

UNIDADE CENTRAL DE EDUCAÇÃO FAEM FACULDADE LTDA - UCEFF
FACULDADE EMPRESARIAL DE CHAPECÓ – FAEM
ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE COMPARATIVA DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM TIG E A *LASER* EM AÇO INOXIDÁVEL AISI 304

Newton Christmann¹
Euclésio Giuliani²
Keila Daiane Ferrari Orso³
Paulo Miguel de Toni⁴

RESUMO

O aço inoxidável AISI 304 é amplamente utilizado na indústria, exigindo processos de soldagem eficientes e de alta qualidade mecânica. Este estudo compara os processos TIG (*Tungsten Inert Gas*) e *laser* na soldagem de topo em chapas de 1,50 mm, 3,00 mm e 6,00 mm. Utilizando um equipamento TIG Balmer 300A e um *laser* HSoldas de 1550W, foram confeccionados corpos de prova conforme a norma ABNT NBR ISO 6892-1:2024. O objetivo deste artigo é comparar a resistência à tração das juntas soldadas, avaliando o desempenho mecânico de cada processo. A análise estatística dos resultados indica que o processo de soldagem a *laser* resultou em juntas com resistência mecânica superior em todas as espessuras.

Palavras-chave: Soldagem a *laser*. Soldagem TIG. Aço Inoxidável AISI 304.

1 INTRODUÇÃO

A soldagem é um processo de fabricação fundamental para a união permanente de materiais metálicos, sendo caracterizada pela fusão localizada das partes a serem unidas, geralmente com o uso de um material de adição e proteção contra a contaminação atmosférica.

Os processos de soldagem mais utilizados para união de componentes em aço inoxidável são a soldagem TIG e a soldagem a *laser*. A soldagem TIG é valorizada pela precisão e pelo controle do arco elétrico, possibilitando soldas com excelente acabamento superficial. Entretanto, apresenta limitações quanto à produtividade e alta dependência da habilidade do operador. A soldagem a *laser*, por sua alta velocidade e baixa Zona Termicamente Afetada (ZTA), surge como uma alternativa para otimizar a fabricação.

Neste contexto, este estudo parte de um caso prático observado em uma indústria metalúrgica local, que utiliza o processo TIG, mas avalia a implementação da soldagem a *laser*

¹ Graduando (a) em Engenharia Mecânica (UCEFF, 2025). E-mail: newtonchrimann@gmail.com

² Mestre em Projetos e Processos de Fabricação – Universidade de Passo Fundo (UPF) – E-mail: euclesio@uceff.edu.br.

³ Docente da UCEFF Faculdades. E-mail: keila@uceff.edu.br

⁴ Docente da UCEFF Faculdades.

para ganhos de produtividade. Desta necessidade industrial, surge a seguinte questão-problema que norteia este trabalho: **No aço inox AISI 304, qual solda tem melhor desempenho mecânico no ensaio de tração: *laser* ou a TIG?**

Para responder a esta questão, o objetivo geral deste estudo é comparar o desempenho mecânico de juntas soldadas em chapas de aço inoxidável AISI 304, executadas pelos processos TIG e a *laser*, utilizando o ensaio de tração como método de análise. Este objetivo se desdobra nos seguintes objetivos específicos: (i) descrever os princípios e parâmetros operacionais dos processos TIG e a *laser*; (ii) confeccionar corpos de prova a partir de chapas de AISI 304, realizar ensaios de tração para determinar o Limite de Resistência à Tração das juntas soldadas; e (iii) analisar os resultados de resistência obtidos para cada processo, fornecendo uma base de dados para avaliação técnica.

Este trabalho se justifica pela necessidade contínua da engenharia de avaliar e validar novas tecnologias frente a métodos estabelecidos. Embora as vantagens produtivas da soldagem a *laser* sejam amplamente divulgadas, é fundamental quantificar seu impacto nas propriedades mecânicas da junta soldada. Este estudo visa fornecer dados, obtidos por meio de ensaios de tração, orientando a decisão entre os processos de soldagem a ser executados conforme a necessidade de cada aplicação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O AÇO INOXIDÁVEL AISI 304 E SUA SOLDABILIDADE

Os aços inoxidáveis constituem uma classe de ligas metálicas de alta relevância industrial, caracterizados principalmente por sua elevada resistência à corrosão em diversos ambientes. Seu elemento de liga fundamental é o cromo (Cr), sendo necessária uma concentração de pelo menos 11% em peso para conferir a propriedade de inoxidável. Para otimizar a resistência à corrosão e as propriedades mecânicas, elementos como o níquel (Ni) e o molibdênio (Mo) também são adicionados (Callister; Rethwisch, 2016).

O aço AISI 304, objeto de estudo deste trabalho, pertence à classe dos austeníticos, que se destaca como uma das mais utilizadas na indústria graças à sua combinação de alta resistência à corrosão, excelente ductilidade e boa soldabilidade. Sua composição, com cerca de 18% de cromo e 8% de níquel, confere as características ideais para a fabricação de equipamentos que demandam alta durabilidade e resistência estrutural (Callister; Rethwisch, 2016).

Entretanto, a soldagem do AISI 304 exige cuidado. O calor gerado pelo processo cria uma região ao redor da solda, a chamada ZTA, onde as propriedades do aço podem ser alteradas, afetando sua resistência. Por isso, a escolha do processo de soldagem e o controle de seus parâmetros são essenciais para garantir uma junta final confiável. A tabela 1 detalha as propriedades físico-químicas e mecânicas fundamentais do aço inoxidável AISI 304, conforme a literatura técnica.

Tabela 1– Propriedades físico-químicas do aço inoxidável AISI 304

PROPRIEDADE	VALOR TÍPICO	UNIDADE	COMENTÁRIO
Composição química			
Cromo (Cr)	17,5 – 19,5	%	Confere resistência à corrosão
Níquel (Ni)	8,0 – 10,5	%	Estabiliza a estrutura austenítica
Carbono (C)	≤ 0,08	%	Baixo teor para reduzir sensibilidade à corrosão
Propriedades mecânicas			
Resistência à tração	520 – 750	MPa	Varia com tratamento térmico e condição
Alongamento	≥ 40	%	Boa ductilidade
Propriedades físicas			
Densidade	7,9	g/cm ³	
Ponto de fusão	1400 – 1450	°C	
Condutividade térmica	16	W/m·K	Relativamente baixa
Resistência à corrosão	Alta		Excelente em ambientes oxidantes

Fonte: Adaptado de Davis (1994) e Callister; Rethwisch (2016).

A análise da Tabela 1 destaca dois pontos cruciais para este estudo: primeiro, o baixo teor de carbono ($C \leq 0,08\%$), que é essencial para a boa soldabilidade do AISI 304, reduzindo o risco de corrosão. Segundo, as propriedades mecânicas de referência do material-base, notadamente a alta Resistência à Tração (na faixa de 520 a 750 MPa) e a excelente Ductilidade (Alongamento $\geq 40\%$).

2.2 O PROCESSO DE SOLDAGEM TIG

A soldagem TIG é um processo a arco elétrico que utiliza um eletrodo de tungstênio não consumível para gerar o arco de solda. A proteção da poça de fusão contra a contaminação atmosférica é realizada por um gás inerte, usualmente o argônio (AWS, 2015). Este processo é amplamente empregado na soldagem de materiais que exigem alta precisão, como o aço inoxidável AISI 304, justificando-se pela capacidade de produzir juntas de alta qualidade, com excelente acabamento superficial e baixo nível de defeitos.

Para a execução dos ensaios deste trabalho, foi utilizado o equipamento MaxxiTIG 300 P AC/DC da Balmer, uma fonte inversora de alto rendimento (85%) projetada para aplicações

industriais. Segundo o manual de operação, o equipamento utiliza a tecnologia de Modulação por Largura de Pulso (PWM) que permite um ajuste preciso e estável da corrente de saída. A operação em modo "DC" (Corrente Contínua) é a especificada para a soldagem de aço inoxidável. Um recurso fundamental deste modelo é a ignição de arco por alta frequência (HF), que inicia a soldagem sem contato físico entre o eletrodo e a peça, evitando a contaminação da junta (Balmer, 2025).

Um recurso fundamental presente no equipamento utilizado é a capacidade de operar com arco pulsado. Nesta variação do processo, a corrente de soldagem não é contínua, mas alterna entre um valor de pico (alta corrente) e um valor de base (baixa corrente) a uma frequência pré-determinada. Conforme detalhado por Ribeiro (2018), a corrente de pico assegura a fusão e a penetração adequada, enquanto a corrente de base mantém o arco elétrico ativo, porém com baixo aporte de calor, permitindo a solidificação parcial da poça de fusão. Este controle preciso sobre o aporte térmico total é uma grande vantagem, pois minimiza as distorções na peça, melhora o controle sobre a poça de fusão em chapas de menor espessura e resulta em um acabamento de cordão mais refinado e consistente.

Apesar de suas vantagens na qualidade final da junta, a soldagem TIG apresenta limitações de produtividade, pois é caracterizada por uma baixa velocidade de avanço e exige alta qualificação do operador (Davis, 1994). A Tabela 2 detalha os parâmetros operacionais típicos para este processo.

Tabela 2 – Principais parâmetros operacionais da soldagem TIG para aço inoxidável AISI 304

PARÂMETRO	FAIXA TÍPICA	UNIDADE	DESCRIÇÃO
Corrente elétrica	50 – 150	A(ampères)	Controla a intensidade do arco elétrico
Tensão	10 – 20	V (volts)	Influencia a estabilidade do arco
Velocidade de soldagem	5 – 15	cm/min	Afeta a penetração e a largura do cordão
Gás de proteção	Argônio	–	Protege a poça de fusão da contaminação
Tipo de eletrodo	Tungstênio	–	Determina a estabilidade e durabilidade do arco

Fonte: Adaptado de AWS (2015) e Davis (1994).

2.3 O PROCESSO DE SOLDAGEM A LASER

A soldagem a *laser* é um processo de união de alta performance que utiliza um feixe de luz monocromático e coerente, altamente concentrado, para fundir as superfícies das peças, resultando em uma solda precisa, rápida e de alta qualidade. O sucesso do processo está na capacidade do equipamento de concentrar uma altíssima densidade de energia em uma área

muito pequena. Nos *lasers* de fibra óptica, como o utilizado neste estudo, a geração e a condução do feixe garantem um foco preciso e estável.

Conforme aponta Richartz (2017), esta alta densidade de energia, aliada a uma grande profundidade de foco, permite a fusão localizada do material com um aporte térmico mínimo. Isso resulta em uma ZTA significativamente reduzida, o que minimiza distorções e é fundamental para preservar as propriedades mecânicas da junta soldada.

Para a execução deste trabalho, foi empregado um equipamento de *laser* de fibra óptica, modelo HS-65 da HSoldas. De acordo com o fabricante, esta tecnologia permite soldar com velocidades até quatro vezes superiores aos processos convencionais, produzindo juntas de alta resistência, com baixa incidência de defeitos e mínima necessidade de acabamento posterior (Hsoldas, 2025).

O controle preciso de parâmetros como a potência do *laser* (W), a velocidade de avanço (cm/min) e a vazão do gás de proteção (L/min), é determinante para a qualidade final. A potência e a velocidade regulam a energia depositada na peça, influenciando diretamente a penetração e a geometria do cordão, enquanto o uso do gás argônio é crucial para proteger a poça de fusão da contaminação atmosférica e assegurar que as propriedades do aço inoxidável sejam preservadas (AWS, 2015).

Adicionalmente, a implementação de tecnologias de alta potência como a soldagem a *laser* requer uma atenção rigorosa às normas de segurança. Equipamentos desta natureza são tipicamente classificados como Classe 4 (o nível de risco máximo), segundo a norma IEC 60825-1. Um *laser* desta classe apresenta riscos de danos à pele e, principalmente, aos olhos, por exposição direta ou refletida do feixe (Richartz, 2017). Portanto, a operação segura implica o uso de EPIs específicos e o controle do ambiente de trabalho para proteger todos os indivíduos na área.

2.4 O ENSAIO DE TRAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DE JUNTAS SOLDADAS

O ensaio de tração é o método para avaliar o desempenho mecânico das juntas. O procedimento seguiu a norma ABNT NBR ISO 6892-1:2024, onde um corpo de prova é submetido a uma força uniaxial progressiva até a fratura. Durante o ensaio, a máquina universal registra continuamente a Força aplicada (em KN) e o Deslocamento (em mm), gerando a curva completa do ensaio, conforme exemplificado na Figura 1.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho caracteriza-se como um estudo de caso de cunho exploratório, com suporte de revisão bibliográfica para a fundamentação dos processos. A metodologia deste trabalho consistiu na análise comparativa de juntas soldadas em chapas de aço inoxidável AISI 304, nas espessuras de 1,50 mm, 3,00 mm e 6,00 mm. A seleção destas espessuras visou avaliar o desempenho dos processos de soldagem TIG e a *laser* em diferentes cenários de aplicação.

Os processos, TIG e a *laser*, foram realizados por soldadores profissionais para simular as condições reais de produção. Os equipamentos e procedimentos de soldagem foram definidos para cada processo, e os parâmetros operacionais (como corrente, velocidade e gás de proteção) foram rigorosamente controlados e documentados.

Para a soldagem TIG, foi utilizado um equipamento MaxxiTIG 300 P da marca Balmer. A Figura 2 ilustra a execução deste procedimento.

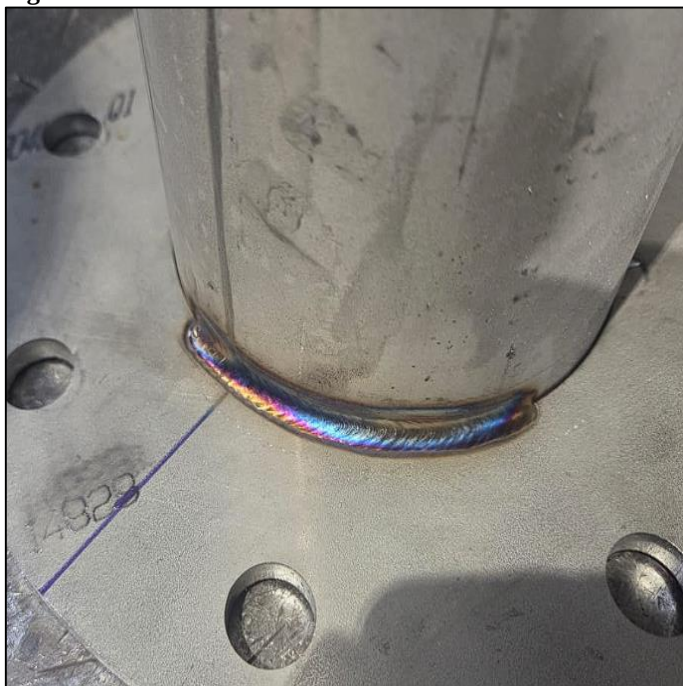
Figura 2 – Profissional executando o processo de soldagem TIG



Fonte: O autor (2025).

O processo resultou em um cordão de solda com acabamento regular e uma ZTA característica, conforme detalhado na Figura 3.

Figura 3 – Detalhe do Cordão de Solda TIG.



Fonte: O autor (2025).

Os parâmetros operacionais definidos para a soldagem TIG dos corpos de prova, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros solda TIG

PARÂMETRO	CHAPA 1,50 mm	CHAPA 3,00 mm	CHAPA 6,00 mm
Gás	Argônio	Argônio	Argônio
Vazão de gás (L/min)	8,00 L/min	8,00 L/min	8,00 L/min
Corrente (amperes)	60 A	130 A	200 A
Tempo de solda 20cm (min)	1 min	0,83 min	0,75 min
Velocidade de solda (cm/min)	20 cm/min	24 cm/min	26,67 cm/min

Fonte: O autor (2025).

Para a soldagem a *laser*, foi utilizado um equipamento de fibra óptica, modelo HS-65 da HSoldas, operando com uma potência de até 1550W. O procedimento de soldagem com este equipamento está mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Profissional executando o processo de soldagem a *laser*



Fonte: O autor (2025).

Este processo resultou em um cordão de solda mais estreito e com uma ZTA visivelmente menor, como pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 – Detalhe do Cordão de Solda a *laser*



Fonte: O autor (2025).

Diferente do TIG (controlado por Corrente), o processo a *laser* é focado no controle da Potência (W). Os parâmetros operacionais definidos para a soldagem a *laser* dos corpos de prova são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4– Parâmetros solda *laser*.

PARÂMETRO	CHAPA 1,50 mm	CHAPA 3,00 mm	CHAPA 6,00 mm
Gás	Argônio	Argônio	Argônio
ANAI5 – Engenharia Mecânica - UCEFF		ISSN – 2594-4649	V.8, Nº 1 - 2026/2

PARÂMETRO	CHAPA 1,50 mm	CHAPA 3,00 mm	CHAPA 6,00 mm
Vazão de gás (L/min)	25,00 L/min	25,00 L/min	25,00 L/min
Potência (Watts)	496 W	1100 W	1550 W
Tempo de solda 20cm (min)	0,30	0,33	0,32
Velocidade de solda (cm/min)	66,67 cm/min	60,61 cm/min	62,50 cm/min

Fonte: O autor (2025).

As diferenças visuais entre os resultados dos dois processos são ilustradas na Figura 6, que mostra um comparativo lado a lado dos cordões de solda TIG e a *laser*.

Figura 6 – Comparação processos de Soldagem TIG e a *laser*.



Fonte: O autor (2025).

Para garantir a padronização e a precisão dos ensaios, a geometria dos corpos de prova seguiu as especificações da norma ABNT NBR ISO 6892-1:2024.

O primeiro passo da fase experimental foi a modelagem digital dos corpos de prova utilizando o *software* de projeto assistido por computador (CAD) *SolidWorks*. A criação de um modelo 3D preciso assegurou que todas as dimensões, como o comprimento da área útil (L0) e o raio de concordância (R), estivessem em estrita conformidade com a norma.

Esta etapa de projeto foi fundamental para garantir a repetibilidade, ao assegurar que todos os corpos de prova tivessem geometria idêntica. O modelo digital foi exportado diretamente para o processo de fabricação, para o corte a *laser* das chapas, garantindo que o corpo de prova físico fosse uma réplica fiel do projeto virtual.

Após a modelagem, os corpos de prova foram confeccionados a partir das chapas soldadas de aço inoxidável AISI 304, nas espessuras de 1,50 mm, 3,00 mm e 6,00 mm. Foram produzidos cinco corpos de prova para cada condição, garantindo a validade estatística dos resultados. As dimensões exatas adotadas para o corpo de prova neste estudo foram detalhadas na Tabela 5.

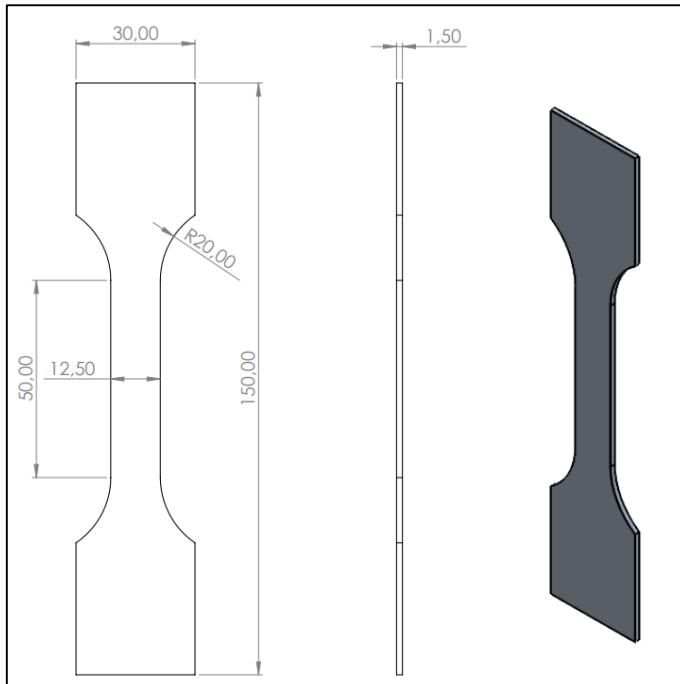
Tabela 5– Dimensões típicas dos corpos de prova para chapas segundo NBR ISO 6892-1:2024

ITEM	DIMENSÃO (mm) PARA CHAPA DE 1,50 mm (Anexo A)	DIMENSÃO (mm) CHAPAS DE 3,00 e 6,00 mm (Anexo C)	OBSERVAÇÕES
Comprimento total (L)	150,00	150,00	Dimensão suficiente para fixação na máquina
Comprimento da região paralela (L_0)	50,00	25,00	Comprimento de referência para medição
Largura da região paralela (b_0)	12,50	12,50	Largura da seção de teste
Raio da transição	20,00	15,00	Raio para suavizar a transição de seções
Largura da região de fixação	30,00	30,00	Largura nas extremidades para fixação

Fonte: Geometria definida pelo autor, com base nas recomendações da ABNT NBR ISO 6892-1:2024.

Para a chapa de menor espessura (1,50 mm), o corpo de prova foi projetado com um comprimento de região paralela (L_0) de 50,00 mm e um raio de transição de 20,00 mm. Estas dimensões, baseadas nas recomendações da norma, são otimizadas para materiais mais finos, garantindo que a fratura ocorra na área de teste. O detalhamento técnico completo deste modelo é apresentado na Figura 7.

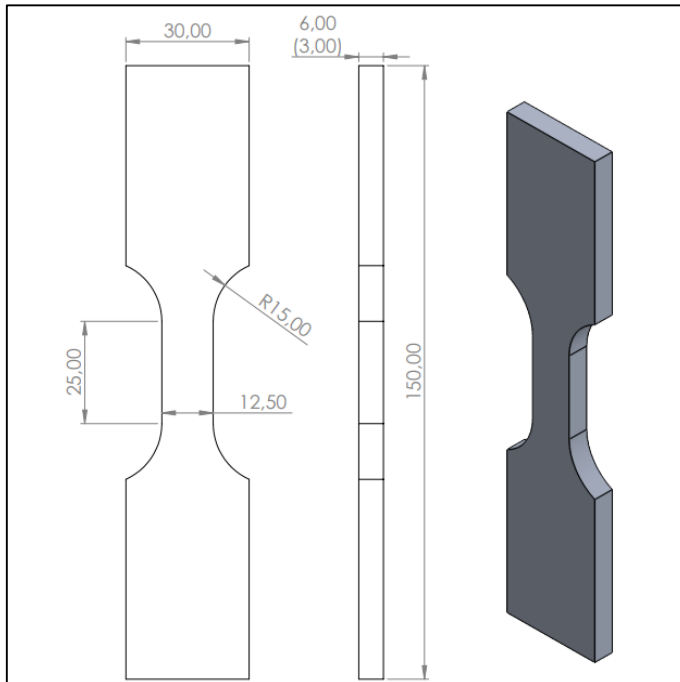
Figura 7 – Desenho técnico do corpo de prova para a chapa de espessura 1,50 mm com dimensões definidas conforme a norma ABNT NBR 6892



Fonte: O autor (2025).

Para as chapas de maior espessura, o projeto do corpo de prova precisou ser adaptado. A Figura 8 exibe o desenho técnico final para a fabricação das amostras de 3,00 mm e 6,00 mm.

Figura 8 – Desenho técnico do corpo de prova para a chapa de espessura 3,00mm e 6,00mm com dimensões definidas conforme a norma ABNT NBR 6892



Fonte: O autor (2025).

Conforme a norma, a geometria para materiais de maior robustez é diferenciada para

garantir a correta distribuição de tensões durante o ensaio. Por isso, neste projeto, utilizou-se um comprimento de região paralela (L0) menor, de 25,00 mm, e um raio de transição mais suave, de 15,00 mm, assegurando a validade dos resultados para as chapas mais espessas.

Após a soldagem, os corpos de prova foram confeccionados e submetidos a uma inspeção visual preliminar para verificar a presença de defeitos superficiais macroscópicos. O método de análise consistiu no ensaio de tração, que foi realizado em laboratório seguindo as normas técnicas vigentes para determinar a resistência mecânica e o comportamento das juntas soldadas. Após as etapas de soldagem e o corte a *laser* conforme o projeto, os corpos de prova finais foram obtidos, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Corpos de prova físicos em aço AISI 304, após os processos de soldagem (TIG e *laser*) e corte, prontos para o ensaio de tração.



Fonte: O autor (2025).

A Figura 9 ilustra os corpos de prova finalizados, representando a conclusão das etapas de projeto (modelagem), fabricação (soldagem) e pós-processamento (corte). Com as amostras físicas prontas e em conformidade com o projeto, a metodologia avança para a etapa final e conclusiva: o ensaio destrutivo para a quantificação do desempenho mecânico.

O ensaio de tração é o método para avaliar o desempenho mecânico das juntas. O procedimento seguiu a norma ABNT NBR ISO 6892-1:2024, onde um corpo de prova é submetido a uma força uniaxial progressiva até a fratura.

Durante o ensaio, a máquina universal registra continuamente a Força (KN) aplicada e o deslocamento (mm), gerando a curva completa do ensaio, conforme exemplificado na Figura 10.

Figura 10 – Máquina Universal de Ensaios EMIC com capacidade de 100KN, utilizada para a realização dos ensaios de tração no laboratório.



Fonte: O autor (2025).

Para a análise, o *software* do equipamento utiliza a área da seção transversal de cada corpo de prova (medida e inserida no sistema) e a Força Máxima (KN) registrada. O programa, então, calcula e fornece automaticamente o valor final da Tensão (MPa).

Com esta etapa, iniciaram-se os ensaios. O indicador-chave para a análise, é o valor do Limite de Resistência à Tração em MPa, fornecido pelo *software* do equipamento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados quantitativos obtidos por meio dos ensaios de tração, realizados conforme a metodologia descrita a cima. Os dados de "Tensão Max MPa", correspondentes ao Limite de Resistência à Tração de cada corpo de prova, foram compilados e analisados estatisticamente.

O objetivo desta seção é comparar diretamente o desempenho mecânico das juntas soldadas pelos processos TIG e a *laser* nas espessuras de 1,50 mm, 3,00 mm e 6,00 mm, respondendo assim à questão-problema da pesquisa.

A compilação dos dados brutos dos ensaios permitiu o cálculo das estatísticas descritivas (média, desvio padrão, mínimo e máximo) para cada uma das seis condições de teste.

É notável também a diferença no desvio padrão, um indicador da consistência do

processo. Na chapa de 1,50 mm, o processo TIG apresentou um alto desvio padrão (84,59 MPa), indicando uma variabilidade considerável nos resultados (quase 25,00% da média). Em comparação, o processo a *laser* se mostrou mais estável e consistente em todas as espessuras, com exceção da chapa de 6,00 mm, onde o desvio (94,78 MPa) sugere uma maior dificuldade no controle do processo, provavelmente devido à espessura limite para o equipamento.

A superioridade mecânica robusta da soldagem a *laser* pode ser diretamente relacionada às características físicas do processo, conforme descrito na fundamentação teórica. O processo a *laser*, por sua altíssima densidade de energia, promove uma fusão rápida e localizada, resultando em uma ZTA significativamente reduzida, característica visualmente observada na Figura 4. Esse rápido ciclo térmico tende a produzir uma microestrutura de grãos mais finos na região fundida, o que, contribui para uma maior resistência mecânica.

Em contrapartida, o processo TIG, sendo mais lento e com maior aporte térmico total, gera uma ZTA mais larga (como visto na Figura 2). Esse aquecimento mais prolongado pode levar ao crescimento de grãos e a uma alteração microestrutural mais extensa, o que pode justificar a menor resistência mecânica observada nos ensaios de tração.

Um ponto interessante nos dados é o desempenho na chapa de 6,00 mm. Ambos os processos mostraram uma queda na resistência em comparação com a chapa de 3,00 mm. No caso do *laser* (de 705,65 MPa para 418,14 MPa), isso pode indicar que a potência de 1550W do equipamento estava próxima do seu limite para garantir uma penetração completa e homogênea nesta espessura, o que pode ter levado a defeitos internos ou falta de fusão, reduzindo a resistência da junta. A queda acentuada do TIG (de 432,01 MPa para 286,32 MPa) também reforça a dificuldade de assegurar a integridade de soldas em chapas mais espessas com este processo.

4.1 ANÁLISE COMPARATIVA: CHAPAS DE 1,50 MM

A primeira análise foi realizada nas chapas de menor espessura (1,50 mm). Esta espessura é comum em tanques e tubulações que exigem alta qualidade de acabamento, onde o controle do aporte térmico é crucial para evitar distorções. A Tabela 6 apresenta os resultados individuais do Limite de Resistência à Tração para os cinco corpos de prova realizados com a solda a *laser*.

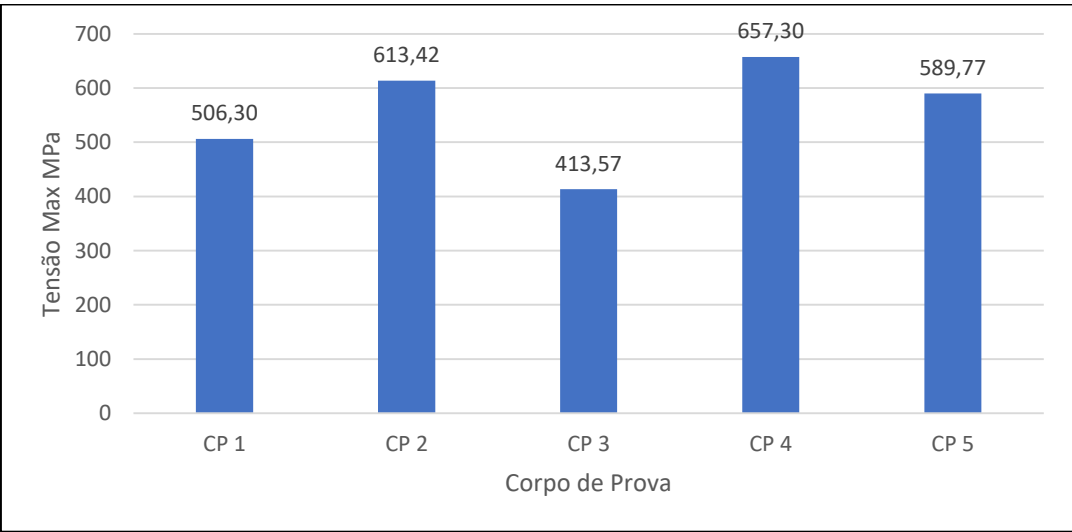
Tabela 6 - Parâmetros solda *laser* dos corpos de prova de 1,50 mm

Processo	Espessura Chapa (mm)	Corpo de Prova	Largura (mm)	Espessura CP (mm)	Força Max (KN)	Tensão Max (Mpa)	Força Ruptura (KN)
<i>Laser</i>	1,50	CP 1	12,50	1,50	9,49	506,30	9,21
<i>Laser</i>	1,50	CP 2	12,50	1,50	11,50	613,42	10,06
<i>Laser</i>	1,50	CP 3	12,50	1,50	7,75	413,57	7,54
<i>Laser</i>	1,50	CP 4	12,50	1,50	12,32	657,30	10,79
<i>Laser</i>	1,50	CP 5	12,50	1,50	11,06	589,77	7,70
Média <i>laser</i> 1,5mm					10,424	556,07	9,06
Desvio padrão					1,82	96,77	1,43

Fonte: O autor (2025).

Os dados da Tabela 6 estabelecem o desempenho do processo a *laser*, com uma média de 612,71 MPa e alta consistência (desvio padrão de 28,39 MPa). A Figura 11, ilustra a comparação visual direta entre as médias de resistência à tração obtidas para este ensaio.

Figura 11 – Limite de Resistência à Tração (Tensão Máxima) dos corpos de prova de 1,50 mm soldados a *laser*.



Fonte: O autor (2025).

A análise dos resultados para o processo a *laser* na chapa de 1,50 mm, detalhados na Tabela 6, revela um desempenho mecânico robusto, atingindo uma média de resistência à tração de 556,07 MPa. No entanto pode-se observar a variabilidade significativa nos resultados, indicada pelo desvio padrão de 96,17 MPa. Essa dispersão, influenciada principalmente pelos corpos de prova CP 1 (506,30 MPa) e CP 3 (413,57 MPa) que apresentaram resistência inferior, sugere que o processo, apesar de atingir picos elevados (como 657,30 MPa), possui uma sensibilidade considerável a pequenas variações operatórias nesta espessura. Esta observação é crucial, indica que, embora o processo tenha alto potencial de resistência, garantir sua consistência é um desafio técnico.

Para completar a análise desta espessura, é necessário agora avaliar o desempenho do processo TIG sob as mesmas condições.

Tabela 7- Resultados do Ensaio de Tração - TIG 1,50 mm.

Processo	Espessura Chapa mm	Corpo de Prova	Largura mm	Espessura CP mm	Força Max KN	Tensão Max MPa	Força Ruptura KN
TIG	1,50	CP 1	12,50	1,50	6,51	347,07	6,30
TIG	1,50	CP 2	12,50	1,50	8,02	427,80	6,72
TIG	1,50	CP 3	12,50	1,50	3,69	196,76	1,09
TIG	1,50	CP 4	12,50	1,50	6,79	362,33	5,66
TIG	1,50	CP 5	12,50	1,50	6,18	329,42	3,98
Média TIG 1,5mm					6,23	332,67	4,75
Desvio padrão					1,59	84,59	2,30

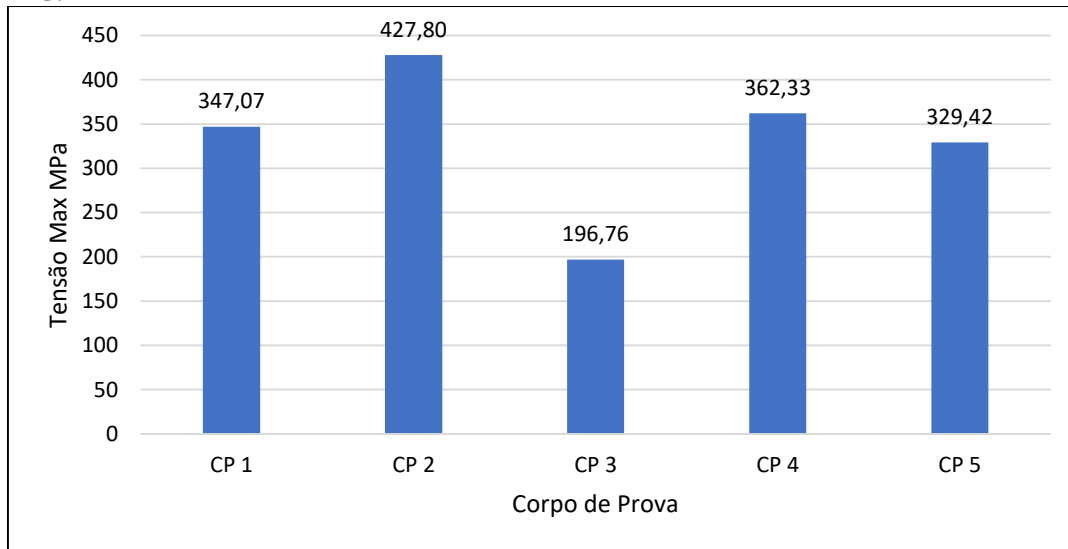
Fonte: O autor (2025).

Dando sequência à análise da chapa de 1,50 mm, a Tabela 7 detalha os resultados obtidos com o processo TIG. A média de resistência à tração para este processo foi de 332,68 MPa. O ponto de maior destaque nesta análise é o altíssimo desvio padrão de 84,59 MPa, que indica uma inconsistência processual ainda mais acentuada do que a observada no *laser*.

Essa grande variabilidade é causada principalmente pelo corpo de prova CP 3, que falhou prematuramente com apenas 196,76 MPa. Este valor discrepante sugere a presença de um defeito crítico na junta, como uma falta de fusão ou porosidade, que comprometeu severamente o desempenho. A diferença entre o pior resultado (CP 3) e o melhor (CP 1, com 427,80 MPa) evidencia a dificuldade em manter a homogeneidade da solda com este processo, um reflexo provável da alta dependência da habilidade manual do soldador em chapas finas, onde o controle do aporte térmico é crítico.

A figura 12, ilustra a comparação visual direta entre as médias de resistência à tração obtidas para este ensaio.

Figura 12 – Limite de Resistência à Tração (Tensão Máxima) dos corpos de prova de 1,50 mm soldados a TIG.



Fonte: O autor (2025).

Estes resultados consolidam a análise da chapa de 1,50 mm, evidenciando a clara superioridade mecânica do processo a *laser*. A média de resistência das juntas a *laser* (556,07 MPa) foi 67,10% superior à média obtida com o processo TIG (332,68 MPa), respondendo objetivamente à questão da pesquisa para esta espessura.

A análise mais aprofundada dos desvios padrão revela um ponto crítico: ambos os processos demonstraram alta inconsistência. O TIG (DP de 84,59 MPa) e o *laser* (DP de 96,17 MPa) apresentaram grande variabilidade, com corpos de prova falhando prematuramente. No TIG, isso se atribui à dificuldade do controle manual em chapas finas. No *laser*, sugere que, embora tenha um potencial de resistência muito maior, o processo é extremamente sensível aos parâmetros de regulagem, o que representa um desafio de repetibilidade. Conclui-se, portanto, que para a chapa de 1,50 mm, o *laser* é mecanicamente superior, mas ambos os processos exigem um controle de processo rigoroso para garantir a consistência.

4.2 ANÁLISE COMPARATIVA: CHAPAS DE 3,00 MM

A análise da chapa de 3,00 mm com o processo a *laser*, detalhada na Tabela 8, demonstra um salto de desempenho notável. A média de resistência à tração atingiu 705,65 MPa, o valor mais elevado registrado em todo o estudo. Isso sugere que os parâmetros de soldagem a *laser* para 3,00 mm (como a potência de 1100 W) atingiram um ponto ótimo de operação, otimizando a penetração e a microestrutura da junta.

Igualmente importante é a melhoria na consistência do processo. O desvio padrão de 39,48 MPa é significativamente inferior ao observado na chapa de 1,50 mm (96,17 MPa). Isso

indica que, nesta espessura, o processo não foi apenas mais resistente, mas também muito mais estável e repetível. A variabilidade restante é atribuída principalmente ao CP 5 (636,30 MPa), que, embora tenha sido o ponto de menor resistência, ainda assim apresentou um valor superior à média do processo na chapa de 1,50 mm.

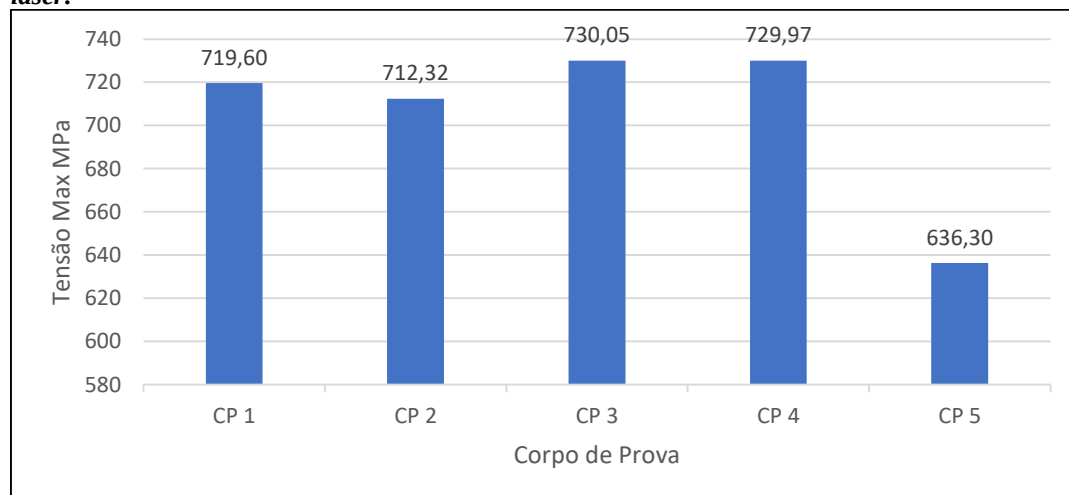
Tabela 8- Resultados do Ensaio de Tração - *laser* 3,00 mm.

Processo	Espessura Chapa mm	Corpo de Prova	Largura mm	Espessura CP mm	Força Max KN	Tensão Max MPa	Força Ruptura KN
<i>Laser</i>	3,00	CP 1	12,50	3,00	26,98	719,6	25,93
<i>Laser</i>	3,00	CP 2	12,50	3,00	26,71	712,32	20,90
<i>Laser</i>	3,00	CP 3	12,50	3,00	27,38	730,05	13,49
<i>Laser</i>	3,00	CP 4	12,50	3,00	27,37	729,97	13,86
<i>Laser</i>	3,00	CP 5	12,50	3,00	23,86	636,3	10,59
Média <i>laser</i> 3,0 mm					26,03	705,65	16,95
Desvio padrão					1,48	39,48	6,29

Fonte: O autor (2025).

A análise estatística da Tabela 8 é complementada pela representação visual na Figura 13, a seguir plota o Limite de Resistência à Tração para cada um dos cinco corpos de prova do processo a *laser*, permitindo uma clara observação da consistência geral dos resultados e identificando o CP 5 como o ponto de menor desempenho no conjunto.

Figura 13 – Limite de Resistência à Tração (Tensão Máxima) dos corpos de prova de 3,00 mm soldados a *laser*.



Fonte: O autor (2025).

Após a análise detalhada do desempenho do processo a *laser*, a investigação prossegue com a avaliação do processo TIG para a mesma espessura de chapa de 3,00 mm. A Tabela 9, a seguir, apresenta os resultados individuais obtidos para esta condição.

Tabela 9- Resultados do Ensaio de Tração - TIG 3,00 mm.

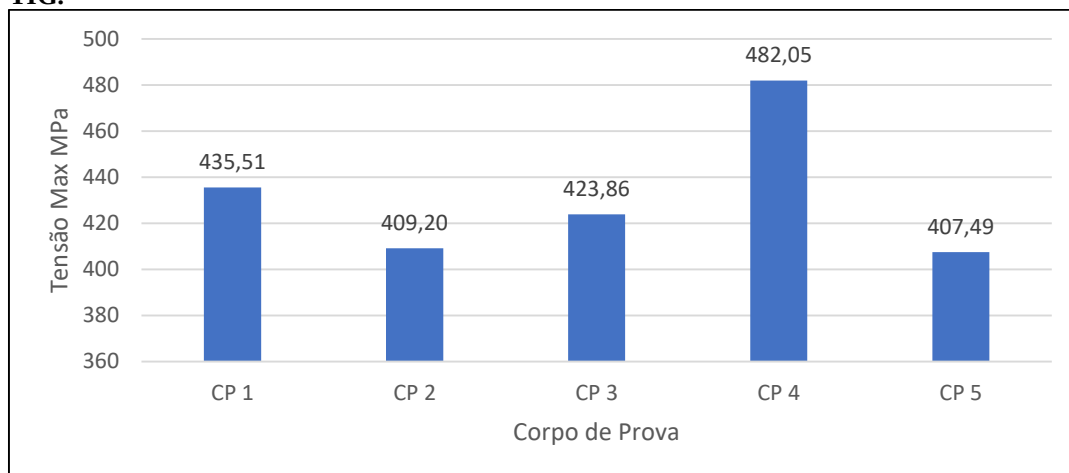
Processo	Espessura Chapa mm	Corpo de Prova	Largura mm	Espessura CP mm	Força Max KN	Tensão Max MPa	Força Ruptura KN
TIG	3,00	CP 1	12,50	3,00	16,33	435,51	15,68
TIG	3,00	CP 2	12,50	3,00	15,35	409,20	13,89
TIG	3,00	CP 3	12,50	3,00	15,89	423,86	14,99
TIG	3,00	CP 4	12,50	3,00	18,08	482,05	14,87
TIG	3,00	CP 5	12,50	3,00	15,28	407,49	14,69
Média TIG 3,00 mm					16,186	431,62	14,824
Desvio padrão					1,14	30,43	0,64

Fonte: O autor (2025).

A análise do processo TIG na chapa de 3,00 mm, conforme detalhado na Tabela 9, revela um comportamento de processo muito distinto. A média de resistência à tração foi de 431,62 MPa. Embora esse valor seja significativamente inferior ao obtido pelo *laser* (705,65 MPa), ele representa uma melhoria substancial em relação ao desempenho do próprio TIG na chapa de 1,50 mm (332,68 MPa).

O destaque principal desta análise é a excelente consistência do processo. O desvio padrão de apenas 30,57 MPa, indicando alta repetibilidade e um processo muito estável. Diferente de outros cenários, não houve falhas prematuras, todos os cinco corpos de prova falharam em uma faixa de tensão previsível. Isso sugere que, para a chapa de 3,00 mm, o processo TIG (com seu maior aporte térmico e menor velocidade) permite ao soldador um controle de poça de fusão mais fácil e homogêneo, resultando em juntas de qualidade muito consistente.

Figura 14 - Limite de Resistência à Tração (Tensão Máxima) dos corpos de prova de 3,00 mm soldados a TIG.



Fonte: O autor (2025).

A Figura 14 consolida a análise da chapa de 3,00 mm e responde objetivamente à questão da pesquisa para esta espessura. A superioridade mecânica do processo a *laser* é indiscutível, com uma média de resistência de 705,65 MPa, um resultado 63,30% superior à média de 432,01 MPa do TIG. Este valor representa o pico de desempenho do *laser* em todo o estudo, sugerindo que a potência de 1100 W e os parâmetros utilizados foram ideais para esta espessura, otimizando a penetração e a microestrutura da junta.

Uma observação técnica crucial, no entanto, é a inversão da consistência. O TIG apresentou um desvio padrão de 30,57 MPa, o mais baixo do estudo, indicando um processo extremamente estável e previsível. Em contrapartida, o *laser* (DP 39,48 MPa) foi ligeiramente menos consistente. Conclui-se que, para 3,00 mm, o *laser* oferece uma resistência máxima muito superior, mas o TIG proporciona uma repetibilidade processual ligeiramente maior.

4.3 ANÁLISE COMPARATIVA: CHAPAS DE 6,00 MM

A etapa final da análise experimental aborda a chapa de 6,00 mm, a maior espessura do estudo, representando um desafio significativo para ambos os processos de soldagem. Esta espessura testa o limite de penetração e a capacidade de aporte energético dos equipamentos.

Seguindo a metodologia, a investigação inicia-se com os resultados do processo a *laser*, que operou em sua potência máxima (1550 W). A Tabela 10 detalha os dados de resistência obtidos para esta condição.

Tabela 10- Resultados do Ensaio de Tração - *laser* 6,00 mm.

Processo	Espessura Chapa mm	Corpo de Prova	Largura mm	Espessura CP mm	Força Max KN	Tensão Max MPa	Força Ruptura KN
<i>Laser</i>	6,00	CP 1	12,50	6,00	35,99	479,82	25,49
<i>Laser</i>	6,00	CP 2	12,50	6,00	31,65	422,02	26,31
<i>Laser</i>	6,00	CP 3	12,50	6,00	19,05	254,01	18,20
<i>Laser</i>	6,00	CP 4	12,50	6,00	36,00	479,95	22,69
<i>Laser</i>	6,00	CP 5	12,50	6,00	34,12	454,92	27,05
Média <i>laser</i> 6,0 mm					31,36	418,14	23,95
Desvio padrão					7,10	94,80	3,60

Fonte: O autor (2025).

A análise da chapa de maior espessura 6,00 mm, detalhada na Tabela 10, revela uma mudança significativa no comportamento do processo a *laser*. A média de resistência à tração teve uma queda abrupta para 418,14 MPa, um valor 40,70% inferior ao pico de desempenho

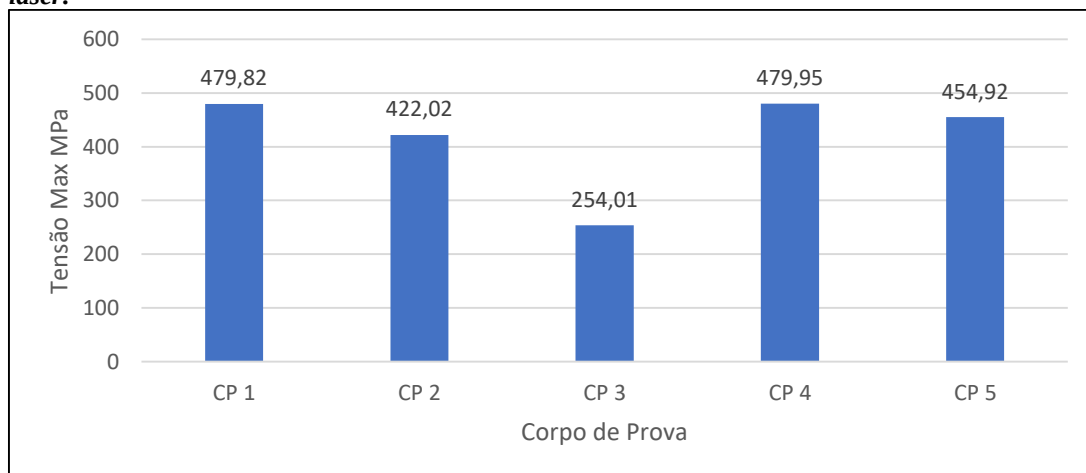
observado na chapa de 3,00 mm (705,65 MPa).

Mais alarmante que a queda na média é a perda de consistência do processo. O desvio padrão aumentou para 94,78 MPa, o mais alto registrado para o *laser*. A causa é o corpo de prova CP 3, que falhou com apenas 254,01 MPa, um colapso da junta. Isso é um forte indicativo de que o equipamento, operando em sua potência máxima de 1550 W, estava no limite ou além de sua capacidade para garantir uma penetração de solda completa e homogênea nesta espessura. A falha do CP 3 sugere um defeito interno grave, como falta de fusão na raiz, que não foi detectado visualmente.

A análise estatística da Tabela 10, especialmente a alta variabilidade e a queda na média, é melhor compreendida através da visualização dos resultados individuais.

A Figura 15, a seguir, ilustra o Limite de Resistência à Tração para cada um dos cinco corpos de prova do processo a *laser*. O gráfico destaca visualmente a falha prematura do CP 3 (254,01 MPa), que é a causa direta da alta instabilidade (desvio padrão) e da quebra de desempenho observada para este processo na espessura de 6,00 mm.

Figura 15 – Limite de Resistência à Tração (Tensão Máxima) dos corpos de prova de 6,00 mm soldados a *laser*.



Fonte: O autor (2025).

A Figura 15 ilustra visualmente a instabilidade do processo a *laser* na chapa de 6,0 mm, confirmando a análise da Tabela 10. Fica evidente que, enquanto os corpos de prova CP 1, 2, 4 e 5 apresentaram um desempenho similar e elevado (acima de 430 MPa), o colapso do CP 3 é a causa direta do altíssimo desvio padrão (94,78 MPa). Este resultado atípico sugere que o processo, operando no seu limite de potência (1550 W), falhou em garantir a integridade da junta em um dos ensaios, provavelmente por falta de penetração.

Após a constatação da queda de desempenho e da alta instabilidade do processo a *laser* na chapa de 6,00 mm, a análise volta-se para o processo TIG. É fundamental verificar se o

método tradicional também enfrenta dificuldades nesta espessura. A Tabela 11 detalha os resultados obtidos para o processo TIG nesta mesma espessura.

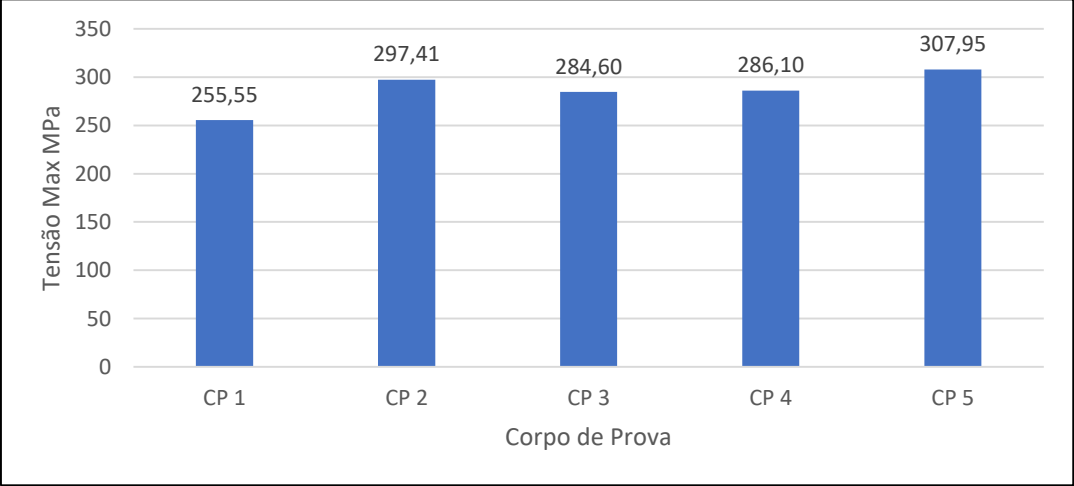
Tabela 11- Resultados do Ensaio de Tração - TIG 6 mm.

Processo	Espessura Chapa mm	Corpo de Prova	Largura mm	Espessura CP mm	Força Max KN	Tensão Max MPa	Força Ruptura KN
TIG	6,00	CP 1	12,50	6,00	19,17	255,55	18,06
TIG	6,00	CP 2	12,50	6,00	22,31	297,41	20,89
TIG	6,00	CP 3	12,50	6,00	21,35	284,60	19,99
TIG	6,00	CP 4	12,50	6,00	21,46	286,10	20,19
TIG	6,00	CP 5	12,50	6,00	23,10	307,95	11,88
Média TIG 6,0 mm					21,48	286,32	18,20
Desvio padrão					1,47	19,63	3,69

Fonte: O autor (2025).

A análise da Tabela 11 confirma que a chapa de 6,00 mm também representou um desafio para o TIG, que atingiu sua média de resistência mais baixa (286,32 MPa). Contudo, o destaque principal é a excepcional consistência do processo. O desvio padrão de apenas 19,63 MPa é o menor de todo o estudo, indicando um processo estável e previsível, mesmo que em um patamar de resistência inferior.

Figura 16 – Limite de Resistência à Tração (Tensão Máxima) dos corpos de prova de 6,00 mm soldados a TIG.



Fonte: O autor (2025).

Com os dados dos processos *laser* (Tabela 10) e TIG (Tabela 11) agora analisados, a comparação final para a chapa de 6,00 mm pode ser realizada.

A análise da chapa de 6,00 mm exige uma interpretação estatística cuidadosa. Embora a média do *laser* (418,14 MPa) já seja 46,00% superior à média do TIG (286,32 MPa), este

valor é distorcido por um resultado discrepante claro (o CP 3, que falhou com 254,01 MPa), provável resultado de uma anomalia processual pontual.

Se analisarmos o desempenho-base do processo, a média de resistência do *laser* sobe para 459,17 MPa. O ponto crucial desta análise é que o pior resultado válido do *laser* (432,63 MPa) ainda foi 40,00% mais resistente que o melhor resultado obtido pelo TIG (307,95 MPa).

Adicionalmente, nota-se que a falha atípica do *laser* (254,01 MPa) foi, de fato, equivalente ao pior resultado do TIG (255,55 MPa). Conclui-se que, embora o *laser* exija um controle de processo rigoroso para evitar anomalias nesta espessura, seu desempenho-base é mecanicamente muito superior ao TIG, que opera de forma consistente, mas em um patamar de resistência significativamente inferior.

4.4 ANÁLISE CONSOLIDADA DO DESEMPENHO MECÂNICO

Após a análise detalhada de cada espessura de chapa, esta seção apresenta a consolidação dos resultados para uma comparação global do desempenho dos processos de soldagem TIG e a *laser*. A Tabela 12 resume os principais indicadores estatísticos (média e desvio padrão) para todas as seis condições de ensaio.

Tabela 12- Resultados do Ensaio de Tração

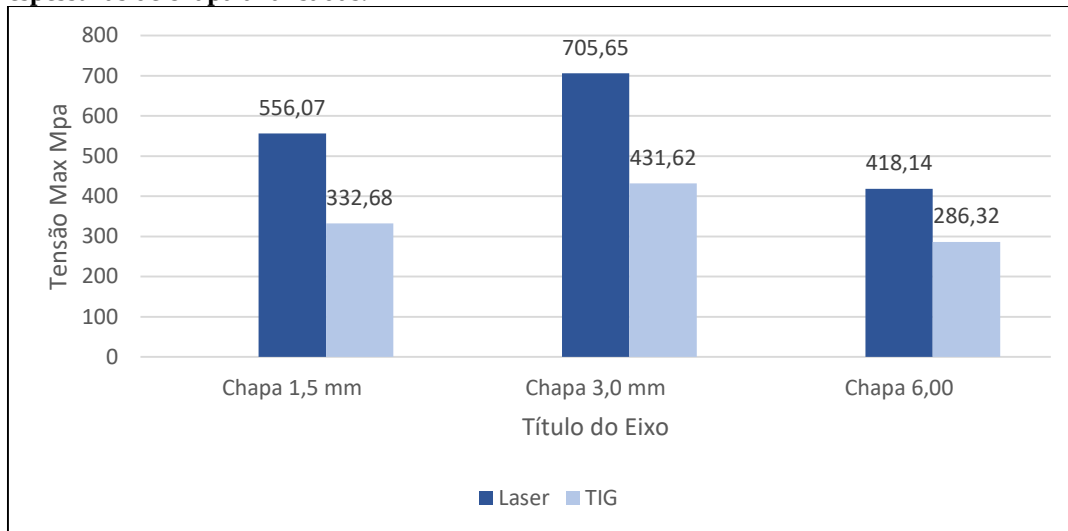
Processo	Chapa 1,50 mm Tensão Max MPa	Chapa 3,00 mm Tensão Max MPa	Chapa 6,00 mm Tensão Max MPa
<i>Laser</i>	556,07	705,65	418,14
TIG	332,68	431,62	286,32

Fonte: O autor (2025).

A Tabela 12 permite observar, de forma direta, que a média de resistência à tração do processo a *laser* foi superior à do TIG em todas as espessuras. Também evidencia a complexidade da análise de consistência: o TIG se mostrou um processo mais estável (menor DP) nas chapas de 3,00 mm e 6,00 mm, enquanto na chapa de 1,50 mm, ambos os processos apresentaram alta variabilidade (DP elevado).

A visualização comparativa destes resultados de média é apresentada na Figura 17, que plota o desempenho de todos os cenários.

Figura 17 – Comparativo da Tensão Máxima Média (LRT) entre os processos TIG e *laser* para as três espessuras de chapa analisadas.



Fonte: O autor (2025).

A Figura 17 torna indiscutível a resposta à questão-problema: no aço inox AISI 304, para as três espessuras testadas, o processo a *laser* entregou um desempenho mecânico (Limite de Resistência à Tração) significativamente superior ao TIG.

Fica claro que o ponto ótimo de operação para ambos os processos foi na chapa de 3,00 mm, onde o *laser* atingiu seu pico de 705,65 MPa e o TIG seu pico de 432,01 MPa. A chapa de 6,00 mm representou um desafio limite, causando uma queda de desempenho em ambos os métodos. A análise detalhada, contudo, mostra que mesmo o desempenho em queda do *laser* na chapa de 6,00 mm foi superior ao melhor desempenho do TIG na chapa de 3,00 mm, reforçando sua superioridade.

Esta análise técnica e quantitativa, que comprova a superioridade mecânica do *laser* e identifica os desafios de consistência em cada processo, fornece a base para as conclusões finais do trabalho.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho se propôs a comparar o desempenho mecânico de juntas soldadas em aço inoxidável AISI 304, executadas pelos processos TIG e a *laser*, utilizando o ensaio de tração como método de análise. A investigação partiu da questão-problema sobre qual processo apresentaria o melhor desempenho mecânico. Com base nos resultados experimentais obtidos, os objetivos propostos pelo estudo foram plenamente alcançados.

Conclui-se, que o processo de soldagem a *laser* apresentou um desempenho mecânico (Limite de Resistência à Tração) superior ao processo TIG em todas as espessuras de chapa avaliadas.

A superioridade do processo a *laser* foi evidenciada quantitativamente nos ensaios. Na chapa de 1,50 mm, a resistência média do *laser* (556,07 MPa) foi 67,10% superior à do TIG (332,68 MPa). Na chapa de 3,00 mm, onde ambos os processos atingiram seu pico de desempenho, a superioridade do *laser* foi de 63,30% (705,65 MPa contra 432,01 MPa). Finalmente, na chapa de 6,00 mm, o *laser* (418,14 MPa) manteve-se 46,0% mais resistente que o TIG (286,32 MPa). Notoriamente, mesmo o pior resultado válido do *laser* na chapa de 6,00 mm (432,63 MPa) foi superior ao melhor resultado do TIG na chapa de 3,00 mm (482,05 MPa, embora o CP 1 do TIG tenha sido 407,49 Mpa).

As conclusões deste estudo possuem implicações práticas diretas para a indústria metalmeccânica, especialmente para o caso prático que motivou este trabalho. A principal vantagem divulgada da soldagem a *laser* é a produtividade; no entanto, este estudo comprova que a tecnologia não apenas aumenta a velocidade, mas também gera juntas com integridade estrutural e resistência mecânica significativamente maiores. O processo TIG, embora tenha se mostrado mais estável em espessuras maiores (como 6,00 mm), opera em um patamar de resistência muito inferior. Esta comprovação fornece um subsídio técnico e quantitativo crucial para justificar o investimento na tecnologia a *laser* em aplicações onde o desempenho mecânico é um requisito crítico de engenharia.

Reconhece-se que este estudo se limitou à análise das propriedades mecânicas de tração. A análise da consistência (desvio padrão) mostrou-se um ponto complexo, com ambos os processos apresentando alta variabilidade na chapa de 1,50 mm e o *laser* mostrando instabilidade na chapa de 6,00 mm, indicando a necessidade de um controle de processo rigoroso para garantir a repetibilidade.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a investigação de outros fatores críticos, especialmente considerando a aplicação na indústria alimentícia. A realização de ensaios de microdureza na ZTA, uma análise metalográfica para comparar a microestrutura e, fundamentalmente, ensaios de resistência à corrosão, forneceriam um entendimento ainda mais completo sobre o impacto de cada processo na vida útil e segurança dos equipamentos fabricados em aço AISI 304.

REFERÊNCIAS

- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6892-1:2024: Materiais metálicos — Ensaio de tração — Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro, 2024.
- AWS. AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook – Volume 1: Welding Science and Technology**. 9. ed. Miami: AWS, 2015.
- BALMER. **Manual de Operação: Fonte de Soldagem a arco TIG AC/DC pulsado MaxxiTIG 300 P AC/DC Multivoltagem**. Ijuí: Fricke Soldas Ltda., 2025. Disponível em: https://www.balmer.com.br/documentos/29-07-2020-11-07-27_1_doc_30.pdf. Acesso em: 2 set. 2025.
- CALLISTER, W. D., Jr.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- ENDLER, Karilen. **Análise do comportamento mecânico de tubos de aço inoxidável AISI 304L submetidos a diferentes processos de soldagem**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2022.
- HSOLDAS. **Laser HS 65**. H Soldas, 2025. Disponível em: <https://hsoldas.com.br/produto/laser-hs-65/>. Acesso em: 2 set. 2025.
- RIBEIRO, Júlio César Bento. **Análise de técnicas para a soldagem TIG automatizada**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.
- RICHARTZ, Tiago de Souza. **Aplicação de um LASER de fibra de alta potência para soldagem autógena de juntas espessas**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.