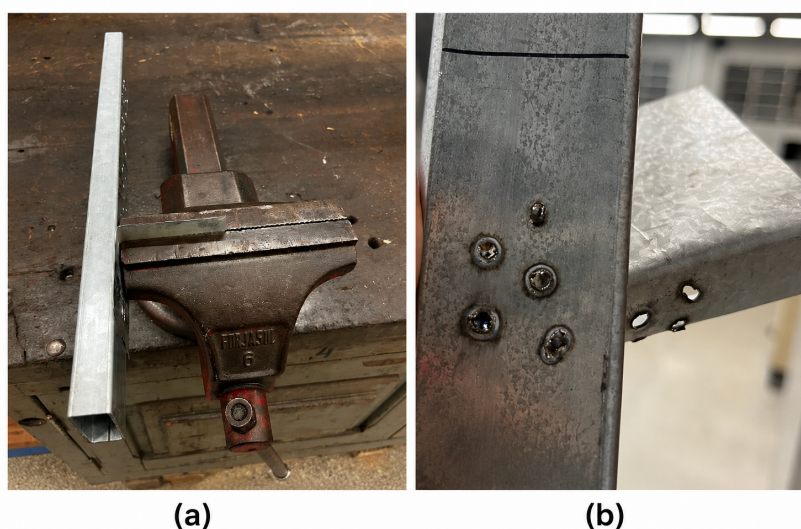
Fonte: Autoria própria (2026).

3.5 Ensaios Preliminares de Arrancamento

Antes da definição dos parâmetros finais de soldagem, foram realizados ensaios preliminares de arrancamento com o objetivo de avaliar qualitativamente a resistência dos pontos produzidas por soldagem a laser.

Para a realização dos ensaios, foi utilizada uma morsa de bancada, Figura 14(a), para auxiliar no afastamento das peças soldadas.

Figura 14 – (a) Aparato usado nos ensaios preliminares de arrancamento dos pontos de solda arrancamento; (b) Ensaio preliminar de arrancamento realizado nos pontos de solda.



Fonte: Autoria própria (2026).

Após a execução dos pontos de solda na posição horizontal de soldagem, as amostras foram posicionadas na morsa e submetidas a esforços mecânicos do ensaio de arrancamento para separação das peças, Figura 14(b). Na sequência a inspeção visual permitiu verificar o comportamento da junta, a ocorrência de falhas na região soldada e a formação ou não do botão de solda após o arrancamento.

3.6 Critérios de Validação da Solda

A validação dos pontos soldados será realizada por meio de ensaios mecânicos de arrancamento, também denominados ensaios de *déboutonnage*. Como referência, serão utilizados os critérios dimensionais estabelecidos pela norma Renault 01-50-903, originalmente aplicável à soldagem por resistência a ponto.

Embora o processo estudado seja a soldagem laser manual autógena, essa norma foi adotada como referência para a avaliação dimensional dos pontos soldados, permitindo comparar os resultados experimentais com critérios utilizados na indústria automotiva.

Após o ensaio de arrancamento, será avaliado o diâmetro médio do ponto de solda, representado por D . A medição será realizada na região correspondente ao ponto soldado remanescente após a separação das peças. Para isso, serão medidas a maior dimensão (D_1) e a menor dimensão (D_2) do ponto, sendo o diâmetro médio calculado conforme a Equação 3.

$$D = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (3)$$

em que:

- D – diâmetro médio do ponto soldado após o arrancamento (mm);
- D_1 – maior dimensão medida no ponto soldado após o arrancamento (mm);
- D_2 – menor dimensão medida no ponto soldado após o arrancamento (mm).

Os valores de referência para o diâmetro médio do ponto de solda foram definidos com base no Anexo 2 da Norma Renault 01-50-903. Esse documento relaciona o diâmetro mínimo do ponto à espessura da chapa mais fina presente na união.

Como as espessuras de 0,35 mm e 0,65 mm não são apresentadas diretamente no referido anexo, adotaram-se, de maneira conservadora, os requisitos correspondentes às espessuras imediatamente superiores disponíveis, respectivamente 0,50 mm e 0,70 mm. Para a chapa de 0,95 mm, foi utilizado diretamente o valor indicado na norma.

Tabela 2 – Diâmetros médios mínimos de referência adotados para os pontos de solda.

Chapa ensaiada (mm)	Espessura de referência (mm)	Diâmetro médio mínimo D_m (mm)
0,35	0,50	3,0
0,65	0,70	3,8
0,95	0,95	4,5

Fonte: Adaptado da Norma Renault 01-50-903 (1996).

O ponto de solda será considerado aprovado quando o diâmetro médio medido após o ensaio de arrancamento for igual ou superior ao valor mínimo especificado para a respectiva espessura de chapa, conforme apresentado na Tabela 2. Adicionalmente, o ponto não deverá apresentar falhas visuais que comprometam sua integridade estrutural.

Ressalta-se, contudo, que a norma Renault 01-50-903 é específica dessa montadora, não possuindo caráter normativo geral no setor automotivo, sendo aqui empregada apenas como referência dimensional objetiva para fins de comparação.

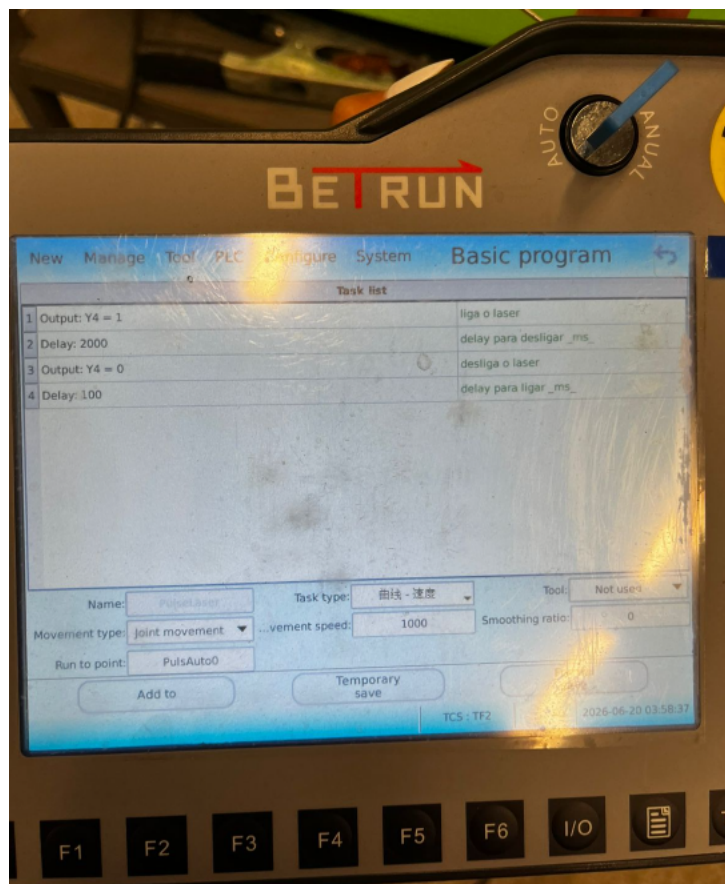
3.7 Duração da Solda Ponto Laser

Os ensaios preliminares foram realizados com o sistema portátil de soldagem laser manual por fibra óptica Qilin BWT16, equipado com uma fonte laser de 1500 W. O equipamento permitia ajustar parâmetros como potência, frequência, largura de oscilação do feixe e ciclo de trabalho (*duty cycle*). Entretanto, seu acionamento manual não permitia determinar com precisão o tempo de emissão do feixe laser.

Nessa condição, o tempo de aplicação dependia diretamente da ação do operador, o que introduzia variações entre os pontos produzidos. Como a energia nominal fornecida ao ponto está relacionada à potência e ao tempo de emissão, essa variação comprometia a repetibilidade dos ensaios e dificultava a comparação entre as diferentes condições experimentais.

Para eliminar a influência do operador sobre o tempo de soldagem, a fonte laser de fibra óptica com potência nominal de 3000 W foi integrada ao controlador de um robô industrial articulado de seis graus de liberdade do fabricante LBBBD LT1600. Nessa célula de fabricação, o robô industrial foi utilizado somente para determinar o tempo de duração da soldagem de cada ponto, responsável pelo acionamento e pela interrupção da emissão do feixe laser em intervalos previamente especificados na sua programação, Figura 15. Ressalta-se que, embora a fonte laser estivesse integrado ao robô industrial, o tipo de soldagem laser permaneceu de execução manual.

Figura 15 – Rotina de programação no terminal de programação do robô LBBBD para determinar o tempo de soldagem laser do ponto.



Fonte: Autora própria (2026).

A utilização dessa rotina permitiu estabelecer tempos específicos de emissão, reduzindo a variação associada ao acionamento manual e aumentando a repetibilidade dos pontos de solda. Com isso, tornou-se possível determinar de forma mais precisa a energia fornecida ao ponto de solda, potência laser vezes tempo, em cada condição experimental.

3.8 Desenvolvimento do Gabarito para Execução dos Pontos de Solda

Com o objetivo de reproduzir as condições reais de aplicação encontradas na linha de produção da empresa, foi desenvolvido um gabinete metálico para fixação dos corpos de prova na posição de soldagem horizontal durante a realização dos ensaios experimentais.

A utilização desse dispositivo permitiu que as soldagens fossem executadas na mesma posição de soldagem empregada no processo industrial, garantindo maior representatividade dos resultados obtidos e maior confiabilidade na validação do procedimento de soldagem.

O gabarito foi construído utilizando perfis estruturais de alumínio e dispositivos de fixação mecânica, proporcionando rigidez estrutural e repetibilidade no posicionamento e fixação dos corpos de prova, Figura 16.

Figura 16 – Gabarito construído em alumínio de 450x380x90mm para fixação dos corpos de prova na posição horizontal de soldagem..



Fonte: Autoria própria (2026).

3.9 Tipos de Corpos de Prova

Para os ensaios experimentais, foram definidas combinações entre chapas finas de aço carbono zincadas e perfis tubulares de aço carbono, considerando as espessuras utilizadas e/ou de interesse para o processo produtivo da empresa parceira.

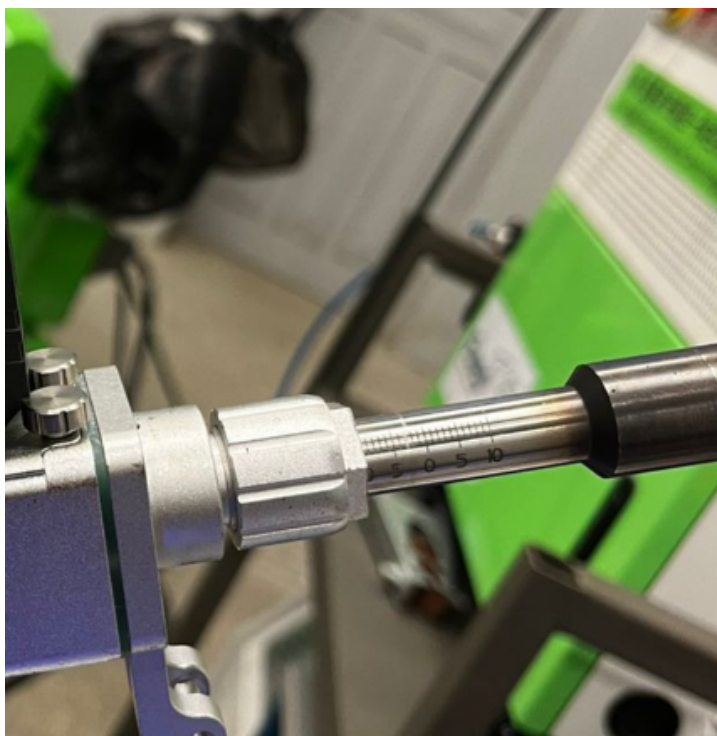
3.9.1 Determinação dos Parâmetros Iniciais de Soldagem

Antes da definição dos parâmetros de potência e tempo de emissão laser, foi ajustada a posição focal do cabeçote de soldagem. Para todos os ensaios, utilizou-se a posição 10 da escala de regulagem do cabeçote, Figura 17, mantida constante durante a execução dos pontos.

Ressalta-se que a posição 10 corresponde à marcação indicada na escala do próprio cabeçote de soldagem, não sendo interpretada neste trabalho como uma

distância focal absoluta em milímetros. A distância focal nominal é definida pelas características ópticas da lente utilizada, enquanto a escala do cabeçote foi empregada como referência prática de regulagem operacional.

Figura 17 – Ajuste do cabeçote de soldagem na posição 10 da escala de regulagem.



Fonte: Autoria própria (2026).

Esse ajuste foi adotado experimentalmente com o objetivo de aumentar a área de interação do feixe laser com a superfície da junta. Com uma área de interação maior, buscou-se obter pontos de solda com maior diâmetro, adequados aos critérios dimensionais adotados para a validação das juntas.

Para compensar a distribuição da energia em uma área mais ampla e assegurar a fusão na interface entre a chapa e o tubo, foram utilizados valores mais elevados de potência e tempo de emissão.

Ressalta-se que o valor 10 corresponde à marcação da escala de ajuste do cabeçote, não sendo interpretado neste trabalho como uma distância focal absoluta. A posição foi mantida constante em todos os ensaios para garantir repetibilidade entre as condições avaliadas.

Após a definição e a manutenção da posição focal, foi estabelecida uma matriz inicial de potência e tempo de emissão para as diferentes combinações de espessura entre chapa e tubo. A seleção desses valores foi orientada pela energia nominal incidente no ponto de solda, utilizada como grandeza de comparação entre as condições experimentais.

A energia fornecida à junta foi estimada a partir do produto entre a potência do feixe laser e o tempo de permanência sobre a superfície do material, conforme apresentado na Equação 4.

$$E = P \cdot t \quad (4)$$

onde:

- E – energia aplicada ao ponto de solda (J);
- P – potência do laser (W);
- t – tempo de soldagem (s).

A utilização dessa relação permitiu estimar a quantidade de energia necessária, servindo como critério para a seleção dos valores iniciais de potência e tempo empregados nos ensaios. Dessa forma, materiais de maior espessura demandaram maiores níveis de energia, obtidos por meio do aumento da potência do laser, do tempo de exposição ou da combinação de ambos.

Segundo Steen e Mazumder (STEEN; MAZUMDER, 2021) e Katayama (KATAYAMA, 2013), a energia aplicada constitui um dos principais parâmetros da soldagem a laser, influenciando diretamente a profundidade de penetração, o volume fundido e a qualidade da junta soldada.

Com base nesse critério, foram definidos os parâmetros iniciais apresentados na Tabela 3. Esses valores foram utilizados como ponto de partida para os ensaios experimentais e posteriormente ajustados de acordo com os resultados obtidos nos testes de validação.

Tabela 3 – Parâmetros iniciais utilizados nos ensaios de soldagem laser manual com controle automatizado do tempo de emissão.

CP	Chapa (mm)	Tubo (mm)	Potência (W)	Tempo (ms)	Energia (J)
CP01	0,35	1,55	1000	900	900
CP02	0,35	1,95	1100	900	990
CP03	0,35	2,70	1200	1000	1200
CP04	0,35	4,25	1300	1200	1560
CP05	0,65	1,55	1200	900	1080
CP06	0,65	1,95	1300	1000	1300
CP07	0,65	2,70	1400	1200	1680
CP08	0,65	4,25	1500	1400	2100
CP09	0,95	1,55	1400	1100	1540
CP10	0,95	1,95	1500	1300	1950
CP11	0,95	2,70	1600	1500	2400
CP12	0,95	4,25	1700	1700	2890

Fonte: Autoria própria (2026).

4 RESULTADOS

A análise foi conduzida a partir dos parâmetros validados experimentalmente, da inspeção visual dos pontos soldados e dos resultados obtidos após os ensaios de arrancamento.

A avaliação foi realizada com base nos critérios dimensionais definidos na metodologia, utilizando como referência os valores estabelecidos a partir da norma Renault 01-50-903, Tabela 2. Dessa forma, buscou-se verificar quais combinações atenderam aos requisitos mínimos de validação e quais condições apresentaram maior potencial para aplicação no processo produtivo da empresa parceira.

4.1 Parâmetros Validados de Soldagem

A partir dos parâmetros iniciais apresentados na Tabela 3, foram realizados ajustes sucessivos da potência do laser para cada combinação de chapa e tubo avaliada. Quando o ponto obtido não atendia ao critério dimensional estabelecido na metodologia ou apresentava formação insuficiente, a potência era aumentada em incrementos de 100 W.

O ajuste foi conduzido até a obtenção de pontos de solda com diâmetro médio igual ou superior ao valor mínimo estabelecido, sem ocorrência de perfuração da chapa e com evidência de fusão na interface entre a chapa e o tubo. Dessa forma, buscou-se determinar a menor condição de potência capaz de produzir um ponto soldado dimensionalmente aceitável, evitando aplicação excessiva de energia e reduzindo a ocorrência de deformações ou danos localizados na chapa zincada. Para todas as combinações avaliadas, o tempo de emissão do feixe laser foi mantido em 1000 ms, sendo a potência a principal variável ajustada em função das espessuras da chapa e do tubo.

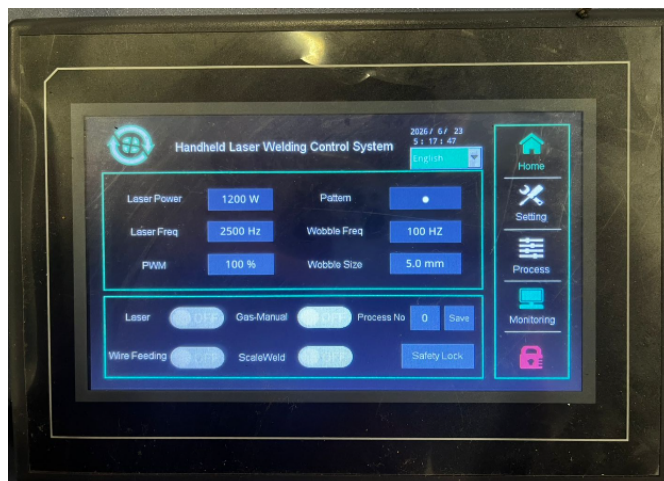
Além da potência e do tempo de emissão, foram mantidos constantes os demais parâmetros do processo. De acordo com o manual do cabeçote de soldagem BW101-GS, a frequência do laser (*Laser Freq*) corresponde ao número de pulsos emitidos pelo laser por segundo. Assim, a frequência de 2500 Hz indica que o sistema foi configurado para emitir 2500 pulsos por segundo.

O parâmetro PWM corresponde à razão entre a duração do pulso e o período total do ciclo, podendo variar de 0 a 100%. Neste trabalho, foi utilizado PWM de 100%, condição em que o feixe permanece ativo durante todo o ciclo programado.

Também foram mantidos constantes os parâmetros relacionados à oscilação do feixe. A frequência de oscilação (*wobble frequency*) define a frequência com que o feixe realiza o movimento oscilatório durante a soldagem, enquanto a largura de oscilação (*wobble size*) ajusta a amplitude do ponto linear produzido pela oscilação.

Nos ensaios de validação, utilizou-se *wobble frequency* de 100 Hz e *wobble size* de 5,0 mm, Figura 18, buscando aumentar a área de interação do feixe com a chapa e favorecer a formação de pontos de solda com dimensão superficial adequada (RayTools AG, 2021).

Figura 18 – Interface do equipamento laser e os parâmetros dos ensaios de validação.



Fonte: Autoria própria (2026).

Os parâmetros validados para cada combinação de chapa e tubo são apresentados na Tabela 4. Como o tempo de emissão foi mantido constante, a energia nominal aplicada corresponde numericamente à potência utilizada, considerando o tempo de 1 s. Para cada uma das doze combinações da Tabela 4, foram executados três pontos de solda com o objetivo de obter o diâmetro médio do ponto e o respectivo desvio padrão.

Tabela 4 – Parâmetros validados para obtenção do ponto mínimo de solda laser.

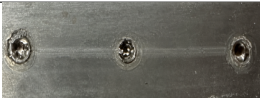
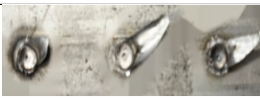
Chapa (mm)	Tubo (mm)	Potência (W)	Tempo (ms)	Energia (J)
0,35	1,55	1250	1000	1250
0,35	1,95	1300	1000	1300
0,35	2,70	1400	1000	1400
0,35	4,25	1400	1000	1400
0,65	1,55	1300	1000	1300
0,65	1,95	1300	1000	1300
0,65	2,70	1500	1000	1500
0,65	4,25	1580	1000	1580
0,95	1,55	1850	1000	1850
0,95	1,95	1900	1000	1900
0,95	2,70	1950	1000	1950
0,95	4,25	2100	1000	2100

Fonte: Autoria própria (2026).

4.2 Resultados para Chapa de 0,35 mm

Na Tabela 5 apresenta os resultados obtidos para a chapa de 0,35 mm de espessura soldada aos tubos de espessuras: 1,55 mm, 1,95 mm, 2,70 mm e 4,25 mm. Para cada espessura de tubo são apresentados a foto dos pontos soldados na chapa, a foto da região correspondente após o ensaio de arrancamento, o diâmetro médio de cada um dos três pontos de solda (D) da Equação 3, o diâmetro médio (D_m) dos três pontos de solda e o respectivo desvio padrão (σ).

Tabela 5 – Resultados obtidos para união da chapa de 0,35 mm nos tubos de espessuras 1,55 mm, 1,95 mm, 2,70 mm e 4,25 mm.

Espessura do Tubo (mm)	Pontos Soldados			Região após Arrancamento			Diâmetros médios, Média e Desvio Padrão (mm)
	1	2	3	1	2	3	
1,55							$D = [4,21 \ 2,99 \ 3,65]$ $D_m = 3,62$ $\sigma = 0,61$
1,95							$D = [3,46 \ 3,04 \ 3,17]$ $D_m = 3,22$ $\sigma = 0,22$
2,70							$D = [4,19 \ 5,41 \ 4,35]$ $D_m = 4,65$ $\sigma = 0,66$
4,25							$D = [5,44 \ 5,12 \ 3,90]$ $D_m = 4,82$ $\sigma = 0,81$

Fonte: Autoria própria (2026).

Com base no critério de validação adotado na metodologia, a chapa de 0,35 mm foi avaliada utilizando como referência a espessura imediatamente superior disponível na Norma Renault 01-50-903, correspondente a 0,50 mm. Para essa condição, o diâmetro médio mínimo exigido para aprovação do ponto soldado foi de 3,0 mm.

Observa-se, na Tabela 5, que todas as combinações avaliadas para a chapa de 0,35 mm apresentaram diâmetro médio superior ao valor mínimo estabelecido. A menor média foi obtida na união com tubo de 1,95 mm, com $D_m = 3,22$ mm, ainda acima do limite mínimo de 3,0 mm. As demais combinações apresentaram médias de 3,62 mm, 4,65 mm e 4,82 mm, indicando atendimento ao critério dimensional adotado.

Os maiores valores de diâmetro médio foram observados nas combinações com tubos de 2,70 mm e 4,25 mm. Esse comportamento está relacionado ao aumento da potência aplicada nessas condições, necessário para promover a fusão adequada na interface entre a chapa fina e os tubos de maior espessura. Entretanto, mesmo com o aumento da energia nominal, não foi observada perfuração da chapa, indicando que os parâmetros utilizados permitiram formar pontos soldados dimensionalmente aceitáveis.

O desvio padrão variou entre 0,22 mm e 0,81 mm. A menor dispersão ocorreu na combinação com tubo de 1,95 mm, enquanto a maior variação foi observada no tubo de 4,25 mm. Essa maior dispersão pode estar associada à maior dificuldade de manter uniformidade na formação dos pontos em chapas de baixa espessura, especialmente quando são empregadas potências mais elevadas. Ainda assim, os valores

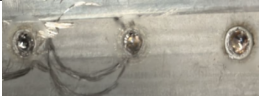
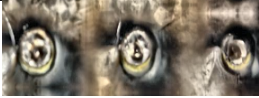
médios permaneceram acima do limite mínimo estabelecido pela norma de referência.

Dessa forma, todos os pontos avaliados para a chapa de 0,35 mm foram considerados aprovados quanto ao critério dimensional de diâmetro médio mínimo, conforme a referência adotada a partir da Norma Renault 01-50-903.

4.3 Resultados para Chapa de 0,65 mm

A Tabela 6 reúne os resultados referentes aos pontos produzidas com chapa de 0,65 mm, combinada aos tubos de 1,55 mm, 1,95 mm, 2,70 mm e 4,25 mm. Para cada condição são apresentadas as imagens dos pontos formados na chapa, a região correspondente após o ensaio de arrancamento, os três diâmetros dos três pontos de solda, o diâmetro médio e o desvio padrão.

Tabela 6 – Resultados obtidos para união da chapa de 0,65 mm nos tubos de espessuras 1,55 mm, 1,95 mm, 2,70 mm e 4,25 mm.

Espessura do Tubo (mm)	Pontos Soldados			Região após Arrancamento			Diâmetros médios, Média e Desvio Padrão (mm)
	1	2	3	1	2	3	
1,55							$D = [4,95 \ 3,64 \ 4,17]$ $D_m = 4,25$ $\sigma = 0,66$
1,95							$D = [4,78 \ 3,89 \ 4,37]$ $D_m = 4,34$ $\sigma = 0,45$
2,70							$D = [4,49 \ 4,14 \ 4,49]$ $D_m = 4,37$ $\sigma = 0,20$
4,25							$D = [3,99 \ 4,08 \ 3,90]$ $D_m = 3,99$ $\sigma = 0,09$

Fonte: Autoria própria (2026).

Para a chapa de 0,65 mm, o critério dimensional foi definido com base na espessura de referência de 0,70 mm da Norma Renault 01-50-903. Assim, adotou-se como limite mínimo o diâmetro médio de 3,8 mm para aprovação dos pontos soldados.

A análise dos dados mostra que todas as combinações atenderam ao valor mínimo estabelecido. Os diâmetros médios variaram entre 3,99 mm e 4,37 mm, indicando que os parâmetros utilizados foram suficientes para promover a formação dos pontos de solda nas diferentes espessuras de tubo avaliadas.

A maior média foi verificada na união com tubo de 2,70 mm, com $D_m = 4,37$ mm, seguida pela condição com tubo de 1,95 mm, que apresentou $D_m = 4,34$ mm.

Já a menor média ocorreu na combinação com tubo de 4,25 mm, com $D_m = 3,99$ mm. Apesar de apresentar menor margem em relação ao limite mínimo, essa condição permaneceu acima do valor exigido pela norma de referência.

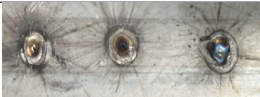
Em relação à dispersão dos resultados, o menor desvio padrão foi obtido na combinação com tubo de 4,25 mm, com $\sigma = 0,09$ mm, demonstrando maior uniformidade entre os três pontos medidos. Por outro lado, a união com tubo de 1,55 mm apresentou o maior desvio padrão, igual a $\sigma = 0,66$ mm, indicando maior variação dimensional entre os pontos produzidos.

De modo geral, os resultados indicam que a chapa de 0,65 mm apresentou comportamento adequado nas quatro combinações avaliadas. Mesmo com a necessidade de aumento da potência para os tubos de maior espessura, os pontos soldados permaneceram acima do critério mínimo de diâmetro médio, sem comprometimento visual significativo do ponto.

4.4 Resultados para Chapa de 0,95 mm

A Tabela 7 reúne os resultados dos pontos produzidas com chapa de 0,95 mm, soldada aos tubos de 1,55 mm, 1,95 mm, 2,70 mm e 4,25 mm. Para cada condição, são apresentadas as imagens dos pontos formados na chapa, a região correspondente após o ensaio de arrancamento, os três diâmetros médios, o diâmetro médio e o desvio padrão.

Tabela 7 – Resultados obtidos para união da chapa de 0,95 mm nos tubos de espessuras 1,55 mm, 1,95 mm, 2,70 mm e 4,25 mm.

Espessura do Tubo (mm)	Pontos Soldados			Região após Arrancamento			Diâmetros médios, Média e Desvio Padrão (mm)
	1	2	3	1	2	3	
1,55							$D = [5,07 \ 3,71 \ 4,37]$ $D_m = 4,38$ $\sigma = 0,68$
1,95							$D = [4,55 \ 4,30 \ 4,18]$ $D_m = 4,34$ $\sigma = 0,19$
2,70							$D = [5,28 \ 5,52 \ 4,24]$ $D_m = 5,01$ $\sigma = 0,68$
4,25							$D = [4,94 \ 4,44 \ 5,18]$ $D_m = 4,85$ $\sigma = 0,38$

Fonte: Autoria própria (2026).

Para a chapa de 0,95 mm, o critério dimensional foi adotado diretamente da Norma Renault 01-50-903, que estabelece um diâmetro médio mínimo de 4,5 mm. Diferentemente das chapas de menor espessura, essa condição apresentou configurações que não atenderam ao valor mínimo estipulado.

As uniões realizadas nos tubos de 2,70 mm e 4,25 mm apresentaram diâmetros médios de $D_m = 5,01$ mm e $D_m = 4,85$ mm, respectivamente. Esses valores ficaram acima do limite regulamentar, sendo, portanto, aprovados pelo critério dimensional adotado.

Por outro lado, as juntas com os tubos de 1,55 mm e 1,95 mm não atenderam ao requisito. Para o tubo de 1,55 mm, resultou em um diâmetro médio de $D_m = 4,38$ mm. Já para o tubo de 1,95 mm, resultou em um diâmetro médio de $D_m = 4,34$ mm.

Embora tenha ocorrido a formação efetiva dos pontos soldados nessas duas condições, os diâmetros médios situaram-se abaixo do limite de 4,50 mm. Dessa forma, as uniões da chapa de 0,95 mm com os tubos de 1,55 mm e 1,95 mm foram reprovadas quanto ao critério dimensional.

A menor dispersão foi observada na combinação com o tubo de 1,95 mm, com $\sigma = 0,19$ mm. No entanto, apesar da boa repetibilidade, o valor médio permaneceu insatisfatório. Esse resultado evidencia que a uniformidade dos pontos não garante, isoladamente, a validação da junta, sendo imperativo que o diâmetro médio também atenda aos requisitos da norma.

De modo geral, a chapa de 0,95 mm exigiu maiores níveis de potência em relação às espessuras de 0,35 mm e 0,65 mm. Para os tubos de 2,70 mm e 4,25 mm, os parâmetros utilizados foram suficientes para atingir o diâmetro mínimo. Já nas combinações com tubos mais finos (1,55 mm e 1,95 mm), o aumento da potência provocou a perfuração da chapa durante os ajustes preliminares do processo. Por esse motivo, os parâmetros foram limitados às condições apresentadas na Tabela 7, as quais permitiram a formação dos pontos, porém sem atingir a dimensão exigida pela norma de referência.

Uma possível explicação para o comportamento observado nos tubos de 1,55 mm e 1,95 mm está relacionada à geometria da seção transversal desses perfis. Diferentemente dos tubos de 2,70 mm e 4,25 mm, que apresentam seções de 40×60 mm e 40×50 mm, respectivamente, os tubos de 1,55 mm e 1,95 mm possuem seções menores, de 20×50 mm e 30×40 mm. Essa redução implica em uma menor massa de material na região adjacente ao ponto de solda, reduzindo a capacidade da parede do tubo de atuar como um anteparo rígido durante a aplicação do feixe laser.

Com menor massa localizada, a parede do tubo tende a aquecer e perder rigidez periférica mais rapidamente durante o pulso de soldagem, favorecendo

flutuações no contato entre a chapa e o tubo no instante crítico de formação do núcleo fundido. Esse comportamento é consistente com os elevados valores de desvio padrão observados nessas condições, Tabela 7, que indicam menor repetibilidade dimensional entre os três pontos avaliados.

Adicionalmente, observa-se que o tubo de 4,25 mm apresenta especificação de material distinta dos demais (aço SAE 1006/1008, em vez do aço zincado ZAR230 utilizado nos tubos de 1,55 mm, 1,95 mm e 2,70 mm), o que também pode contribuir, em menor grau, para diferenças na cinética de fusão da junta.

Esses resultados sugerem que, além da espessura nominal da parede, a geometria da seção transversal do perfil tubular exerce influência relevante sobre a capacidade do processo de produzir pontos de solda dimensionalmente adequados, sendo um fator crítico na seleção de acoplamentos chapa-tubo para aplicação industrial.

4.5 Discussão Geral dos Resultados

A análise conjunta dos resultados demonstrou que a espessura da chapa exerceu influência direta sobre a definição dos parâmetros de soldagem e sobre o atendimento aos critérios dimensionais adotados. De modo geral, o incremento na espessura da chapa exigiu maiores níveis de potência para promover a formação do ponto soldado, devido, fundamentalmente, à maior massa de material a ser fundida na região da junta.

Nas chapas de 0,35 mm e 0,65 mm, todas as combinações avaliadas atenderam ao diâmetro médio mínimo estabelecido com base na Norma Renault 01-50-903. Esses resultados indicam que, para tais espessuras, os parâmetros operacionais foram suficientes para produzir pontos de solda com dimensões adequadas, sem a ocorrência de perfurações e garantindo a integridade da junta após o ensaio de arrancamento.

A chapa de 0,35 mm apresentou maior sensibilidade ao aporte térmico, comportamento esperado em função da reduzida espessura do material. Nessa condição, pequenos acréscimos na potência podem provocar deformação localizada ou perfuração. Ainda assim, os parâmetros validados permitiram obter diâmetros acima do limite mínimo, demonstrando a viabilidade do processo de soldagem laser manual autógena para essa espessura, desde que haja um controle rigoroso do tempo da potência aplicada.

Para a chapa de 0,65 mm, observou-se o comportamento mais equilibrado entre o diâmetro médio e a repetibilidade dos pontos. Os valores obtidos situaram-se consistentemente acima do limite mínimo de 3,8 mm, acompanhados por dispersões dimensionais relativamente baixas entre os três pontos avaliados em cada condição.

Esse panorama denota uma maior estabilidade do processo dentro dessa faixa de espessura.

Em contrapartida, na chapa de 0,95 mm, os resultados evidenciaram maior restrição para o atendimento ao critério dimensional. Enquanto as uniões com os tubos de 2,70 mm e 4,25 mm atingiram o diâmetro médio mínimo exigido, as combinações com os tubos de 1,55 mm e 1,95 mm permaneceram aquém do limite de 4,5 mm. Durante as etapas de ajuste, o aumento incremental da potência resultou na perfuração da chapa, inviabilizando a ampliação do diâmetro útil do ponto nessas condições específicas.

Verificou-se também que, embora o desvio padrão seja uma ferramenta valiosa para qualificar a repetibilidade do processo, ele não deve ser interpretado isoladamente como critério de aceitação. Algumas configurações apresentaram baixa dispersão entre as réplicas, mas falharam em atingir o diâmetro médio mínimo. Portanto, a validação da junta requer uma abordagem holística, correlacionando diâmetro médio, repetibilidade, aspecto visual e ausência de descontinuidades macroscópicas.

De forma ampla, os dados obtidos confirmam o potencial da soldagem laser manual autógena para aplicação em juntas de chapas galvanizadas finas sobre tubos de aço carbono zincado. O controle do tempo de emissão, a manutenção da inclinação da tocha e o ajuste preciso da potência mostraram-se variáveis críticas para assegurar dimensões conformes. Contudo, os resultados também delimitam uma janela operacional estreita, sobretudo para as chapas mais espessas, na qual o aumento da energia deixa de expandir a zona fundida e passa a induzir a instabilidade do poço de fusão e a consequente perfuração do material.

É fundamental destacar que essa limitação não esteve associada exclusivamente à espessura isolada dos componentes, mas sim à geometria da seção transversal dos perfis tubulares empregados. Os tubos de 1,55 mm e 1,95 mm, que não atenderam ao critério dimensional, possuem seções transversais reduzidas (20×50 mm e 30×40 mm, respectivamente) em comparação aos tubos de 2,70 mm e 4,25 mm (40×60 mm e 40×50 mm), que foram aprovados. Essa discrepância geométrica reduziu a rigidez estrutural da parede do tubo e comprometeu a estabilidade do contato chapa-tubo durante o ciclo térmico. Tal fenômeno intensificou a variabilidade dimensional e a dificuldade de atingir o diâmetro mínimo, independentemente do aporte de potência fornecido ao sistema.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos, verificou-se que a soldagem laser manual autógena apresenta elevado potencial para aplicação na união de chapas galvanizadas finas em perfis tubulares de aço carbono zincado. O controle rigoroso da potência, do tempo de emissão do feixe, da posição focal e da inclinação da tocha mostrou-se mandatório para a formação adequada dos pontos soldados e para o pleno atendimento aos critérios dimensionais adotados.

As chapas de 0,35 mm e 0,65 mm apresentaram resultados satisfatórios em todas as configurações avaliadas, cumprindo com os diâmetros médios mínimos estabelecidos pela norma de referência. Para a chapa de 0,95 mm, as juntas com tubos de 2,70 mm e 4,25 mm também atenderam ao critério dimensional. Dessa forma, essas condições específicas foram consideradas tecnicamente validadas dentro dos limites deste estudo.

A validação dessas juntas aponta para a viabilidade técnica da aplicação de chapas de menor espessura em uniões sobrepostas com perfis tubulares, contribuindo diretamente para o **lightweighting** (redução da massa estrutural) dos componentes avaliados. Essa redução de massa é altamente estratégica para estruturas metálicas veiculares, pois favorece a diminuição do peso total do veículo e, por conseguinte, impulsiona melhorias na eficiência energética e operacional.

Além do ganho estrutural, o processo estudado manifesta grande potencial para a redução de custos de fabricação. O procedimento atualmente empregado pela empresa baseia-se na soldagem GMAW, método que envolve custos contínuos com consumíveis (como arame eletrodo e gás de proteção), além de impor um maior aporte térmico que exige etapas posteriores de controle de deformações e acabamento. Por se tratar de um processo autógeno, a soldagem laser avaliada dispensa material de adição, eliminando uma parcela expressiva dos custos diretos de manufatura.

Adicionalmente, a possibilidade de transitar para chapas mais finas sem comprometer os requisitos dimensionais dos pontos soldados representa uma economia direta de matéria-prima um dos principais fatores de custo em linhas de produção de larga escala. Essa redução de espessura reflete-se diretamente na redução do preço final da chapa adquirida, uma vez que o custo do material é proporcional à sua massa, e chapas mais finas demandam menor quantidade de aço zincado por unidade de área. Dessa forma, a viabilização técnica de espessuras reduzidas, comprovada nos ensaios com as chapas de 0,35 mm e 0,65 mm, traduz-se em ganho econômico direto para o processo produtivo da empresa parceira, além do ganho indireto associado à redução de massa veicular.

Em linhas gerais, a soldagem laser manual autógena consolida-se como

uma alternativa tecnicamente promissora ao processo convencional de arco elétrico. Contudo, sua transposição para o ambiente industrial requer o controle rigoroso das variáveis operacionais, do ângulo de ataque e do acoplamento mecânico entre as peças, visto que pequenas oscilações de montagem influenciam diretamente a integridade geométrica dos pontos gerados.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como continuidade deste trabalho, sugere-se o desenvolvimento de um sistema de fixação por eletromagnetismo para aproximar e manter a chapa em contato com o perfil tubular antes do início da soldagem. Esse recurso poderia melhorar o contato entre as superfícies, reduzir folgas na junta e aumentar a repetibilidade dos pontos soldados.

Também se recomenda o desenvolvimento de um adaptador específico para o cabeçote da tocha, projetado para manter a inclinação de 30° durante a execução da soldagem. Esse dispositivo permitiria controlar o ângulo de trabalho de forma mais prática, dispensando o uso contínuo do medidor digital de ângulo durante os ensaios ou em aplicações futuras.

Adicionalmente, sugere-se a automação completa do processo de união, na qual o robô industrial passe a executar não apenas o controle do tempo de emissão do feixe laser, mas também o posicionamento, a trajetória e o ângulo de ataque da tocha em relação à junta. Essa automação tenderia a eliminar as variações associadas à operação manual identificadas neste estudo (como a manutenção da inclinação de 30°), aumentando a repetibilidade dimensional dos pontos de solda e viabilizando a aplicação do processo em escala produtiva contínua.

Recomenda-se também o desenvolvimento de uma norma interna de avaliação de pontos de solda a laser específica para a empresa Comil Carrocerias e Ônibus S.A., contemplando critérios dimensionais e de qualidade adequados às particularidades do processo autógeno manual e às combinações de espessuras chapas e tubos empregadas em sua linha de produção. Essa norma permitiria substituir o uso da Norma Renault 01-50-903 adotada neste trabalho apenas como referência provisória por um documento próprio, alinhado às necessidades e à realidade produtiva da empresa parceira.

Por fim, sugere-se investigar o uso do hidrogênio como gás de proteção alternativo ao argônio no processo de soldagem a laser. Além do menor custo em relação ao argônio, o hidrogênio apresenta elevada condutividade térmica, podendo influenciar a estabilidade do processo e as características do cordão de solda, sendo necessária uma avaliação experimental de seus efeitos sobre a qualidade e a integridade metalúrgica das juntas produzidas.

REFERÊNCIAS

- BERRETTA, J. R. *Estudo e desenvolvimento de um sistema laser aplicado à manufatura*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. 24
- BRANDÃO, A. C. *Redução de massa em elemento estrutural de veículos automotivos através da utilização de aços de alta resistência*. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- Gimenes Jr., L.; RAMALHO, J. P. *Soldagem Laser*. 2006. Infosolda - Portal Brasileiro da Soldagem. Material técnico sobre fundamentos e aplicações da soldagem a laser. 22
- Hobart Brothers. *Galvanized Steel Welding: Is It Really Worth the Trouble?* 2024. Acesso em: 15 out. 2025. Disponível em: <<https://www.hobartbrothers.com/resources/technical-articles/galvanized-steel-welding/>>.
- International Electrotechnical Commission. *IEC 60825-1: Safety of laser products – Part 1: Equipment classification and requirements*. Geneva: [s.n.], 2014. 29
- International Organization for Standardization. *ISO 14273: Specimen dimensions and procedure for shear testing resistance spot, seam and embossed projection welds*. Geneva: [s.n.], 2016. 27
- INVERNIZZI, R. *Estudo da Soldagem de Chapas Finas Galvanizadas por Processo MIG/MAG*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017. 20
- KATAYAMA, S. *Handbook of Laser Welding Technologies*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013. 42
- KOU, S. *Welding Metallurgy*. 2. ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2003. 19
- Laser Project. *Láser de fibra: qué es y ventajas*. 2024. Acesso em: 30 maio 2026. Disponível em: <<https://www.laserproject.es/laser-de-fibra-que-es-y-ventajas/>>.
- MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q.; MARQUES, P. V. *Soldagem: Fundamentos e Tecnologia*. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2012. 13
- PACHECO, R. M. B. Trabalho de Conclusão de Curso, *Caracterização Mecânica e Metalográfica de Juntas Soldadas a Laser para Aplicação em Equipamento Agrícola*. Uberlândia, MG: [s.n.], 2023. 25
- PINTO, R. d. S. *Laser de Nd:YAG de Alta Potência, Estabilidade e Qualidade de Feixe*. Dissertação (Mestrado) — Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. 24
- RayTools AG. *BW101-GS Series 2KW Handheld Laser Processing Head: User Manual*. Switzerland, 2021. Manual do fabricante. 45
- REGIE NATIONALE DES USINES RENAULT S.A. *Norme 01-50-903/-D: Soudage électrique par résistance à recouvrement par points*. Paris, 1996. Norma técnica Renault. 27

RIBEIRO, H. O. *Soldagem*. Florianópolis: [s.n.], 2004.

RIBOLLA, C. E. M.; DAMOULIS, P. D.; BATALHA, G. F. Aplicação da tecnologia laser na indústria automobilística. *In: Congresso Nacional de Soldagem*. São Paulo: [s.n.], 2004.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. *Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho*. São Paulo: Artliber, 2008.

Shenzhen Qilin Laser Application Technology Co., Ltd. *User Manual - Double Swing Handheld Laser Welding System BWT16*. [S.l.], 2021. Manual do fabricante.

STEEN, W. M.; MAZUMDER, J. *Laser Material Processing*. 5. ed. Cham: Springer, 2021. 42

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. d. *Soldagem: Processos e Metalurgia*. São Paulo: Edgard Blucher, 1992. 21