

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL  
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**DOUGLAS DE SOUZA PEREIRA**

**ESTUDO DE UM PRODUTO SOLDADO: UMA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE  
OS PROCESSOS DE SOLDAGEM MIG/MAG MANUAL E ROBOTIZADA**

**CAXIAS DO SUL**

**2025**

**DOUGLAS DE SOUZA PEREIRA**

**ESTUDO DE UM PRODUTO SOLDADO: UMA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE  
OS PROCESSOS DE SOLDAGEM MIG/MAG MANUAL E ROBOTIZADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como requisito parcial para a obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Mecânica pela  
Universidade de Caxias do Sul.

Área de Concentração: Processos Metalúrgicos

Orientador: Prof. Me. Victor Hugo Velazquez  
Acosta

**CAXIAS DO SUL**

**2025**

**DOUGLAS DE SOUZA PEREIRA**

**ESTUDO DE UM PRODUTO SOLDADO: UMA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE  
OS PROCESSOS DE SOLDAGEM MIG/MAG MANUAL E ROBOTIZADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como requisito parcial para a obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Mecânica pela  
Universidade de Caxias do Sul.

Área de Concentração: Processos Metalúrgicos

Orientador: Prof. Me. Victor Hugo Velazquez  
Acosta

**Aprovado em:** 02 / 12 / 2025

**Banca Examinadora**

---

Prof. Me. Eng. Mec. Victor Hugo Velazquez Acosta  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

---

Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

---

Me. Eng. Mec. Samuel Inácio Velho

## RESUMO

Este trabalho apresentou um estudo comparativo entre os processos de soldagem MIG/MAG manual e robotizado aplicados à fabricação de um componente balancim de suspensão rodoviária em aço ASTM A36. Foram realizadas análises de produtividade, macrografia, microestrutura, microdureza, ensaio mecânico e inspeção visual dos cordões de solda. A metodologia compreendeu a soldagem de amostras pelos dois processos, a medição de tempos, a avaliação metalúrgica e ensaios dinâmicos sob carga. Os resultados mostraram que o processo robotizado apresentou ganho de 37,8% na produtividade e eficiência média de 87,4%, contra 61,7% do processo manual, além de menor variabilidade entre amostras e maior repetibilidade. A análise visual revelou que 39% das soldas manuais apresentaram falta de fusão, enquanto as soldas robotizadas apresentaram maior uniformidade e ausência de sobreposição. A macrografia indicou cordões de geometria semelhantes entre os processos, porém influenciados pelo posicionamento da tocha e pela posição de soldagem. A microestrutura da soldagem manual apresentou maior presença de ferrita acicular e variação no tamanho dos grãos, característica de flutuação térmica, enquanto a soldagem robotizada evidenciou predomínio de ferrita secundária e menor concentração de ferrita de contorno de grão, associadas a um resfriamento mais uniforme. Os valores de microdureza mostraram comportamento típico do processo MIG/MAG, com picos no metal fundido e médias semelhantes entre os processos. Nos ensaios mecânicos, os componentes soldados manualmente resistiram a 500 ciclos sem falhas, enquanto os componentes robotizados apresentaram ruptura em cordões inferiores devido à falta de fusão local, ocasionando trincas em cordões próximos. Conclui-se que o processo robotizado proporciona maior produtividade e controle dimensional, enquanto a qualidade final depende do correto ajuste dos parâmetros de soldagem e do posicionamento da tocha.

**Palavras chave:** Soldagem MIG/MAG; Processo robotizado; Processo manual; Aço ASTM A36; Microestrutura.

## ABSTRACT

This work presents a comparative study between manual and robotic MIG/MAG welding processes applied to the manufacturing of a road suspension rocker arm component made of ASTM A36 steel. Analyses of productivity, macrography, microstructure, microhardness, mechanical testing, and visual inspection of the weld beads were performed. The methodology comprised welding samples using both processes, measuring production times, conducting metallurgical evaluations, and performing dynamic load tests. The results showed that the robotic process achieved a 37.8% productivity gain and an average efficiency of 87.4%, compared to 61.7% for the manual process, in addition to lower variability between samples and greater repeatability. The visual analysis revealed that 39% of the manual welds exhibited lack of fusion, whereas the robotic welds showed higher uniformity and absence of overlap. The macrographic analysis indicated similar bead geometries between the processes, though influenced by torch positioning and welding position. The microstructure of the manual welding presented a higher presence of acicular ferrite and grain size variation, characteristic of thermal fluctuation, while the robotic welding showed predominance of secondary ferrite and lower concentration of grain boundary ferrite, associated with more uniform cooling. The microhardness values showed a typical behavior of the MIG/MAG process, with peaks in the weld metal and similar averages between processes. In the mechanical tests, the manually welded components withstood 500 cycles without failure, while the robotically welded components showed fracture in lower beads due to local lack of fusion, causing cracks in adjacent welds. It is concluded that the robotic process provides higher productivity and dimensional control, while the final quality depends on the correct adjustment of welding parameters and torch positioning.

**Keywords:** MIG/MAG welding; Robotic process; Manual process; ASTM A36 steel; Microstructure.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – ZTA processo soldagem Manual. ....  | 18 |
| Figura 2 – ZTA Processo de Soldagem Robotizado.....  | 19 |
| Figura 3 – Microconstituintes obtidos pelo processo de soldagem manual. ....                               | 20 |
| Figura 4 – Microconstituintes obtidos pelo processo de soldagem robotizado. ....                           | 21 |
| Figura 5 – Macrografia Comparativa entre Processos de Soldagem.....  | 22 |
| Figura 6 – Macrografia Processo de Soldagem Automatizado. ....   | 22 |
| Figura 7 – Análise Visual do Cordão de Solda: Análise Comparativa entre Soldagem Manual e Robotizada. .... | 25 |
| Figura 8 – Componentes Fabricados com Aço ASTM A36.....  | 28 |
| Figura 9 – Máquina de Solda Hawk 305 .....   | 30 |
| Figura 10 – Fonte de Soldagem OTC e Célula de Soldagem Robotizada.....                                     | 30 |
| Figura 11 – Braço Robótico de Solda e Mesa de Trabalho. ....   | 31 |
| Figura 12 – Braço Robótico de Soldagem e Mesas de Trabalho.....  | 31 |
| Figura 13 – Dispositivo de Posicionamento para Soldagem Robotizada.....                                    | 32 |
| Figura 14 – Componente Montado por Ponteamento de Solda.....   | 33 |
| Figura 15 – Componente Soldado CAD 3D.....   | 34 |
| Figura 16 – Amostra do estudo fixada no dispositivo de soldagem.....                                       | 35 |
| Figura 17 – Processo de soldagem robotizado .....  | 36 |
| Figura 18 – Processo de soldagem manual.....   | 37 |
| Figura 19 – Indicação dos pontos de análise metalúrgica. ....  | 38 |
| Figura 20 – Estereoscópio Gênerico.....  | 39 |
| Figura 21 – Microscópio Zeiss Observer.D1m .....   | 40 |
| Figura 22 – Ilustração do Corte Transversal da Junta Soldada. ....   | 40 |
| Figura 23 – Microdurômetro Shimadzu HMV-2.....   | 41 |
| Figura 24 – Configurações de simulação no software Simulation. ....  | 42 |
| Figura 25 – Configurações de simulação no software Simulation. ....  | 42 |
| Figura 26 – Descontinuidades encontradas na análise visual.....  | 48 |
| Figura 27 – Aspecto visual dos cordões de solda analisados. ....   | 51 |
| Figura 28 – Macrografia Cordão Inferior entre Chapa de Atrito e Chapa Lateral .....                        | 53 |
| Figura 29 – Macrografia Cordão Superior entre Chapa de Atrito e Chapa Lateral.....                         | 56 |
| Figura 30 – Microestrutura encontrada do metal base ASTM A36. ....   | 60 |
| Figura 31 – Microestrutura zona fundida cordão superior. ....  | 61 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 32 – Microestrutura zona fundida cordão inferior. ....                | 61 |
| Figura 33 – Microestrutura encontrada na ZTA. ....                           | 62 |
| Figura 34 – Análise de elementos finitos do componente soldado. ....         | 65 |
| Figura 35 – Resultado de tensão encontrado no cordão de solda inferior. .... | 65 |
| Figura 36 – Equipamento utilizado no ensaio mecânico. ....                   | 66 |
| Figura 37 – Rompimento da fusão do cordão de solda inferior. ....            | 67 |
| Figura 38 – Defeito cordão de solda superior.....                            | 68 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|  |    |
|--|----|
| Gráfico 1 – Tamanho Médio da ZTA dos Processos de Soldagem.....  | 19 |
| Gráfico 2 – Perfil de Microdureza, procedimentos manual e robotizado. ....   | 23 |
| Gráfico 3 – Perfil de Microdureza da junta soldada. ....   | 23 |
| Gráfico 4 – Resultados de Dureza Vickers.....  | 24 |
| Gráfico 5 – Resultado Ensaio de Tração. ....   | 24 |
| Gráfico 6 – Produtividade Ganha no Processo Robotizado. ....   | 26 |
| Gráfico 7 – Comparação entre os tempos de soldagem manual e robotizado. ....   | 43 |
| Gráfico 8 – Média e desvio padrão dos tempos de processo de soldagem.....  | 44 |
| Gráfico 9 – Tempos de limpeza do componente soldado.....   | 45 |
| Gráfico 10 – Média de deposição de material de solda e desvio padrão.....  | 45 |
| Gráfico 11 – Quantidade de descontinuidades por processo.....  | 47 |
| Gráfico 12 – Análise aspecto visual. ....  | 49 |
| Gráfico 13 – Análise aspecto visual. ....  | 50 |
| Gráfico 14 – Análise aspecto visual. ....  | 50 |
| Gráfico 15 – Média e desvio padrão dos tamanhos dos cordões de solda.....  | 52 |
| Gráfico 16 – Dimensões macrográficas dos cordões de solda inferiores entre chapa de atrito e chapa lateral.....                  | 54 |
| Gráfico 17 – Médias das dimensões macrográficas dos cordões de solda inferiores entre chapa de atrito e chapa lateral.....       | 55 |
| Gráfico 18 – Tamanho da área da ZTA cordão inferior. ....  | 55 |
| Gráfico 19 – Características macrográficas dos cordões de solda superiores entre chapa de atrito e chapa lateral.....            | 57 |
| Gráfico 20 – Médias das características macrográficas dos cordões de solda superiores entre chapa de atrito e chapa lateral..... | 58 |
| Gráfico 21 – Tamanho da área da ZTA cordão superior. ....  | 59 |
| Gráfico 22 – Perfil de microdureza Vickers dos cordões de solda dos processos manual e robotizado. ....                          | 63 |
| Gráfico 23 – Média de microdureza Vickers dos cordões de solda. ....   | 64 |
| Gráfico 24 – Resultados do ensaio mecânico. ....   | 67 |

## **LISTA DE TABELAS**

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Propriedades Químicas e Mecânicas do Aço ASTM A36.....                   | 28 |
| Tabela 2 – Definição Siglas do Arame de Solda. ....                                 | 29 |
| Tabela 3 – Propriedades do Arame de Solda ER70-S6. ....                             | 29 |
| Tabela 4 – Faixa de Parâmetros de Solda Utilizadas na Fabricação do Componente..... | 33 |

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....   | 12 |
| 1.1 JUSTIFICATIVA .....   | 14 |
| 1.2 OBJETIVO GERAL .....  | 15 |
| 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....   | 15 |
| <b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....  | 16 |
| 2.1 SOLDAGEM .....  | 16 |
| 2.2 SOLDAGEM MIG/MAG .....  | 16 |
| <b>2.2.1 Soldagem robotizada</b> .....  | 17 |
| 2.3 SOLDAGEM MANUAL X ROBOTIZADA .....  | 18 |
| <b>2.3.1 Microestrutura e macrografia: soldagem manual x robotizada</b> ..... | 18 |
| <b>2.3.2 Microdureza: soldagem manual x robotizada</b> .....                  | 23 |
| <b>2.3.3 Ensaio mecânicos: soldagem manual x robotizada</b> .....             | 24 |
| <b>2.3.4 Análise visual: soldagem manual x robotizada</b> .....               | 25 |
| <b>2.3.5 Produtividade: soldagem manual x robotizada</b> .....                | 26 |
| <b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....  | 28 |
| 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS .....  | 28 |
| 3.2 EQUIPAMENTOS DE SOLDAGEM .....  | 29 |
| 3.3 PRODUÇÃO DOS COMPONENTES PARA ESTUDO .....                                | 32 |
| <b>3.3.1 Soldagem Robotizada</b> .....  | 34 |
| <b>3.3.2 Soldagem Manual</b> .....  | 34 |
| 3.4 PRODUTIVIDADE: TEMPO, EFICIÊNCIA E QUALIDADE DOS PROCESSOS .....          | 34 |
| <b>3.4.1 Soldagem robotizada</b> .....  | 35 |
| <b>3.4.2 Soldagem manual</b> .....  | 36 |
| 3.5 ANÁLISE VISUAL .....  | 37 |
| 3.6 ANÁLISE METALÚRGICA .....   | 37 |

|  |    |
|--|----|
| <b>3.6.1 Macrografia</b> .....   | 38 |
| <b>3.6.2 Microestrutura</b> .....  | 39 |
| <b>3.6.3 Microdureza</b> .....   | 40 |
| 3.7 ENSAIO MECÂNICO .....  | 41 |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....   | 43 |
| 4.1 PRODUTIVIDADE: TEMPO, EFICIÊNCIA E QUALIDADE DOS PROCESSOS .....           | 43 |
| 4.2 ANÁLISE VISUAL .....   | 46 |
| 4.3 ANÁLISE METALURGICA .....  | 53 |
| <b>4.3.1 Macrografia</b> .....   | 53 |
| <b>4.3.2 Microestrutura</b> .....  | 60 |
| <b>4.3.3 Microdureza</b> .....   | 63 |
| 4.4 ENSAIO MECÂNICO .....  | 65 |
| 4.5 MELHORIAS .....  | 68 |
| <b>5 CONCLUSÃO</b> .....   | 70 |
| <b>6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....                                | 72 |
| <b>REFERÊNCIAS</b> .....   | 73 |
| <b>APÊNDICES</b> .....   | 75 |
| APÊNDICE A: DISPOSITIVO PARA MONTAGEM DO PRODUTO .....                         | 75 |
| APÊNDICE B: MASSA INICIAL POR AMOSTRA DE CONJUNTO MONTADO.....                 | 75 |
| APÊNDICE C: PARÂMETROS DE SOLDAGEM ROBOTIZADA .....                            | 75 |
| APÊNDICE D: ANÁLISE DE DADOS ANOVA DOS TEMPOS DE ARCO ABERTO .....             | 76 |
| APÊNDICE E: DEPOSIÇÃO DE ARAME DE SOLDA .....                                  | 76 |
| APÊNDICE F: ANÁLISE DE DADOS DA DEPOSIÇÃO DE MATERIAL DE ARAME DE SOLDA.....   | 76 |
| APÊNDICE G: RESULTADOS DA ANÁLISE VISUAL.....                                  | 77 |
| APÊNDICE H: MICROESTRUTURA ZTA .....   | 80 |
| APÊNDICE I: ANÁLISE DE DADOS ANOVA DOS RESULTADOS DE MICRODUREZA VICKERS. .... | 81 |

|   |    |
|---|----|
| <b>ANEXOS</b> .....   | 82 |
| ANEXO A: SEQUENCIAMENTO DE SOLDAGEM.....  | 82 |
| ANEXO B: CONFIGURAÇÕES DE PROPRIEDADES DOS MATERIAIS UTILIZADOS<br>NO SIMULATION..... | 83 |
| ANEXO C: MÉDIA E DESVIO PADRÃO, TEMPO DE SOLDAGEM.....                                | 85 |
| ANEXO D: RESULTADO DE TENSÃO ENCONTRADO NO CORDÃO DE SOLDA<br>INFERIOR.....           | 85 |

## 1 INTRODUÇÃO

A soldagem é um dos processos de fabricação mais utilizados na indústria moderna, sendo fundamental para a união de componentes metálicos em diversas aplicações, desde estruturas leves até equipamentos de grande porte. Dentre os diversos métodos disponíveis, a soldagem a arco elétrico com gás de proteção, GMAW (Gas Metal Arc welding), mais popularmente conhecida como MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas), destaca-se por sua eficiência, versatilidade e capacidade de produzir uniões de alta qualidade. Segundo Marques et al. (2017, pag.34), a descoberta do arco elétrico ocorreu no início do século XIX por Sir Humphry Dave, ocasionando um avanço muito grande no desenvolvimento do processo de soldagem. Já o conceito de soldagem ao arco elétrico com gás de proteção tem como data de registro o ano de 1925, conforme Santos (2015, pag.13). Atualmente o processo de soldagem MIG/MAG é um dos métodos de produção mais empregados globalmente, devido as suas grandes vantagens, como, a possibilidade de realizar soldas mais rápidas, sem necessidade de remoção de escória e grande possibilidade de automatização.

No setor da indústria metal mecânica a soldagem através do processo MIG/MAG está bem enraizada, sendo um processo fortemente utilizada na fabricação de implementos rodoviários. Conforme dados da Anfir (2025), o mercado de vendas de implementos rodoviários cresceu no geral 5,04% no ano de 2024. Com essa crescente na venda de implementos, conseqüentemente o setor de peças de reposição para estes equipamentos cresce junto, levando em consideração que ocorre a renovação da frota, mas os implementos semi-novos ou mais velhos continuam na ativa, portanto, ocorre a necessidade de processos de soldagem cada vez mais eficazes, produtivos e que tragam garantia de segurança nos componentes que entram no mercado. Tamanho é o crescimento do setor, que a Suspensys, uma grande empresa especializada na fabricação e desenvolvimento de componentes para implementos rodoviários, criou uma linha especialmente para atender o mercado de reposição, a CargoParts, alavancando a indústria metalúrgica prestadora de serviços terceirizados. Com esta demanda crescente, as empresas que prestam serviços para estas grandes fabricas do ramo, obrigam-se a investir em desenvolvimento e tecnologias para entregar um produto de grande qualidade e que traga a segurança e eficiência necessárias ao produto.

Com os avanços tecnológicos e desenvolvimentos de processos, as células robotizadas no setor de soldagem estão em uma crescente na indústria fabril, fazendo parte da chamada quarta revolução industrial ou indústria 4.0. A soldagem robotizada é um processo automatizado que utiliza robôs para soldar peças e componentes, aumentando a eficiência e a precisão. O sistema é composto, essencialmente, por um braço robótico, uma fonte de energia, um alimentador de arame e uma tocha de solda. Além disso, pode ser integrado a posicionadores móveis, que permitem a movimentação das peças, proporcionando ganhos significativos em produtividade. A automação da soldagem é aplicada principalmente nos

processos MIG/MAG, TIG e arame tubular. A implementação da soldagem robotizada traz diversos benefícios, especialmente na redução de custos operacionais e no aumento da qualidade e repetibilidade do processo. Este avanço tecnológico também vem para suprir uma alta carência no mercado de trabalho, que é a falta da mão de obra qualificada para a realização da soldagem manual. O investimento em capacitação de operadores e programadores dos sistemas de soldagem automatizada contribui para ampliar a qualificação profissional disponível no setor, aumentando a empregabilidade e estimulando a criação de postos de trabalho com maior valor agregado.

O papel das empresas prestadoras de serviço no ramo metal mecânico é fundamental para absorver altas demandas das grandes empresas nacionais e internacionais, como é o caso da empresa Brassud Componentes Metálicos, presente no setor da indústria metalúrgica a 14 anos, especializada na fabricação de componentes metálicos, especialmente para o setor de implementos rodoviários. A empresa conta com máquinas para realizar diversos processos, desde máquinas de corte a laser até robôs de soldagem MIG/MAG. Tratando-se de robôs de solda, a empresa possui 3 células robotizadas de solda, sendo duas delas com mesas que giram 360°, proporcionando maiores possibilidades na fabricação de peças, mais eficiência e produtividade. As células robotizadas de soldagem têm capacidade produtiva para fabricar mais de 300 balancins por dia, trabalhando em dois turnos. O balancim é um componente estrutural essencial em implementos rodoviários, especialmente em suspensões de veículos pesados, como carretas e semirreboques. Sua principal função é distribuir de maneira equilibrada a carga entre os eixos, garantindo maior estabilidade e reduzindo o impacto sobre a estrutura do veículo.

Com a chegada da automatização com células robotizadas de soldagem na indústria metalúrgica, os questionamentos começaram a surgir sobre o quanto a solda realizada por um robô seria melhor que a soldagem manual. Algumas das vantagens da robotização da soldagem são a produtividade e repetibilidade, porém caso aconteça alguma colisão que desalinhe a tocha de soldagem e não ocorra nenhum alarme, a solda será realizada de forma irregular, com isso, ocasionando o refugo dos componentes ou até mesmo o envio do componente irregular para processos posteriores. Fatos estes que indicam a necessidade de cuidados e essencialmente pessoas qualificadas para a operação e programação destes sistemas automatizados de soldagem.

De acordo com Albuquerque (2011, pag.323), a automatização no processo de soldagem permite um controle mais preciso dos parâmetros operacionais, resultando em maior eficiência, redução do tempo de soldagem e alta repetibilidade na execução das juntas soldadas. Em contrapartida, na soldagem manual, a qualidade do cordão de solda está diretamente relacionada à habilidade e experiência do soldador, tornando a padronização mais desafiadora.

Ainda segundo Albuquerque (2011, pag.323), os processos automatizados ou robotizados permitem uma soldagem com maior velocidade de deslocamento, resultando em uma zona termicamente

afetada (ZTA) de menor tamanho e maior uniformidade. Esse último fator ocorre devido à menor variabilidade das condições operacionais, garantindo maior repetibilidade e controle sobre o processo.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Este trabalho se justifica pela necessidade de uma análise comparativa aprofundada entre os processos de soldagem MIG/MAG manual e robotizado, considerando não apenas a integridade estrutural do produto final, mas também sua viabilidade produtiva e operacional. A pesquisa abordará um estudo de caso em um componente crítico de suspensão rodoviária, o balancim, que requer alta resistência mecânica e confiabilidade na sua aplicação. Assim, a avaliação detalhada das características metalúrgicas, resistência mecânica, distribuição de tensões e qualidade visual das juntas soldadas permitirá compreender as vantagens e limitações inerentes a cada método.

Além disso, a realização de ensaio mecânico dinâmico para avaliar a fadiga do cordão soldado e a aplicação da análise de elementos finitos para determinar a resistência da união soldada, justifica-se ao proporcionarem dados quantitativos para embasar tecnicamente a qualidade de ambos os processos de soldagem.

A análise da dureza do cordão de solda e da zona termicamente afetada (ZTA) é fundamental para a compreensão das diferenças de desempenho entre os processos de soldagem manual e robotizado. Essa investigação permitirá estabelecer uma relação direta entre as alterações microestruturais geradas pelo aporte térmico e o comportamento mecânico da junta soldada, evidenciando como cada método impacta a resistência e a qualidade final do produto.

Dessa forma, a pesquisa se justifica pela necessidade de avaliar, de maneira criteriosa e embasada em pesquisas anteriores (Cunha *et al.*, 2024; Schio, 2019; Albuquerque, 2011) onde identificaram diferenças significativas entre os processos manual e robotizado, especialmente no controle térmico, formação microestrutural e distribuição de dureza. Enquanto a soldagem manual apresenta maior variabilidade a robotizada demonstra maior uniformidade nos resultados microestruturais e também uma melhor repetibilidade. Ensaio mecânicos (Schio, 2019) também comprovam maior resistência e confiabilidade no processo robotizado, além de ganhos produtivos expressivos (Fraga *et al.*, 2013; Cremon Junior *et al.*, 2019). Apesar desses resultados, ainda se verifica a necessidade de estudos aplicados em componentes estruturais críticos, como o balancim, justificando a presente pesquisa.

Justifica-se também pela falta de documentação que ateste a qualidade do serviço de soldagem prestado pela empresa Brassud Componentes Metálicos. Este trabalho tem importância para a empresa, pois permitirá validar cientificamente a qualidade dos serviços de soldagem prestados. Os resultados fornecerão dados técnicos que poderão embasar melhorias e inovações no setor produtivo. Além disso,

possibilitarão a alternância entre os métodos manual e robotizado sempre que necessário, seja por aumento de demanda ou por limitações operacionais dos robôs, assegurando a qualidade do produto final.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é apresentar um estudo de um produto soldado no aço ao carbono, comparando os cordões de solda resultantes dos processos de soldagem MIG/MAG robotizado e manual.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são divididos em:

- Avaliar o processo de fabricação das amostras dos balancins em aço ASTM A36, verificando a repetibilidade dos processos de soldagem e as características geométricas dos cordões de solda.
- Análise das características metalúrgicas do cordão soldado de ambos os processos.
- Análise através de elementos finitos, para verificar tensões no componente soldado e determinar carga aplicada no ensaio mecânico.
- Análise dos ensaios mecânicos para verificar a resistência dos cordões de solda de ambos os processos.
- Análise visual dos cordões soldados, verificando a existência de descontinuidades.
- Avaliação comparativa da produtividade em ambos os processos de soldagem.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos necessários para a compreensão técnica dos processos de soldagem abordados neste estudo. Inicialmente, discute-se o princípio da soldagem por fusão e os conceitos essenciais relacionados ao arco elétrico e à proteção gasosa. Em seguida, são detalhados os aspectos que caracterizam o processo MIG/MAG, incluindo sua classificação, comportamento do arco e influência dos gases de proteção. O capítulo também introduz as particularidades dos métodos manual, mecanizado e robotizado, destacando como fatores como controle térmico, estabilidade operacional e parametrização influenciam a formação do cordão, a microestrutura, a dureza e o desempenho mecânico da junta soldada. Assim, este referencial teórico estabelece a base necessária para interpretar os resultados experimentais e sustentar a análise comparativa desenvolvida nos capítulos posteriores.

### 2.1 SOLDAGEM

Conforme Weiner *et al.* (2019, pag. 12), denomina-se soldagem o processo de união entre duas partes metálicas, utilizando uma fonte de calor, com ou sem a aplicação de pressão, gerando como resultado a solda. Apesar de o arco elétrico ter sido desenvolvido no século XIX, o processo de soldagem teve seu grande impulso durante a segunda guerra mundial, com a fabricação de navios e aviões, sendo grande parte de seus componentes soldados.

Conforme Marques *et al.* (2017, pag. 6), os processos de soldagem por fusão podem ser classificados em subgrupos conforme a fonte de energia utilizada, sendo os processos a arco, com arco elétrico como fonte, os mais relevantes na indústria. Devido à tendência de reação do material fundido com os gases da atmosfera, esses processos geralmente empregam proteção para reduzir essas reações. Já segundo Weiner *et al.* (2019, pag. 14), os processos de soldagem por fusão incluem soldagem por resistência, a arco submerso, com plasma, por feixe de elétrons, a gás, com eletrodo revestido, com eletrodo tubular, a laser, TIG e MIG/MAG.

### 2.2 SOLDAGEM MIG/MAG

Segundo Santos (2015, pag. 59), a soldagem MIG/MAG utiliza o arco elétrico como fonte de calor, transmitido por um eletrodo de arame nu alimentado de forma contínua até o metal de base. O calor funde a extremidade do eletrodo, formando a poça de fusão e permitindo a deposição do metal fundido. O

processo pode ser classificado como automático, quando o movimento da tocha é mecanizado, ou semiautomático, quando o deslocamento é realizado manualmente pelo soldador.

Conforme Marques *et al.* (2017, pag. 216), a proteção do arco elétrico e da solda contra a contaminação atmosférica ocorre por meio de gases ou misturas gasosas, sendo o processo classificado como MIG (*Metal Inert Gas*) quando se utilizam gases inertes e como MAG (*Metal Active Gas*) quando predominam gases ativos. Ainda segundo Marques *et al.* (2017, pag. 242), o tipo de gás afeta o comportamento do arco, a transferência de metal, a penetração, o formato do cordão, a velocidade de soldagem e o custo. Gases inertes são usados na soldagem de metais não ferrosos, enquanto gases ativos melhoram a estabilidade do arco em metais ferrosos.

A soldagem MIG/MAG, têm sido um dos processos de soldagem que apresentaram um maior crescimento em termos de utilização, nos últimos anos, em escala mundial. Este crescimento ocorre principalmente devido à tendência em substituir, sempre que possível, a soldagem manual por processos mecanizados, para a obtenção de maior produtividade durante a soldagem. Estes processos têm se mostrado os mais adequados, dentre os processos de soldagem a arco, soldagem semiautomática e soldagem com utilização de robôs. (Marques *et al.* 2017, pag. 221)

### **2.2.1 Soldagem robotizada**

De acordo com Marques *et al.* (2017, p. 210), no processo MIG/MAG (ou GMAW), a soldagem semimecanizada ocorre quando o soldador conduz a tocha, enquanto o arco elétrico e a alimentação do arame são controlados pela máquina. Quando o deslocamento da tocha é realizado por dispositivo mecânico, o processo é classificado como mecanizado. Já na soldagem automática, o equipamento realiza o acompanhamento da junta - região formada pela interseção entre dois componentes que serão unidos permanentemente pelo processo de soldagem - ajustando a trajetória da tocha e corrigindo o processo de forma contínua. A soldagem robotizada com GMAW representa, assim, um exemplo de soldagem automatizada, integrando tecnologia e fabricação industrial com alta precisão e eficiência.

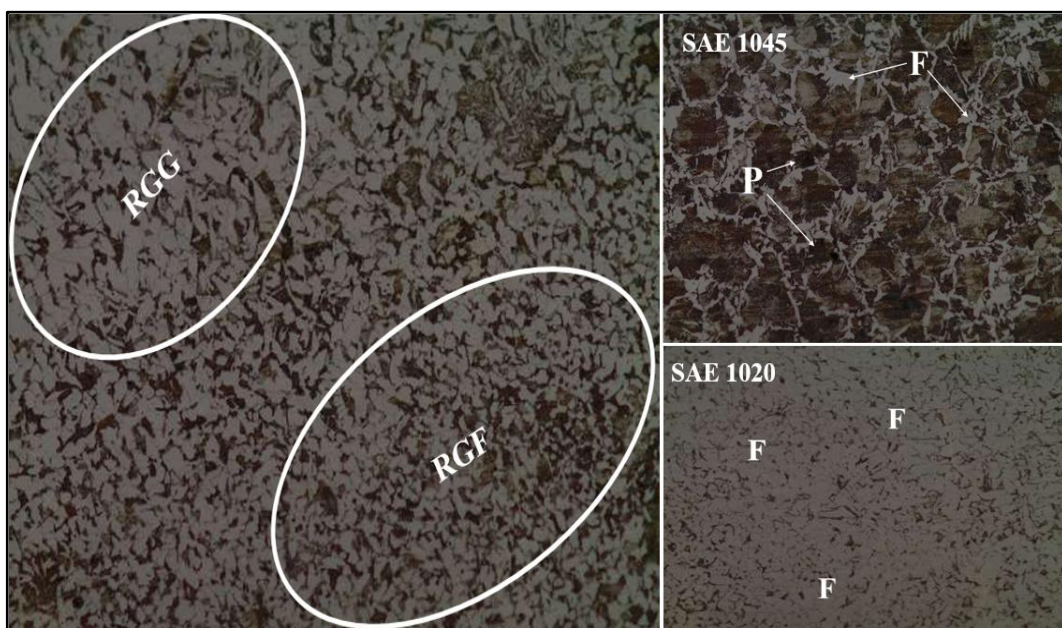
Segundo Faria *et al.* (2022, pag. 2), o processo de soldagem automatizado é realizado por robôs com apoio de sensores, garantindo acuracidade, maior velocidade de ciclo, qualidade da solda e mínima interferência humana, limitada ao posicionamento e remoção da peça, inicialização do programa e inspeção visual final. Ainda conforme Faria *et al.* (2022, pag. 2), a soldagem robotizada exige atenção a fatores críticos, como o método de programação (online ou offline), o planejamento da sequência das soldas, a definição e controle dos parâmetros de soldagem (corrente, tensão, velocidade de alimentação do arame, stick out) e o desenvolvimento da trajetória, sendo todos esses elementos essenciais para assegurar a qualidade técnica do processo.

## 2.3 SOLDAGEM MANUAL X ROBOTIZADA

### 2.3.1 Microestrutura e macrografia: soldagem manual x robotizada

No estudo realizado por Cunha *et al.* (2024), o processo de soldagem manual resultou em uma ZTA mais larga, indicando um controle térmico menos preciso devido ao processo ser muito dependente da habilidade do soldador. No processo manual, também se observou regiões bem características de uma junta soldada, apresentados na Figura 1 com diferenciação entre regiões de grãos grosseiros e finos, indicando diferentes zonas térmicas, assim como a formação de zonas escuras e claras evidenciando a presença de ferrita e perlita, principalmente na região do aço SAE 1045.

Figura 1 – ZTA processo soldagem Manual.

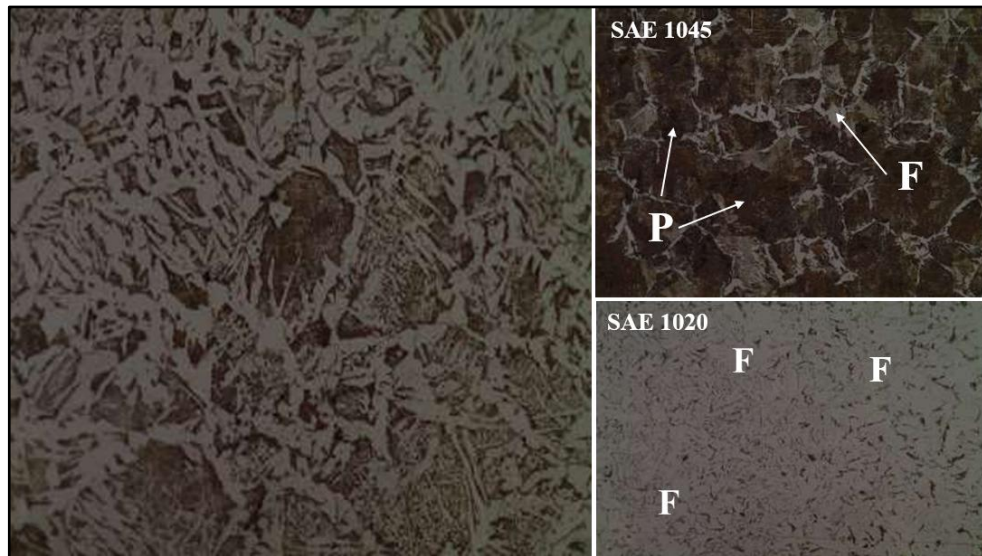


Fonte: Adaptado de Cunha (2024).

Região de Grão Grosseiro (RGG), Região de Grão Fino (RGF), Perlita (P), Ferrita (F).

Ainda no estudo de Cunha *et al.* (2024), a soldagem robotizada apresentou uma ZTA mais estreita e controlada, característico de um processo de soldagem robotizado devido à repetibilidade do processo e controle mais preciso de parâmetros de soldagem. Essa característica permite melhor controle térmico resultando em um resfriamento mais uniforme, reduzindo o risco de formação de grãos grosseiros na ZTA e resultando em uma microestrutura mais homogênea, conforme Figura 2.

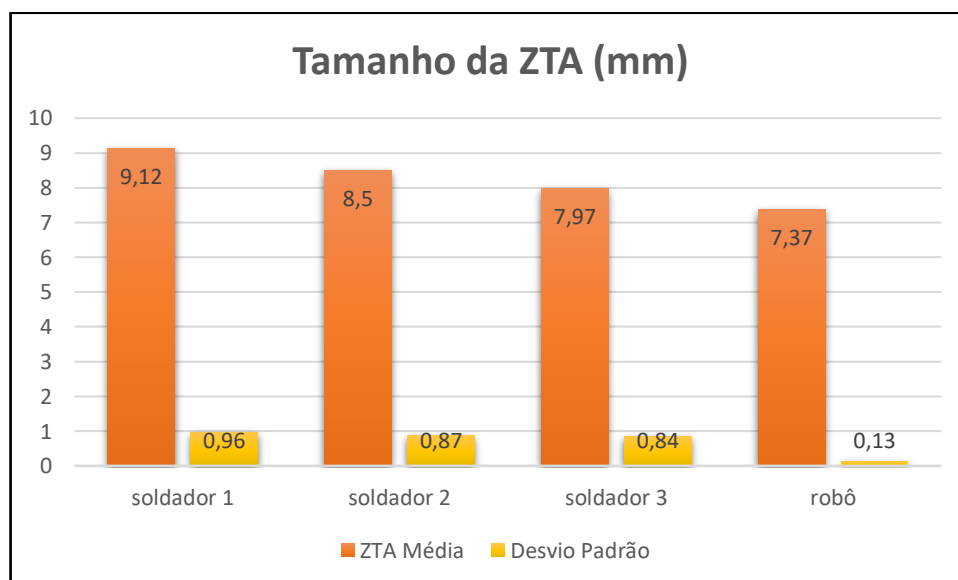
Figura 2 – ZTA Processo de Soldagem Robotizado.



Fonte: Adaptado de Cunha (2024).  
Perlita (P), Ferrita (F).

Como apresentado por Schio (2019, pag.59), o processo de soldagem robotizado realizado em seu estudo, obteve a menor ZTA, porém o processo manual teve como resultado médio um valor mais elevado, evidenciando um aporte térmico menor no processo robotizado. Analisando o desvio padrão das medidas da ZTA, o processo robotizado quase não teve variação, ao contrário do processo manual. Essa diferença, ilustrada no Gráfico 1, confirma a maior estabilidade térmica e repetibilidade do processo automatizado em comparação ao processo manual.

Gráfico 1 – Tamanho Médio da ZTA dos Processos de Soldagem.

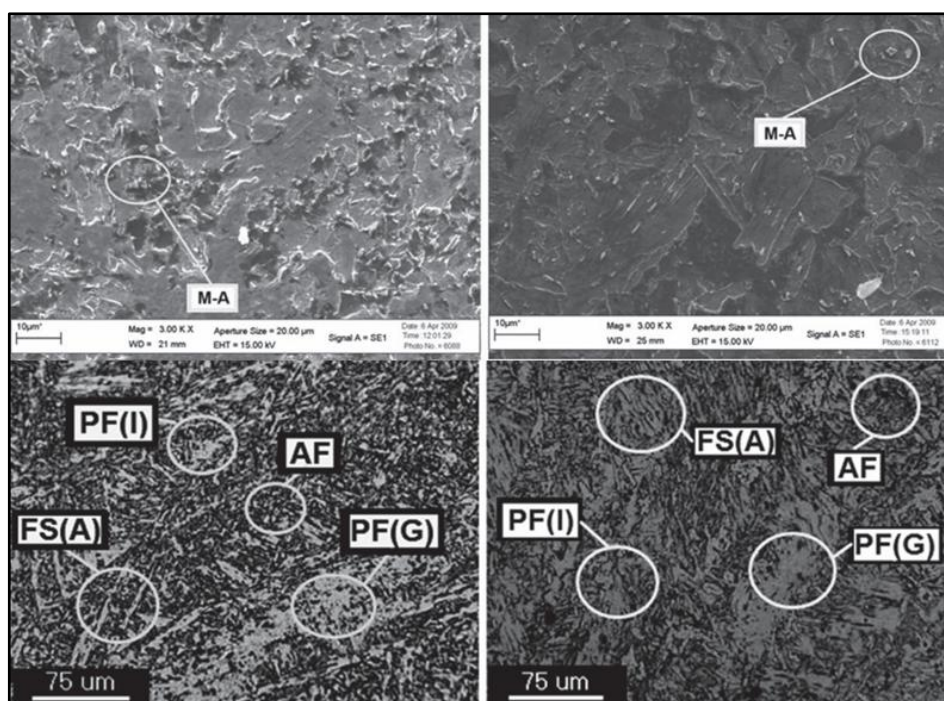


Fonte: Adaptado de Schio (2019)

Conforme Albuquerque (2011, p. 326), ao analisar os resultados relativos ao tamanho de grão na região de grão fino, constatou-se que não ocorreram variações significativas entre os diferentes métodos de soldagem. Já na região de grão grosso, mais sensível às propriedades mecânicas do material, observou-se que os processos de soldagem manual e robotizada, com menores valores de energia de soldagem, resultaram em grãos menores, enquanto aqueles com maior energia de soldagem apresentaram grãos mais espessos.

Segundo Albuquerque (2011, pag.326), a análise dos processos de soldagem manual e robotizada obtiveram resultados diferentes no quesito formação do microconstituente martensita-austenita, como apresentado na Figura 3. Na soldagem manual foram aplicados dois conjuntos de parâmetros, o primeiro com aporte térmico elevado e resfriamento rápido e o segundo com aporte térmico ainda maior e resfriamento mais lento. Essa segunda condição promoveu a decomposição dos microconstituintes martensita-austenita, resultando em menor quantidade desses microconstituintes em comparação ao primeiro conjunto de parâmetros.

Figura 3 – Microconstituintes obtidos pelo processo de soldagem manual.



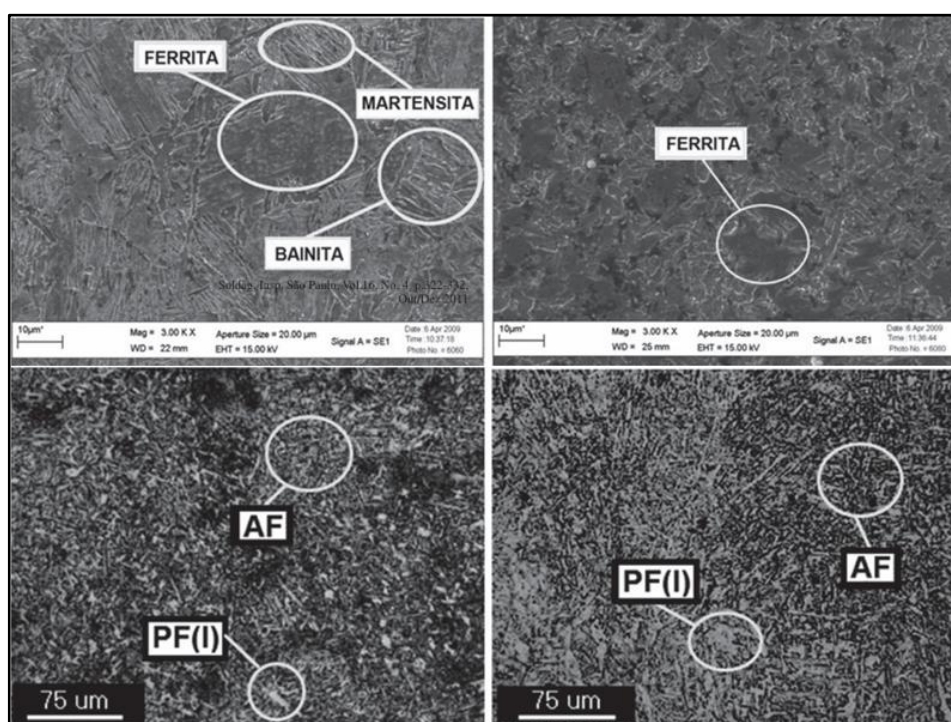
Fonte: Adaptado de Albuquerque (2011).

Microconstituente Martensita-Austenita (M-A), Ferrita Acicular (AF), Ferrita Primária (PF(I)), Ferrita Secundária (FS(A)), Ferrita de Contorno de Grão (PF(G)).

De acordo com Albuquerque (2011), os processos de soldagem robotizados, ao empregarem diferentes níveis de aporte térmico em comparação aos processos manuais, apresentaram variações significativas na formação de microconstituintes. Em determinadas amostras robotizadas, observou-se

ausência de martensita-austenita e baixos teores de martensita, resultado de aportes térmicos reduzidos e consequente resfriamento acelerado. Em outra amostra robotizada, com o maior aporte térmico do estudo, também não houve formação de martensita ou martensita-austenita. Quando presente, a martensita esteve acompanhada de bainita e ferrita, indicando uma microestrutura potencialmente superior em propriedades mecânicas. Além disso, os metais de solda provenientes dos processos robotizados apresentaram aproximadamente o dobro de ferrita acicular em comparação aos processos manuais, os quais, por sua vez, mostraram maior presença de ferrita primária, especialmente de contorno de grão, e ferrita secundária, microestruturas que reduzem a resistência à propagação de trincas, comprometendo a tenacidade e a integridade estrutural das juntas soldadas. A Figura 4 mostra os resultados de microestruturas do processo robotizado.

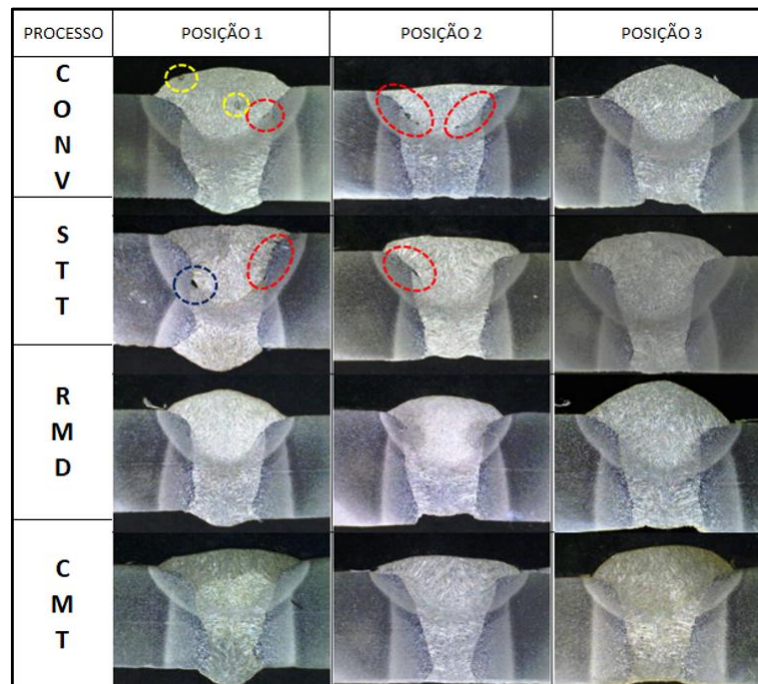
Figura 4 – Microconstituintes obtidos pelo processo de soldagem robotizado.



Fonte: Adaptado de Albuquerque (2011).  
Ferrita Acicular (AF), Ferrita Primária (PF).

Magalhães (2016) apresenta em seu estudo, uma comparação entre uma soldagem convencional GMAW e outros três derivados, sendo eles STT (*Surface Tension Transfer*), RMD (*Regulated Metal Deposition*) e CMT (*Cold Metal Transfer*). Estes processos foram comparados a um sistema automatizado que proporciona a auto regulação da tocha conforme o cordão de solda é realizado. Após realizar a soldagem com cada processo sem a automatização, verificou-se o resultado das macrografias conforme Figura 5.

Figura 5 – Macrografia Comparativa entre Processos de Soldagem.

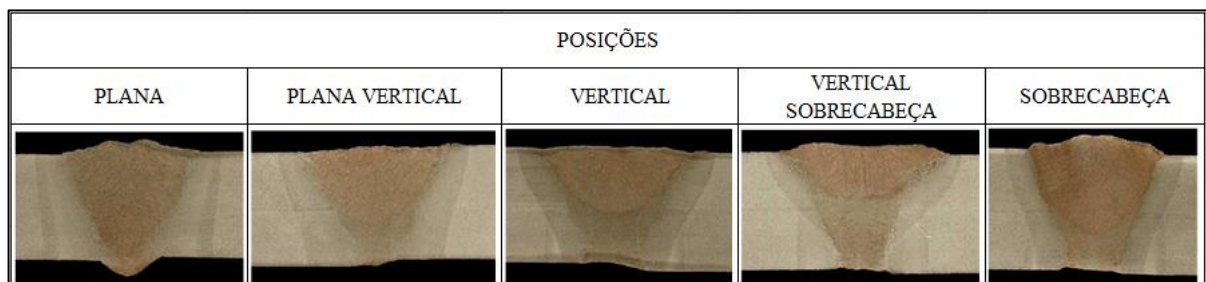


Fonte: Adaptado de Magalhães (2016, pag. 134).

Falta de fusão destacado em vermelho. Falta de penetração destacado em azul. Porosidades destacado em amarelo.

Magalhães (2016, pag.134) mostra que no processo convencional ocorreu falta de fusão e penetração assim como no processo STT. Porosidades também podem ser observadas no processo convencional. Os demais processos não obtiveram descontinuidades. A partir destes dados, o sistema automatizado foi realizado no processo convencional que obteve as maiores descontinuidades. Após implementação da automatização, a soldagem foi realizada e os resultados da macrografia são mostrados na Figura 6.

Figura 6 – Macrografia Processo de Soldagem Automatizado.



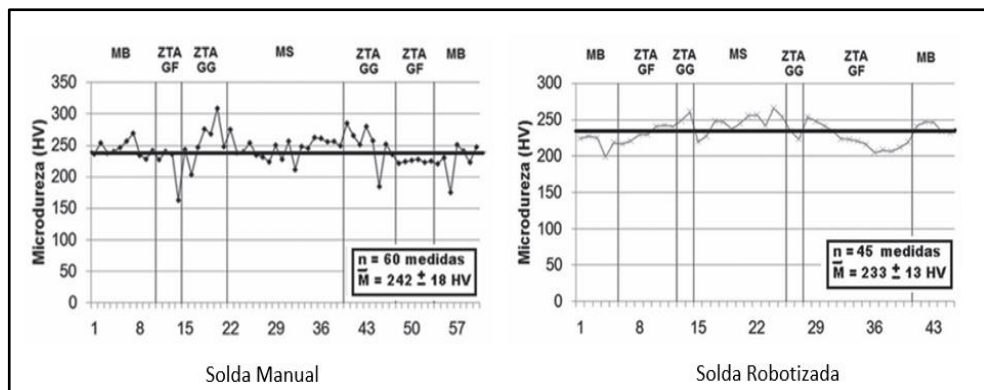
Fonte: Adaptado de Magalhães (2016, pag.179)

Nota-se que com a automatização realizada por Magalhães (2016), as descontinuidades obtidas no processo convencional GMAW foram solucionadas, garantindo uma solda resistente e de qualidade.

### 2.3.2 Microdureza: soldagem manual x robotizada

Conforme Albuquerque (2011, pag.329-330), os valores de micro dureza encontrados nas amostras, tem influência direta da formação da microestrutura gerada por cada processo de soldagem. Ocorrendo pico maior que 300 HV na amostra de soldagem manual, possivelmente por presença do microconstituente martensita-austenita. O processo de soldagem robotizado, obteve valores de micro dureza mais próximos entre os dois métodos utilizados na soldagem robotizada, como pode ser observado no Gráfico 2.

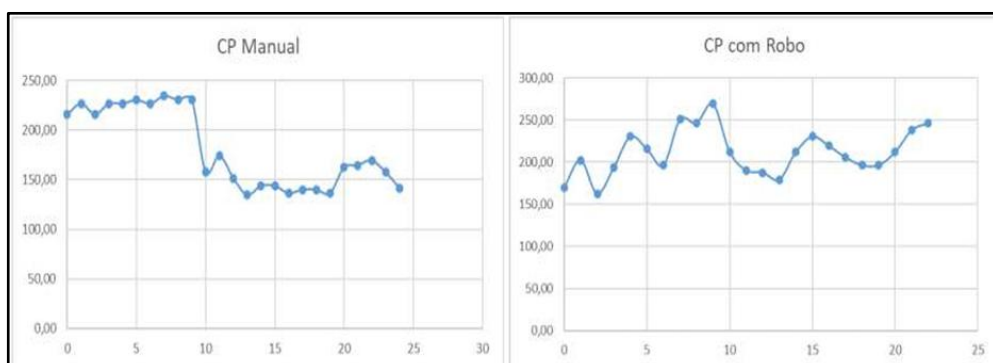
Gráfico 2 – Perfil de Microdureza, procedimentos manual e robotizado.



Fonte: Adaptado de Albuquerque (2011)

Para Cunha *et al.* (2024), a análise dos valores de dureza nos processos de soldagem manual e robotizado revela diferenças significativas no comportamento da dureza ao longo da solda. Pode-se observar nas imagens do Gráfico 3, que ocorre um declínio na transição entre os materiais SAE 1045 e SAE 1020. Os resultados obtidos também estão relacionados a microestrutura gerada por ambos processos de soldagem.

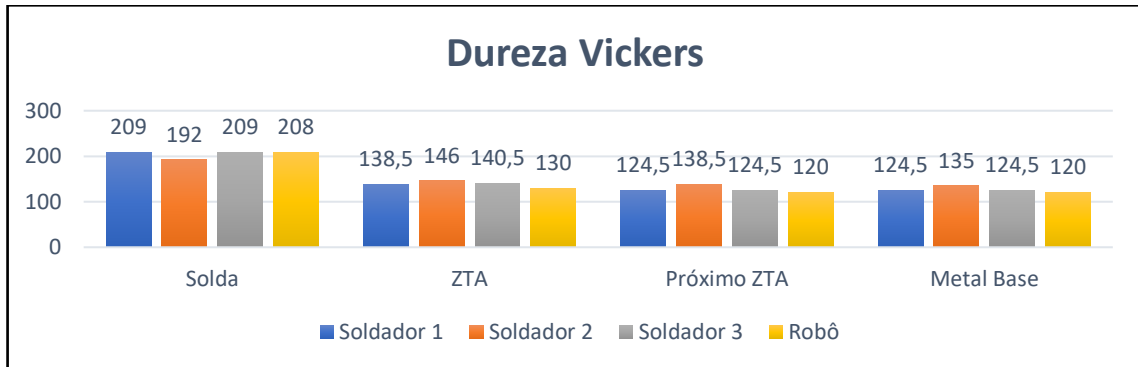
Gráfico 3 – Perfil de Microdureza da junta soldada.



Fonte: Adaptado de Cunha et al. (2024)

Conforme apresentada por Schio (2019, pag.61), o Gráfico 4, evidencia de forma precisa os resultados médios obtidos no ensaio de dureza Vickers para diferentes regiões da solda - Solda, Zona Termicamente Afetada (ZTA), próximo à ZTA e Metal Base. Pode se observar que a dureza aumenta conforme adentra a ZTA, resultado da alteração microestrutural do material.

Gráfico 4 – Resultados de Dureza Vickers.

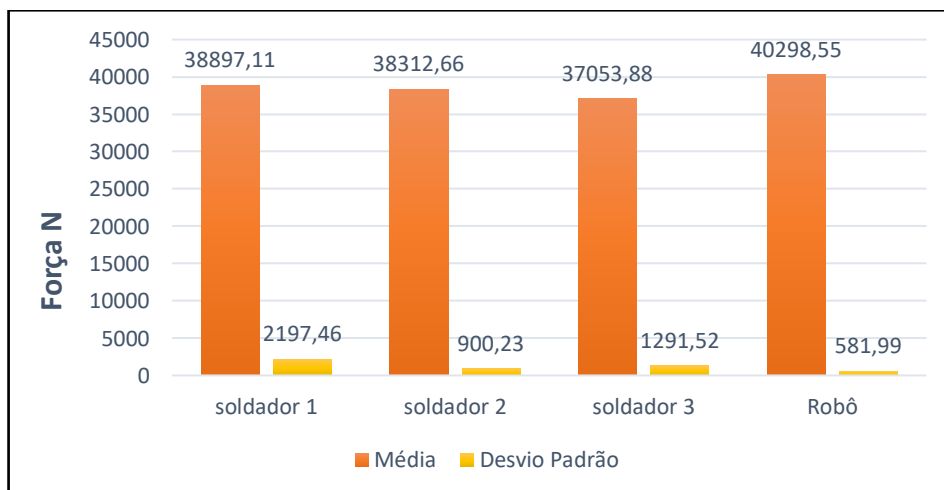


Fonte: Adaptado de Schio (2019, pag.61)

### 2.3.3 Ensaio mecânicos: soldagem manual x robotizada

Conforme Schio (2019, pag.58) mostra no seu trabalho, a comparação entre soldagem manual e robotizada obteve resultados significativos ao analisar os ensaios de tração para cada processo. O processo de soldagem robotizado obteve resultados médios de carga máxima mais resistentes se comparados aos processos manuais e também mostrou ser o processo mais estável. O Gráfico 5 mostra os resultados mencionados.

Gráfico 5 – Resultado Ensaio de Tração.



Fonte: Adaptado de Schio (2019)

Conforme estudo realizado por Schio (2019, pag.62), os testes destrutivos de dobramento evidenciaram a qualidade do processo de soldagem robotizada. De todas as amostras soldadas por robô, nenhuma obteve trinca ou rachadura, sendo assim, todas as amostras foram aprovadas e qualificando o processo. No entanto, o processo de soldagem manual, obteve duas amostras reprovadas, com trinca e rachadura, evidenciando as incertezas geradas pelo processo, que depende muito da habilidade do soldador.

### 2.3.4 Análise visual: soldagem manual x robotizada

Tanto Cremon Junior et al. (2019) quanto Pereira (2019) evidenciaram, por meio de ensaios de inspeção visual, a superioridade técnica do processo de soldagem robotizada em comparação à soldagem manual. As amostras produzidas por automação apresentaram cordões de solda com maior regularidade geométrica, padronização e baixa ocorrência de respingos, enquanto os cordões obtidos manualmente mostraram variações dimensionais e menor uniformidade. Essa diferença de desempenho reflete o maior controle dos parâmetros operacionais proporcionado pelo sistema robotizado, resultando em melhor repetibilidade e qualidade superficial, fatores críticos para a confiabilidade do processo de soldagem.

Na Figura 7 pode-se observar que o processo de soldagem robotizado produziu um cordão muito mais homogêneo e padronizado, sem necessidade de fazer qualquer tipo de limpeza ou lixamento. Percebe-se que não há emendas de cordão de solda, isto se deve ao processo de soldagem robotizada ou automatizada permitir que a solda ocorra continuamente, deixando a emenda somente no início e fim do cordão, porém isso não ocorre no processo manual.

Figura 7 – Análise Visual do Cordão de Solda: Análise Comparativa entre Soldagem Manual e Robotizada.

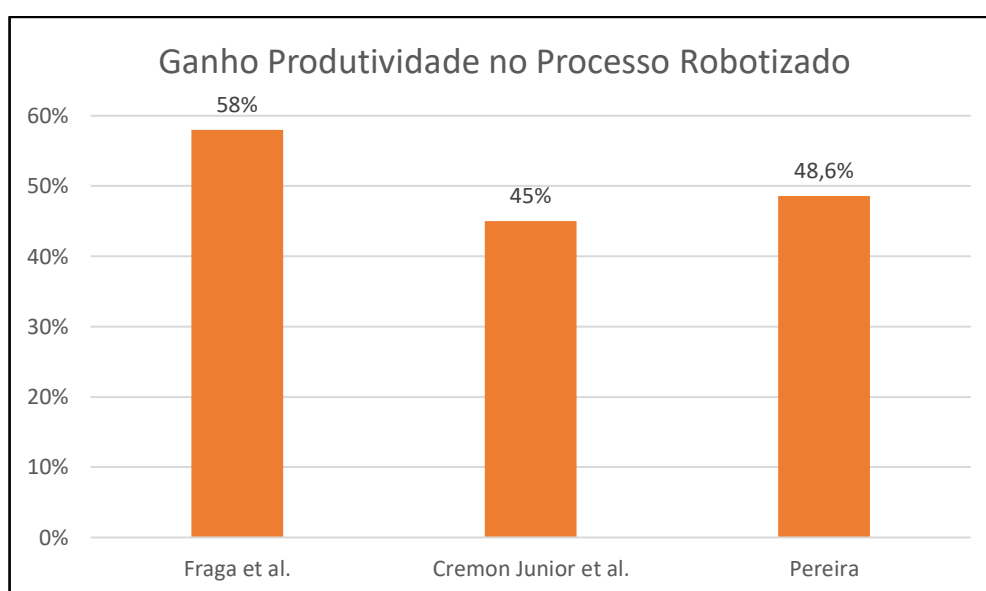


Fonte: Adaptado de Cremon Junior et al. (2019)

### 2.3.5 Produtividade: soldagem manual x robotizada

Conforme estudos realizados por Fraga et al. (2013), Cremon Junior et al. (2019) e Pereira (2019), a comparação produtiva entre os processos de soldagem manual e robotizado obtiveram ganhos significativos em percentual, mostrando na prática os benefícios produtivos proporcionados pelo processo de soldagem robotizada. Os valores dos ganhos em produtividade podem ser observados conforme mostra o Gráfico 6.

Gráfico 6 – Produtividade Ganha no Processo Robotizado.



Fonte: Adaptado de Fraga et al. (2013), Cremon Junior et al. (2019) e Pereira (2019)

Fraga et al. (2013) demonstram que a soldagem robotizada permite aumentar pela metade o volume de produção e otimizar o fluxo da linha, possibilitando a realocação de operadores para células não automatizadas. A produtividade média do processo automatizado alcança 90%, superior aos 65% do processo manual, cuja eficiência é limitada por fatores operacionais e ambientais. Cremon Junior (2019) complementa ao evidenciar que, embora o tempo de arco aberto seja semelhante entre os processos, o ganho de produtividade na soldagem robotizada ocorre pela possibilidade de montagem simultânea dos componentes durante a operação do robô, eliminando tempos ociosos entre ciclos, uma limitação presente na soldagem manual.

Conforme estudo de Schio (2019, pag.61), a velocidade de soldagem nos processos manual e robotizado, considerando uma média de tempo, ficaram muito próximas, porém ao verificar o resultado do desvio padrão das velocidades medidas, o sistema robotizado não obteve variação nenhuma, no entanto o processo manual obteve um desvio padrão de velocidade de soldagem de 0,98 mm/s.

Outro fator observado por Cremon Junior *et al.* (2019, pag.55), é a uniformidade na deposição do metal de adição, onde a soldagem robotizada teve uma variação mínima de massa depositada, porém na soldagem manual essa variação ocorreu de maneira mais significativa. Este fato demonstra uma das vantagens do processo automático, que são as parametrizações do arco elétrico, sendo possível diferentes regulagens na peça ou até mesmo no cordão de solda sem paradas para ajustes, obtendo-se ganhos em produtividade e custo de matéria prima.

Segundo Pereira (2019), a avaliação do consumo de material revelou outro benefício importante da soldagem automatizada: o processo manual utilizou mais que o dobro de arame de adição em comparação ao processo automatizado. O maior consumo de material no processo manual está diretamente relacionado ao tempo adicional necessário para sua execução, demonstrando, de forma inequívoca, a maior eficiência e economia de recursos proporcionadas pela automação da soldagem.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

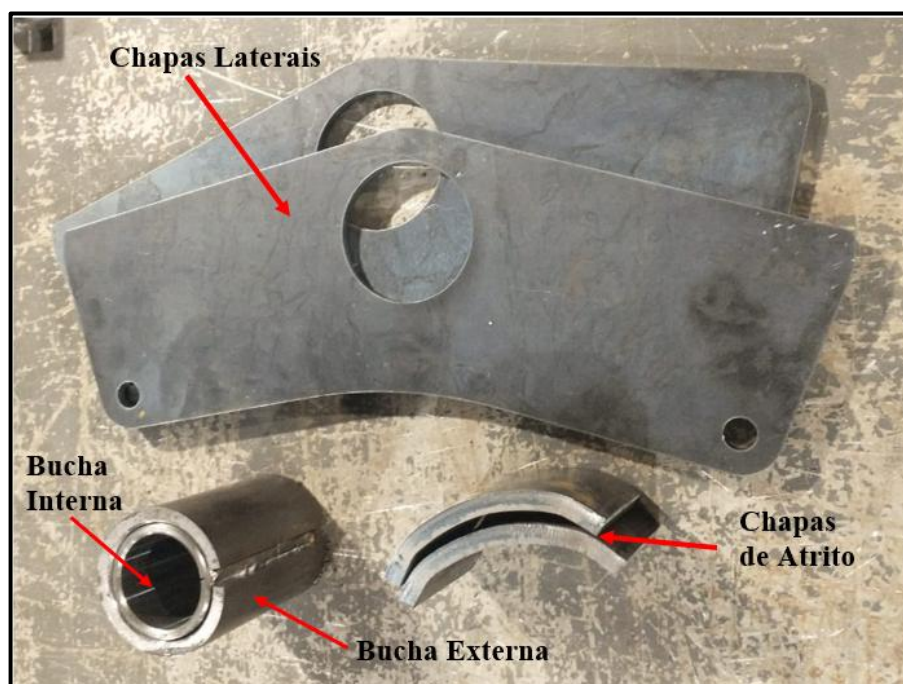
Para a implementação deste trabalho, o material base utilizado para fabricação dos componentes soldados foi o ASTM A36, com espessuras de 8 e 9,5 mm. As propriedades químicas e mecânicas do material estão apresentadas na Tabela 1 e os componentes fabricados na Figura 8.

Tabela 1 – Propriedades Químicas e Mecânicas do Aço ASTM A36.

| Aço ASTM A36 |                        |      |     |      |       |      |      |      |      |        |                        |          |       |
|--------------|------------------------|------|-----|------|-------|------|------|------|------|--------|------------------------|----------|-------|
| Espessura    | Composição Química (%) |      |     |      |       |      |      |      |      |        | Propriedades Mecânicas |          |       |
|              | C                      | Si   | Mn  | P    | S     | Al   | Cu   | Ni   | Cr   | Outros | LE (Mpa)               | LR (Mpa) | A (%) |
| 8mm          | 0,1                    | 0,1  | 1,1 | 0,02 | 0,003 | 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | >1     | 234                    | 454      | 34    |
| 9,5mm        | 0,2                    | 0,02 | 0,7 | 0,01 | 0,008 | 0,05 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | >1     | 302                    | 469      | 34    |

Fonte: Adaptado dos Certificados da Matéria Prima do Fabricante ArcelorMittal do Brasil

Figura 8 – Componentes Fabricados com Aço ASTM A36



Fonte: O próprio Autor (2025)

O metal de adição utilizado foi o arame de solda ER-70S6 com diâmetro de 1,2mm (Norma AWS A 5.18 / A5. 18M:2021 ER70S-6), cuja nomenclatura está descrita na Tabela 2 e suas propriedades químicas e mecânicas informadas na Tabela 3.

Tabela 2 – Definição Siglas do Arame de Solda.

| ARAME DE SOLDAGEM ER70-S6 |   |
|---------------------------|---|
| ER70-S6                   | DEFINIÇÃO   |
| <b>E</b>                  | Eletrodo para soldagem ao arco elétrico                                       |
| <b>R</b>                  | Pode ser vareta ou arame  |
| <b>70</b>                 | Refere-se a resistência a tração mínima em Kpsi                               |
| <b>S</b>                  | Indica ser um arame sólido  |
| <b>6</b>                  | Refere-se a composição química, com alto teor de Manganês (Mn) e Silício (Si) |

Fonte: Adaptado de AWS A 5.18 / A5. 18M:2021 ER70S-6

Tabela 3 – Propriedades do Arame de Solda ER70-S6.

| Propriedades Químicas e Mecânicas do Arame de Solda ER70-S6 |                        |      |      |       |       |      |      |      |      |       |                        |                    |                 |
|---|------------------------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|-------|------------------------|--------------------|-----------------|
| Classificação   | Composição Química (%) |      |      |       |       |      |      |      |      |       | Propriedades Mecânicas |                    |                 |
|   | C                      | Si   | Mn   | P     | S     | Cr   | Ni   | Cu   | Mo   | V     | LE (Mpa)<br>mínimo     | LR (Mpa)<br>mínimo | A (%)<br>mínimo |
| ER70-S6<br>Ø1,2mm   | 0,07                   | 0,88 | 1,46 | 0,015 | 0,011 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,003 | 400                    | 490                | 22              |

Fonte: Adaptado do Certificado de Matéria Prima do Fabricante Gerdau

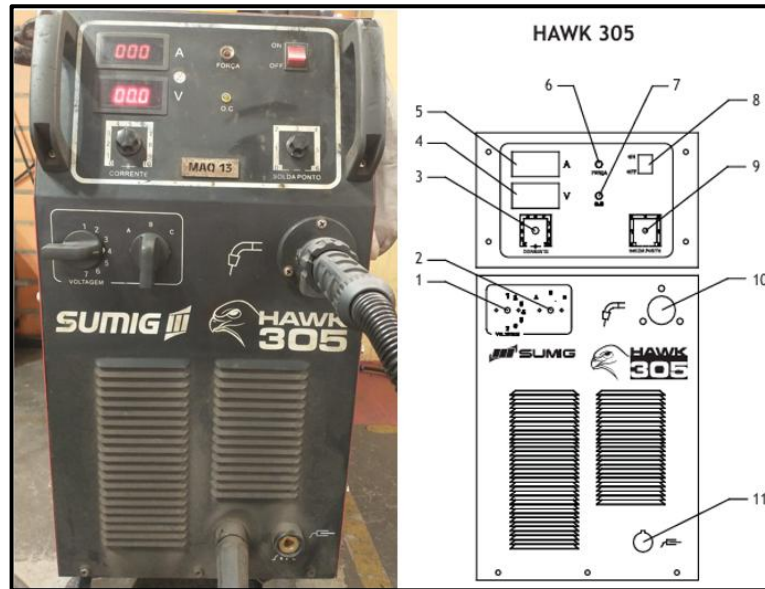
O gás de proteção utilizado na soldagem de ambos os processos foi o gás para soldagem MIG/MAG, da White Martins, seguindo a norma AWS A5.32 (ISO 14175) – M20 – ArC – 15, composto por 15% de dióxido de carbono e 85% de argônio. Para conferir a vazão de gás durante os processos de soldagem, utilizou-se um fluxômetro para gás de solda.

Durante os processos de soldagem, utilizou-se um produto antirrespingo à base de água para prevenir e facilitar a remoção de respingos e escórias. Sua composição química inclui água, ácido benzenossulfônico, derivados 4-C10-13-sec-alquil combinados com trietanolamina, dodecanol etoxilado e agente preservante.

### 3.2 EQUIPAMENTOS DE SOLDAGEM

O equipamento utilizado para realizar a soldagem manual foi a máquina de soldagem mig Hawk 305 da Sumig (Figura 9). Equipamento robusto com sistema trifásico, opera com corrente regulável de 50 a 300 A. Permite uso de arames de 0,8 a 1,2 mm e trabalha com CO<sub>2</sub> puro ou misturas com argônio. Possui painel com voltímetro e amperímetro digitais, comutador de 21 posições garantindo ajustes precisos e alimentação de arame estável.

Figura 9 – Máquina de Solda Hawk 305



Fonte: O próprio Autor (2025) e adaptado de Sumig (2019, pag.06).

1. Comutador 7 posições; 2. Comutador 3 posições; 3. Seletor de Corrente; 4. Voltímetro Digital; 5. Amperímetro Digital; 6. Indicador de Equipamento Ligado; 7. Indicador de "Over Current"; 8. Interruptor Liga/Desliga; 9. Temporizador para Solda Ponto; 10. Euro Conector para Tocha MIG; 11. Engate Rápido para Cabo Terra.

A soldagem robotizada foi realizada na célula de soldagem Moducell PD-2000 Sumig (Figura 10), que conta com duas estações de trabalho, oferecendo maior versatilidade e agilidade na produção. Essa célula possui fonte de solda OTC com nanotecnologia e inteligência artificial, possibilitando soldas de alta precisão e qualidade, além de controle de forma de onda otimizado conforme o tipo de metal base.

Figura 10 – Fonte de Soldagem OTC e Célula de Soldagem Robotizada.

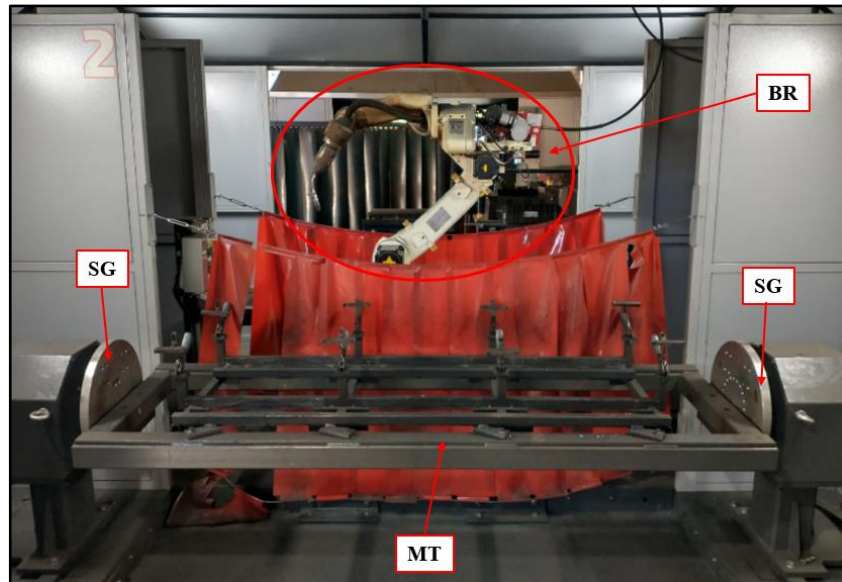


Fonte: O próprio Autor (2025).

A imagem da esquerda está a fonte de soldagem OTC e a direita pode-se observar a vista externa da célula de soldagem.

Na Figura 11 observa-se, ao centro, o braço robótico de soldagem em posição *home* e, à frente, a mesa de trabalho equipada com o dispositivo de fixação. Na Figura 12 evidencia-se o braço robótico posicionado entre as duas mesas de trabalho da célula, além do mecanismo automático de limpeza da tocha de soldagem.

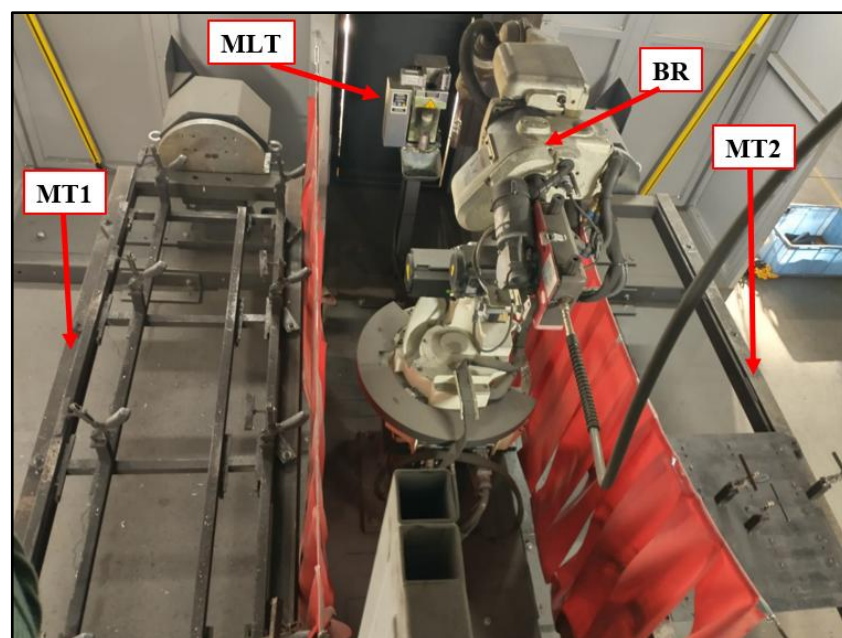
Figura 11 – Braço Robótico de Solda e Mesa de Trabalho.



Fonte: O próprio Autor (2025).

Braço Robótico de Soldagem (BR), Sistema Giratório da mesa de trabalho (SG) e Mesa de Trabalho (MT).

Figura 12 – Braço Robótico de Soldagem e Mesas de Trabalho.



Fonte: O próprio Autor (2025).

Braço Robótico de Soldagem (BR); Mesas de trabalho (MT1 e MT2) e Mecanismo de limpeza da tocha (MLT).

No processo de soldagem robotizada, também se utilizou um dispositivo de posicionamento para os conjuntos montados, como mostrado na Figura 13, assim proporcionando repetibilidade no processo, otimização e ganhos em produção.

Figura 13 – Dispositivo de Posicionamento para Soldagem Robotizada.



Fonte: O próprio Autor (2025).  
Conjuntos montados fixados no dispositivo da mesa de trabalho.

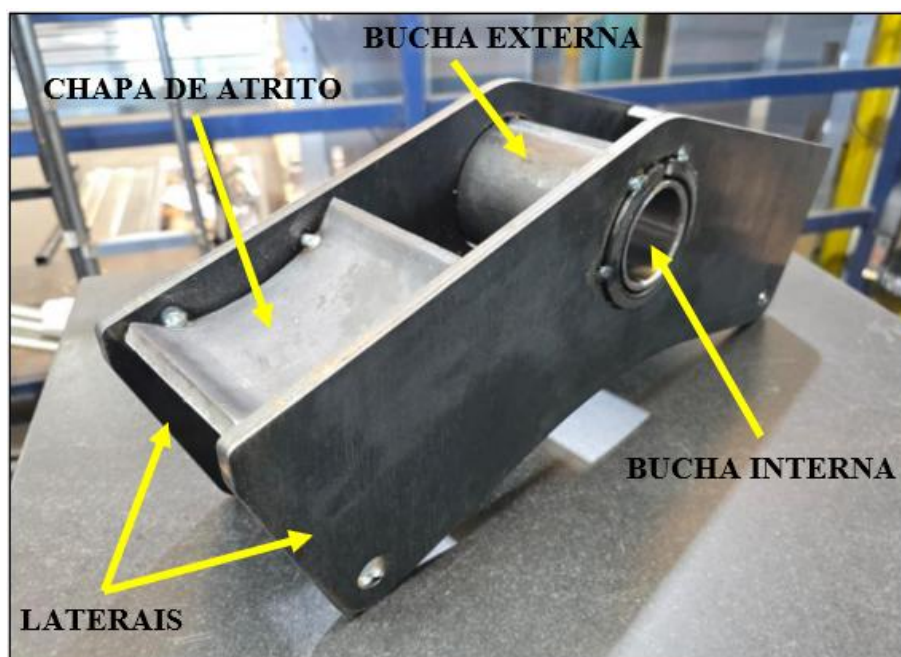
### 3.3 PRODUÇÃO DOS COMPONENTES PARA ESTUDO

Foram produzidos 12 conjuntos soldados, sendo seis pelo processo manual e seis pelo robotizado. Cada conjunto foi previamente posicionado em um dispositivo de montagem (Apêndice A), permitindo o ponteamto dos componentes e garantindo o alinhamento adequado antes da soldagem final.

Após a montagem os conjuntos foram pesado com o auxílio de uma balança digital com resolução de 50 gramas e capacidade para 200 quilogramas. Assim foi possível fazer uma verificação simples da massa inicial do conjunto a ser soldado. O Apêndice B apresenta o quadro com a massa inicial dos conjuntos montados.

A Figura 14 mostra o conjunto montado por ponteamto de solda, pronto para receber a soldagem final.

Figura 14 – Componente Montado por Ponteamento de Solda.



Fonte: O próprio Autor (2025).

A soldagem em ambos os processos, teve como referência, parâmetros - Tabela 4 - estabelecidos na instrução de trabalho de soldagem, elaborada pela empresa Brassud, que adaptou os parâmetros de soldagem fornecidos pelo fabricante dos equipamentos. A vazão de gás foi regulada em 16 L/min para ambos os processos.

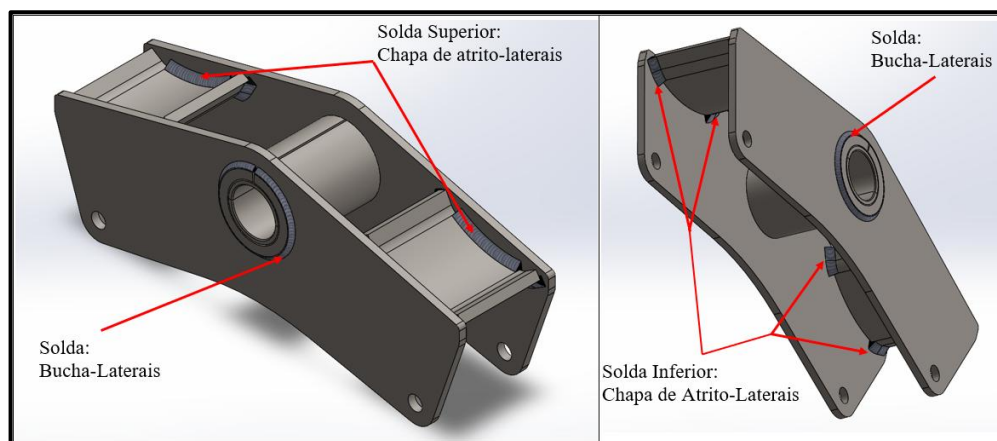
Tabela 4 – Faixa de Parâmetros de Solda Utilizadas na Fabricação do Componente.

| <b>Parâmetros de Soldagem</b> |                   |                                     |  |                             |
|-------------------------------|-------------------|-------------------------------------|--|-----------------------------|
| <b>Corrente (A)</b>           | <b>Tensão (V)</b> | <b>Alimentação do Arame (m/min)</b> | <b>Velocidade de Soldagem (cm/min)</b> | <b>Vazão de Gás (L/min)</b> |
| 190 - 280                     | 21 - 32           | 1,8 - 7,2                           | 30 -45                                 | 15 - 20                     |

Fonte: Adaptado da Instrução de Trabalho da Empresa Brassud Componentes Metálicos

O mesmo sequenciamento de soldagem foi adotado para ambos os processos. Inicialmente se realizou a soldagem entre a bucha e as laterais. Posteriormente a soldagem na parte inferior entre chapa de atrito e laterais foi realizada utilizando o método cruzado. Para finalizar a soldagem do conjunto, a solda superior entre chapa de atrito e laterais foi realizada, também intercalando a soldagem entre os lados para melhor dissipação do calor. O Anexo A mostra o sequenciamento de soldagem detalhado. A Figura 15 apresenta os cordões de solda e suas respectivas localizações no componente.

Figura 15 – Componente Soldado CAD 3D.



Fonte: O próprio Autor (2025).

### 3.3.1 Soldagem Robotizada

Para realizar o processo de soldagem robotizada, o programa foi elaborado com três parâmetros de soldagem distintos, conforme a necessidade definida pelo programador para cada região do componente. Estes parâmetros de soldagem robotizada estão apresentados no Apêndice C.

Durante a soldagem robotizada, os valores de corrente e tensão exibidos no display da fonte apresentaram comportamento progressivo. A corrente iniciou em aproximadamente 220A e reduziu gradualmente até cerca de 208A ao longo da formação do cordão, sem oscilações abruptas. A tensão manteve-se relativamente estável durante todo o processo, variando apenas entre 21,8V e 22,2V.

### 3.3.2 Soldagem Manual

O processo de soldagem manual foi realizado após a etapa robotizada, utilizando parâmetros semelhantes. Entretanto, por se tratar de um processo manual, foi feita apenas uma única regulagem para a execução de todo o conjunto, estabelecendo-se aproximadamente 220A de corrente e 23V de tensão. Durante a soldagem, a corrente apresentou oscilações severas, característica inerente ao controle manual do arco, com valores variando entre 198A e 229A, o que exigiu maior habilidade do operador para manter a estabilidade do processo. A tensão permaneceu relativamente estável ao longo da execução.

## 3.4 PRODUTIVIDADE: TEMPO, EFICIÊNCIA E QUALIDADE DOS PROCESSOS

A análise de produtividade contempla os tempos, a efetividade e a qualidade dos processos de soldagem avaliados. Foram consideradas as medições de tempo de produção e de arco aberto, a

necessidade de limpeza, o tempo de limpeza e a pesagem dos componentes após a soldagem, permitindo identificar eventuais diferenças na deposição de material. A limpeza dos respingos, escória e impurezas deixadas pelos processos de soldagem, foi realizada com auxílio de raspadores de metal e realizada manualmente em ambos os processos.

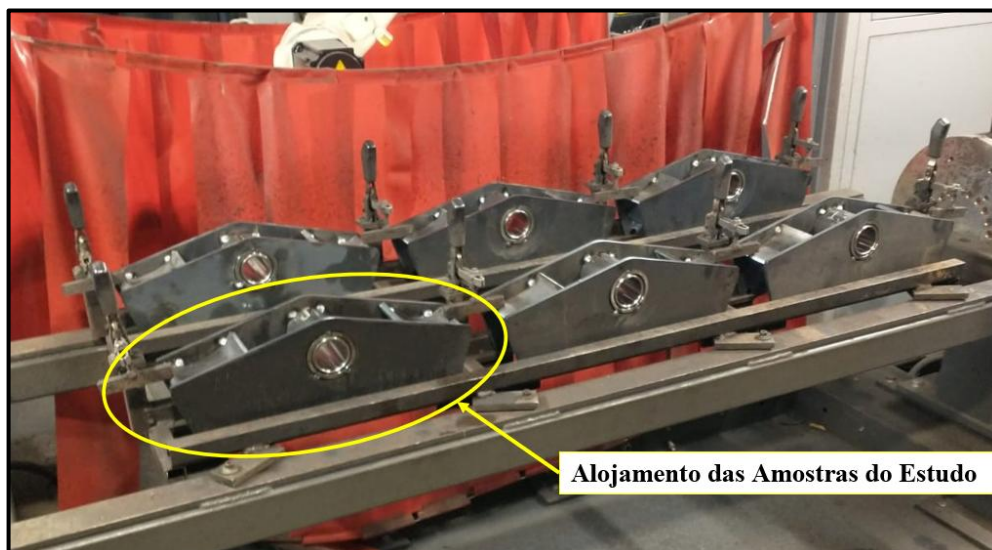
### 3.4.1 Soldagem robotizada

O tempo de soldagem robotizada foi registrado desde o acionamento do start no painel de controle até a liberação do sistema de segurança, momento que indica a conclusão do ciclo de soldagem. Foram cronometrados 6 ciclos completos, cada um correspondendo à soldagem de 6 conjuntos. Assim, o tempo médio de soldagem por balancim foi obtido a partir da média dos tempos desses ciclos. Da mesma forma, o tempo de arco aberto foi medido ao longo dos mesmos 6 ciclos, acionando-se o cronometro ao abrir o arco elétrico e pausado ao fechar o arco elétrico.

O sistema operacional do robô de soldagem, requer uma limpeza no bocal de solda ao final de cada execução do programa de soldagem. Esta limpeza é realizada por um mecanismo da própria máquina (Figura 12), onde o tempo de limpeza foi considerado dentro do processo de soldagem.

Para a execução do processo de soldagem robotizada, as amostras do estudo foram posicionadas sempre na mesma região do dispositivo de fixação da mesa de trabalho (Figura 16). Essa padronização de posicionamento garantiu a repetibilidade das condições de soldagem e evitou variações nos resultados que poderiam ocorrer caso os componentes fossem alojados em diferentes pontos do dispositivo.

Figura 16 – Amostra do estudo fixada no dispositivo de soldagem



Fonte: O próprio Autor (2025).  
Local utilizado para avaliação da soldagem neste trabalho.

A carga e descarga dos conjuntos foram medidas separadamente do tempo de soldagem, uma vez que essas etapas podem ser executadas enquanto a máquina realiza a soldagem na outra mesa de trabalho. A aplicação do antirrespingo foi considerada como parte do tempo de carga e descarga. Ao término do processo robotizado, as amostras do estudo foram pesadas a fim de determinar a quantidade de material de adição efetivamente depositado. A Figura 17 mostra a soldagem robotizada em execução.

Figura 17 – Processo de soldagem robotizado



Fonte: O próprio Autor (2025).

Braço robotizado realizando a soldagem no componente acoplado no dispositivo de fixação da mesa de trabalho.

### 3.4.2 Soldagem manual

Para a soldagem manual, o carrinho com as amostras foi posicionado próximo à mesa de trabalho do operador, a fim de facilitar o manuseio dos componentes e reduzir o tempo de troca entre os conjuntos. O tempo total de soldagem foi medido desde o momento em que o operador retirou o componente do carrinho até sua devolução após a soldagem concluída. Já o tempo de arco aberto foi registrado exclusivamente durante a execução do cordão de solda, onde o cronometro foi acionado ao abrir o arco e pausado ao fechar o arco, durante toda a soldagem do componente.

Os tempos de aplicação de antirrespingo e limpeza de tocha, contemplaram o tempo total de soldagem, pois eram realizados em meio ao processo. Após a soldagem manual, os conjuntos foram

pesados da mesma forma que no processo robotizado, a fim de verificar as diferenças entre os processos quanto à deposição de material de adição. A Figura 18 mostra o processo de soldagem manual em execução.

Figura 18 – Processo de soldagem manual



Fonte: O próprio Autor (2025).

Operador realizando a soldagem no conjunto montado.

### 3.5 ANÁLISE VISUAL

A inspeção visual das juntas soldadas foi realizada conforme a norma AWS D1.1/D1.1M:2015, garantindo padronização no processo. As superfícies foram previamente limpas para remoção de respingos e escória restantes do processo de soldagem, assegurando uma superfície livre de qualquer tipo de interferência visual.

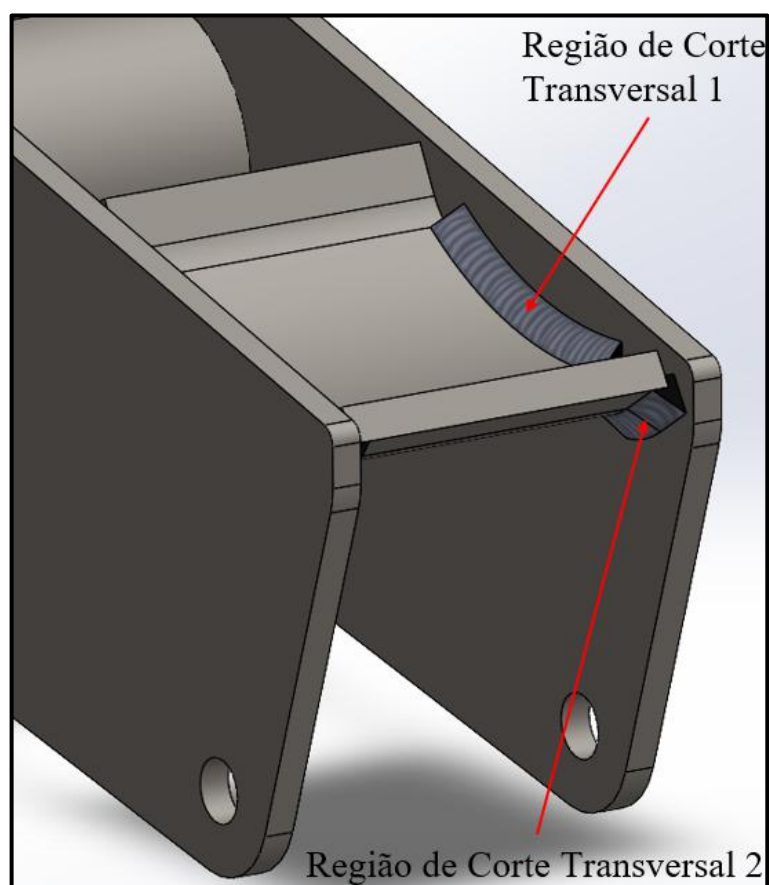
Em seguida, cada junta foi avaliada de forma sistemática, realizando a verificação da ausência de trincas, verificando a fusão completa com o metal de base das chapas laterais e de atrito, inspeção de crateras em terminações dos cordões, análise do perfil do cordão quanto à concavidade e verificação de mordeduras, porosidade e dimensões do comprimento dos filetes. Todos os resultados foram comparados seguindo as tabelas especificadas na norma.

### 3.6 ANÁLISE METALÚRGICA

Para realização das análises metalúrgicas as amostras foram cortadas nas dependências da empresa Brassud Componentes Metálicos utilizando a máquina de corte com serra fita. Os conjuntos

foram cortados nas seções transversais dos cordões a serem analisados conforme Figura 19. Após o corte dos corpos de prova, os mesmos foram encaminhados ao Laboratório de Ensaio Mecânicos (LAMEC) da Universidade de Caxias do Sul. Foram encaminhados para análise 12 corpos de prova, sendo 6 de cada processo de soldagem e a preparação das amostras seguiu os procedimentos estabelecidos na norma ABNT NBR 13284:1995.

Figura 19 – Indicação dos pontos de análise metalúrgica.



Fonte: O próprio Autor (2025).

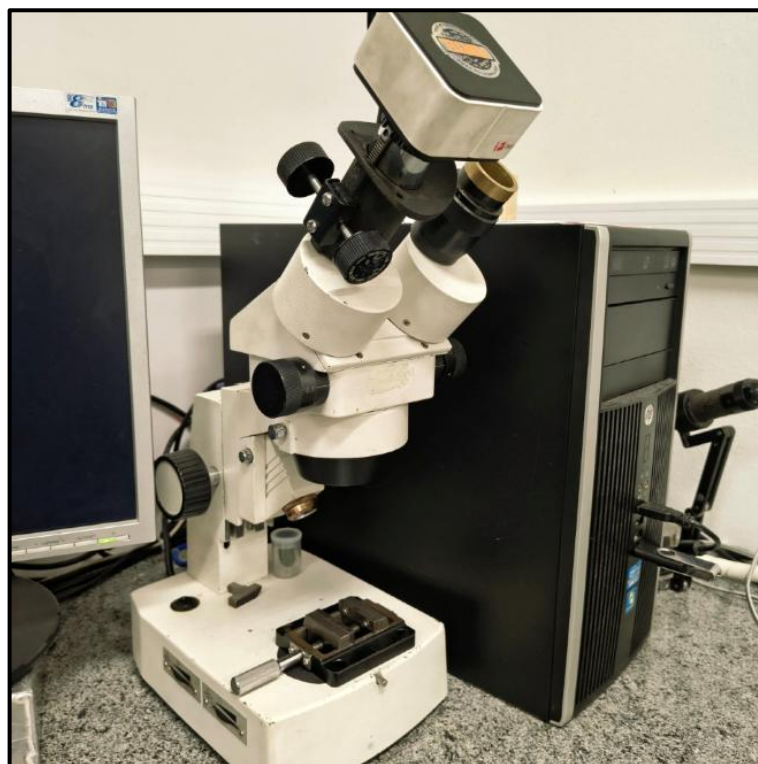
Na imagem observa-se os pontos de corte transversal para análise metalúrgica.

### 3.6.1 Macrografia

A análise da macrografia dos cordões de solda dos componentes realizada no LAMEC adotou os procedimentos conforme normas AWS D1.1; ASME IX e DIN EN 1321. Foram analisadas as regiões do corte transversal conforme mostrado anteriormente na Figura 19. A macrografia buscou variações de tamanho de garganta, tamanho de perna, penetração de solda, defeitos estruturais, descontinuidades internas e tamanho da ZTA, assim verificando a diferenciação entre os resultados de cada processo de soldagem.

A análise macroscópica das amostras foi realizada com o auxílio de um Estereoscópio Gênerico acoplado a uma câmera Fortel (Figura 20), ampliando em 7 vezes a visualização, permitindo a observação da morfologia do cordão de solda, penetração, presença de descontinuidades e demais características visíveis a baixas ampliações.

Figura 20 – Estereoscópio Gênerico



Fonte: O próprio Autor (2025).

### 3.6.2 Microestrutura

A microestrutura resultante da soldagem de ambos os processos, também foram analisadas através de procedimentos realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos (LAMEC) da Universidade de Caxias do Sul (UCS). Realizou-se a análise da microestrutura do corte transversal das juntas soldadas (Figura 19), verificando os microconstituintes no metal base, zona termicamente afetada e zona fundida e os procedimentos adotados para análise da microestrutura da união soldada foram conforme normas AWS D1.1; ASME IX e DIN EN 1321.

A análise micrográfica foi conduzida utilizando o microscópio Zeiss Observer.D1m (Figura 21), equipamento que possibilita ampliações elevadas e observação detalhada da microestrutura do material, permitindo a identificação das fases e a avaliação das alterações metalúrgicas decorrentes do processo de soldagem.

Figura 21 – Microscópio Zeiss Observer.D1m

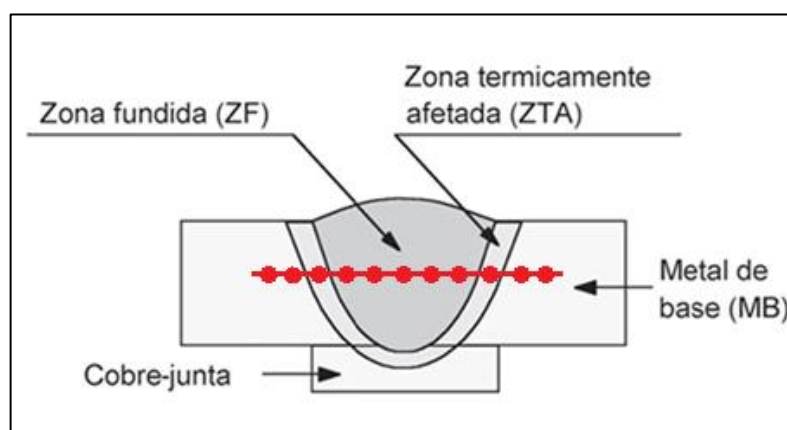


Fonte: O próprio Autor (2025).

### 3.6.3 Microdureza

A análise da microdureza dos cordões soldados foi realizada nos corpos de prova após os ensaios de macrografia e micrografia. O ensaio foi realizado no LAMEC da UCS, utilizando o método para verificar a medida de dureza Vickers, que utiliza um penetrador de diamante em forma de pirâmide e seguirá os procedimentos conforme norma ABNT NBR ISO 6507-1:2019. A medição foi realizada em pontos da linha intermediária da união soldada, buscando variações da dureza desde o material base, passando pela ZTA e chegando à zona fundida, como exemplo ilustrado na Figura 22.

Figura 22 – Ilustração do Corte Transversal da Junta Soldada.



Fonte: Adaptado de Marques et al. (2017, pag.16)

Os ensaios de microdureza Vickers foram realizados utilizando o microdurômetro Shimadzu HMV-2 (Figura 23), com o objetivo de avaliar a variação de dureza ao longo das diferentes regiões da junta soldada. As medições foram efetuadas aplicando uma carga controlada de 300 gramas e espaçamentos de 1 mm entre as 10 medições realizadas.

Figura 23 – Microdurômetro Shimadzu HMV-2



Fonte: O próprio Autor (2025).

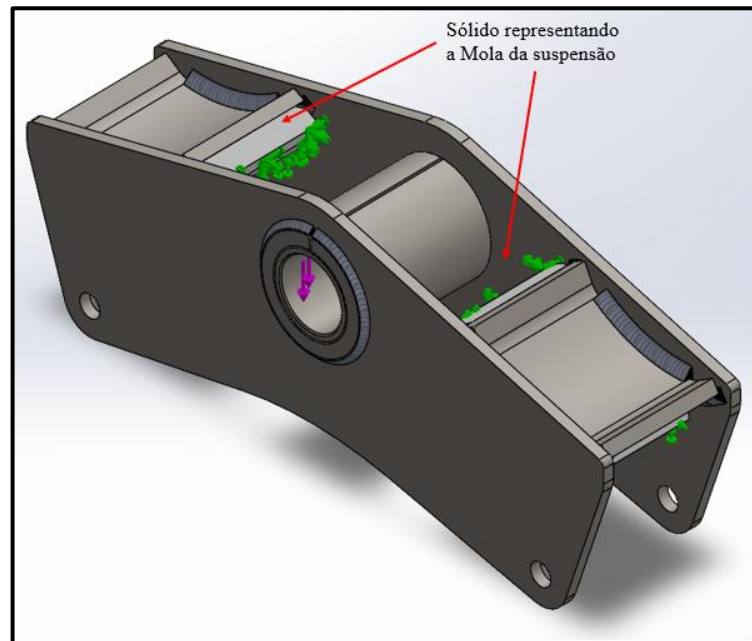
### 3.7 ENSAIO MECÂNICO

Para o estudo de ensaio mecânico, inicialmente foi realizada uma análise simples do projeto em 3D por meio do método de elementos finitos, para verificar as tensões existentes no componente, e assim, determinar a carga a ser utilizada nos ensaios mecânicos. Essa análise de elementos finitos foi considerada estática e executada com o auxílio do software SolidWorks Simulation, determinando a partir das configurações realizados no software as tensões baseadas no critério de VonMises.

Os dados das propriedades dos materiais foram inseridos no software conforme as características de cada material, baseando-se principalmente no limite de escoamento especificado nos certificados de matéria-prima. Todos os materiais foram considerados isotrópicos lineares elásticos e foram modelados conforme tabelas no Anexo B.

As configurações de carga exercida e restrições do componente foram feitas simulando condições reais de aplicação do componente e estão apresentadas na Figura 24. A malha foi gerada com densidade fina e com base em curvatura. A Figura 25 mostra a malha gerada e seus detalhes.

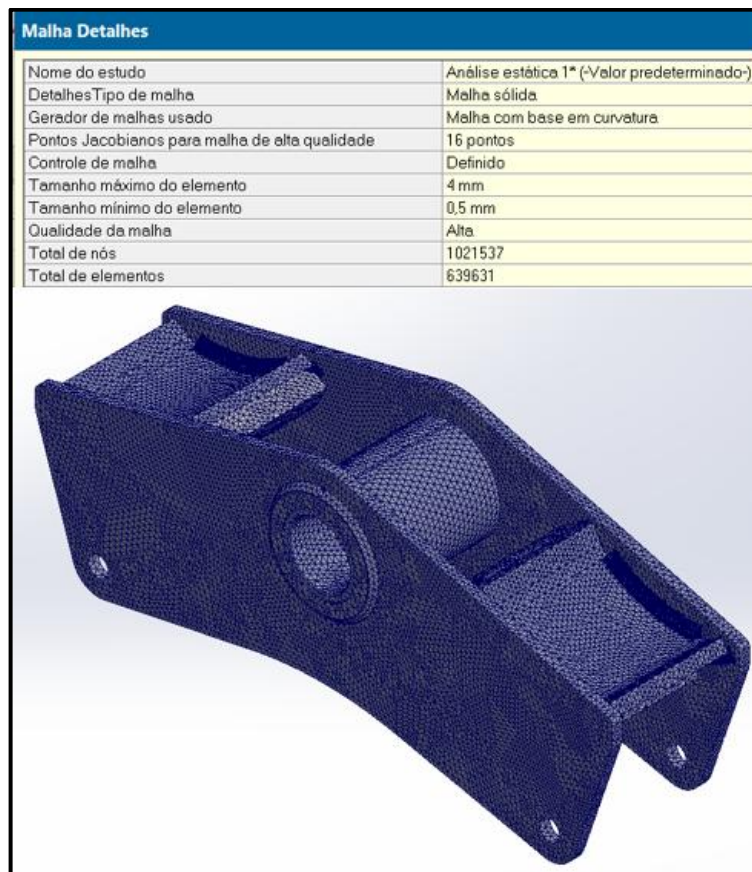
Figura 24 – Configurações de simulação no software Simulation.



Fonte: O próprio Autor (2025).

Observa-se na imagem as setas em lilás representando o sentido da carga aplicada e as setas em verde as restrições de movimento aplicados a representação da mola.

Figura 25 – Configurações de simulação no software Simulation.



Fonte: O próprio Autor (2025).

A análise de elementos finitos foi utilizada para determinar a carga necessária para atingir o limite de escoamento do material de solda, ajustando-se progressivamente o carregamento na simulação até identificar o valor a ser aplicado no ensaio mecânico.

Determinada a carga mínima a ser aplicada no componente, os testes de ensaios mecânicos foram realizados nas dependências da empresa Brassud Componentes Metálicos, utilizando uma prensa hidráulica com capacidade para até 35 toneladas de carga. Os componentes soldados foram submetidos a carga mínima determinada a partir da análise de elementos finitos e também submetidos a carga máxima da máquina. Foi determinado para o ensaio a realização de até 500 ciclos (carga mínima/carga máxima) ou até o componente apresentar falha. Foram submetidos a teste três componente de cada processo de soldagem. O experimento buscou avaliar diferenças de resistências dos cordões de solda gerados nos processos de soldagem manual e robotizada.

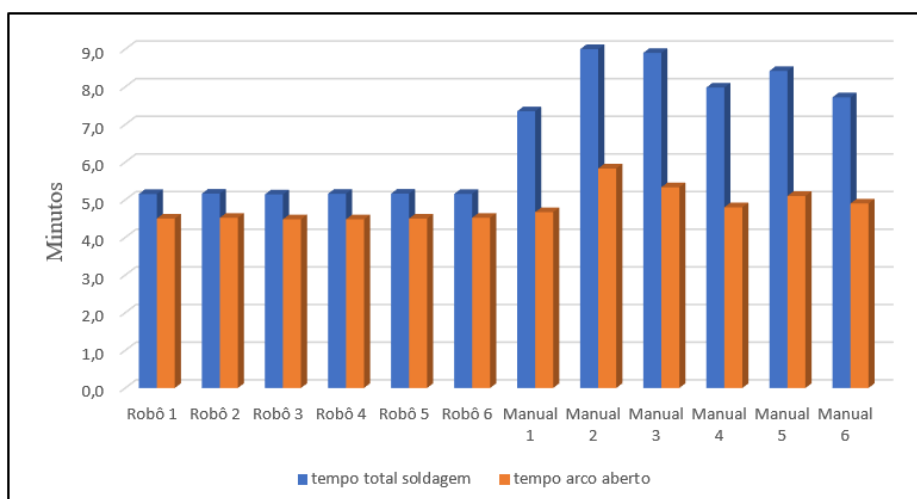
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 PRODUTIVIDADE: TEMPO, EFICIÊNCIA E QUALIDADE DOS PROCESSOS

Os tempos do processo de soldagem robotizado foram obtidos com base no ciclo de produção, no qual cada ciclo realiza a soldagem de seis componentes. Dessa forma, os tempos totais registrados, tanto de arco aberto quanto de soldagem total, foram divididos entre os componentes para determinação do tempo individual de soldagem.

O Gráfico 7 apresenta os resultados obtidos na medição dos tempos de soldagem total e tempo de arco aberto em ambos os processos.

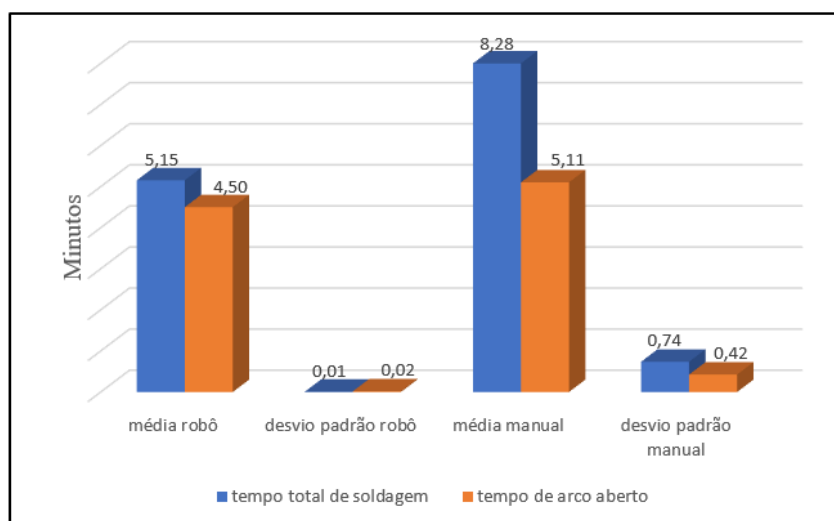
Gráfico 7 – Comparação entre os tempos de soldagem manual e robotizado.



Fonte: O próprio Autor (2025).

O Gráfico 8 mostra a média dos tempos de soldagem e também seus respectivos desvios padrões. O processo robotizado representa um ganho de 37,8% em velocidade de produção, reduzindo o tempo total de soldagem. A eficiência do processo manual ficou em média 61,7%, enquanto a eficiência do processo robotizado foi de 87,4%. Isso significa que o robô de solda gastou 87,4% do tempo soldando, um ganho significativo em relação ao processo manual.

Gráfico 8 – Média e desvio padrão dos tempos de processo de soldagem.



Fonte: O próprio Autor (2025).

A diferença entre os tempos totais de soldagem dos dois processos é evidente, porém, os tempos de arco aberto apresentaram variações muito menores. Para verificar se essa diferença é estatisticamente significativa, realizou-se uma análise de dados ANOVA, realizada no Excell (Apêndice D).

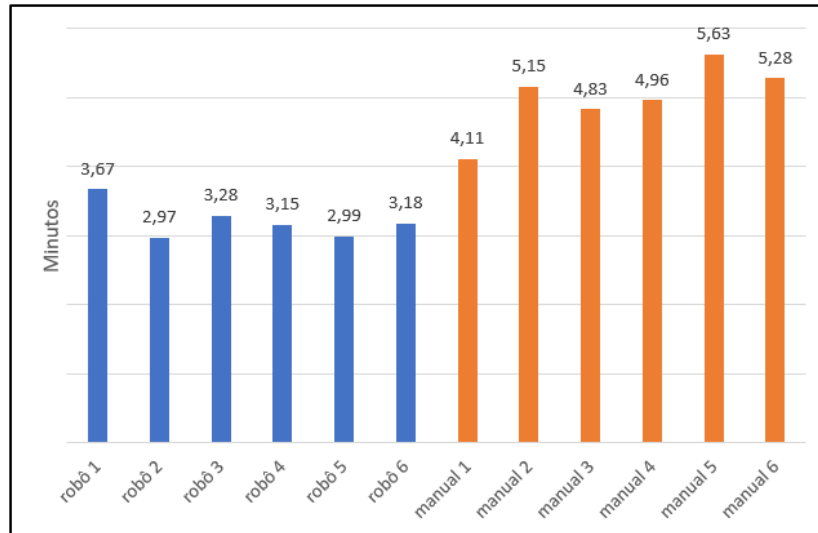
Com nível de significância de 1%, o resultado da ANOVA indicou que o *valor-P* foi superior a 0,01, demonstrando que a variação entre os processos não é estatisticamente significativa. Da mesma forma, o *valor de F* calculado ficou abaixo do *F crítico*, reforçando que não há diferença significativa entre os tempos de arco aberto dos processos manual e robotizado. Dessa forma, conclui-se que, apesar das diferenças no tempo total de soldagem, o tempo efetivo de arco aberto permaneceu equivalente entre os dois métodos.

O tempo de retirada dos componentes e abastecimento da mesa de trabalho do sistema de soldagem robotizado ficou em média 1,9 minutos por ciclo, aproximadamente 0,32 minutos por componente. Mesmo com o acréscimo do tempo de troca, o processo robotizado manteve desempenho superior, apresentando tempo total aproximadamente 34% menor em comparação ao processo manual. O Anexo C apresenta o gráfico das médias e desvios padrões com o tempo de troca no processo robotizado.

Os tempos de limpeza necessário para retirada de respingos, escória e outras impurezas deixados no processo de soldagem seguem conforme Gráfico 9. Nota-se que os componentes fabricados através do

processo de soldagem robotizado, necessitaram de um tempo médio de 35,8% menor. Este tempo impacta diretamente na produção do componente, pois o operador do robô faz a limpeza enquanto o equipamento está trabalhando, já o soldador de bancada realiza a limpeza após a soldagem de cada componente, aumentando o tempo de produção.

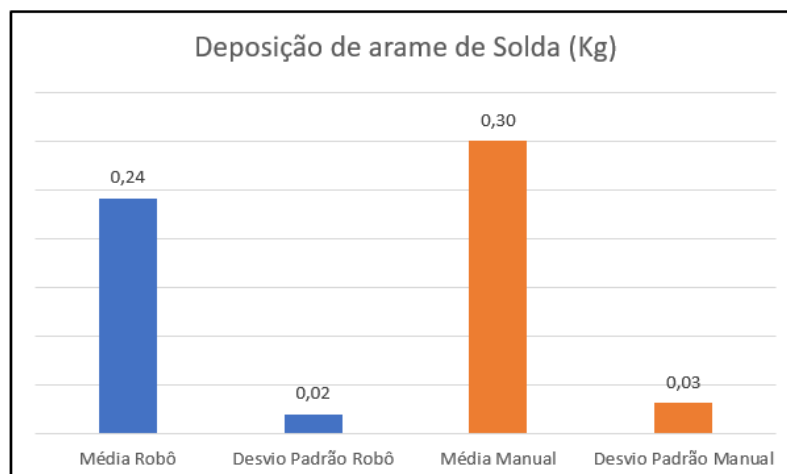
Gráfico 9 – Tempos de limpeza do componente soldado.



Fonte: O próprio Autor (2025).

Após a pesagem dos conjuntos soldados, foi possível identificar a diferença na deposição de material entre os processos de soldagem. O Gráfico 10 apresenta as médias de deposição e os respectivos desvios padrão, indicando que o processo de soldagem robotizado obteve uma taxa de deposição levemente menor e mais uniforme em comparação ao processo manual. O Apêndice E apresenta o quadro com as massas obtidas após a soldagem dos componentes.

Gráfico 10 – Média de deposição de material de solda e desvio padrão



Fonte: O próprio Autor (2025).

Realizou-se uma análise estatística semelhante à aplicada para os tempos de arco aberto, cujos resultados encontram-se no Apêndice F. A ANOVA indicou que o *valor-P* ficou acima do nível de significância de 1%, demonstrando que a diferença entre as taxas de deposição não é estatisticamente significativa. No entanto, considerando o volume diário de produção da soldagem manual (300 componentes), essa diferença representa um consumo adicional de 18 kg de arame de solda por dia em relação ao processo robotizado, resultando em aproximadamente 4,68 toneladas de arame a mais ao ano. Embora o tempo de arco aberto tenha sido semelhante entre os processos, a pequena variação observada implica uma deposição ligeiramente superior de material no processo manual.

Conclui-se que o tempo de soldagem total no processo robotizado é 37,8% superior ao processo manual, no entanto, o tempo de arco aberto é igual na comparação entre os processos. Este tempo de soldagem total maior no processo manual ocorre devido as movimentações, limpezas, aplicação de antirrespingo, fadiga operacional entre outras. A soldagem robotizada mantém um processo mais controlado minimizando as perdas ocorridas no processo manual. A taxa de deposição entre os processos se mostrou insignificante, ocorrendo uma pequena diferença somente pelo fato de o tempo de arco aberto no processo manual apresentar-se levemente superior ao processo robotizado. Porém ao analisar o macro anual, o processo robotizado é aproximadamente 18,4% mais eficiente em comparação com o processo manual.

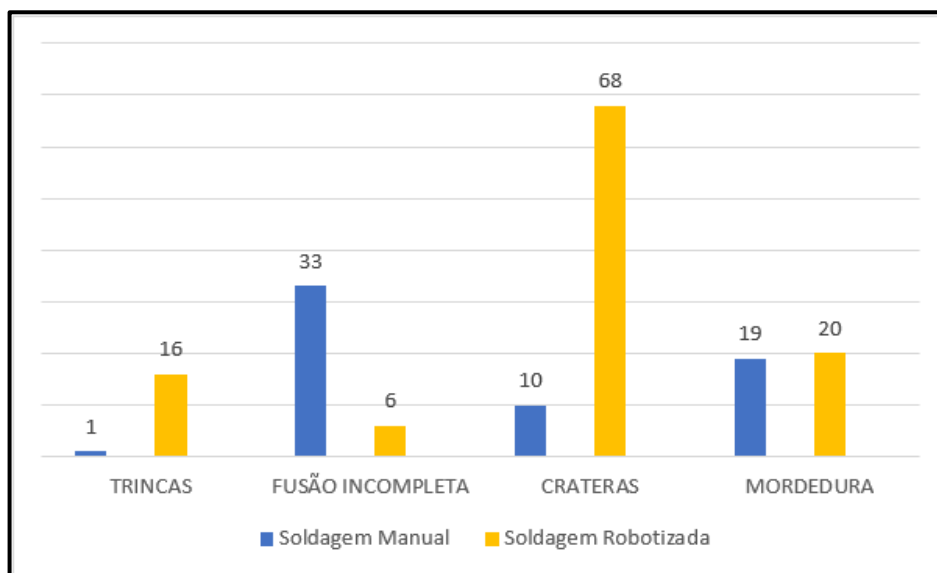
## 4.2 ANÁLISE VISUAL

Os resultados da análise visual da soldagem abordaram a verificação de existência de trincas, a fusão completa de metal de adição com as chapas laterais e de atrito. Também se verificou a existência de crateras nas terminações de solda, a verificação visual da existência de porosidade, mordedura e uma análise do aspecto do cordão de solda. O comprimento de cada cordão soldado foi medido para verificação da repetibilidade de cada processo. O Apêndice G apresenta os quadros com as análises completas de cada componente.

Não foram identificadas porosidades nas amostras de ambos os processos, evidenciando que a soldagem foi realizada de forma adequada e livre de impurezas. Esse resultado também indica que o fluxo de gás de proteção foi corretamente ajustado, fator essencial para evitar a formação de poros no cordão de solda.

Os componentes soldados possuem 14 cordões de solda, totalizando 84 cordões para as amostras de cada processo de soldagem. O Gráfico 11 mostra a quantidade de cordões de solda com descontinuidades encontradas em cada processo de soldagem.

Gráfico 11 – Quantidade de descontinuidades por processo.



Fonte: O próprio Autor (2025).

No processo de soldagem robotizado foi detectado em 80,9% dos cordões de solda a descontinuidade de cratera ao final de cada filete de solda (Figura 26). No entanto, o processo de soldagem manual mostrou este tipo de descontinuidade em 10 entre todos os cordões soldados, resultado aproximadamente 85% menor que o obtido no processo robotizado.

Este defeito ocorreu principalmente no processo robotizado pelo fato de o cordão ser finalizado e imediatamente o arco ser fechado, sem um tempo de deposição de material de adição para preencher a poça de fusão no final do filete, ocasionando a cratera após a contração do material.

Foram identificadas descontinuidades do tipo trinca (Figura 26) nos filetes de solda do processo robotizado, principalmente nas terminações dos cordões superiores entre a chapa de atrito e as chapas laterais, imediatamente após a formação das crateras. No processo manual, observou-se uma trinca de solidificação em um dos cordões de solda. Essas trincas resultam das tensões desenvolvidas durante a solidificação do metal de solda e, sobretudo, das tensões de contração associadas ao resfriamento da poça de fusão, que favorecem a formação de crateras e a abertura de fissuras nas extremidades dos filetes.

Mordeduras foram identificadas em ambos os processos de soldagem. No processo robotizado, essa descontinuidade ocorreu com maior frequência na região entre a bucha e as chapas laterais, decorrente do espaçamento relativamente elevado entre esses componentes. Essa condição, combinada com a alta velocidade de soldagem, o sentido de deslocamento da tocha e os valores elevados de tensão e corrente, favoreceu o surgimento de mordeduras ao longo do cordão.

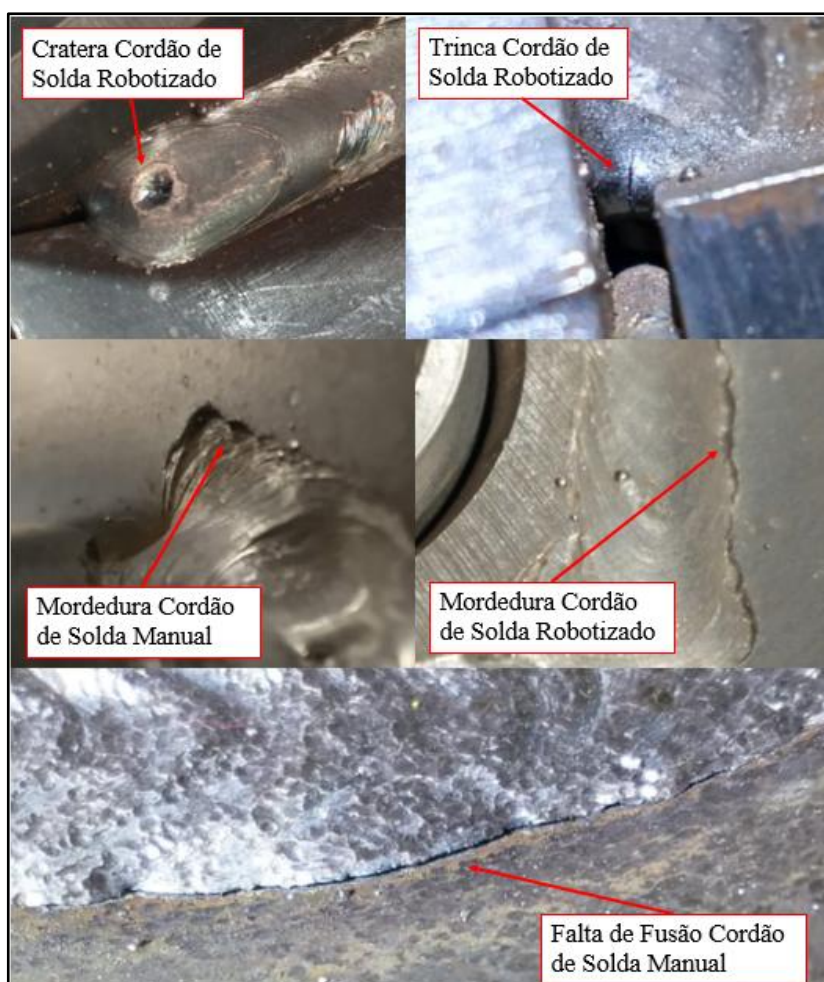
No processo manual, as mordeduras foram mais recorrentes nos cordões inferiores, entre a chapa de atrito e as chapas laterais (Figura 26). Nessa região, o acesso restrito e o posicionamento menos

favorável da tocha dificultam a visibilidade da poça de fusão, reduzindo o controle do operador sobre a formação do filete e aumentando a ocorrência da descontinuidade.

Foram identificados seis cordões com falta de fusão nas amostras do processo de soldagem robotizado. No processo manual, essa descontinuidade ocorreu com maior frequência, totalizando 33 cordões com falta de fusão (Figura 26), o que corresponde a aproximadamente 39% dos cordões executados. Esse resultado é crítico, pois todas as amostras do processo manual apresentaram ao menos um ponto de falta de fusão.

A falta de fusão ocorre quando os parâmetros de soldagem não estão adequadamente ajustados para o tipo de junta, sobretudo a tensão: valores muito baixos impedem a fusão completa entre metal de base e metal de adição. Além disso, fatores operacionais como a manipulação da tocha, o ângulo de trabalho e a posição de soldagem influenciam diretamente esse defeito. No processo manual, tais fatores dependem fortemente da habilidade e experiência do operador, aumentando a probabilidade de formação dessa descontinuidade.

Figura 26 – Descontinuidades encontradas na análise visual.

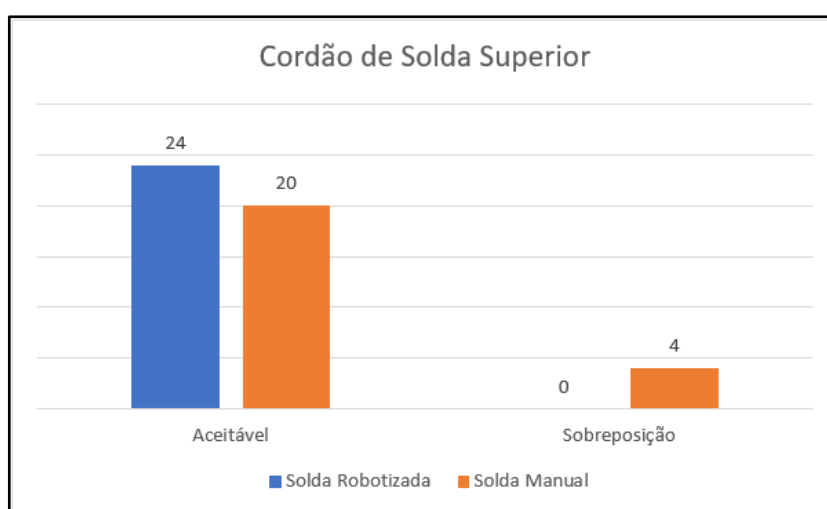


Fonte: O próprio Autor (2025).

O resultado da análise do aspecto visual do cordão de solda superior, apresentado no Gráfico 12, mostra que o processo de soldagem robotizada obteve todas as amostras classificadas como aceitáveis e nenhuma ocorrência de sobreposição. Já o processo de soldagem manual apresentou 20 amostras dentro do padrão aceitável e quatro com registros de sobreposição.

Esses resultados indicam maior consistência no processo robotizado, evidenciada pela ausência de defeitos no aspecto visual e pela repetibilidade do cordão de solda. No processo manual, a presença de sobreposição e a maior variabilidade entre as amostras refletem a influência direta do operador e a menor estabilidade do arco durante a execução.

Gráfico 12 – Análise aspecto visual.



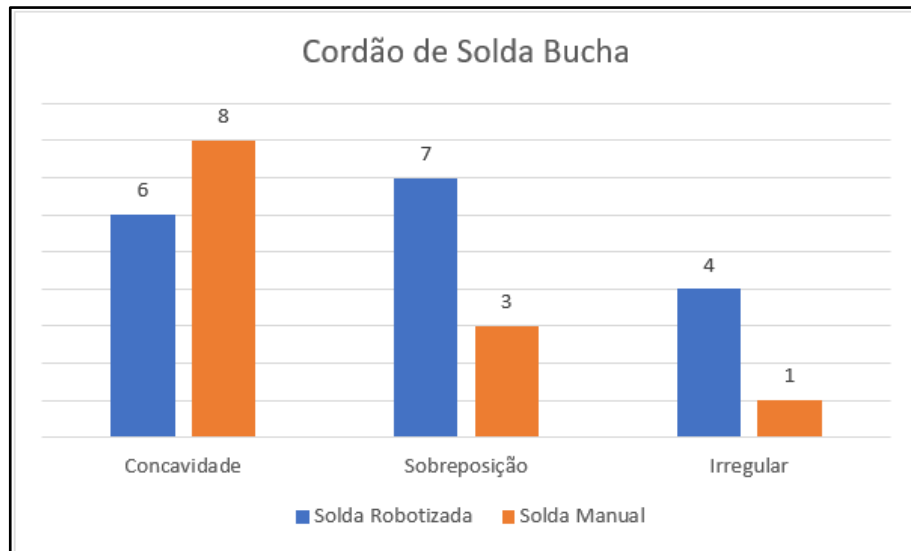
Fonte: O próprio Autor (2025).

A análise do aspecto visual do cordão de solda aplicado na região da bucha, conforme apresentado no Gráfico 13, mostra que o processo de soldagem manual apresentou maior ocorrência de concavidade. Quanto à sobreposição, o processo robotizado registrou sete ocorrências, valor aproximadamente 57% superior ao observado no processo manual. No critério de irregularidade, a soldagem robotizada apresentou quatro casos, enquanto o processo manual contabilizou apenas um.

Esses resultados indicam que, embora o processo robotizado ofereça maior controle e repetibilidade, ainda foram identificadas imperfeições relacionadas principalmente à regulagem de parâmetros, ao espaçamento excessivo entre os componentes e à geometria da junta. As limitações de movimentação do braço robótico decorrentes do dispositivo de fixação, também influenciam para o surgimento destas imperfeições. Já a soldagem manual demonstrou maior tendência à concavidade, possivelmente associada à variação na velocidade de avanço, à instabilidade do arco e ao posicionamento do conjunto durante a execução. A falta de um dispositivo rotativo no processo de soldagem manual,

influenciou diretamente no resultado obtido neste estudo. A Figura 27 apresenta a soldagem do cordão entre a bucha e as chapas laterais para ambos os processos.

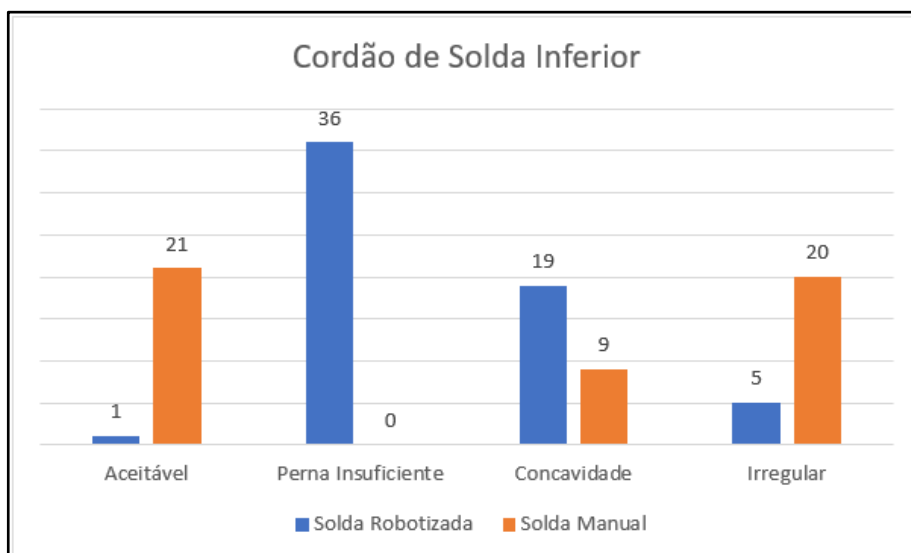
Gráfico 13 – Análise aspecto visual.



Fonte: O próprio Autor (2025).

A análise do aspecto visual do cordão de solda inferior, conforme apresentado no Gráfico 14, demonstra diferenças significativas entre os processos manual e robotizado. No quesito concavidade, as ocorrências na soldagem robotizada foram 52,6% superior ao resultado encontrado no processo manual. Já quanto à irregularidade do cordão, a soldagem manual apresentou 20 casos, valor 75% superior ao observado na soldagem robotizada.

Gráfico 14 – Análise aspecto visual.



Fonte: O próprio Autor (2025).

Esses resultados indicam que o processo manual apresentou melhor conformidade visual geral nesta região, enquanto o processo robotizado registrou maior incidência de imperfeições associadas à insuficiência de material depositado. Isso sugere a necessidade de ajustes nos parâmetros de corrente, velocidade de avanço ou posicionamento da tocha durante a execução da solda inferior. Observa-se também que o modelo de dispositivo de fixação utilizado influenciou diretamente a formação dessas discontinuidades, pois exige que o robô opere próximo ao limite de sua envergadura, dificultando o posicionamento ideal da tocha de soldagem.

Na Figura 27, observa-se a soldagem manual irregular entre bucha e chapa lateral. Também a soldagem robotizada entre bucha e chapa lateral é apresentada com concavidade. Os cordões de solda inferiores entre chapa de atrito e chapa lateral também estão apresentados na Figura 27, onde a soldagem manual originou um cordão irregular e a soldagem robotizada formou um cordão assimétrico, com perna insuficiente.

Figura 27 – Aspecto visual dos cordões de solda analisados.

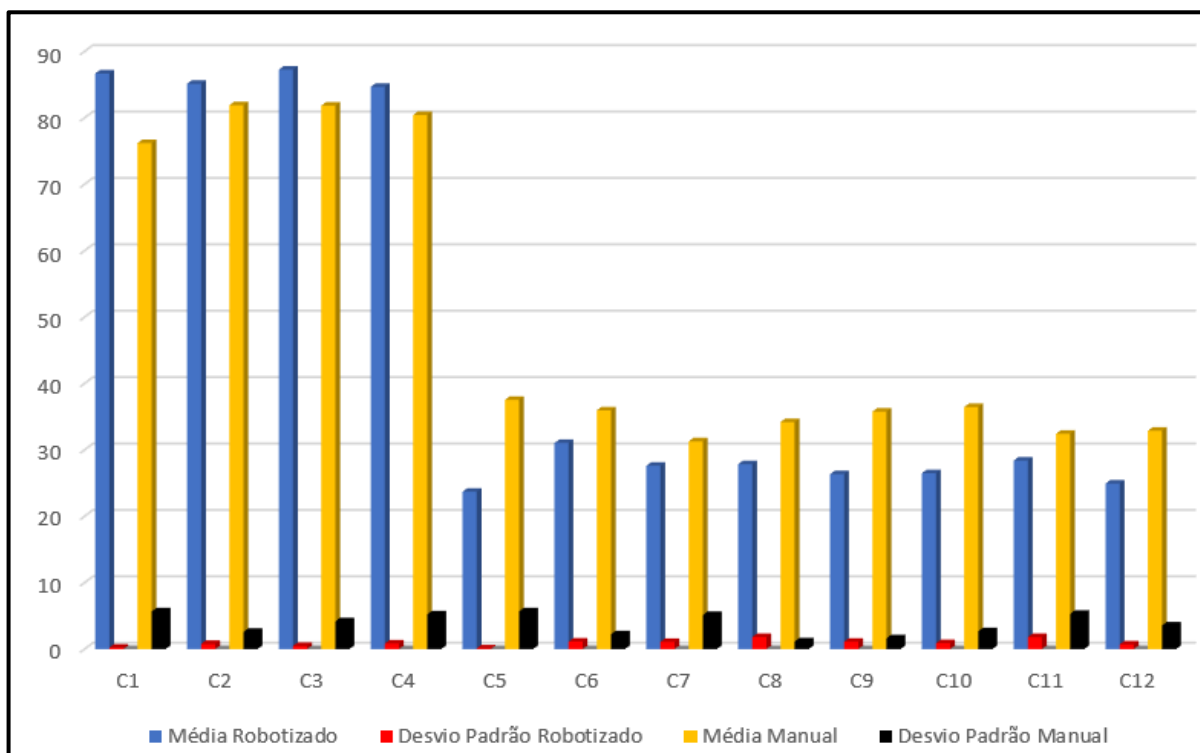


Fonte: O próprio Autor (2025).

A esquerda os cordões de solda entre bucha e chapas laterais. A direita os cordões de solda inferiores entre chapa de atrito e chapa lateral.

No Gráfico 15 observa-se os resultados das médias do comprimento de cada cordão de solda em ambos os processos e também seus respectivos desvios padrões.

Gráfico 15 – Média e desvio padrão dos tamanhos dos cordões de solda.



Fonte: O próprio Autor (2025).

C1-C12(Cordão 1 e respectivamente até Cordão 12).

Observa-se que as médias dos cordões C5 a C12 do processo robotizado permaneceram próximas aos 25 mm definidos em projeto, enquanto os cordões do processo manual apresentaram valores superiores a 30 mm. Os desvios padrão do processo manual também foram mais elevados em comparação ao processo robotizado, indicando menor uniformidade. Essa variação contribuiu para o aumento do tempo de arco aberto no processo manual. Além disso, o sistema robotizado, por seguir rigorosamente o programa definido, garante maior repetibilidade e controle em cada etapa do processo.

A análise visual evidenciou que, neste estudo de caso, ambos os processos apresentaram limitações relacionadas à qualidade do perfil de solda e à ocorrência de descontinuidades consideradas críticas. O processo robotizado demonstrou sua principal vantagem, a repetibilidade, reproduzindo de forma consistente os mesmos resultados, ainda que estes não atingissem o padrão ideal. Observou-se também que o modelo de dispositivo de fixação adotado influenciou diretamente a ocorrência de defeitos na soldagem robotizada. Em contraste, o processo manual apresentou maior variabilidade entre as amostras, característico do processo, e foi integralmente reprovado, pois todas apresentaram falta de fusão em pelo menos um cordão de solda por componente.

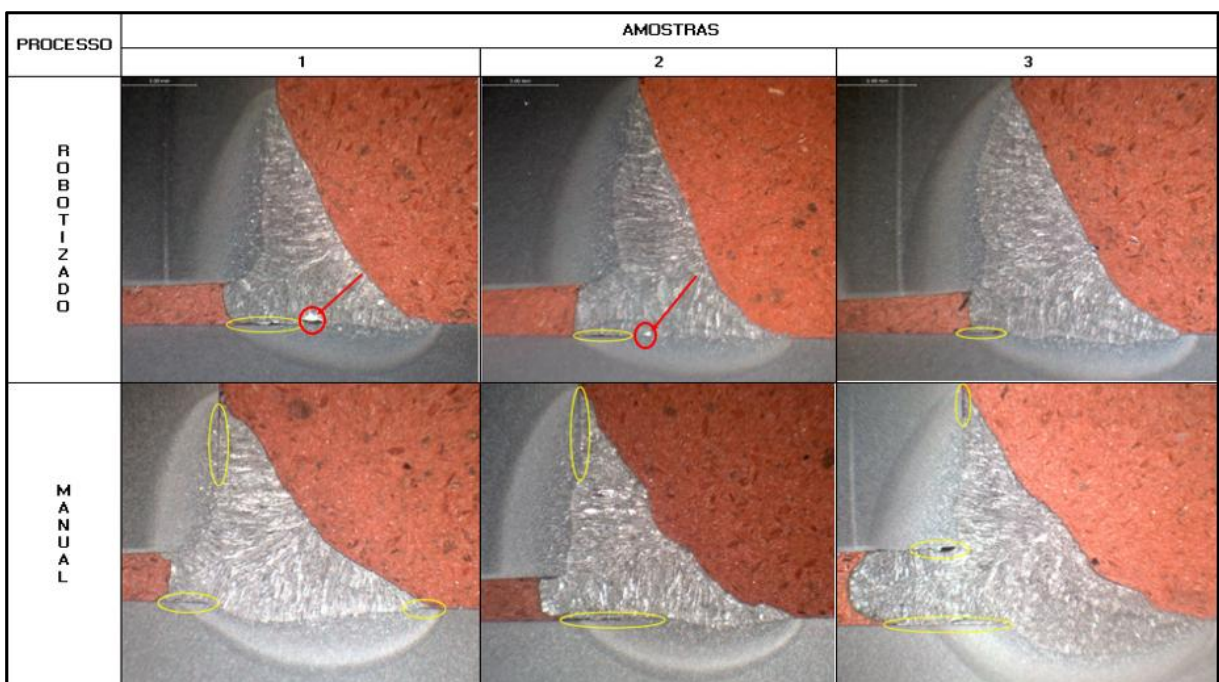
### 4.3 ANÁLISE METALURGICA

#### 4.3.1 Macrografia

Após a realização dos ensaios de macrografia, foram avaliadas as amostras correspondentes a cada processo de soldagem. A Figura 28 apresenta os resultados obtidos nos cordões inferiores, localizados entre a chapa de atrito e a chapa lateral. Observa-se que as amostras do processo robotizado apresentaram cordões de solda com boa uniformidade, característica da repetibilidade e do controle preciso de parâmetros proporcionados pelo sistema automatizado. Em contrapartida, as amostras do processo manual exibiram maior variação geométrica, influenciada diretamente pela habilidade do operador e pela dificuldade em manter condições estáveis durante a soldagem.

Ainda na Figura 28, verificou-se que todas as amostras do processo robotizado apresentaram falta de fusão na raiz do cordão e, em duas delas, a presença de porosidade interna. Já nas amostras do processo manual, não foram observadas porosidades, porém constatou-se falta de penetração na raiz e nas extremidades das pernas do cordão, conforme indicado anteriormente na análise visual. Esses resultados reforçam o melhor controle e repetibilidade do processo robotizado, embora evidenciem também que ajustes nos parâmetros térmicos ainda são necessários para eliminar discontinuidades críticas.

Figura 28 – Macrografia Cordão Inferior entre Chapa de Atrito e Chapa Lateral

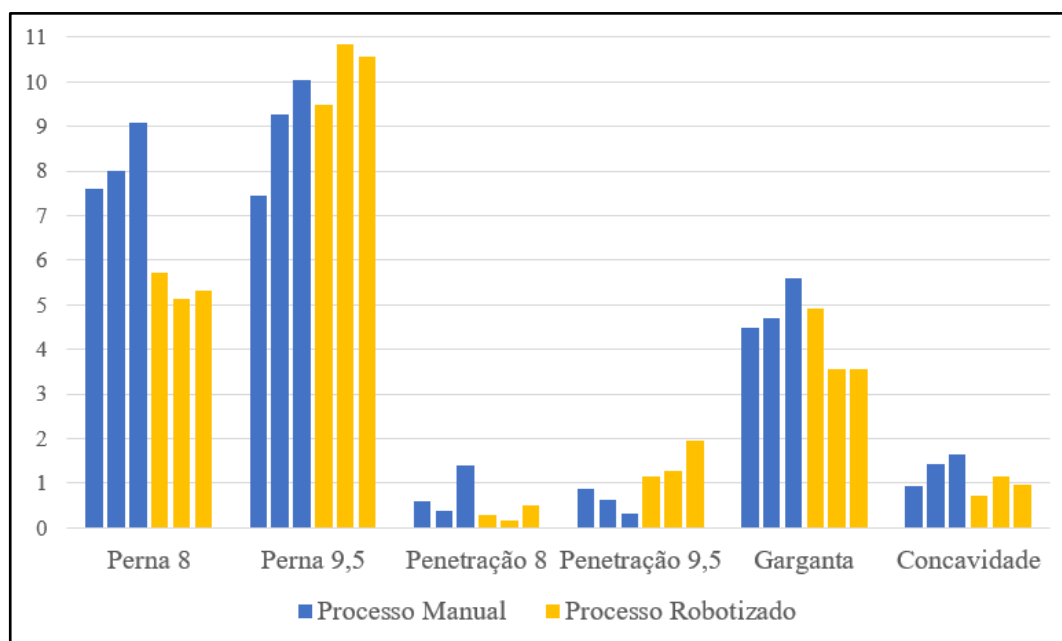


Fonte: O próprio Autor (2025).

As setas vermelhas indicam a presença de porosidade. As marcações em amarelo mostram a falta de penetração.

No Gráfico 16 é possível verificar as dimensões macrográficas de cada cordão de solda de ambos os processos.

Gráfico 16 – Dimensões macrográficas dos cordões de solda inferiores entre chapa de atrito e chapa lateral.



Fonte: O próprio Autor (2025).

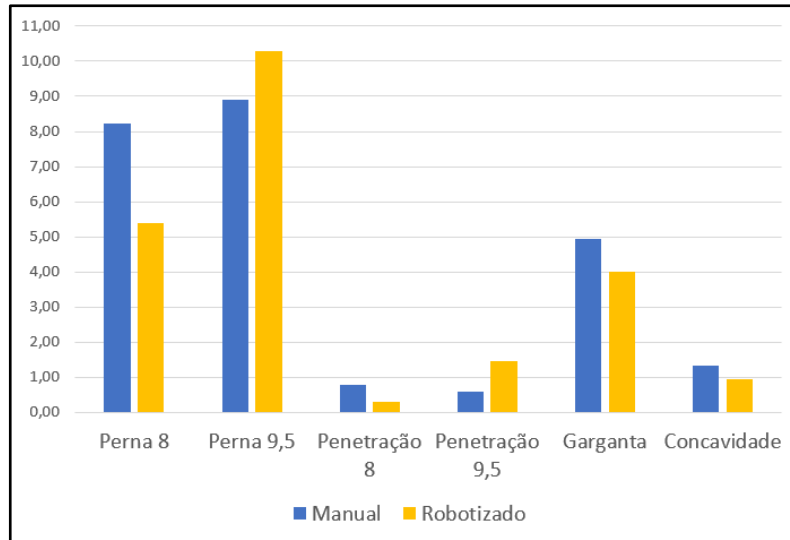
As referências de 8 e 9,5 indicam as características encontradas nas chapas de 8 e 9,5mm.

Os cordões de ambos os processos de soldagem apresentaram concavidade, defeito este que diminui a resistência do cordão de solda podendo ocasionar problemas precoce de fadiga. Este problema ocorre devido a ajustes incorretos de parâmetros de soldagem juntamente com alta velocidade de deslocamento, impossibilitando o preenchimento da poça de fusão.

Ambos os processos apresentaram tamanho médio de garganta inferiores aos 5mm especificados em projeto. O tamanho médio de garganta apresentou diferença inferior a 1 mm entre os dois processos, essa variação é considerada insignificante, indicando que não há diferença relevante entre os processos de soldagem analisados.

Observa-se no Gráfico 17, que o tamanho das pernas dos cordões de solda no processo manual apresentou maior uniformidade, com diferença média inferior a 1 mm entre as chapas. No processo robotizado, a diferença média entre as pernas do cordão de solda foi de 4,9 mm. Além disso, o tamanho médio da perna na chapa de 9,5 mm foi 90,8% superior ao da chapa de 8 mm, comportamento também identificado na análise visual, onde foi constatado o defeito de perna insuficiente.

Gráfico 17 – Médias das dimensões macrográficas dos cordões de solda inferiores entre chapa de atrito e chapa lateral.

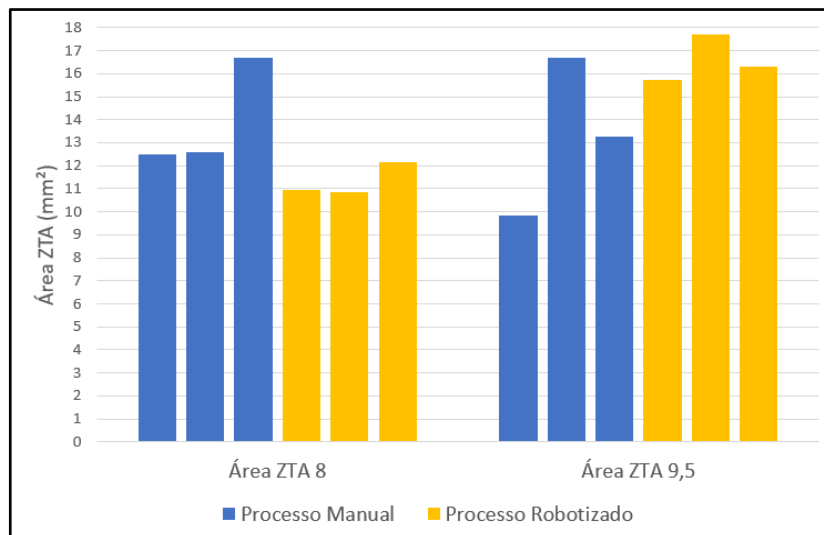


Fonte: O próprio Autor (2025).

A penetração nos cordões de solda não ocorreu totalmente e também como visto no gráfico acima, a espessura de penetração média foi superior a 1 mm somente no processo robotizado na chapa de 9,5mm. Este valor de penetração juntamente com as discontinuidades de falta de penetração resultam uma união soldada indesejada.

O Gráfico 18 apresenta os resultados do tamanho da área da ZTA resultante do processo de soldagem do cordão inferior entre a chapa de atrito e a chapa lateral.

Gráfico 18 – Tamanho da área da ZTA cordão inferior.



Fonte: O próprio Autor (2025).

Área ZTA 8: metal base da chapa de 8mm;

Área ZTA 9,5: metal base da chapa de 9,5mm.

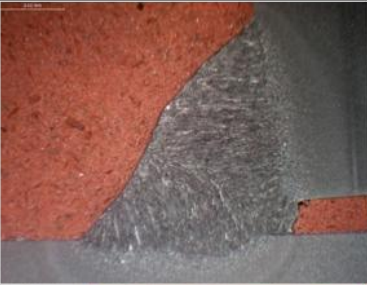
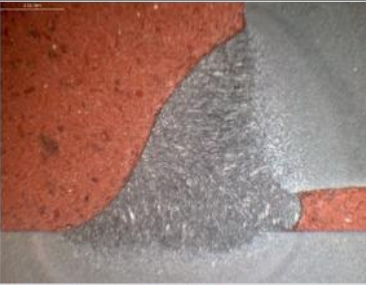




A análise da área da ZTA 8 mostra uma equivalência entre os processos. Este resultado se deve ao fato de a penetração nesta região também ser similar entre os processos. A falta de penetração resultou em uma área menor na ZTA do metal base da chapa de 8mm.

O tamanho da ZTA no metal base da chapa de 9,5mm foi maior no processo robotizado, resultado esse devido a maior penetração na mesma região. O processo manual teve uma ZTA com mais oscilação, variando entre 12,5mm<sup>2</sup> e 16,7mm<sup>2</sup>, mostrando a instabilidade no controle do aporte térmico pelo operador.

Esses defeitos estão associados ao posicionamento inadequado da tocha, resultado da geometria da peça, que limita o ângulo ideal de soldagem. No processo manual, o operador consegue corrigir continuamente o posicionamento, gerando cordões mais uniformes, embora essa limitação também tenha contribuído para a ocorrência de porosidade em alguns cordões. Já na soldagem robotizada, tais correções não são possíveis, pois o processo depende da programação e do alcance imposto pelo dispositivo de fixação, favorecendo descontinuidades por posicionamento. Além disso, a velocidade de soldagem influenciou ambos os processos, uma vez que valores elevados em relação aos demais parâmetros tendem a gerar concavidade e falta de fusão.

A Figura 29 apresenta os resultados macrográficos dos cordões de solda superiores entre as chapas de atrito e a chapa lateral.

Figura 29 – Macrografia Cordão Superior entre Chapa de Atrito e Chapa Lateral

| PROCESSO                                       | CORPOS DE PROVA CORDÃO SUPERIOR ENTRE CAPA DE ATRITO E CHAPA LATERAL                |  |   |
|--|---|--|---|
|  | 1   | 2  | 3   |
| R<br>O<br>B<br>O<br>T<br>I<br>Z<br>A<br>D<br>O |  |  |  |
| M<br>A<br>N<br>U<br>A<br>L                     |  |  |  |

Fonte: O próprio Autor (2025).

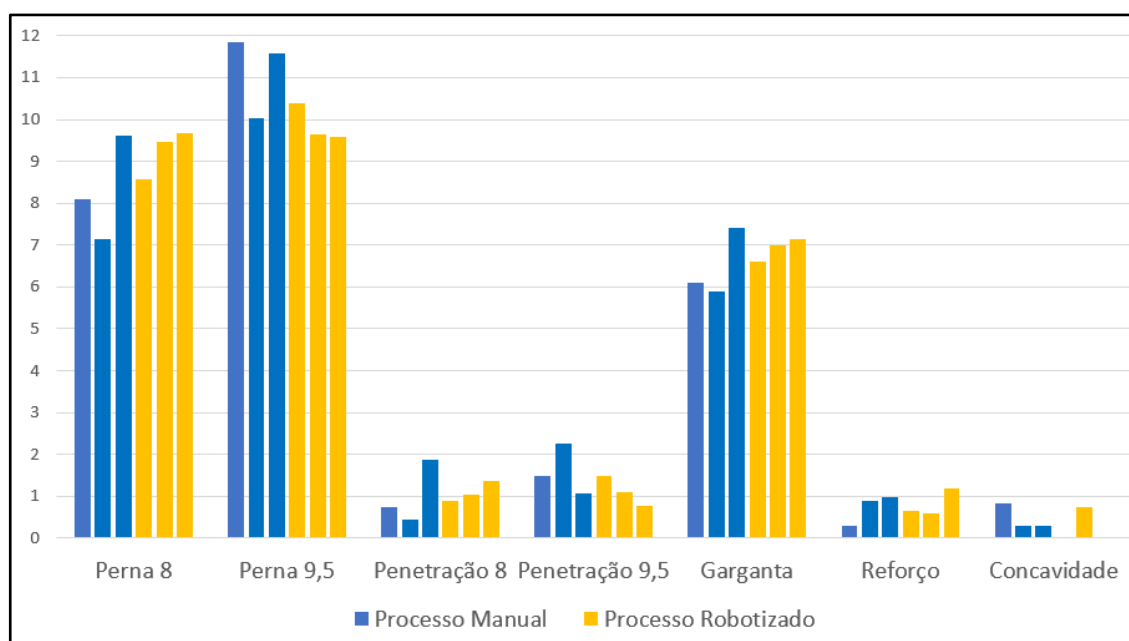
Marcações em amarelo mostram a falta de fusão do metal de adição com o metal base. As setas pretas indicam a presença de trincas no cordão de solda. Seta vermelha indica a presença de porosidade.

A macrografia do processo de soldagem robotizado realizado na parte superior entre a chapa de atrito e a lateral gerou um perfil de cordão uniforme, sem descontinuidades como porosidade e trincas. Também demonstrou a repetibilidade do processo, como perfis muito similares.

O ensaio macrográfico do processo manual mostrado na Figura 34, apresentou falta de fusão na raiz da garganta em todas as amostras. Uma das amostras também apresentou trincas, defeito que reprova a amostra. Observa-se também que o perfil do cordão soldado das amostras não obteve uma similaridade como existente no processo robotizado, ocasionado pelo fator operacional.

A macrografia mostrou que todas as amostras apresentaram concavidade e também o reforço, que é quando o material depositado excede o tamanho da garganta. Estes e outros resultados podem ser analisados no Gráfico 19, onde são apresentados os valores de dimensões dos cordões soldados.

Gráfico 19 – Características macrográficas dos cordões de solda superiores entre chapa de atrito e chapa lateral



Fonte: O próprio Autor (2025).

As referências de 8 e 9,5 indicam as características encontradas nas chapas de 8 e 9,5mm.

O tamanho de garganta nos dois processos ficou superior aos 5mm de projeto, isto não chega a ser um problema, porém é deposição de material desnecessária. No processo manual este ajuste depende da experiência e controle do operador, possibilitando mais variação entre os cordões. Já no processo robotizado o ajuste pode ser realizado afim de aproximar o tamanho da garganta ao do projeto, obtendo a repetibilidade mais aproximada mostrada no gráfico.

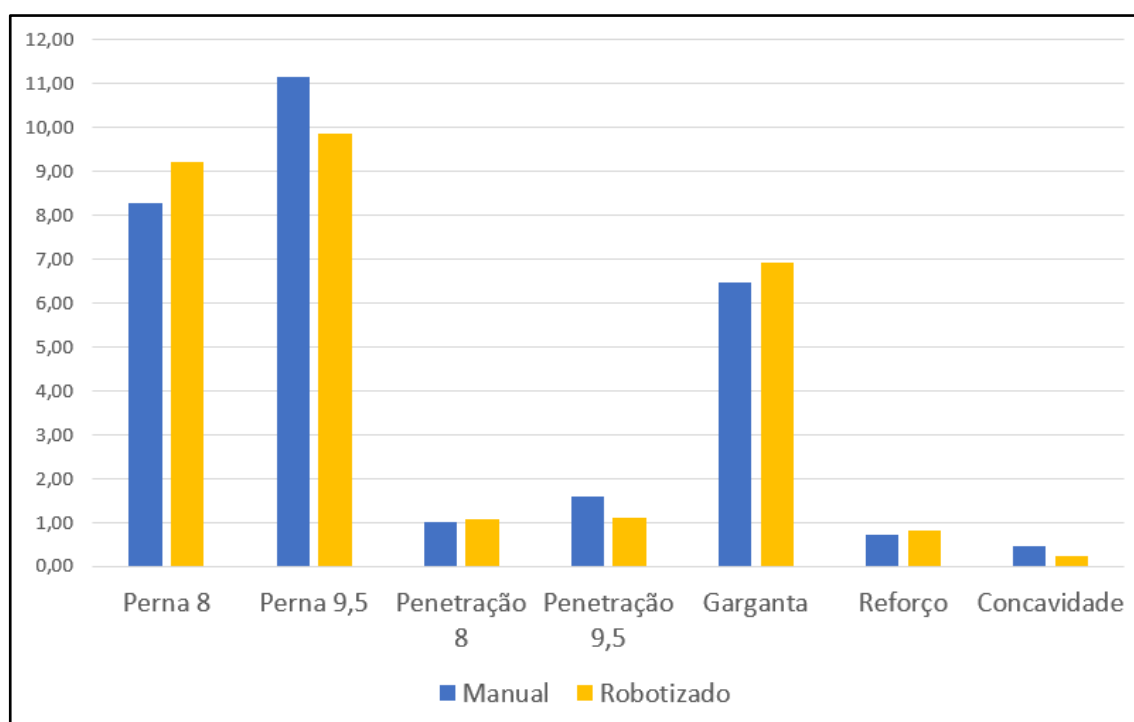
A soldagem nesse ponto foi executada na posição horizontal, o que contribuiu para o excesso de deposição e para a concavidade observada nos cordões. Nessa posição, a poça de fusão tende a se deslocar

em direção à chapa de apoio devido à ação da gravidade, resultando em maior acúmulo de material e menor controle da geometria do cordão.

Apesar de os cordões de solda do processo manual apresentarem falta de fusão, o tamanho da penetração em ambos os processos foi superior ao observado nos cordões inferiores, evidenciando que o melhor acesso da tocha de soldagem nesta região influencia positivamente esse parâmetro. Essa melhoria corresponde a um aumento médio de 41,7% na penetração em relação à posição inferior do componente.

O Gráfico 20 apresenta as médias das principais características macrográficas do cordão de solda superior entre a chapa de atrito e a chapa lateral.

Gráfico 20 – Médias das características macrográficas dos cordões de solda superiores entre chapa de atrito e chapa lateral.

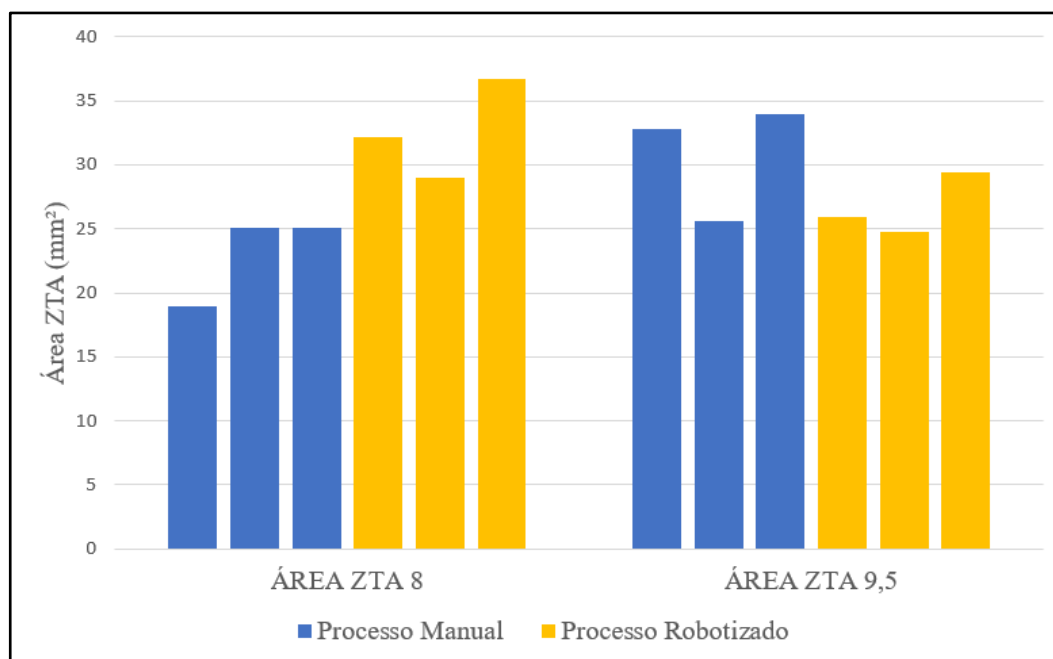


Fonte: O próprio Autor (2025).

As características analisadas na macrografia mostram através do gráfico das médias que não há diferenças significativas entre os processos de soldagem realizados. As diferenças ficaram muito próximas, exceto no tamanho das pernas onde a diferença entre cada processo superou 1mm. O processo manual apresentou uma diferença de 2,87mm entre suas médias de tamanho de perna.

O tamanho da ZTA dos cordões de solda superior entre chapa de atrito e chapa lateral são apresentados no Gráfico 21.

Gráfico 21 – Tamanho da área da ZTA cordão superior.



Fonte: O próprio Autor (2025).

Área ZTA 8 indica o tamanho da área resultante no metal base da chapa de 8mm; Área ZTA 9,5 indica o tamanho da área resultante no metal base da chapa de 9,5mm. Resultado em  $mm^2$ .

O tamanho da ZTA apresentado no metal base da chapa de 8mm foi menor no processo manual, cerca de 41,7% menor que o processo robotizado. Este fato deve-se a falta de fusão observada anteriormente na Figura 38. A média da área ZTA 9,5 ficou  $30,79mm^2$  para o processo manual e  $26,66mm^2$  para o processo robotizado, indicando não haver diferenças significativas entre os processos para este ponto observado.

O ensaio macrográfico para o cordão de solda superior entre a chapa de atrito e a chapa lateral, mostrou a importância do posicionamento da tocha de soldagem. Este ponto do componente permite melhor movimentação e posicionamento da tocha, resultando em cordões mais homogêneos e simétricos, principalmente no processo robotizado. O processo manual apresentou defeitos como falta de penetração, trincas e perfil irregular. A soldagem na posição horizontal proporcionou o aparecimento de reforços desnecessários na garganta e também concavidade, defeitos ocorridos em ambos os processos. A soldagem na posição plana seria a melhor opção para minimizar estes problemas encontrados, aumentando a penetração nas duas chapas e melhorando a simetria do cordão de solda.

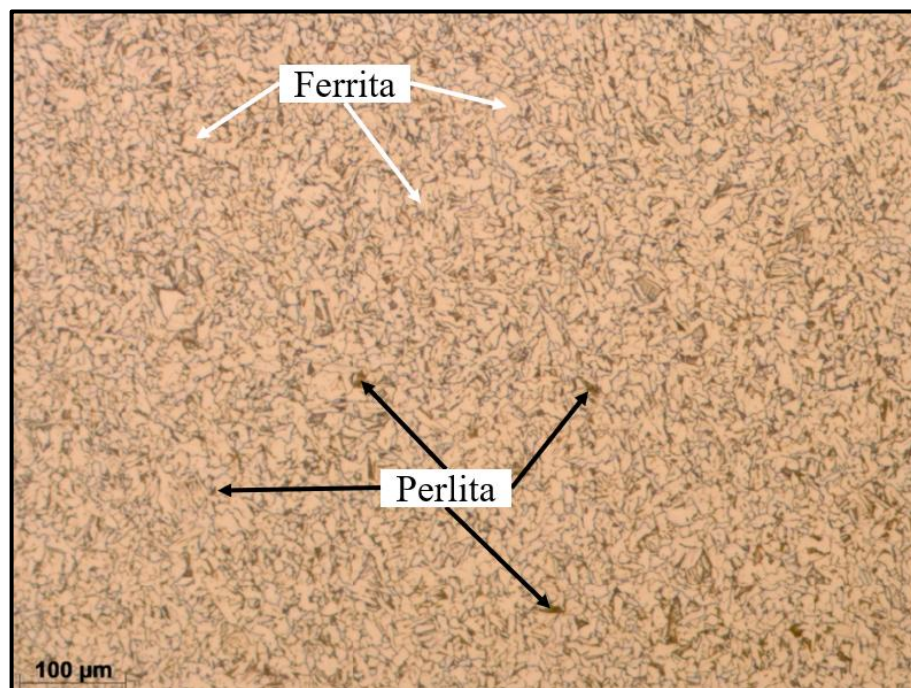
A macrografia mostrou que o processo robotizado apresentou maior uniformidade, mas com falta de fusão na raiz dos cordões inferiores, enquanto o processo manual apresentou maior variabilidade e ocorrência de trincas e falta de fusão nos cordões superiores. A análise da ZTA indicou equivalência entre os processos nos cordões inferiores, devido à baixa penetração em ambos. Nos cordões superiores, a ZTA do processo manual foi menor na chapa de 8 mm por falta de fusão, enquanto na chapa de 9,5 mm

os processos apresentaram valores semelhantes. Esses resultados reforçam a influência do posicionamento da tocha e das condições de acesso na formação da ZTA e na ocorrência das discontinuidades observadas.

### 4.3.2 Microestrutura

A Figura 30 mostra a microestrutura típica encontrada nas amostras do metal base ASTM A36 analisadas neste trabalho. O campo metálico ampliado em 100 vezes revela uma matriz constituída predominantemente por duas fases principais, ferrita e perlita. Ferrita é a fase clara e majoritária na imagem. A perlita aparece nas regiões escuras distribuída de forma fina e homogênea entre os grãos de ferrita.

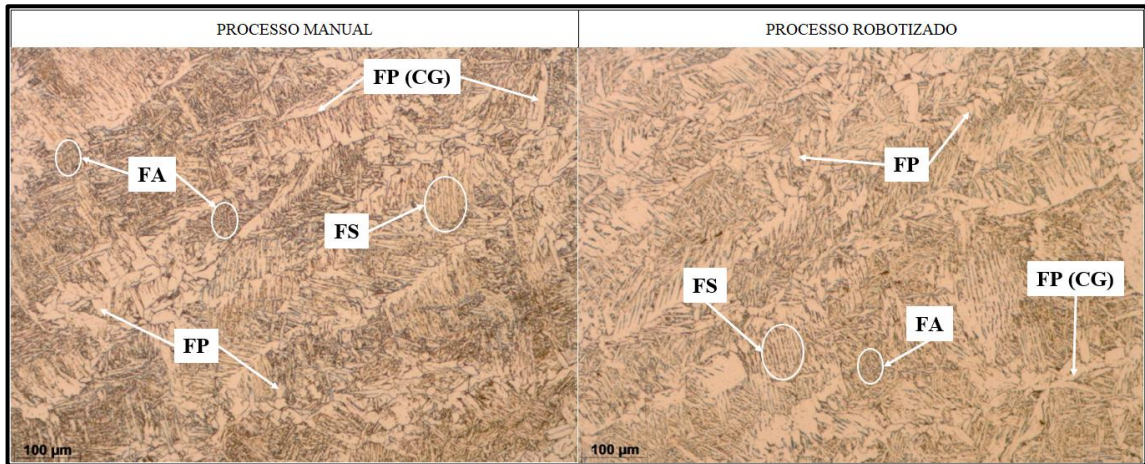
Figura 30 – Microestrutura encontrada do metal base ASTM A36.



Fonte: O próprio Autor (2025).

A análise microestrutural das zonas fundidas obtidas nos processos de soldagem manual e robotizado revelou resultados semelhantes quanto às fases presentes. As microestruturas típicas observadas nos cordões superiores, entre a chapa de atrito e a chapa lateral, são apresentadas na Figura 31. Verifica-se que o processo manual apresentou maior quantidade de ferrita acicular, com variações no tamanho e na orientação dos feixes, indicando flutuações térmicas durante a soldagem e um resfriamento de taxa moderada. Também foram identificadas regiões com ferrita de diferentes tamanhos, característica comum ao processo manual, em que pequenas variações na velocidade de soldagem, na distância da tocha e na oscilação do arco promovem heterogeneidades na estrutura formada.

Figura 31 – Microestrutura zona fundida cordão superior.



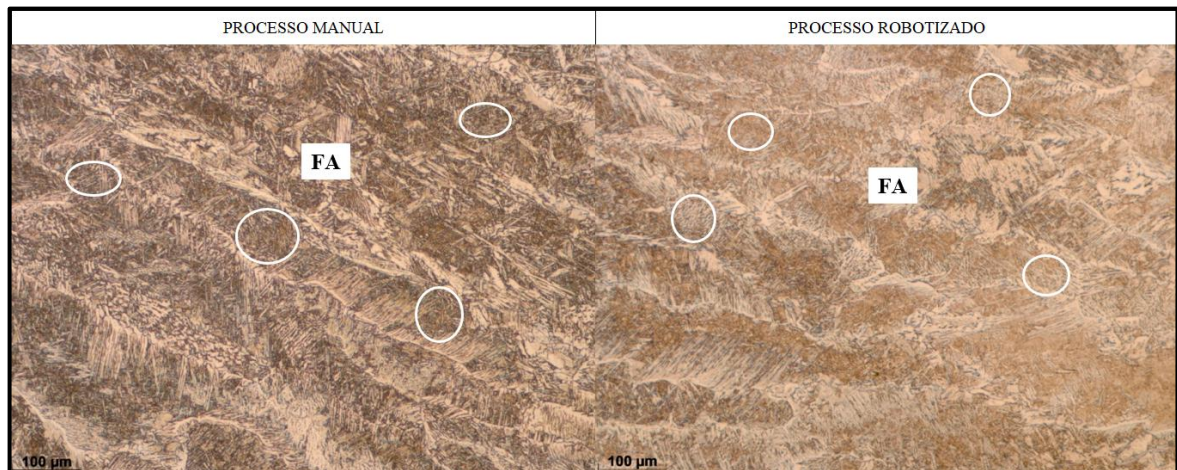
Fonte: O próprio Autor (2025).

FA (Ferrita Acicular); FP (Ferrita Primária); FS (Ferrita Secundária); FP (CG) (Ferrita de Contorno de Grão).

A micrografia do processo de soldagem robotizado mostrou uniformidade e refinamento, com predominância de ferrita secundária e ferrita de contorno de grão menos acentuada, devido ao resfriamento lento. Essa homogeneidade é resultado do controle rigoroso da velocidade de soldagem, aporte térmico e distância do bico de contato, característicos da soldagem robotizada.

A microestrutura obtida na zona fundida para os cordões de solda inferiores entre a chapa de atrito e chapa lateral podem ser observadas na Figura 32. A predominância da ferrita acicular deve-se ao fato de o cordão de solda nesta região ser menor, portanto, gerar uma taxa de resfriamento moderada.

Figura 32 – Microestrutura zona fundida cordão inferior.



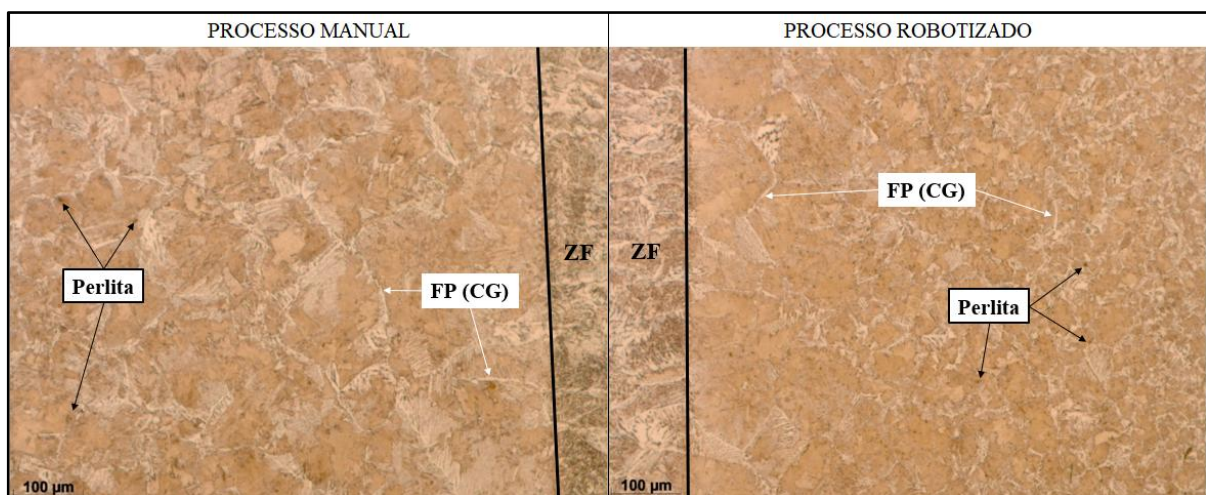
Fonte: O próprio Autor (2025).

FA (Ferrita Acicular).

A zona termicamente afetada obteve características semelhantes entre as amostras de cada processo, com microestrutura em fase predominante de ferrita e presença de perlita em pouca quantidade.

O processo de soldagem manual obteve regiões de crescimento de grão bem definida e grosseira. A presença de ferrita primária de contorno de grão é mais acentuada na ZTA deste processo. Este resultado é referente ao aporte térmico alto e descontrolado do processo de soldagem manual. Já a microestrutura da ZTA do processo de soldagem robotizado apresenta uma região de crescimento de grão mais uniforme. A ferrita primária de contorno de grão é observada em menor quantidade. Resultados de um processo com o controle térmico mais estável. A Figura 33 apresenta a microestrutura da ZTA dos processos manual e robotizado.

Figura 33 – Microestrutura encontrada na ZTA.



Fonte: O próprio Autor (2025).

FP (Ferrita Primária de Contorno de Grão); ZF (Zona Fundida).

O processo de soldagem robotizado apresentou uma região de crescimento de grão mais estreita, em comparação com o resultado do processo manual, podendo ser observado a região onde os grãos começam a diminuir, entrando na região de refino de grão. Essa condição foi observada com repetibilidade no processo robotizado, onde as amostras mostraram similaridade entre os resultados. No entanto o processo manual obteve maiores variações nos resultados obtidos, onde cada amostra apresentou tamanhos de regiões e grãos com diferenças consideráveis entre os resultados obtidos. O Apêndice H apresenta outros resultados de ZTA originados de ambos os processos de soldagem.

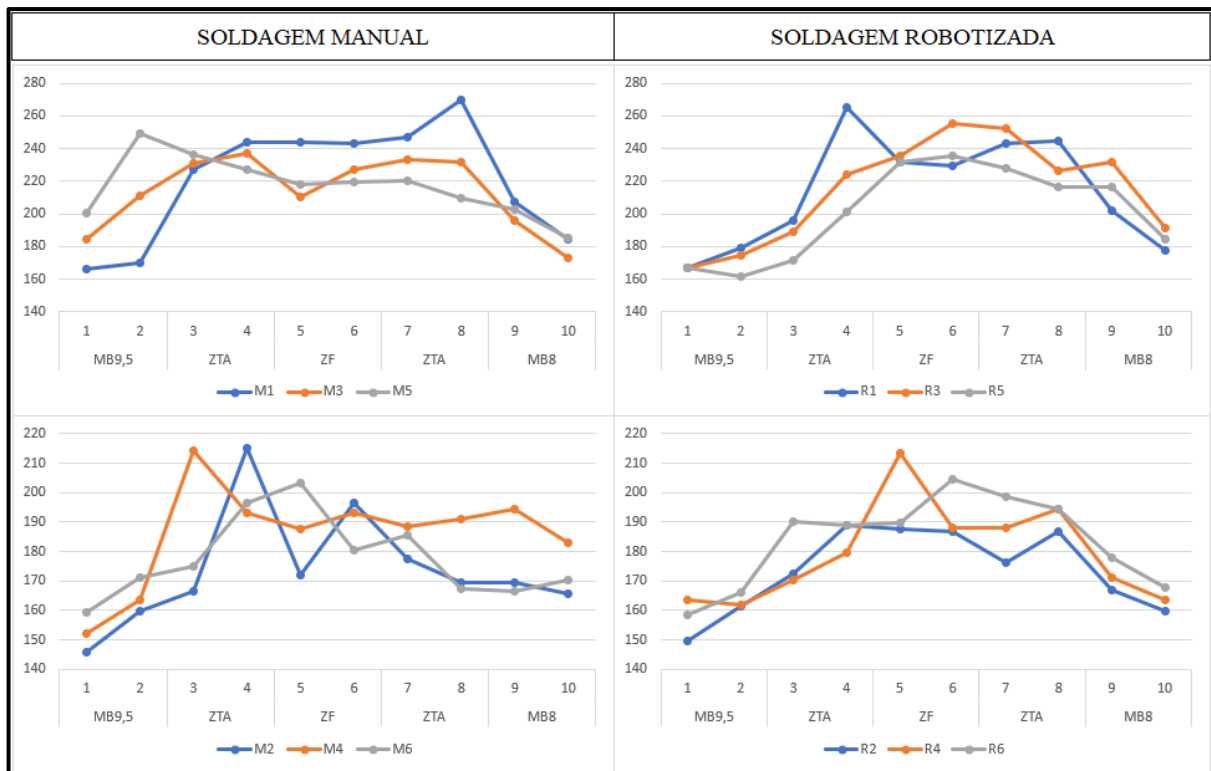
Com base nas análises microestruturais realizadas, observa-se que o processo de soldagem robotizado apresentou maior uniformidade e refinamento microestrutural em todas as regiões avaliadas, evidenciando um controle térmico mais eficiente e reprodutível. O processo manual, por sua vez, demonstrou maior variação no tamanho e na morfologia dos grãos, bem como maior presença de ferrita acicular e ferrita de contorno de grão, características de flutuações térmicas decorrentes da instabilidade

operacional. A zona termicamente afetada do processo robotizado apresentou menor espessura e crescimento de grão mais controlado, indicando menor aporte térmico e melhor dissipação de calor.

### 4.3.3 Microdureza

Os resultados dos ensaios de microdureza Vickers são apresentados no Gráfico 22. Nota-se comportamento bem característico deste tipo de ensaio, onde o valor de dureza é menor no metal base e cresce conforme passa pela zona termicamente afetada e zona fundida, decrescendo após passar por estas regiões.

Gráfico 22 – Perfil de microdureza Vickers dos cordões de solda dos processos manual e robotizado.

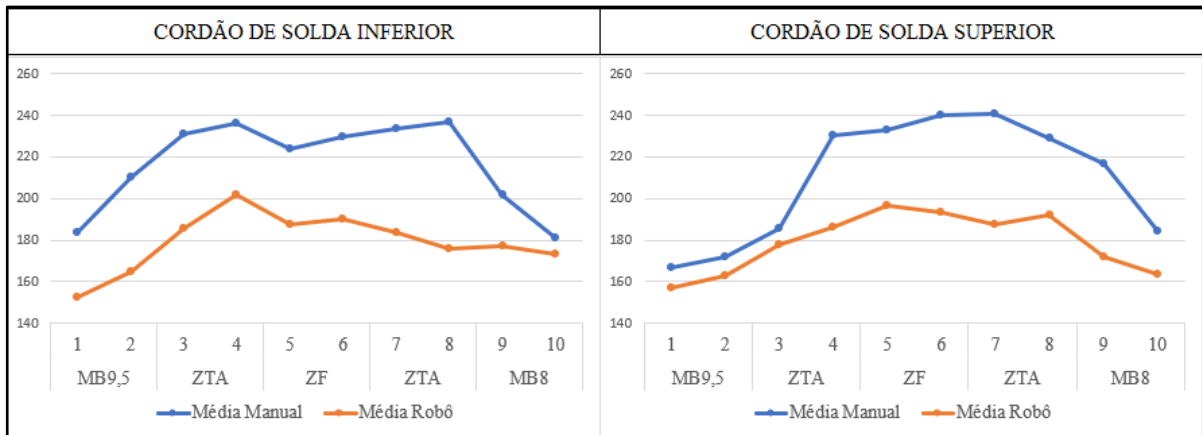


Fonte: O próprio Autor (2025).

Os gráficos da esquerda referem-se ao processo manual, onde M1, M3 e M5 correspondem aos cordões de solda inferiores entre chapa de atrito e chapa lateral. M2, M4 e M6 correspondem aos cordões de solda superiores. Os gráficos da direita referem-se ao processo de soldagem robotizado. R1, R3 e R5 correspondem aos cordões de solda inferiores entre chapa de atrito e chapa lateral e R2, R4 e R6 aos cordões de solda superiores. MB9,5 (Metal base 9,5mm); MB8 (Metal base 8 mm); ZTA (zona termicamente afetada) e ZF (Zona fundida).

Comparando os resultados dos gráficos, os valores de microdureza HV mostram-se semelhantes entre os processos, porém o Gráfico 23, apresenta os resultados de média de dureza HV, indicando um resultado de dureza mais elevada no processo manual.

Gráfico 23 – Média de microdureza Vickers dos cordões de solda.



Fonte: O próprio Autor (2025).

Os gráficos apresentam as médias de microdureza Vickers, comparando os processos de soldagem nos cordões inferiores e superiores entre chapa de atrito e chapa lateral.

A correlação entre a energia de soldagem e os resultados de microdureza demonstra que as diferenças entre os processos estão diretamente vinculadas à estabilidade térmica e às flutuações de corrente ocorridas durante o depósito do material.

A análise estatística dos dados, realizada por meio do método ANOVA (Apêndice I), evidenciou que os valores de microdureza obtidos nas amostras do processo de soldagem manual foram significativamente superiores aos observados no processo robotizado. Essa diferença está diretamente associada às variações de energias térmicas e microestruturais resultantes de cada processo. No processo manual, verificou-se predominância de ferrita acicular, fase reconhecida por elevar a resistência mecânica e a dureza devido à sua morfologia refinada e orientação irregular. Em contraste, as amostras provenientes do processo robotizado apresentaram maior fração de ferrita secundária, caracterizada por morfologia mais equiaxial e maior ductilidade, o que justifica os menores valores de dureza registrados nesse processo.

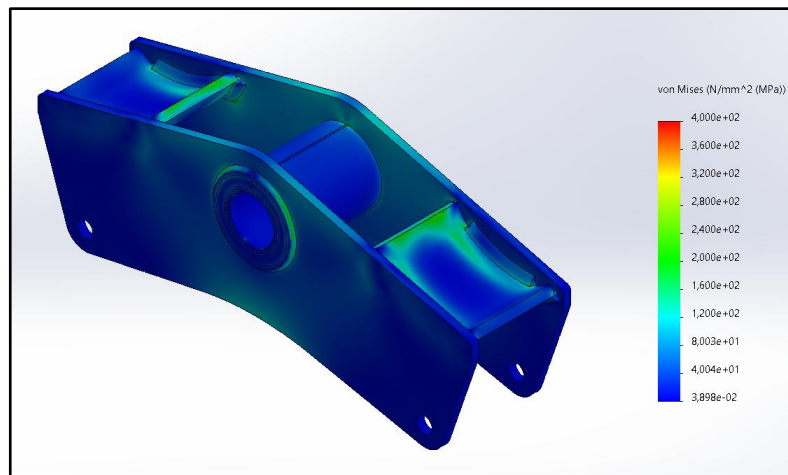
As diferenças entre os valores de microdureza Vickers nas regiões de ZTA e zona fundida ficaram entre 19% e 28% maiores que os resultados encontrados no processo de soldagem robotizado.

A análise dos resultados de microdureza Vickers evidenciou um comportamento típico do ensaio, com menores valores no metal base e aumento progressivo nas regiões da zona termicamente afetada e zona fundida. O processo manual apresentou flutuações mais acentuadas de corrente e tensão, resultando em aporte térmico irregular ao longo do cordão. Essas oscilações favorecem variações pontuais na taxa de resfriamento, que elevam a dureza local, refletindo-se em médias de microdureza superiores às do processo robotizado. Essa diferença está relacionada à predominância de ferrita acicular na microestrutura do processo manual, responsável por maior resistência e dureza, enquanto o processo robotizado apresentou microestrutura composta em sua maioria por ferrita secundária, de menor dureza relativa.

#### 4.4 ENSAIO MECÂNICO

A análise de elementos finitos utilizada para definir a carga do ensaio mecânico é apresentada na Figura 34. Embora a carga simulada de 6,3 toneladas já atingisse a tensão de von Mises correspondente ao escoamento do material base, optou-se por elevar a carga para alcançar o limite de escoamento do metal de solda, resultando em 10 toneladas. Essa carga, definida pelo autor e não representa as condições de trabalho do componente. Esse valor de 10 toneladas, corresponde à condição em que a tensão de von Mises atinge aproximadamente 390 MPa, valor próximo ao limite de escoamento do arame de solda ER70S-6 (400 MPa), conforme indicado na Figura 35 e no Anexo D.

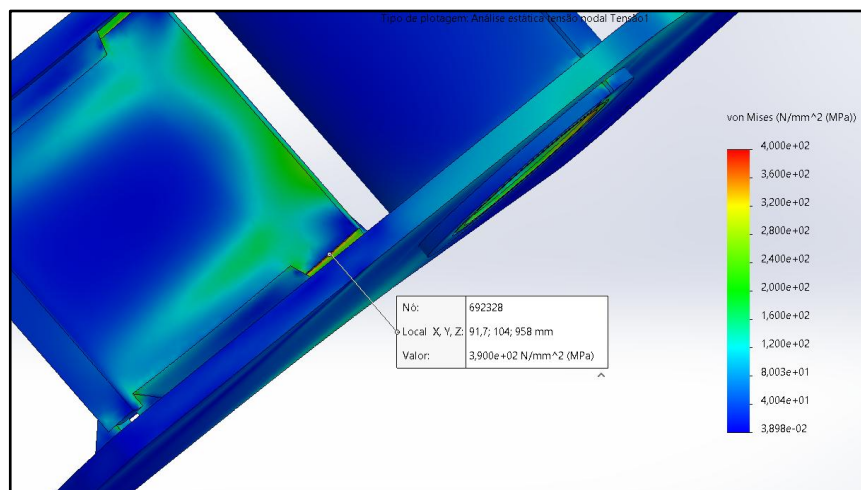
Figura 34 – Análise de elementos finitos do componente soldado.



Fonte: O próprio Autor (2025).

Na figura observa-se o componente com os níveis de tensões representados em cores conforme a plotagem de tensões de Von Mises localizada a direita.

Figura 35 – Resultado de tensão encontrado no cordão de solda inferior.



Fonte: O próprio Autor (2025).

Após a carga ser determinada pela análise de elementos finitos, pode-se realizar os ensaios mecânicos com ciclos de carga mínima de 10 toneladas e carga máxima de 35 toneladas. A Figura 36 mostra o equipamento com o dispositivo e o componente acoplado para realização do ensaio mecânico.

Figura 36 – Equipamento utilizado no ensaio mecânico.

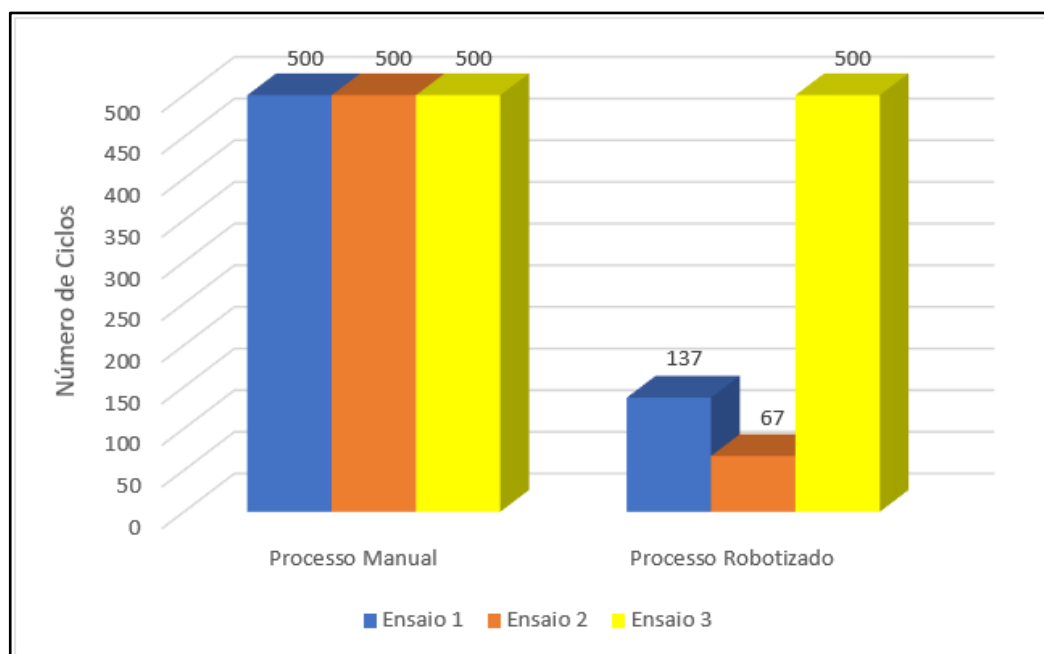


Fonte: O próprio Autor (2025).

Na figura nota-se que o equipamento utilizado no ensaio mecânico é uma prensa hidráulica. Observa-se também o dispositivo com o componente soldado acoplado para realização do ensaio mecânico.

Após a realização dos ensaios mecânicos os resultados são apresentados no Gráfico 24. Os componentes soldados pelo processo manual, suportaram os 500 ciclos do ensaio e não apresentaram danos nos cordões de solda. Os componentes obtidos através do processo de soldagem robotizado apresentaram resultados diferentes em comparação com o processo manual, onde apenas um dos componentes resistiu aos 500 ciclos sem apresentar falha nos cordões de solda.

Gráfico 24 – Resultados do ensaio mecânico.



Fonte: O próprio Autor (2025).

Ao realizar o ensaio mecânico nos componentes obtidos através do processo de soldagem robotizados, notou-se que um dos cordões de solda inferior, mais próximo da bucha, rompiam ou quebravam logo no primeiro ciclo, como apresentado na Figura 37. Este resultado contribui para a análise visual realizada neste trabalho, onde constatou-se que o cordão de solda inferior apresentou falta de fusão em todas as amostras (tabelas no Apêndice G).

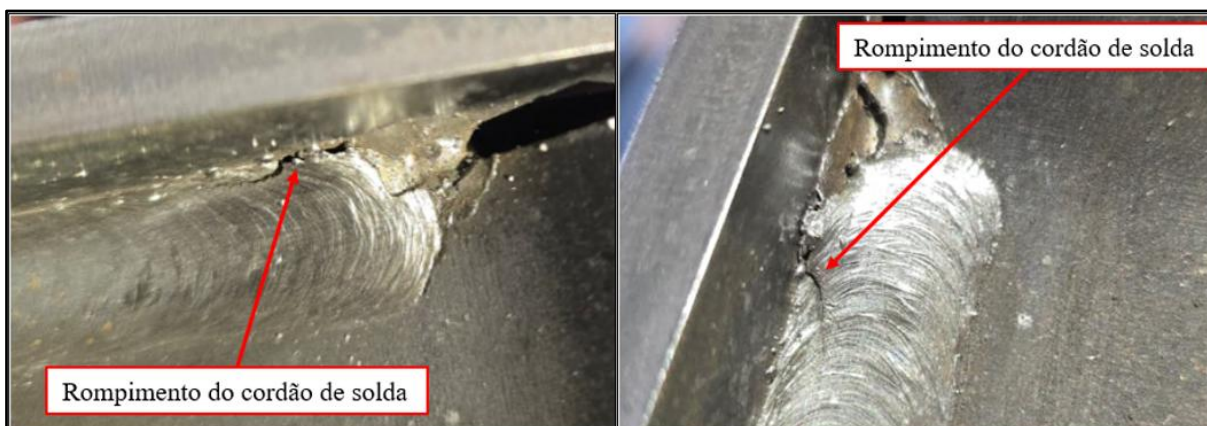
Figura 37 – Rompimento da fusão do cordão de solda inferior.



Fonte: O próprio Autor (2025).

Com o prosseguimento do ensaio notou-se o início de rompimento do cordão de solda superior em dois componentes, como mostrado na Figura 38. Este cordão de solda superior localiza-se acima do cordão de solda inferior com defeito, fato que contribui para o aparecimento do rompimento observado. O terceiro componente apesar da falha no cordão de solda inferior, suportou os 500 ciclos.

Figura 38 – Defeito cordão de solda superior.



Fonte: O próprio Autor (2025).

O ensaio mecânico evidenciou diferenças expressivas entre os dois processos de soldagem analisados neste estudo de caso. As amostras provenientes do processo robotizado apresentaram falha em todos os testes realizados, sendo que, em dois deles, a ruptura ocorreu em mais de um cordão de solda. Esse resultado está diretamente relacionado à falta de fusão observada no cordão de solda inferior, identificada na análise visual. Por outro lado, os componentes produzidos pelo processo de soldagem manual demonstraram melhor desempenho mecânico, suportando os 500 ciclos de ensaio sem apresentar falhas visíveis nos cordões de solda, o que indica maior integridade estrutural mesmo diante das variações inerentes ao processo manual.

#### 4.5 MELHORIAS

No decorrer do desenvolvimento deste trabalho, percebeu-se que o processo de soldagem robotizado não alcançou os resultados esperados em alguns dos estudos realizados. A fabricação de dispositivos de fixação com conceitos voltados para agrupar grande quantidade de peças, tendem a gerar maior produtividade. No entanto algumas limitações podem ocorrer, como visto neste trabalho, onde o dispositivo para posicionamento dos conjuntos montados acaba exigindo maior envergadura do braço robótico, limitando movimentação e posicionamento adequado.

Como melhoria no processo de soldagem robotizado, propõe-se a fabricação de um dispositivo para apenas um conjunto montado, assim centralizando o componente a mesa de trabalho, proporcionando melhor movimentação do braço robótico. Esta melhoria também proporcionará maior precisão e uniformidade no cordão de solda, pois a limitação de movimentação será reduzida.

Projeto e fabricação de um dispositivo de fixação para a soldagem manual, com sistemas giratório e de posicionamento, também se mostra necessário para melhorar a qualidade do cordão de solda e também a eficiência do processo manual.

Investimento na qualificação do profissional responsável pela programação do sistema robotizado, também é uma melhoria a ser realizada, tendo em vista os problemas considerados falhas de programação e técnica de posicionamento da tocha.

A melhoria no dispositivo de fixação acarretará em uma nova programação, que poderá ser melhor executada, devido a menor quantidade de pontos a serem editados durante a programação.

A soldagem na posição plana deve ser realizada sempre que possível, afim de melhorar a uniformidade, penetração e reduzir as descontinuidades nos cordões de solda.

A verificação dos parâmetros utilizados no processo de soldagem robotizado, podem ser revisados também como uma melhoria, certificando a utilização dos valores de corrente e tensão corretos para o material a ser soldado.

A manutenção preventiva dos equipamentos de ambos os processos é recomendada para garantir que os parâmetros de soldagem correspondam a suas respectivas regulagens no momento da soldagem.

Treinamentos e requalificação dos operadores do processo de soldagem manual, também são sugeridos para minimizar os defeitos ocasionados pelo fator humano.

## 5 CONCLUSÃO

O estudo comparativo entre os processos de soldagem MIG/MAG manual e robotizado aplicados ao balancim de suspensão rodoviária possibilitou avaliar, de forma integrada, aspectos produtivos, metalúrgicos, geométricos e mecânicos de cada método, destacando suas principais vantagens e limitações em ambiente industrial. A pesquisa, fundamentada em análises experimentais e métodos normatizados, forneceu um diagnóstico técnico consistente sobre o desempenho dos processos quanto à eficiência, repetibilidade e comportamento estrutural das juntas soldadas.

A análise de produtividade demonstrou que o processo robotizado proporcionou ganho de 37,8% em velocidade de produção, apresentando eficiência média de 87,4%, enquanto o processo manual obteve 61,7%. O tempo total de soldagem foi consideravelmente menor no processo robotizado, principalmente pela eliminação de interrupções típicas da soldagem manual, como pausas para limpeza de bocal e ajustes operacionais. A deposição de material foi 18,4% mais eficiente no processo robotizado quando analisado o consumo anual de arame de solda.

Na análise visual, observou-se que o processo robotizado apresentou cordões com maior uniformidade e ausência de sobreposição, enquanto 39% das amostras manuais apresentaram falta de fusão, sendo reprovadas pelos critérios de inspeção. Esse resultado evidencia a vantagem da automação quanto à repetibilidade e controle do arco elétrico. No entanto defeitos no processo robotizado estão diretamente ligados ao modelo de dispositivo utilizado. Limitações na movimentação do braço robótico e da tocha de soldagem contribuíram para as descontinuidades encontradas.

A análise macrografia indicou que ambos os processos geraram cordões com geometrias semelhantes, embora o posicionamento da tocha e a posição de soldagem tenham influenciado a simetria, penetração, tamanho da ZTA e o tamanho da garganta. A variação foi mais acentuada na soldagem manual, refletindo o efeito da habilidade do operador.

Com base nas análises microestruturais, conclui-se que os processos de soldagem manual e robotizado apresentaram diferenças significativas na uniformidade e no controle térmico das juntas. Ambos formaram as mesmas fases na zona fundida, porém o processo manual exibiu maior presença de ferrita acicular e variações no tamanho de grão devido às oscilações térmicas. O processo robotizado apresentou predominância de ferrita secundária e microestruturas mais homogêneas, resultado do controle preciso dos parâmetros de soldagem. Na zona termicamente afetada, o processo manual mostrou regiões de crescimento de grão mais amplas e heterogêneas, enquanto o robotizado apresentou ZTA mais estreita e refinada.

Os resultados dos ensaios de microdureza Vickers apresentaram comportamento característico do processo de soldagem MIG/MAG, com valores mais baixos no metal base, elevação na zona

termicamente afetada (ZTA) e na zona fundida, e posterior redução nas regiões adjacentes do metal base. Observou-se que o processo de soldagem MIG/MAG manual obteve valores de microdureza entre 19% e 28% superiores aos verificados no processo robotizado. Essa variação está associada às oscilações de energias térmicas observadas durante a soldagem, refletidas em microestruturas distintas entre os processos. Já a soldagem robotizada resultou em perfis de dureza mais uniformes e valores médios inferiores, acompanhando sua maior estabilidade de aporte térmico. Dessa forma, os resultados demonstram que as condições operacionais de cada processo influenciaram diretamente a distribuição de dureza ao longo dos cordões.

Nos ensaios mecânicos dinâmicos realizados com carga cíclica, os componentes soldados manualmente resistiram a 500 ciclos sem apresentar falhas nos cordões, enquanto os componentes robotizados apresentaram falhas localizadas nos cordões inferiores, associadas a falta de fusão identificada nas inspeções visuais. Esses resultados indicam que, apesar da maior produtividade e padronização do processo robotizado, a qualidade final está diretamente ligada à calibração do robô e ao ajuste preciso dos parâmetros operacionais.

Conclui-se que o processo robotizado é mais eficiente e viável em ambientes industriais que demandam alta produtividade, repetibilidade e padronização dimensional, enquanto o processo manual, embora mais dependente da habilidade do operador, pode apresentar desempenho estrutural superior quando corretamente executado. A qualidade do produto final depende, portanto, da interação entre controle de processo, parâmetros térmicos e posicionamento da tocha, ressaltando a importância da calibração e manutenção dos sistemas automatizados para garantir a confiabilidade da solda.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como proposta para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de um estudo comparativo entre os processos de soldagem FCAW manual e robotizado aplicados ao aço ARBL S700MC. A comparação entre os dois processos nesse aço de alta resistência contribuiria para ampliar o entendimento sobre a eficiência, repetitividade e qualidade metalúrgica alcançadas em aplicações industriais que demandam estruturas de maior desempenho.

Estudo Comparativo entre os Processos de Soldagem FCAW Manual e Robotizado com Transferência Pulsada, aplicados ao aço ASTM A36. Esse tema apresenta potencial significativo, uma vez que o FCAW é amplamente empregado na fabricação de componentes estruturais e pode oferecer maior taxa de deposição e estabilidade operacional em relação ao processo MIG/MAG convencional. A análise da influência da transferência pulsada sobre a formação do cordão, a microestrutura, a dureza e a repetibilidade do processo robotizado permitiria ampliar o entendimento sobre o desempenho metalúrgico e mecânico desse método. Além disso, a comparação direta com a execução manual possibilitaria avaliar ganhos reais em produtividade, controle térmico e redução de variabilidade, contribuindo para o aprimoramento de processos de soldagem utilizados na indústria metalmeccânica

## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, Siderley Fernandes. Avaliação da Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Metais de Solda Obtidos por Processos de Soldagem Manual e Automatizado utilizado na Soldagem de Aço API 5L X80. Revista: **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 16, n. 4, p. 322-332, dez. 2011.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME IX**: boiler and pressure vessel code: qualification standard for welding, brazing, and fusing procedures, welders, brazers, and welding, brazing, and fusing operators. New York, 2021.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS A5.18/A5.18M:2021**: Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding. 8 ed. AWS, 2021. 34 p.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D1.1/D1.1M:2015**: Código de Soldagem Estrutural-Aço. 23 ed. AWS, 2015. 604 p.
- ANFIR - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE IMPLEMENTOS RODOVIÁRIOS. **Dados do Setor**. Emplacamentos do setor. Disponível em: <https://anfir.org.br/dados-do-setor.php?selAno=2024>. Acesso em: 01 abr. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13284**: Preparação de corpos-de-prova para análise metalográfica. ABR:1995. Rio de Janeiro: 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6507-1**: Ensaio de Dureza Vickers Parte 1: Método de Ensaio. 1 ed. Rio de Janeiro: 2019. 30 p.
- CREMON JUNIOR, Onivaldo Aparecido; NASCIMENTO, Victor Hidenari Arashiro do; FERREZIN, Evaldo; BOVÉRIO, Maria Aparecida. **Comparações na Soldagem MIG/MAG: Automatizada e Manual**. In: II SITEFA SIMPÓSIO DE TECNOLOGIA FATEC, 2., 2019, Sertãozinho. Sitefa, p. 48-57.
- CUNHA, Gustavo Wippel; CARARA, Lucas Antunes; SILVA, Luiz Henrique Moraes; DALEFFE, Anderson; CROZETA, Natan; SILVA, Joélson Vieira da; MARTINS, Hadrian; CASAGRANDE, Henrique Cechinel. Comparativo entre Solda Manual e Automática em Aços Dissimilares. **Revista Vincci**, Criciúma, v. 9, n. 2, p. 486-510, dez. 2024.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN 1321**: destructive tests on welds in metallic materials - macroscopic and microscopic examination of welds. Berlin: Beuth Verlag, 1996.
- FARIA, ICS, Filleti, RAP, Helleno, AL. Evolução dos processos de automação em células de soldagem: Uma revisão de literatura. Revista: **Soldagem & Inspeção**. 2022;27:e2704.
- FRAGA, Gabriel Portal de; CUNHA, William Tedesco; SOUZA, José de. **Automação no Processo de Solda MIG/MAG**. Sapucaia do Sul: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, 2013. p. 1-10.
- MAGALHÃES, Víctor Augusto Nascimento. **Avaliação da Soldagem GMAW Mecanizada e Automatizada para União de Dutos Utilizando Fontes Convencional e com Controle de Curto-Circuito**. 2016. 219 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.
- MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2017. 361 p.

PEREIRA, Vinícius Silva. **Análise do Processo de Soldagem MIG/MAG Manualmente e Automatizada**. 2021. 38 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Universitário do Sul de Minas Unis Mg, Varginha, 2021.

SANTOS, Carlos Eduardo Figueiredo dos. **Processos de Soldagem - Conceitos, Equipamentos e Normas de Segurança**. São Paulo: Érica, 2015. 153 p.

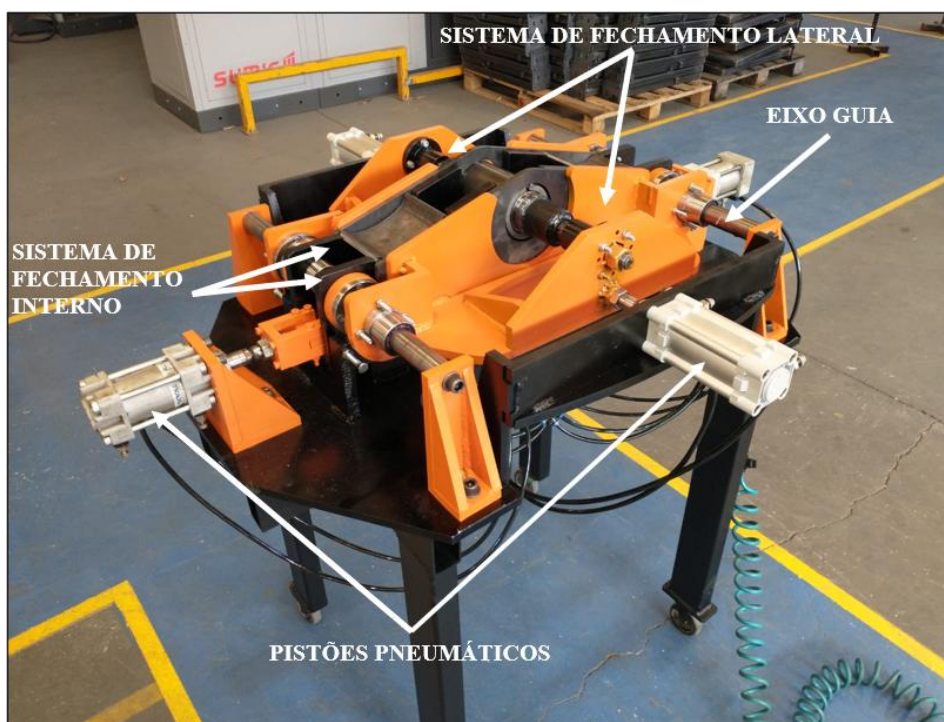
SCHIO, Fernando. **Análise Comparativa entre Soldagem MIG/MAG Manual e Robotizada**. 2013. 68 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Dceeng – Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, Unijuí - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2013. Disponível em:

SUMIG. **Manual de Instrução: MIG Hawk 205-255-305**. 2019. 28 páginas. Caxias do Sul, 2019, Revisão 07.

SUSPENSY. **Reposição**. Disponível em: <https://www.suspensys.com/pt>. Acesso em: 01 abr. 2025.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A: DISPOSITIVO PARA MONTAGEM DO PRODUTO



Fonte: O próprio Autor (2025).

### APÊNDICE B: MASSA INICIAL POR AMOSTRA DE CONJUNTO MONTADO

| Conjunto  | AM01  | AM02  | AM03  | AM04  | AM05  | AM06  | AM07  | AM08  | AM09  | AM10  | AM11  | AM12  | AM13  | AM14  |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Peso (Kg) | 11,70 | 11,70 | 11,70 | 11,75 | 11,75 | 11,85 | 11,85 | 11,85 | 11,75 | 11,75 | 11,75 | 11,70 | 11,75 | 11,75 |

Fonte: O próprio Autor (2025).

### APÊNDICE C: PARÂMETROS DE SOLDAGEM ROBOTIZADA

Parâmetros utilizados na soldagem robotizada.

| Nº Parâmetro | Corrente Principal (A) | Velocidade de Soldagem (cm/min) |
|--------------|------------------------|---------------------------------|
| 119          | 235                    | 40                              |
| 120          | 235                    | 42                              |
| 121          | 245                    | 45                              |

Fonte: O próprio Autor (2025).

## APÊNDICE D: ANÁLISE DE DADOS ANOVA DOS TEMPOS DE ARCO ABERTO

| <i>RESUMO</i>            |           |           | <i>Amostras</i> | <i>Soma dos Tempos</i> | <i>Média</i>   | <i>Variância</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------------|------------------------|----------------|------------------|
| Solda Robotizada         |           |           | 6               | 27                     | 4,5            | 0,00032          |
| Solda Manual             |           |           | 6               | 30,63                  | 5,105          | 0,18011          |
| <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i>       | <i>F</i>               | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
| Processos                | 1,098075  | 1         | 1,098075        | 12,50441269            | 0,016630398    | 16,25817704      |

Fonte: O próprio Autor (2025)

## APÊNDICE E: DEPOSIÇÃO DE ARAME DE SOLDA.

| DEPOSIÇÃO DE MATERIAL DE SOLDA |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
|--------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| CONJUNTO                       | AM06<br>R1 | AM07<br>R2 | AM10<br>R3 | AM11<br>R4 | AM13<br>R5 | AM14<br>R6 | AM02<br>M1 | AM03<br>M2 | AM04<br>M3 | AM08<br>M4 | AM09<br>M5 | AM12<br>M6 |
| PESO 1 (Kg)                    | 11,85      | 11,85      | 11,75      | 11,75      | 11,75      | 11,75      | 11,7       | 11,7       | 11,75      | 11,85      | 11,75      | 11,7       |
| PESO 2 (Kg)                    | 12,1       | 12,1       | 12         | 11,95      | 12         | 12         | 12         | 12,05      | 12,05      | 12,1       | 12,05      | 12         |
| DEPOSIÇÃO MATERIAL             | 0,25       | 0,25       | 0,25       | 0,2        | 0,25       | 0,25       | 0,3        | 0,35       | 0,3        | 0,25       | 0,3        | 0,3        |

Fonte: O próprio Autor (2025).

## APÊNDICE F: ANÁLISE DE DADOS DA DEPOSIÇÃO DE MATERIAL DE ARAME DE SOLDA.

| <i>RESUMO</i>            |           | <i>Contagem Amostras</i> |           | <i>Soma</i> | <i>Média</i>   | <i>Variância</i> |
|--------------------------|-----------|--------------------------|-----------|-------------|----------------|------------------|
| Deposição Robô           |           | 6                        |           | 1,45        | 0,241666667    | 0,000417         |
| Deposição Manual         |           | 6                        |           | 1,8         | 0,3            | 0,001            |
| <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i>                | <i>MQ</i> | <i>F</i>    | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
| Processos                | 0,0102083 | 1                        | 0,01021   | 14,4118     | 0,012676602    | 16,25818         |

Fonte: O próprio Autor (2025).

## APÊNDICE G: RESULTADOS DA ANÁLISE VISUAL.

### Siglas Análise Visual.

|    |                         |
|----|-------------------------|
| S  | SIM                     |
| N  | NÃO                     |
| AC | ACEITÁVEL               |
| CV | CONCÂVO                 |
| PI | PERNA INSUFICIENTE      |
| SP | SOBRE POSIÇÃO           |
| GI | GARGANTA INCOMPLETA     |
| C  | COMPLETO                |
| I  | IRREGULAR               |
| TS | TRINCA DE SOLIDIFICAÇÃO |

Fonte: O próprio Autor (2025).

### Quadro de resultados análise visual processo robotizado

| ANÁLISE VISUAL DA SOLDAGEM |                 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |         |                     |  |
|----------------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|---------------------|--|
| PROCESSO: Robotizado       |                 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |         | AMOSTRA: R1 (AM-06) |  |
| DESCONTINUIDADE            | CORDÃO DE SOLDA |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | BUCHA 1 | BUCHA 2             |  |
|                            | 1               | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |         |                     |  |
| TRINCAS                    | S               | N     | S     | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N       | N                   |  |
| FUSÃO COMPLETA             | S               | S     | S     | S     | S     | S     | S     | S     | S     | S     | N     | S     | S       | S                   |  |
| CRATERAS                   | S               | S     | S     | S     | S     | S     | S     | S     | S     | S     | S     | S     | N       | N                   |  |
| POROSIDADE                 | N               | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N       | N                   |  |
| MORDEDURA                  | N               | N     | N     | N     | S     | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N     | S       | S                   |  |
| ASPECTO PERFIL DE SOLDA    | AC              | AC    | AC    | AC    | CV    | CV    | CV    | PI    | PI    | PI-CV | PI-CV | CV    | SP      | CV-GI               |  |
| COMPRIMENTO DO CORDÃO (mm) | 86,73           | 84,35 | 86,39 | 83,26 | 23,77 | 29,65 | 26,33 | 28,46 | 24,81 | 27,89 | 29,6  | 25,54 | C       | C                   |  |

| ANÁLISE VISUAL DA SOLDAGEM |                 |      |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |         |                     |  |
|----------------------------|-----------------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|---------------------|--|
| PROCESSO: Robotizado       |                 |      |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |         | AMOSTRA: R2 (AM-07) |  |
| DESCONTINUIDADE            | CORDÃO DE SOLDA |      |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       | BUCHA 1 | BUCHA 2             |  |
|                            | 1               | 2    | 3     | 4    | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |         |                     |  |
| TRINCAS                    | S               | N    | N     | S    | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N     | S     | N       | N                   |  |
| FUSÃO COMPLETA             | S               | S    | S     | S    | S     | S     | S     | S     | S     | S     | N     | S     | S       | S                   |  |
| CRATERAS                   | S               | S    | S     | S    | S     | S     | S     | S     | S     | S     | N     | S     | N       | N                   |  |
| POROSIDADE                 | N               | N    | N     | N    | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N       | N                   |  |
| MORDEDURA                  | N               | N    | N     | N    | S     | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N     | S       | S                   |  |
| ASPECTO PERFIL DE SOLDA    | AC              | AC   | AC    | AC   | AC    | PI    | PI-CV | PI    | PI    | PI-CV | PI-CV | I     | SP      | CV                  |  |
| COMPRIMENTO DO CORDÃO (mm) | 86,36           | 84,7 | 87,27 | 84,3 | 23,73 | 31,84 | 27,81 | 28,12 | 25,06 | 25,39 | 30,11 | 23,62 | C       | C                   |  |

| ANÁLISE VISUAL DA SOLDAGEM |                 |       |       |       |       |       |                          |       |       |       |       |       |         |         |
|----------------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|---------|
| PROCESSO: Robotizado       |                 |       |       |       |       |       | AMOSTRA: R3 (AM-10) Lab. |       |       |       |       |       |         |         |
| DESCONTINUIDADE            | CORDÃO DE SOLDA |       |       |       |       |       |                          |       |       |       |       |       | BUCHA 1 | BUCHA 2 |
|                            | 1               | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7                        | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |         |         |
| TRINCAS                    | N               | N     | FC    | FC    | N     | N     | N                        | N     | N     | N     | N     | N     | N       | N       |
| FUSÃO COMPLETA             | S               | S     | S     | S     | S     | S     | S                        | S     | S     | S     | N     | S     | S       | S       |
| CRATERAS                   | S               | S     | S     | S     | S     | S     | S                        | S     | S     | S     | S     | S     | N       | N       |
| POROSIDADE                 | N               | N     | N     | N     | N     | N     | N                        | N     | N     | N     | N     | N     | N       | N       |
| MORDEDURA                  | N               | N     | N     | N     | S     | N     | N                        | N     | N     | N     | N     | N     | S       | S       |
| ASPECTO PERFIL DE SOLDA    | AC              | AC    | AC    | AC    | CV    | PI    | PI-CV                    | PI    | PI    | PI    | PI    | I     | I       | I-SP    |
| COMPRIMENTO DO CORDÃO (mm) | 86,47           | 84,61 | 87,39 | 84,98 | 23,61 | 31,39 | 27,21                    | 29,43 | 26,65 | 27,08 | 27,44 | 24,95 | C       | C       |

| ANÁLISE VISUAL DA SOLDAGEM |                 |       |       |       |       |       |                          |       |       |       |       |       |         |         |
|----------------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|---------|
| PROCESSO: Robotizado       |                 |       |       |       |       |       | AMOSTRA: R4 (AM-11) Lab. |       |       |       |       |       |         |         |
| DESCONTINUIDADE            | CORDÃO DE SOLDA |       |       |       |       |       |                          |       |       |       |       |       | BUCHA 1 | BUCHA 2 |
|                            | 1               | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7                        | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |         |         |
| TRINCAS                    | S               | S     | N     | S     | N     | N     | N                        | N     | N     | TS    | N     | N     | N       | N       |
| FUSÃO COMPLETA             | S               | S     | S     | S     | S     | S     | S                        | S     | S     | S     | N     | S     | S       | S       |
| CRATERAS                   | S               | S     | S     | S     | S     | S     | S                        | S     | S     | N     | N     | S     | N       | N       |
| POROSIDADE                 | N               | N     | N     | N     | N     | N     | N                        | N     | N     | N     | N     | N     | N       | N       |
| MORDEDURA                  | N               | N     | N     | N     | S     | N     | N                        | N     | N     | N     | N     | S     | S       | S       |
| ASPECTO PERFIL DE SOLDA    | AC              | AC    | AC    | AC    | PI-CV | PI    | PI-CV                    | PI    | PI    | PI    | PI-CV | I     | SP-CV   | SP-CV   |
| COMPRIMENTO DO CORDÃO (mm) | 86,91           | 85,97 | 87,71 | 84,75 | 23,82 | 30,91 | 28,44                    | 25,64 | 27,12 | 26,03 | 28,39 | 25,28 | C       | C       |

| ANÁLISE VISUAL DA SOLDAGEM |                 |       |       |       |       |      |                     |       |       |       |       |       |         |         |
|----------------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|---------|
| PROCESSO: Robotizado       |                 |       |       |       |       |      | AMOSTRA: R5 (AM-13) |       |       |       |       |       |         |         |
| DESCONTINUIDADE            | CORDÃO DE SOLDA |       |       |       |       |      |                     |       |       |       |       |       | BUCHA 1 | BUCHA 2 |
|                            | 1               | 2     | 3     | 4     | 5     | 6    | 7                   | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |         |         |
| TRINCAS                    | N               | S     | S     | S     | N     | N    | N                   | N     | N     | TS    | N     | N     | N       | N       |
| FUSÃO COMPLETA             | S               | S     | S     | S     | S     | S    | S                   | S     | S     | S     | N     | S     | S       | S       |
| CRATERAS                   | S               | S     | S     | S     | S     | S    | S                   | S     | S     | N     | S     | S     | N       | N       |
| POROSIDADE                 | N               | N     | N     | N     | N     | N    | N                   | N     | N     | N     | N     | N     | N       | N       |
| MORDEDURA                  | N               | N     | N     | N     | N     | N    | N                   | N     | N     | N     | S     | S     | S       | S       |
| ASPECTO PERFIL DE SOLDA    | AC              | AC    | AC    | AC    | CV    | PI   | PI                  | PI    | PI    | PI    | PI-CV | I     | SP-CV   | SP-CV   |
| COMPRIMENTO DO CORDÃO (mm) | 86,82           | 86,18 | 87,57 | 85,67 | 23,67 | 32,5 | 26,66               | 25,64 | 27,12 | 26,03 | 25,28 | 25,28 | C       | C       |

| ANÁLISE VISUAL DA SOLDAGEM |                 |       |       |       |       |       |                          |       |       |       |       |       |         |         |
|----------------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|---------|
| PROCESSO: Robotizado       |                 |       |       |       |       |       | AMOSTRA: R6 (AM-14) Lab. |       |       |       |       |       |         |         |
| DESCONTINUIDADE            | CORDÃO DE SOLDA |       |       |       |       |       |                          |       |       |       |       |       | BUCHA 1 | BUCHA 2 |
|                            | 1               | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7                        | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |         |         |
| TRINCAS                    | N               | N     | N     | FC    | N     | N     | N                        | N     | N     | N     | N     | N     | N       | N       |
| FUSÃO COMPLETA             | S               | S     | S     | S     | S     | S     | S                        | S     | S     | S     | N     | S     | N       | S       |
| CRATERAS                   | S               | S     | S     | S     | S     | S     | S                        | S     | S     | S     | S     | S     | N       | N       |
| POROSIDADE                 | N               | N     | N     | N     | N     | N     | N                        | N     | N     | N     | N     | N     | N       | N       |
| MORDEDURA                  | N               | N     | N     | N     | S     | N     | N                        | N     | N     | N     | N     | N     | S       | S       |
| ASPECTO PERFIL DE SOLDA    | AC              | AC    | AC    | AC    | PI-CV | PI    | PI-CV                    | PI    | PI    | PI    | PI-CV | I     | I       | I       |
| COMPRIMENTO DO CORDÃO (mm) | 86,7            | 84,99 | 87,23 | 85,09 | 23,57 | 29,87 | 29,14                    | 29,73 | 27,21 | 26,43 | 29,48 | 24,88 | C       | C       |

Fonte: O próprio Autor (2025).

## Quadro de resultados análise visual processo manual

| ANÁLISE VISUAL DA SOLDAGEM |                 |       |       |       |       |       |       |       |       |                            |       |       |         |         |
|----------------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------------------|-------|-------|---------|---------|
| PROCESSO: <b>Manual</b>    |                 |       |       |       |       |       |       |       |       | AMOSTRA: <b>M1 (AM-02)</b> |       |       |         |         |
| DESCONTINUIDADE            | CORDÃO DE SOLDA |       |       |       |       |       |       |       |       |                            |       |       | BUCHA 1 | BUCHA 2 |
|                            | 1               | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10                         | 11    | 12    |         |         |
| TRINCAS                    | N               | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N                          | N     | N     | N       | N       |
| FUSÃO COMPLETA             | S               | N     | S     | S     | N     | S     | N     | S     | S     | N                          | S     | N     | S       | S       |
| CRATERAS                   | N               | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N                          | N     | N     | N       | N       |
| POROSIDADE                 | N               | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N                          | N     | N     | N       | N       |
| MORDEDURA                  | N               | N     | N     | N     | N     | N     | S     | N     | N     | N                          | N     | S     | S       | N       |
| ASPECTO PERFIL DE SOLDA    | AC              | AC    | SP    | SP    | I-CV  | CV    | I     | I     | AC    | AC                         | I     | I     | SP      | AC      |
| COMPRIMENTO DO CORDÃO (mm) | 79,91           | 81,81 | 76,42 | 74,16 | 43,84 | 38,84 | 30,63 | 32,75 | 37,09 | 32,34                      | 27,71 | 33,39 | C       | C       |

| ANÁLISE VISUAL DA SOLDAGEM |                 |       |       |      |       |       |       |       |       |                            |       |       |         |         |
|----------------------------|-----------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------------------|-------|-------|---------|---------|
| PROCESSO: <b>Manual</b>    |                 |       |       |      |       |       |       |       |       | AMOSTRA: <b>M2 (AM-03)</b> |       |       |         |         |
| DESCONTINUIDADE            | CORDÃO DE SOLDA |       |       |      |       |       |       |       |       |                            |       |       | BUCHA 1 | BUCHA 2 |
|                            | 1               | 2     | 3     | 4    | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10                         | 11    | 12    |         |         |
| TRINCAS                    | N               | N     | N     | N    | N     | N     | N     | S     | N     | N                          | N     | N     | N       | N       |
| FUSÃO COMPLETA             | S               | S     | S     | N    | N     | N     | S     | S     | N     | N                          | N     | N     | S       | S       |
| CRATERAS                   | N               | N     | N     | S    | N     | N     | N     | N     | N     | N                          | N     | N     | N       | N       |
| POROSIDADE                 | N               | N     | N     | N    | N     | N     | N     | N     | N     | N                          | N     | N     | N       | N       |
| MORDEDURA                  | N               | N     | N     | N    | S     | N     | N     | N     | N     | N                          | N     | N     | N       | N       |
| ASPECTO PERFIL DE SOLDA    | AC              | AC    | SP    | AC   | AC    | AC    | I     | I     | CV    | CV                         | AC    | AC    | AC      | AC      |
| COMPRIMENTO DO CORDÃO (mm) | 85,14           | 82,09 | 86,92 | 87,4 | 38,01 | 37,42 | 31,52 | 35,13 | 37,17 | 39,56                      | 38,89 | 34,75 | C       | C       |

| ANÁLISE VISUAL DA SOLDAGEM |                 |       |       |       |       |       |       |       |       |                                 |       |       |         |         |
|----------------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------------------|-------|-------|---------|---------|
| PROCESSO: <b>Manual</b>    |                 |       |       |       |       |       |       |       |       | AMOSTRA: <b>M3 (AM-04) Lab.</b> |       |       |         |         |
| DESCONTINUIDADE            | CORDÃO DE SOLDA |       |       |       |       |       |       |       |       |                                 |       |       | BUCHA 1 | BUCHA 2 |
|                            | 1               | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10                              | 11    | 12    |         |         |
| TRINCAS                    | N               | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N                               | N     | N     | N       | N       |
| FUSÃO COMPLETA             | N               | S     | N-IC  | N     | N     | N     | N     | N     | S     | N                               | N     | S     | S       | S       |
| CRATERAS                   | FC              | N     | N     | FC    | N     | N     | N     | N     | N     | N                               | N     | N     | N       | N       |
| POROSIDADE                 | N               | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N                               | N     | N     | N       | N       |
| MORDEDURA                  | N               | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N     | N                               | S     | S     | S       | S       |
| ASPECTO PERFIL DE SOLDA    | AC              | AC    | AC    | AC    | AC    | AC    | I     | I     | I     | AC                              | I     | I     | SP-CV   | SP      |
| COMPRIMENTO DO CORDÃO (mm) | 77,41           | 85,91 | 84,83 | 83,75 | 41,23 | 33,71 | 34,31 | 32,88 | 36,24 | 36,67                           | 37,31 | 37,31 | C       | C       |

| ANÁLISE VISUAL DA SOLDAGEM |                 |       |       |      |      |       |       |       |       |                                 |       |       |         |         |
|----------------------------|-----------------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|---------------------------------|-------|-------|---------|---------|
| PROCESSO: <b>Manual</b>    |                 |       |       |      |      |       |       |       |       | AMOSTRA: <b>M4 (AM-09) Lab.</b> |       |       |         |         |
| DESCONTINUIDADE            | CORDÃO DE SOLDA |       |       |      |      |       |       |       |       |                                 |       |       | BUCHA 1 | BUCHA 2 |
|                            | 1               | 2     | 3     | 4    | 5    | 6     | 7     | 8     | 9     | 10                              | 11    | 12    |         |         |
| TRINCAS                    | N               | N     | N     | N    | N    | N     | TS    | N     | N     | N                               | N     | N     | N       | N       |
| FUSÃO COMPLETA             | S               | N     | N     | N    | S    | N     | S     | S     | S     | S                               | S     | N     | N       | S       |
| CRATERAS                   | N               | N     | N     | N    | FC   | N     | FC    | N     | FC    | FC                              | N     | N     | N       | N       |
| POROSIDADE                 | N               | N     | N     | N    | N    | N     | N     | N     | N     | N                               | N     | N     | N       | N       |
| MORDEDURA                  | N               | N     | N     | N    | N    | N     | S     | N     | N     | N                               | S     | S     | S       | S       |
| ASPECTO PERFIL DE SOLDA    | AC              | AC    | AC    | D    | CV   | AC    | I     | AC    | CV    | CV                              | I-CV  | CV    | AC      | I       |
| COMPRIMENTO DO CORDÃO (mm) | 70,89           | 82,66 | 77,36 | 77,4 | 29,6 | 37,16 | 23,78 | 34,27 | 32,79 | 34,39                           | 25,83 | 30,96 | C       | C       |

| ANÁLISE VISUAL DA SOLDAGEM |                 |       |       |       |       |       |      |       |       |                            |       |       |         |         |
|----------------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|----------------------------|-------|-------|---------|---------|
| PROCESSO: <b>Manual</b>    |                 |       |       |       |       |       |      |       |       | AMOSTRA: <b>M5 (AM-08)</b> |       |       |         |         |
| DESCONTINUIDADE            | CORDÃO DE SOLDA |       |       |       |       |       |      |       |       |                            |       |       | BUCHA 1 | BUCHA 2 |
|                            | 1               | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7    | 8     | 9     | 10                         | 11    | 12    |         |         |
| TRINCAS                    | N               | N     | N     | N     | N     | N     | N    | N     | N     | N                          | N     | N     | N       | N       |
| FUSÃO COMPLETA             | S               | N     | S     | N     | N     | S     | N    | S     | S     | S                          | S     | S     | S       | S       |
| CRATERAS                   | N               | N     | N     | N     | N     | N     | N    | N     | N     | N                          | N     | N     | S       | N       |
| POROSIDADE                 | N               | N     | N     | N     | N     | N     | N    | N     | N     | N                          | N     | N     | N       | N       |
| MORDEDURA                  | N               | N     | N     | N     | N     | N     | N    | S     | N     | N                          | N     | S     | N       | N       |
| ASPECTO PERFIL DE SOLDA    | AC              | AC    | AC    | AC    | AC    | AC    | AC   | I     | AC    | AC                         | AC    | AC    | AC      | AC      |
| COMPRIMENTO DO CORDÃO (mm) | 72,01           | 81,07 | 81,98 | 83,62 | 31,73 | 33,29 | 38,9 | 35,48 | 35,99 | 37,16                      | 34,57 | 26,98 | C       | C       |

| ANÁLISE VISUAL DA SOLDAGEM |                 |       |       |       |       |       |                          |       |       |       |       |       |         |         |
|----------------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|---------|
| PROCESSO: Manual           |                 |       |       |       |       |       | AMOSTRA: M6 (AM-12) Lab. |       |       |       |       |       |         |         |
| DESCONTINUIDADE            | CORDÃO DE SOLDA |       |       |       |       |       |                          |       |       |       |       |       | BUCHA 1 | BUCHA 2 |
|                            | 1               | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7                        | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |         |         |
| TRINCAS                    | N               | N     | N     | N     | N     | N     | N                        | N     | N     | N     | N     | N     | N       | N       |
| FUSÃO COMPLETA             | S               | S     | S     | S     | S     | S     | S                        | S     | N     | S     | N     | N     | S       | S       |
| CRATERAS                   | N               | N     | N     | N     | N     | N     | N                        | N     | FC    | N     | N     | FC    | N       | N       |
| POROSIDADE                 | N               | N     | N     | N     | N     | N     | N                        | N     | N     | N     | N     | N     | N       | N       |
| MORDEDURA                  | N               | N     | N     | N     | N     | N     | N                        | S     | N     | N     | S     | S     | S       | N       |
| ASPECTO PERFIL DE SOLDA    | AC              | AC    | AC    | AC    | I     | AC    | AC                       | AC    | I     | I     | I     | I     | AC      | AC      |
| COMPRIMENTO DO CORDÃO (mm) | 71,79           | 77,85 | 83,47 | 76,16 | 40,75 | 35,23 | 28,52                    | 34,58 | 35,26 | 38,61 | 30,22 | 33,88 | C       | C       |

## APÊNDICE H: MICROESTRUTURA ZTA



Fonte: O próprio Autor (2025).

APÊNDICE I: ANÁLISE DE DADOS ANOVA DOS RESULTADOS DE MICRODUREZA VICKERS.

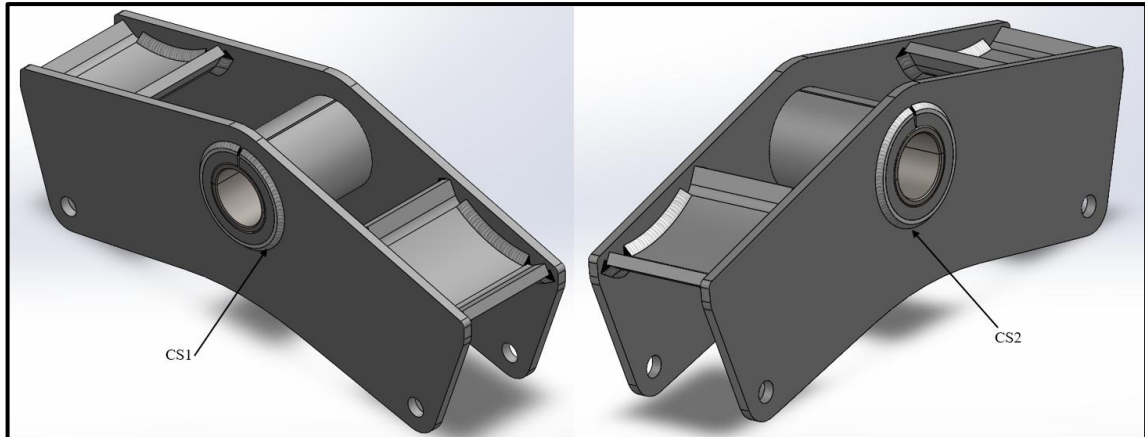
| ANOVA                         |             |           |           |          |                |                  |
|-------------------------------|-------------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| <i>Fonte da variação</i>      | <i>SQ</i>   | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
| Regiões Analisadas            | 4239,299111 | 4         | 1059,825  | 12,47652 | 0,000669       | 3,47805          |
| Valores de HV entre processos | 7091,378    | 1         | 7091,378  | 83,48145 | 3,61E-06       | 4,964603         |

Fonte: O próprio Autor (2025).

## ANEXOS

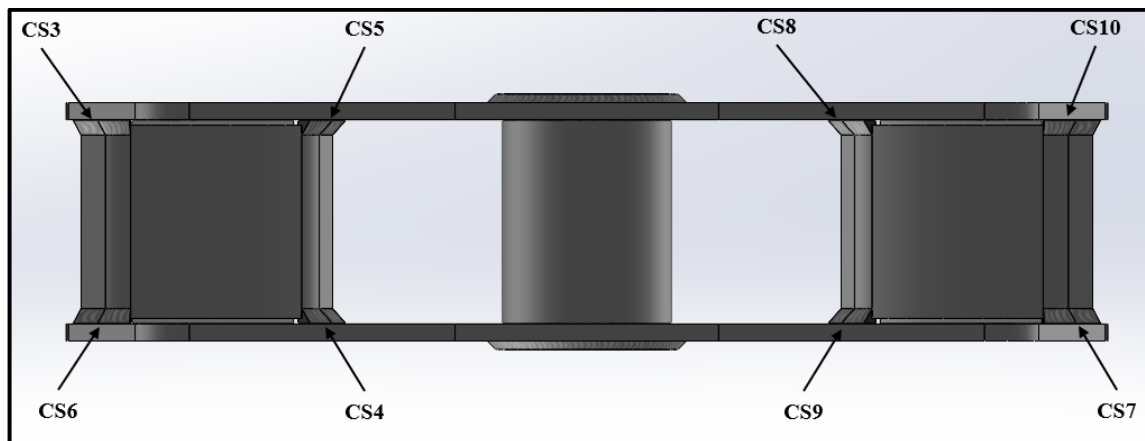
### ANEXO A: SEQUENCIAMENTO DE SOLDAGEM

Soldas entre bucha e chapas laterais: Cordão de solda 1 e cordão de solda 2



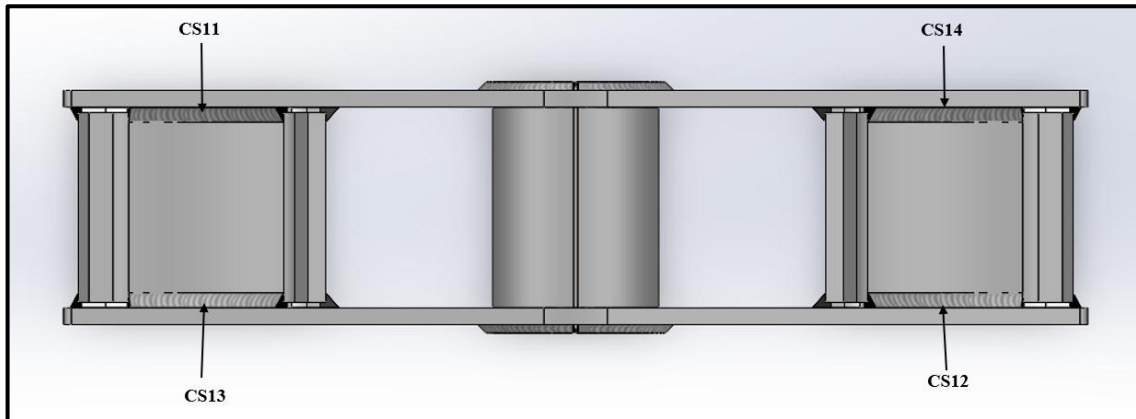
Fonte: O próprio Autor (2025).

Cordões de soldas inferiores entre chapas de atrito e chapas laterais.



Fonte: O próprio Autor (2025).

### Cordões de soldas superiores entre chapas de atrito e chapas laterais.



Fonte: O próprio Autor (2025).

## ANEXO B: CONFIGURAÇÕES DE PROPRIEDADES DOS MATERIAIS UTILIZADOS NO SIMULATION.

### Propriedades chapa 8mm.

Propriedades do material  
Os materiais na biblioteca predeterminada não podem ser editados. Você precisa copiar o material para uma biblioteca personalizada para poder editá-lo.

Tipo de modelo:   Salvar tipo mod. na biblioteca

Unidades:

Categoria:

Nome:

Critério de falha predeterminado:

Descrição:

Origem:

Sustentabilidade:

| Propriedade                               | Valor   | Unidades          |
|---|---------|-------------------|
| Módulo elástico                           | 200000  | N/mm <sup>2</sup> |
| Coefficiente de Poisson                   | 0.26    | N/A               |
| Módulo de cisalhamento                    | 79300   | N/mm <sup>2</sup> |
| Massa específica                          | 7850    | kg/m <sup>3</sup> |
| Resistência de tração                     | 454     | N/mm <sup>2</sup> |
| Resistência à compressão                  | 454     | N/mm <sup>2</sup> |
| Limite de escoamento                      | 234     | N/mm <sup>2</sup> |
| Coefficiente de expansão térmica          | 1.2e-05 | /K                |
| Condutividade térmica                     | 50      | W/(m·K)           |
| Calor específico                          | 490     | J/(kg·K)          |
| Coefficiente de amortecimento do material | 0.02    | N/A               |

Fonte: O próprio Autor (2025).

## Propriedades chapa 9,5mm.

Propriedades do material  
Os materiais na biblioteca determinada não podem ser editados. Você precisa copiar o material para uma biblioteca personalizada para poder editá-lo.

Tipo de modelo:   Salvar tipo mod. na biblioteca

Unidades:

Categoria:

Nome:

Critério de falha predeterminado:

Descrição:

Origem:

Sustentabilidade:

| Propriedade                               | Valor   | Unidades          |
|---|---------|-------------------|
| Módulo elástico                           | 200000  | N/mm <sup>2</sup> |
| Coefficiente de Poisson                   | 0.26    | N/A               |
| Módulo de cisalhamento                    | 79300   | N/mm <sup>2</sup> |
| Massa específica                          | 7850    | kg/m <sup>3</sup> |
| Resistência de tração                     | 469     | N/mm <sup>2</sup> |
| Resistência à compressão                  | 469     | N/mm <sup>2</sup> |
| Limite de escoamento                      | 302     | N/mm <sup>2</sup> |
| Coefficiente de expansão térmica          | 1.2e-05 | /K                |
| Condutividade térmica                     | 50      | W/(m-K)           |
| Calor específico                          | 490     | J/(kg-K)          |
| Coefficiente de amortecimento do material | 0.02    | N/A               |

Fonte: O próprio Autor (2025).

## Propriedades arame de solda.

Propriedades do material  
Os materiais na biblioteca determinada não podem ser editados. Você precisa copiar o material para uma biblioteca personalizada para poder editá-lo.

Tipo de modelo:   Salvar tipo mod. na biblioteca

Unidades:

Categoria:

Nome:

Critério de falha predeterminado:

Descrição:

Origem:

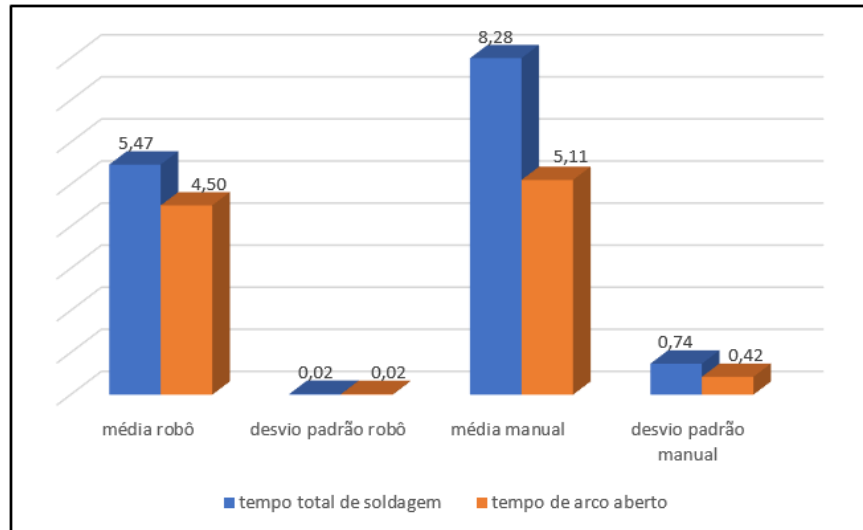
Sustentabilidade:

| Propriedade                               | Valor   | Unidades          |
|---|---------|-------------------|
| Módulo elástico                           | 210000  | N/mm <sup>2</sup> |
| Coefficiente de Poisson                   | 0.29    | N/A               |
| Módulo de cisalhamento                    | 80770   | N/mm <sup>2</sup> |
| Massa específica                          | 7850    | kg/m <sup>3</sup> |
| Resistência de tração                     | 490     | N/mm <sup>2</sup> |
| Resistência à compressão                  | 490     | N/mm <sup>2</sup> |
| Limite de escoamento                      | 400     | N/mm <sup>2</sup> |
| Coefficiente de expansão térmica          | 1.2e-05 | /K                |
| Condutividade térmica                     | 50      | W/(m-K)           |
| Calor específico                          | 490     | J/(kg-K)          |
| Coefficiente de amortecimento do material | 0.02    | N/A               |

Fonte: O próprio Autor (2025).

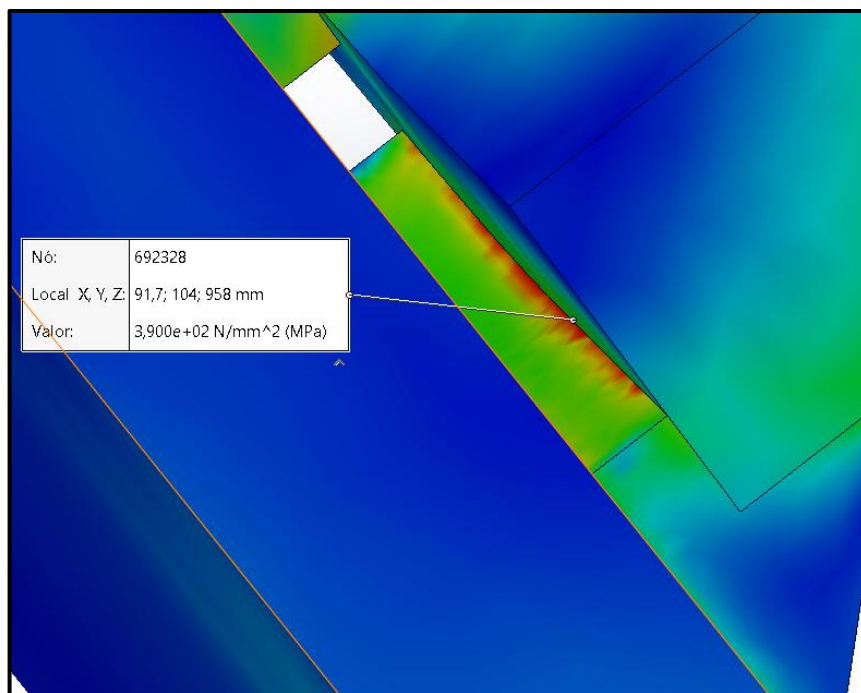
## ANEXO C: MÉDIA E DESVIO PADRÃO, TEMPO DE SOLDAGEM.

Média e desvio padrão considerando tempo de troca no processo robotizado.



Fonte: O próprio Autor (2025).

## ANEXO D: RESULTADO DE TENSÃO ENCONTRADO NO CORDÃO DE SOLDA INFERIOR.



Fonte: O próprio Autor (2025).

A imagem ampliada mostra a região onde ocorre a maior tensão no cordão de solda.