

CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE ITAQUERA
PROFESSOR MIGUEL REALE

GABRIEL ISTVANDIC DE MENDONÇA
JONAS CANQUERINI
JOSÉ LUIZ CANQUERINI NETO

**Avaliação mecânica e metalúrgica do aço galvanizado SAE 1005
utilizando o processo MIG-Brazing.**

São Paulo
2025

CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE ITAQUERA
PROFESSOR MIGUEL REALE

GABRIEL ISTVANDIC DE MENDONÇA
JONAS CANQUERINI
JOSÉ LUIZ CANQUERINI NETO

**Avaliação mecânica e metalúrgica do aço galvanizado SAE 1005
utilizando o processo MIG-Brazing.**

Projeto científico elaborado como
requisito final para a conclusão do Curso
Superior de Tecnologia em Mecânica
Processos de Soldagem.

Orientador(a): Me. Edgar Dutra

São Paulo
2025

FOLHA DE APROVAÇÃO

GABRIEL ISTVANDIC DE MENDONÇA

JONAS CANQUERINI

JOSÉ LUIZ CANQUERINI NETO

Avaliação mecânica e metalúrgica do aço galvanizado SAE 1005 utilizando o processo MIG-Brazing.

Projeto tecnológico elaborado como
requisito final para a conclusão do Curso
Superior de Tecnologia em Mecânica
Processos de Soldagem.

Orientador(a): Me. Edgar Dutra

Aprovado em: 03 / 12 / 25

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Edgar Dutra

Assinatura: _____

Instituição: FATEC ITAQUERA

Data 03 / 12 / 2025

Prof. Me. João Batista da Silva

Assinatura: _____

Instituição: FATEC ITAQUERA

Data 03 / 12 / 2025

Prof. Esp. Alex Arnoso

Assinatura: _____

Instituição: FATEC ITAQUERA

Data 03 / 12 / 2025

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecemos a Deus por nos proporcionar força, sabedoria e perseverança durante toda a jornada que resultou na realização deste trabalho. Agradecemos profundamente a nossos pais, esposa, avós, tia, amigos, familiares e irmãos em Cristo pelo apoio contínuo, compreensão e incentivo ao longo de toda a jornada. Cada ato de apoio foi fundamental para que alcançássemos este sonho. Nossa gratidão pelo auxílio prestado pela Thainá, que contribuiu muitíssimo para a elaboração deste trabalho. Ao nosso professor orientador, Mestre Edgar Dutra, expressamos nossa profunda gratidão pela orientação competente, pelo suporte constante e pelo comprometimento em todas as fases do projeto. O desenvolvimento desta pesquisa foi muito facilitado pela sua experiência e disponibilidade. Agradecemos à empresa TeamLab por fornecer seus equipamentos e infraestrutura, o que possibilitou a execução prática do estudo e teve um impacto significativo na qualidade dos resultados obtidos.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades mecânicas e metalúrgicas do aço galvanizado SAE 1005 submetido ao processo MIG-Brazing, utilizando o consumível de bronze-alumínio ER CuAl-A2. Foram confeccionados oito corpos de prova, posteriormente caracterizados por macrográficos, ensaios destrutivos (tração e microdureza Vickers) e ensaios não destrutivos do tipo visual. Nos ensaios de tração, as amostras soldadas apresentaram força máxima média de 3598,7 N, deslocamento médio de 7,3 mm e tempo médio de ruptura de 86,3 s. Os valores individuais variaram entre 517,2 N e 7129,2 N, refletindo a influência das condições locais da junta. O alongamento médio obtido foi de 0,73%, correspondente à deformação relativa no instante de ruptura. A microdureza Vickers (HV 0,05) evidenciou variações características entre as regiões da junta. O metal de base apresentou valores médios entre 148 e 164 HV; a zona fundida exibiu dureza superior, variando de 164 a 200 HV; e a zona afetada pelo calor registrou médias entre 137,5 e 158 HV. Esses resultados refletem a influência térmica e a interação entre o metal de adição CuAl-A2 e o aço galvanizado. A composição química das chapas SAE 1005 analisadas manteve-se dentro do esperado para o material, apresentando entre 0,05% e 0,10% de C e 0,30% a 0,60% de Mn. O processo MIG-Brazing demonstrou-se eficaz ao preservar o revestimento de zinco e garantir controle térmico adequado, resultando em juntas com boa integridade estrutural. De modo geral, os dados experimentais confirmam que o uso do MIG-Brazing no aço galvanizado SAE 1005 é tecnicamente viável, desde que haja controle rigoroso dos parâmetros operacionais.

Palavras-chave: Aço galvanizado SAE 1005; Soldagem MIG-Brazing; Indústria metalúrgica; Propriedades mecânicas; Comparação de materiais.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the mechanical and metallurgical properties of galvanized SAE 1005 steel subjected to the MIG-Brazing process, using the ER CuAl-A2 aluminum-bronze filler metal. Eight specimens were produced and subsequently characterized through macrographic analysis, destructive tests (tensile testing and Vickers microhardness), and non-destructive visual inspections. In the tensile tests, the welded samples exhibited an average maximum force of 3598.7 N, an average displacement of 7.3 mm, and an average fracture time of 86.3 s. Individual values ranged from 517.2 N to 7129.2 N, reflecting the influence of local joint conditions. The average elongation obtained was 0.73%, corresponding to the relative deformation at the moment of fracture. The Vickers microhardness (HV 0.05) revealed characteristic variations among the joint regions. The base metal presented average values between 148 and 164 HV; the fusion zone showed higher hardness, ranging from 164 to 200 HV; and the heat-affected zone recorded averages between 137.5 and 158 HV. These results reflect the thermal influence and the interaction between the CuAl-A2 filler metal and the galvanized steel. The chemical composition of the analyzed SAE 1005 sheets remained within the expected range for the material, presenting 0.05% to 0.10% C and 0.30% to 0.60% Mn. The MIG-Brazing process proved effective in preserving the zinc coating and ensuring adequate thermal control, resulting in joints with good structural integrity. Overall, the experimental data confirm that the use of MIG-Brazing on galvanized SAE 1005 steel is technically feasible, provided that strict control of operational parameters is maintained.

Keywords: Galvanized steel SAE 1005; MIG-Brazing welding; Metallurgical industry; Mechanical properties; Materials comparison.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Representação esquemática do processo de brasagem	6
Figura 2- Tensões superficiais envolvidas na medida do ângulo de contato.....	7
Figura 3- Representação de capilaridade entre materiais	9
Figura 4- Representação esquemática do processo de brasagem e capilaridade do material de adição no metal de base.....	9
Figura 5- Gota sésil localizada sobre uma superfície e direções dos vetores em junta sobreposta de aço galvanizado utilizando MIG-TIG Hybrid Torch.....	10
Figura 6- Representação do processo de MIG-Brazing	11
Figura 7- Vista do Arco Elétrico no Processo GMAW.....	12
Figura 8- Representação esquemática dos gases e a penetração.....	13
Figura 9- Representação esquemática do equipamento do processo GMAW	13
Figura 10- AWS A5.7	14
Figura 11- Posições de Soldagem.....	15
Figura 12- Descontinuidades do Processo GMAW	16
Figura 13- Tipos de transferência Metálicas.....	17
Figura 14- Tipos de distorções	20
Figura 15- Materiais de Consumo para Metalografia.....	23
Figura 16- Vista da seção transversal dos cordões depositados por MIG-Brazing (i-iv) CMT-MIG com WFR de 4, 5, 6 e 6,5 m/min, (v-viii) MIG-Brazing Pulsado a 3, 3,5, 4 e 5 m/min e (ix-xii) MIG-Brazing Padrão 3, 4, 5 e 6 m/min.	24
Figura 17- Tipos de ensaios não destrutivos (a) Líquido penetrante (b) Partículas magnéticas (c) Ultrassom.....	25
Figura 18- Representação sistemática do ensaio visual	26
Figura 19- Representação sistemática do ensaio de tração.....	28
Figura 20- Representação do ensaio Vickers em junta sobreposta de aço galvanizado utilizando	30
Figura 21- Junta do tipo sobreposta	33
Figura 22- Fonte de Soldagem	34
Figura 23- Módulo STT - Power Wave	35
Figura 24- Alimentador de arame LF-45 Lincoln K14072	36
Figura 25- Esmerilhadeira	37
Figura 26- Serra Tico-Tico.....	37

Figura 27- Calibre de folga	38
Figura 28- Paquímetro Mitutoyo	39
Figura 29- Relógio Apalpador (a) e (b)	39
Figura 30- Riscador	40
Figura 31- Cut-off	41
Figura 32- Embutimento dos Corpos de Prova.....	41
Figura 33- Politriz e lixas	42
Figura 34- Politriz e a Pasta de Diamante	43
Figura 35- Solução nital (a) e Soprador térmico (b).....	44
Figura 36- Estereoscópio com a utilização do software Top View 64.....	44
Figura 37- Máquina universal de ensaios (WDW 100E).....	45
Figura 38- Chapa furada para ensaios de tração	46
Figura 39- Corpo de tração.....	47
Figura 40- Sobreposição de chapas conforme espessura	48
Figura 41- Preparação para o corte dos corpos de prova (a) riscador, esquadro de 90° e escala (b) marcações na chapa. (c) Chapa fixada na bancada. (d) execução do corte	49
Figura 42- Preparação dos corpos de prova para usinagem.....	50
Figura 43- Marcação nos corpos de prova para a usinagem	50
Figura 44- Usinagem dos corpos de prova.....	51
Figura 45- Microdurômetro	52
Figura 46- Espectrômetro	53
Figura 47- Parâmetros Ajustados na fonte	54
Figura 48 - Fluxômetro para vazão de gás de proteção (Ar) durante o processo de MIG Brazing	55
Figura 49 - Operação do MIG Brazing.....	56
Figura 50- Demonstração do software Power Wave Manager	56
Figura 51- Tensão do arco do CP1	57
Figura 52- Corrente de soldagem do CP1	57
Figura 53- Tensão do arco do CP2	58
Figura 54- Corrente de soldagem do CP2.....	58
Figura 55- Tensão do arco do CP3	58
Figura 56- Corrente de soldagem do CP3.....	59
Figura 57- Tensão do arco do CP4	59

Figura 58- Corrente de soldagem do CP4	60
Figura 59- Tensão do arco do CP5	60
Figura 60- Corrente de soldagem do CP5	60
Figura 61- Tensão do arco do CP6	61
Figura 62- Corrente de soldagem do CP6	61
Figura 63- Tensão do arco do CP7	62
Figura 64- Corrente de soldagem do CP7	62
Figura 65- Tensão do arco do CP8	63
Figura 66- Corrente de soldagem do CP8	63
Figura 67- Corte feito em uma Cut-Off para o embutimento	64
Figura 68- Corpos de prova identificados para o embutimento	65
Figura 69- Procedimento de embutimento metalográfico e desmolde de corpos de prova	66
Figura 70- Lixamento dos corpos de prova	66
Figura 71- Polimento dos corpos de prova	67
Figura 72- Corpo de prova 1 (CP1) após o ensaio de tração, evidenciando a região de fratura	72
Figura 73- Tração CP1	72
Figura 74- Corpo de prova 2 (CP2)	73
Figura 75- Tração CP2	73
Figura 76- Corpo de prova 3 (CP3)	74
Figura 77- Tração CP3	74
Figura 78- Corpo de prova 4 (CP4)	75
Figura 79- Tração CP4	75
Figura 80- Corpo de prova 5 (CP5)	76
Figura 81- Tração CP5	76
Figura 82- Corpo de prova 6 (CP6)	77
Figura 83- Tração CP6	77
Figura 84- Corpo de prova 7 (CP7)	78
Figura 85- Tração CP7	78
Figura 86- Corpo de prova 8 (CP8)	79
Figura 87- Tração CP8	79
Figura 88- Macrografia da junta sobreposta soldada do CP1	90
Figura 89- Macrografia da junta sobreposta soldada do CP2	90

Figura 90- Macrografia da junta sobreposta soldada do CP3	91
Figura 91- Macrografia da junta sobreposta soldada do CP4	92
Figura 92- Macrografia da junta sobreposta soldada do CP5	93
Figura 93- Macrografia da junta sobreposta soldada do CP6	93
Figura 94- Macrografia da junta sobreposta soldada do CP7	94
Figura 95- Macrografia da junta sobreposta soldada do CP8	94

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Taxa de resfriamento dos corpos de prova	70
Gráfico 2- Média das temperaturas dos corpos de prova.....	71
Gráfico 3- Dados dos testes de tração	80
Gráfico 4- Microdureza CP1	81
Gráfico 5- Microdureza CP2	82
Gráfico 6- Microdureza CP3	83
Gráfico 7- Microdureza CP4	83
Gráfico 8- Microdureza CP5	84
Gráfico 9- Microdureza CP6	85
Gráfico 10- Microdureza CP7	85
Gráfico 11- Microdureza CP8	86
Gráfico 12- Correlação entre a Tensão e Microdureza na ZAC	87
Gráfico 13- Correlação entre a Tensão e Microdureza na ZF	87
Gráfico 14- Correlação entre a Tensão e Microdureza no MB	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Características dos modos de transferência metálica na soldagem GMAW.....	17
Tabela 2- Exemplos de parâmetros de MIG Brazing.....	18
Tabela 3- Critérios de aceitação para Inspeção visual.....	27
Tabela 4- Composição Química do SAE 1005.....	31
Tabela 5- Propriedades do SAE 1005.....	31
Tabela 6 – Propriedades Mecânicas.....	32
Tabela 7- Composição Química do consumível.....	32
Tabela 8- Categoria da descontinuidade e critérios da inspeção visual.....	69
Tabela 9- Dados dos testes de tração.....	80
Tabela 10- Resultados de microdureza CP1.....	81
Tabela 11- Resultados de microdureza CP2.....	82
Tabela 12- Resultados de microdureza CP3.....	82
Tabela 13- Resultados de microdureza CP4.....	83
Tabela 14- Resultados de microdureza CP5.....	84
Tabela 15- Resultados de microdureza CP6.....	84
Tabela 16- Resultados de microdureza CP7.....	85
Tabela 17- Resultados de microdureza CP8.....	86
Tabela 18- Composição do Metal base	95
Tabela 19- Composição Química do arame.....	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API	<i>American Petroleum Institute</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
CA	Corrente Alternada
CP	Corpo de prova
DCEP	<i>Direct Current Electrode Positive</i>
ER	Eletrodo Revestido
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
LP	Líquido Penetrante
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MB	Metal de base
MIG	<i>Metal Inert Gas, Gás</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SMAW	<i>Shield Metal Arc Welding</i>
STT	<i>Short-Triggered Transfer</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>

ZAC	Zona Afetada pelo Calor
-----	-------------------------

ZF	Zona Fundida
----	--------------

Sumário

1. INTRODUÇÃO	4
1.1. Justificativa.....	5
1.2. Objetivo geral	5
1.2.1. Objetivos específicos	5
2. Revisão da Literatura Técnico-Científica	6
2.1. União de materiais.....	6
2.1.1. Princípios do processo de brasagem	7
2.1.2. Tensão superficial	7
2.1.3. Molhabilidade	8
2.1.4. Capilaridade	8
2.1.5. Difusão	10
2.2. MIG Brazing.....	11
2.2.1. Equipamentos.....	12
2.2.2. Consumíveis (Arame e gás)	14
2.2.3. Vantagens e desvantagens	14
2.2.4. Descontinuidades características do processo MIG BRAZING	15
2.2.5. Tipos de transferência metálicas	16
2.2.6. Qualidade na soldagem.....	18
2.2.7. Normas aplicáveis	20
2.2.8. Controle dimensional.....	20
2.3. Metalurgia.....	21
2.3.1. Transformações na zona fundida	22
2.3.2. Transformações na zona afetada pelo calor	22
2.3.3. Macroestrutura	23
2.4. Ensaaios não destrutivos	24

2.4.1. Ensaio visual	25
2.5. Ensaaios destrutivos	28
2.5.1. Tração	28
2.5.2. Dureza	29
2.5.3 Aço galvanizado	30
3 MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 Material de base	31
3.2 Consumíveis.....	32
3.3 Dimensões da chapa	32
3.4 Procedimento de MIG Brazing	33
3.5 Equipamentos.....	34
3.5.1 Fonte de Soldagem Power Wave	34
3.5.2 Refrigerador de água.....	35
3.5.3 Módulo.....	35
3.5.4 Alimentador de arame	36
3.5.5 Esmerilhadeira.....	36
3.5.6 Serra Tico-Tico	37
3.5.7 Calibre de Folga	38
3.5.8 Paquímetro	38
3.5.9 Relógio Apalpador	39
3.6 Riscador	40
3.6.1 Cortadora metalográfica	40
3.6.2 Embutimento	41
3.6.3 Politriz para lixamento	42
3.6.4 Ensaios mecânicos e metalográficos	42
3.6.5 Ataque químico.....	43

3.6.6 Estereoscópio.....	44
3.6.7 Máquina universal de ensaios	45
3.6.8 Construção dos Corpos de Prova.....	48
3.7 Microdurômetro	52
3.7.1 Espectômetro	53
3.7.2 Parâmetros do processo MIG-Brazing	54
3.7.3 Vazão do Gás de proteção	55
3.7.4 Processo MIG Brazing.....	55
3.7.5 Preparação metalográfica	64
3.7.6 Embutimento metalográfico	65
3.7.7 Lixamento	66
3.7.8 Polimento	67
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
4.1 Ensaio Visual.....	69
4.1.2 Taxa de Resfriamento	69
4.1.3 Ensaio de Tração	71
4.1.4 Ensaio de Microdureza (HV).....	81
4.2 Caracterização Macrográfica.....	89
4.2.1 Determinação das Dimensões do Cordão de Solda e da ZAC.....	89
4.3 Análise de Composição Química.....	95
5. CONCLUSÃO	97
REFERÊNCIAS.....	99
ANEXOS	103
Anexo A- Distribuição Das Indentações Na Junta Soldada Após A Perfuração Pelo Penetrador Do Microdurômetro	103
Anexo B- Composição Química Obtida Por Espectrometria Do Metal De Base ...	104

Anexo C- Composição Química Obtida Por Espectrometria Do Metal De Adição 105

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, houve um progresso considerável na procura por processos de soldagem que proporcionem maior eficiência na produção, mantendo as propriedades originais dos materiais. Essa demanda aumentou especialmente nos setores automotivo e metalúrgico, em que o uso crescente de aços avançados, chapas finas e materiais revestidos exige critérios rigorosos para o controle térmico durante a união.

Dentro deste contexto, destaca-se o processo MIG-Brazing, uma alternativa adaptada do convencional processo MIG/MAG, que se distingue principalmente pelo tipo de metal de adição utilizado. Ao invés de arames de aço com altos pontos de fusão, o MIG-Brazing emprega consumíveis de baixa temperatura de fusão, como as ligas de bronze-alumínio (CuAl). Essa característica modifica significativamente o comportamento térmico do processo.

A redução da temperatura necessária para fundir o metal de adição diminui a quantidade de calor transferida para a peça de trabalho. Isso traz várias vantagens, como a redução da deformação das chapas, menor impacto na microestrutura do material base, redução de tensões residuais e, especialmente, a preservação de camadas protetoras, como o revestimento galvanizado encontrado em muitos componentes automotivos. Como o zinco tem uma temperatura de vaporização baixa, processos tradicionais podem danificar ou remover essa camada, comprometendo a proteção anticorrosiva. No entanto, o MIG-Brazing diminui consideravelmente esse risco ao utilizar um aporte térmico mais moderado.

Como resultado, o MIG-Brazing vem se estabelecendo como uma opção tecnicamente vantajosa para aplicações que demandam alta qualidade metalúrgica e dimensional, possibilitando a união de componentes sensíveis sem prejudicar sua integridade. Esse processo não só ajuda na criação de estruturas mais confiáveis, mas também melhora a eficiência da produção e diminui os custos relacionados a retrabalhos e tratamentos superficiais extras.

1.1. Justificativa

A escolha do tema deste trabalho vem da necessidade de aprimorar as técnicas de união de materiais sem causar danos à sua superfície ou à sua estrutura. Considerando a importância do aço galvanizado SAE 1005 na área industrial e as dificuldades da soldagem desse material, se faz necessário estudar métodos que minimizem os efeitos adversos do calor, de forma que o revestimento permaneça íntegro e se favoreça uma boa solda. Além disso, o MIG-Brazing, apesar de já ser aplicado em setores industriais, ainda carece de estudos acadêmicos mais aprofundados sobre suas implicações diretas nas propriedades mecânicas dos materiais envolvidos. Este trabalho visa contribuir com dados experimentais na tomada de decisões relacionadas à soldagem de aços galvanizados, promovendo maior confiabilidade nos processos produtivos no campo da engenharia de materiais e manufatura.

1.2. Objetivo geral

Avaliar as propriedades mecânicas e macrográficas da união de chapas finas em aço SAE 1005 com revestimento de zinco (chapas galvanizadas) utilizando o processo “MIG-Brazing”

1.2.1. Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, serão traçados os seguintes caminhos:

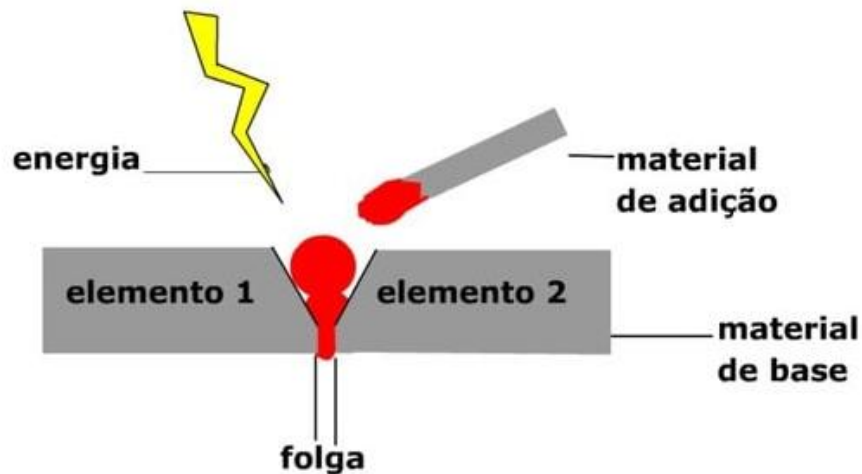
- Realizar as caracterizações macrográficas das juntas soldadas;
- Efetuar os ensaios não destrutivos (visual) e destrutivos (tração e microdureza);
- Avaliar os resultados obtidos com dados da literatura técnica e normas aplicáveis ao processo.

2. REVISÃO DA LITERATURA TÉCNICO-CIENTÍFICA

2.1. União de materiais

Segundo Lopes *et al.* (2020), os primeiros métodos de união de materiais foram de união mecânica. Entre eles estão os parafusos, rebites e dobramento, como os mais utilizados. Processos de soldagem surgiram no século XIX, como SMAW, GMAW, GTAW, Brasagem entre outros, surgiram e atuam como os principais métodos de união de materiais. A Figura 1 ilustra o processo de brasagem.

Figura 1- Representação esquemática do processo de brasagem



Fonte: Adaptado de CIMM (2022)

Segundo Crozetta *et al.* (2025), a indústria metalmeccânica depende fortemente de vários métodos de produção, sendo a soldagem uma técnica crucial. A soldagem é um processo globalmente popular e essencial, utilizado para unir peças aplicando calor, pressão, ou ambos, com ou sem a adição de um material extra. Além de ser vital nas linhas de produção para a união de metais, ela também é empregada para outros fins, como a aplicação de revestimentos em componentes desgastados pelo uso.

2.1.1. Princípios do processo de brasagem

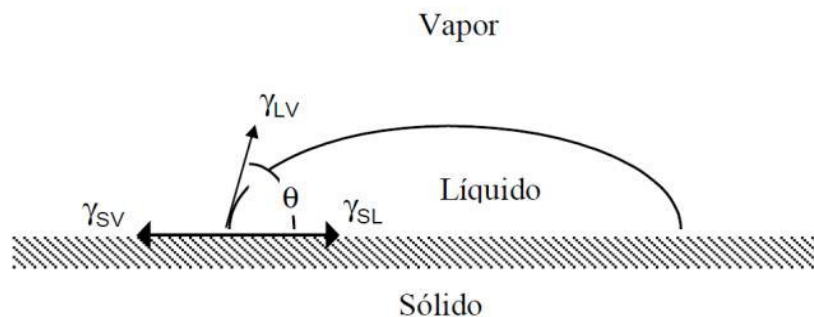
Segundo Silva (2023), a união de dois metais por brasagem é viabilizada quando se estabelece um contato suficientemente íntimo entre as superfícies dos metais de base, esse contato adequado é obtido pela deposição de metal de adição no estado líquido, na região da junta entre os metais de base, envolvendo uma série de características físicas que atuam simultaneamente para garantir a formação da ligação metálica. Os principais responsáveis pelo sucesso da brasagem são: tensão superficial, molhagem, capilaridade e difusão.

2.1.2. Tensão superficial

Conforme Silva (2023), a tensão superficial advém das diferenças nas forças de coesão entre as moléculas presentes na superfície do líquido, sendo responsável pelo maior ou menor grau de facilidade de escoamento da solda em estado líquido sobre o material de base, sem influência de agentes externos. Esse parâmetro está associado às propriedades do sólido ao ser úmido e tende a diminuir à medida que ocorre com a temperatura.

De acordo com Lima *et al.* (2020), quando um líquido entra em contato com uma superfície sólida, ele pode se espalhar sobre ela ou permanecer agrupado, formando uma gota. O ângulo que se forma no ponto de encontro entre o líquido e a superfície sólida é chamado de ângulo de contato, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2- Tensões superficiais envolvidas na medida do ângulo de contato



Fonte: Adaptado de LIMA *et al.* (2020)

Conforme apresentado por Lima *et al.* (2020), esse conjunto de tensões define a molhabilidade de um sólido por um líquido e, normalmente, é representado pelo ângulo de contato (θ), que está relacionado pela equação de Young (1):

$$\gamma_{SL} - \gamma_{SV} + \gamma_{LV} \cos \theta = 0 \quad (1)$$

Onde:

- γ_{SV} = Tensão superficial da interface sólido-vapor;
- γ_{LV} = Tensão superficial da interface líquido-vapor;
- γ_{SL} = Tensão superficial da interface sólido-líquido.

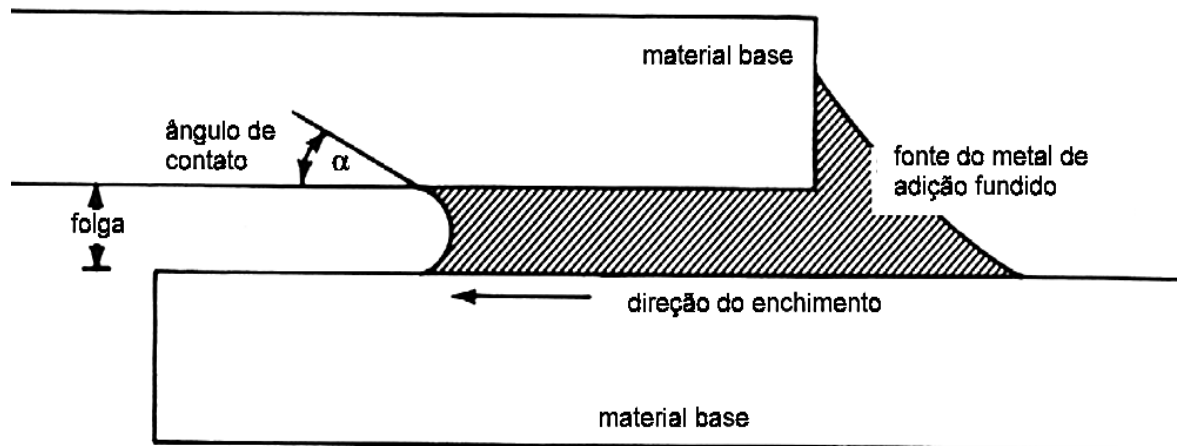
2.1.3. Molhabilidade

De acordo com Silva (2023), define-se a Molhabilidade como a capacidade de solda de se distribuir sobre o substrato. Tal propriedade pode ser determinada por ensaios específicos, alguns parâmetros são definidos de acordo com os materiais utilizados e o processo utilizado. Em termos técnicos, a aparência da molhagem caracteriza-se pela propensão da solda a se espalhar sobre a superfície do material de base, em vez de permanecer aglomerada em forma esférica

2.1.4. Capilaridade

Segundo Silva (2023), a condição do metal de adição para penetrar por capilaridade em uma junta é diretamente proporcional à sua tensão superficial e inversamente proporcional à distância entre as superfícies a serem unidas. O preenchimento da junta, durante a brasagem, ocorre predominantemente por ação capilar sendo necessário um espaçamento limitado entre as superfícies, geralmente na faixa de 0,03 mm a 0,3 mm. Demonstrado na Figura 3.

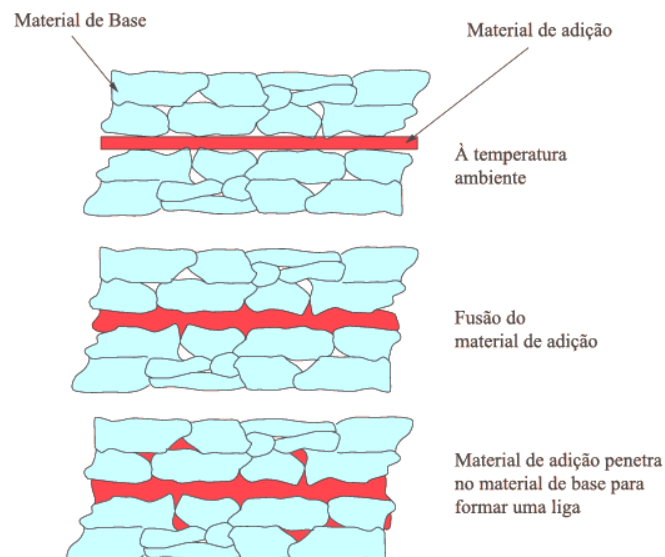
Figura 3- Representação de capilaridade entre materiais



Fonte: Adaptado de OKIMOTO (2016)

A Figura 4 ilustra o processo de brasagem, destacando como o material de adição se comporta ao penetrar por capilaridade na microestrutura do metal de base. Inicialmente, o material de adição está presente entre as superfícies, funde-se com o aumento da temperatura e, por fim, infiltra-se e forma uma liga com o metal de base, assegurando a ligação entre os componentes.

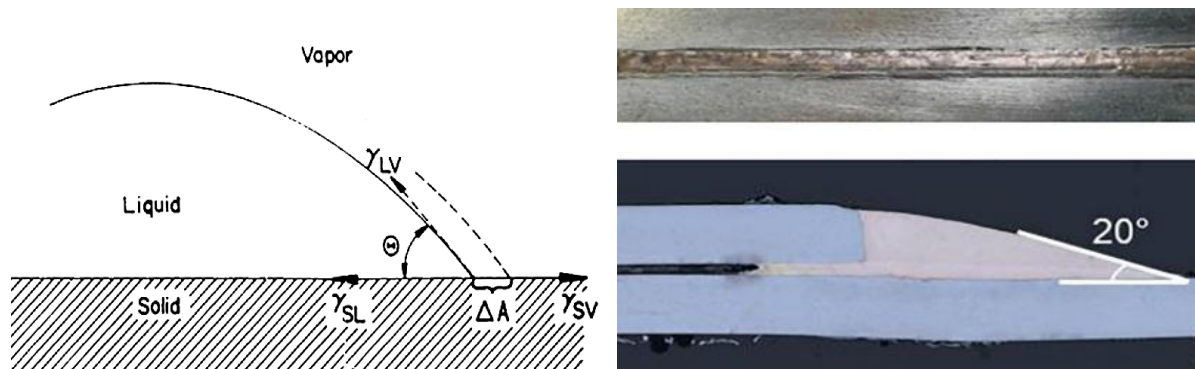
Figura 4- Representação esquemática do processo de brasagem e capilaridade do material de adição no metal de base.



Fonte: Adaptado de SILVA (2023)

Na Figura 5 observa-se que os líquidos depositados sobre superfícies sólidas geralmente não molham completamente a superfície, mas sim permanecem na forma de uma gota, apresentando um ângulo de contato definido entre as fases líquida e sólida.

Figura 5- Gota séssil localizada sobre uma superfície e direções dos vetores em junta sobreposta de aço galvanizado utilizando MIG-TIG Hybrid Torch



Fonte: Adaptado de ASM HANDBOOK (1993) e WEIS et al (2022)

2.1.5. Difusão

Cita Silva (2023), que caso haja possibilidade de formação de liga entre o metal de adição e o metal de base, isso ocorre por difusão do elemento metálico sólido para o líquido. Entretanto, tal formação nem sempre é interessante, pois as propriedades mecânicas da liga formadas podem ser inferiores às do metal de adição. A difusão excessiva pode resultar em perda de ductilidade da junta e no esgotamento da solda, comprometendo a completude da união.

Reforça Silva (2023), que é recomendado que o processo de brasagem seja realizado na menor temperatura e no menor intervalo de tempo possível. Na soldabrasagem, por envolver temperaturas mais elevadas, observa-se maior difusão mútua entre o metal de adição e o metal de base. A zona de difusão corresponde à região onde a microestrutura original do núcleo metálico é preservada. Nessa área, o nitrogênio pode estar dissolvido intersticialmente na ferrita ou presente na forma de precipitados de nitretos de ferro e de outros elementos de liga existentes no aço

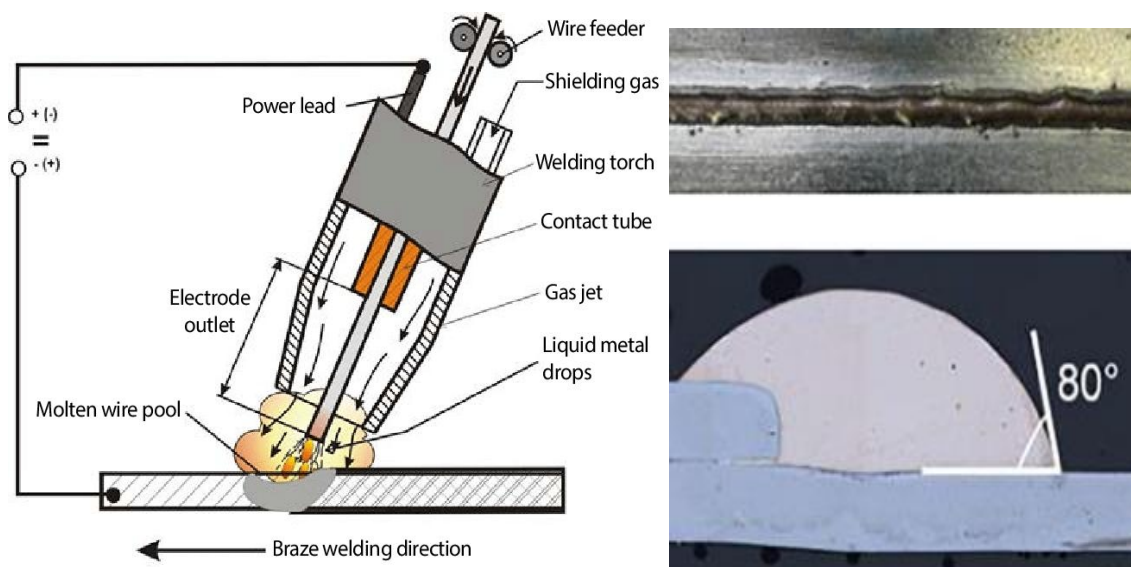
tratado. As distorções causadas pelo nitrogênio na estrutura cristalina resultam em um aumento significativo da dureza do material (Silva, Flávio *et al.* 2007).

2.2. MIG Brazing

A brasagem é um processo de soldagem originado da solda forte. Solda forte, também conhecida por “brazing”, é a soldagem em que o metal de adição apresenta temperatura acima de 450°C , mas inferior à temperatura de fusão do metal de base. A solda forte dá origem à brasagem e à soldabrasagem ou solda brasada. Existe outro método de soldagem, conhecido como solda branda ou fraca, em que o metal de adição tem o ponto de fusão abaixo de 450°C (GIMENES *et al.*, 2022).

Segundo definição da AWS (2025), a brasagem reúne um grupo de processos de união que liga metais pelo aquecimento adequado e pelo uso de um metal de adição com temperatura de fusão mais baixa do que a temperatura “solidus” do metal de base; o metal de adição preenche a junta por capilaridade. Neste tipo de união, o metal de base nunca se funde e é este fato que diferencia a brasagem de outros processos de soldagem por fusão, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6- Representação do processo de MIG-Brazing

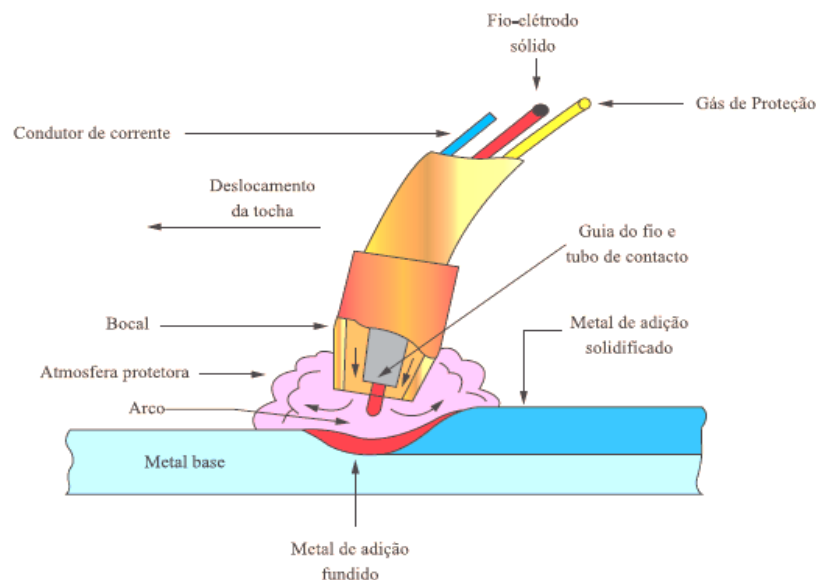


Fonte: Adaptado de PIKUŁA *et al.* (2014) e WEIS *et al.* (2022)

2.2.1. Equipamentos

Segundo Scotti *et al.* (2014), descreve que o processo GMAW (Gas Metal Arc Welding) utiliza um arco elétrico de alta energia como fonte de calor, mantido entre o metal base e um arame eletrodo que é continuamente alimentado e consumido ao longo da soldagem. Essa técnica pode ser aplicada de forma mecanizada ou semiautomática, como demonstrado na Figura 7.

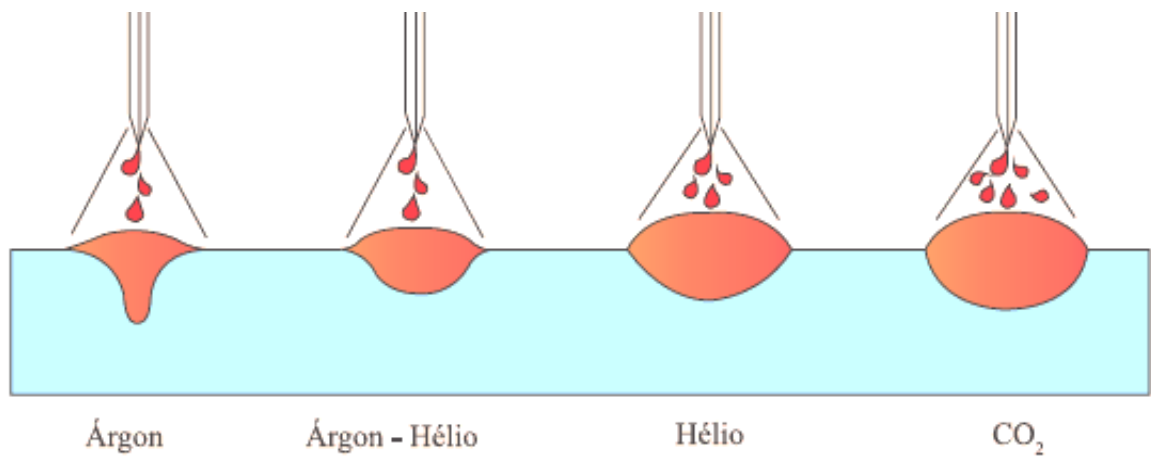
Figura 7- Vista do Arco Elétrico no Processo GMAW



Fonte: Adaptado de SILVA (2023)

Comenta Scotti *et al.* (2014), que a solda é protegida por gases que podem ser inertes, ativos ou uma mistura dos dois. A principal diferença no processo está justamente no tipo de gás utilizado, o que define se ele será chamado de MIG ou MAG. O método MIG (Metal Inert Gas) usa gases inertes como argônio ou hélio para proteger a solda, enquanto o MAG (Metal Active Gas) emprega gases ativos, como o dióxido de carbono (CO_2). Ambos os métodos também podem contar com misturas gasosas para garantir a proteção adequada da solda. A Figura 8 demonstra os gases utilizados e a penetração característica de cada um deles.

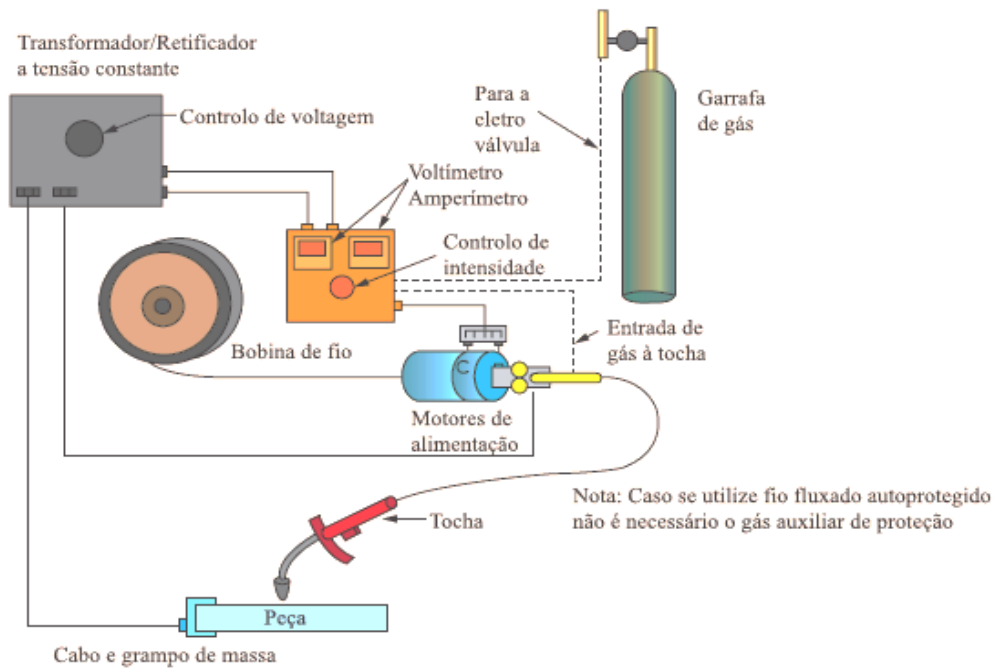
Figura 8- Representação esquemática dos gases e a penetração



Fonte: Adaptado de SILVA (2023)

A Figura 9 mostra os equipamentos que são utilizados no processo GMAW. A composição básica do sistema é composta por uma fonte de energia, o arame alimentador, a tocha, o cilindro com o gás de proteção e a própria peça a ser soldada.

Figura 9- Representação esquemática do equipamento do processo GMAW



Fonte: Adaptado de SILVA (2023)

2.2.2. Consumíveis (Arame e gás)

Em concordância com o Código ASME II PARTE C (2023), no processo MIG-Brazing são utilizados arame a base de cobre, bronze-silício, bronze-alumínio. O gás utilizado nesse processo será um gás inerte, podendo ser Argônio, Hélio ou mistura de ambos. No caso específico da brasagem, o ASME II PARTE C (2023), incorpora as normas da *American Welding Society* (AWS), em especial a AWS A5.7: *specification for copper and copper-alloy bare welding rods and electrodes* (Especificação para varas de soldagem e eletrodos de cobre e liga de cobre). Esse código normativo, classifica e especifica diferentes tipos de metais de adição, conforme a Figura 10.

Figura 10- AWS A5.7

SPECIFICATION FOR COPPER AND COPPER-ALLOY BARE WELDING RODS AND ELECTRODES



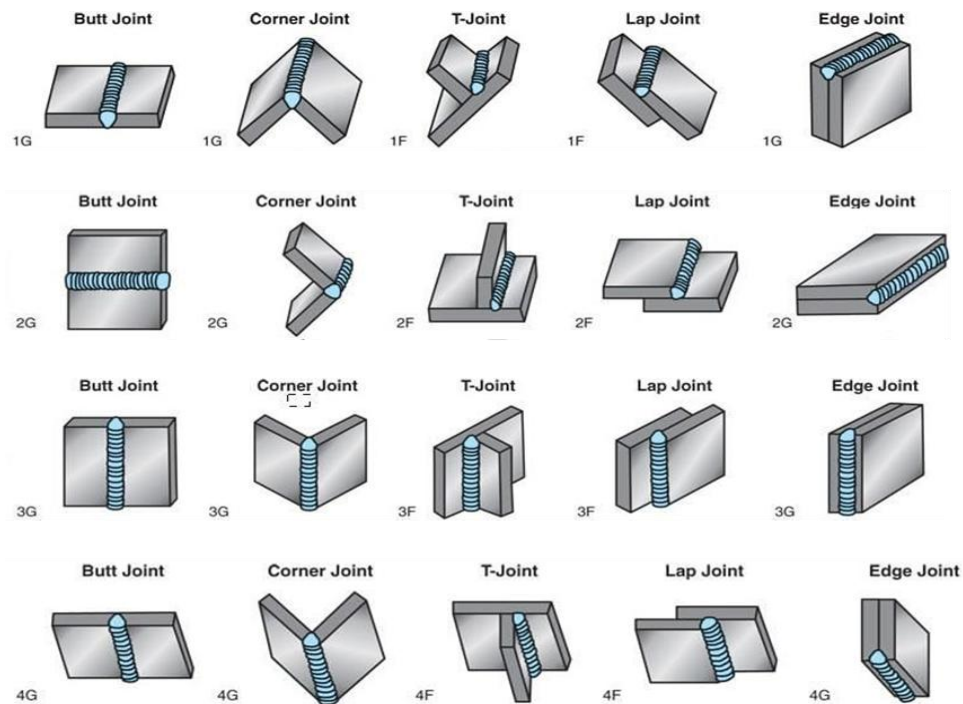
SFA-5.7/SFA-5.7M



Fonte: Adaptado de Código ASME II PARTE C (2023)

2.2.3. Vantagens e desvantagens

De acordo com Mendes (2005), a brasagem a arco apresenta diversas vantagens, como a dispensa do uso de fluxos ou pastas, a facilidade de automação do processo, a geração de baixas tensões residuais e a capacidade de unir materiais dissimilares por coalescência. Além disso, essa técnica pode ser aplicada em qualquer posição de soldagem, o que amplia significativamente suas possibilidades de uso. Conforme demonstra a Figura 11.

Figura 11- Posições de Soldagem

Fonte: Adaptado de PUNAIRWELDER (2021)

No entanto, também existem algumas limitações, como o fato de a resistência da junta estar condicionada à resistência do material de adição e a operação ocorrer em temperaturas relativamente baixas, já que o ponto de fusão do metal de adição é inferior ao do metal base (MENDES, 2005).

2.2.4. Descontinuidades características do processo MIG BRAZING

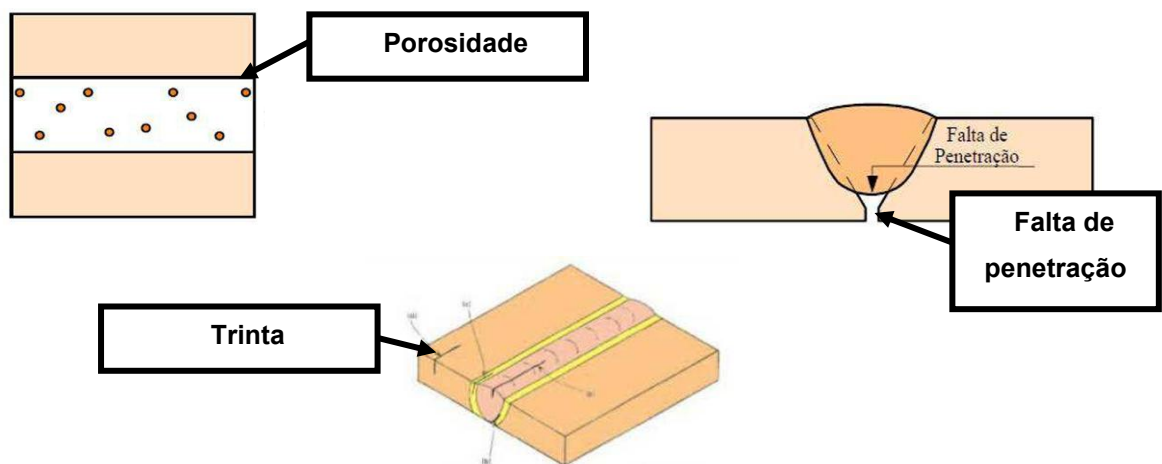
Segundo Wainer *et al.* (1992), o processo de brasagem possui algumas descontinuidades características como:

- **Falta de penetração:** Este termo se refere à ausência de fusão e preenchimento completo na raiz da solda;
- **Trinca a Quente:** Trata-se de uma trinca que surge durante a soldagem, geralmente no metal depositado e na Zona Afetada pelo Calor (ZAC), como resultado das altas temperaturas envolvidas no

processo e da fragilidade do metal enquanto está solidificando;

- **Porosidade:** Porosidade se origina pela liberação de gases na seção traseira da poça de fusão enquanto a solda se solidifica. Normalmente, os poros apresentam uma forma esférica, mas podem ser criados poros em formato alongado, conhecidos como porosidade vermiforme, geralmente relacionados ao hidrogênio.

Figura 12- Descontinuidades do Processo GMAW



Fonte: Adaptado de INFSOLDA (2025)

2.2.5. Tipos de transferência metálicas

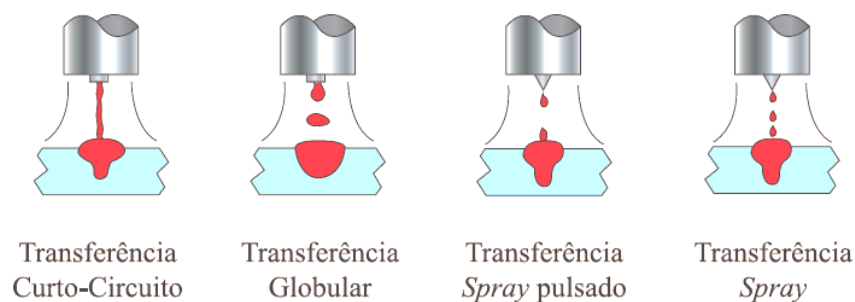
Conforme Scotti *et al.* (2014), o modo de transferência refere-se ao comportamento característico das gotas de metal ao se deslocarem do eletrodo para a poça de fusão. Esse fenômeno pode ocorrer por meio de gotas de maior volume, que se desprendem individualmente da ponta do eletrodo, ou por gotas menores, que são transferidas de forma sucessiva e contínua. Cada padrão de transferência confere características específicas ao processo de soldagem e à estabilidade do arco. No processo MIG pode utilizar as seguintes formas de transferência metálica:

- **Curto-circuito:** O metal é transferido por contato direto entre o eletrodo e a poça de fusão através de uma gota. Pode ser utilizado em qualquer posição;

- **Globular:** O metal é transferido por glóbulos com diâmetro próximo ao eletrodo nu, ou alma do eletrodo. Não é adequado para a soldagem fora de posição;
- **Spray:** Refere-se a um tipo de transferência de metal em que o eletrodo é conduzido até a poça de solda em forma de uma névoa fina de pequenas gotículas, ao invés de grandes gotas ou por meio de curtos-circuitos;
- **Pulsado:** Similar à transferência por pulverização, dela difere porque uma gota é transferida por pulso e possibilita soldar em todas as posições.

A análise dos fenômenos de transferências metálicas descritos acima, podem ser melhor compreendidos com base na Figura 13 e Tabela 1.

Figura 13- Tipos de transferência Metálicas



Fonte: Adaptado de Silva (2023)

A Tabela 1 apresenta as principais características dos modos de transferência metálica aplicados ao processo GMAW (ACESITA, 2011).

Tabela 1- Características dos modos de transferência metálica na soldagem GMAW

Modo de transferência	Tensão no Arco	Densidade de corrente	Energia de soldagem	Penetração
Curto-circuito	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
Globular	Média	Baixa	Média	Média
Spray	Alta	Alta	Alta	Alta
Pulsado	Alta	Média	Média	Alta

Fonte: Adaptado de ACESITA (2011)

Segundo WEIS *et al.* (2022), existe algumas recomendações de parâmetros para MIG Padrão, Arco Pulsado e *Cold Metal Transfer* (CMT). Conforme observado na Tabela 2.

Tabela 2- Exemplos de parâmetros de MIG Brazing

Exp. No.	Standard- MIG		Pulsed-MIG		CMT-MIG	
	WFR (m/min)	Speed (mm/min)	WFR (m/min)	Speed (mm/min)	WFR (m/min)	Speed (mm/min)
1	3	800	3	800	4	800
2	4	800	3.5	800	5	800
3	5	800	4	800	5.5	800
4	5.5	800	5	800	6	800
5	6	800	-	-	6.5	800

Fonte: Adaptado de WEIS *et al.* (2022)

2.2.6. Qualidade na soldagem

No dizer de Coelho *et al.* (2015), a qualidade do processo de soldagem está fortemente ligada à atuação do operador, especialmente quando a execução é manual. A partir de critérios visuais e de ensaios específicos realizados em laboratório, é possível determinar se há necessidade de ajustar parâmetros, substituir materiais de consumo ou alterar o gás de proteção, sempre com o objetivo de garantir a qualidade do processo. Em concordância Nascimento *et al.* (2010), diz que os profissionais habilitados para conduzir e avaliar a soldagem incluem o Inspetor de Solda (em diferentes níveis), o operador e o soldador.

Segundo Coelho *et al.* (2015) e Nascimento *et al.* (2010), a avaliação do processo de soldagem, de modo geral, é composta por três etapas principais:

- 1) **Controle antes da soldagem:** envolve uma série de verificações essenciais para garantir a qualidade do processo. Entre os principais aspectos estão a qualificação dos soldadores e do procedimento de soldagem, a identificação correta do material do metal base (aquele que será soldado) e do material de adição (consumível), além da preparação adequada da junta que pode ser do tipo sobreposta, em ângulo, de canto ou de topo, conforme a necessidade do projeto. Também é fundamental avaliar as condições de trabalho, como o

ambiente, o local e a posição de soldagem, bem como verificar o estado dos equipamentos e componentes auxiliares, assegurando que todos os instrumentos estejam devidamente calibrados.

- 2) **Durante a soldagem:** o foco recai sobre o controle do processo em tempo real. São analisados os materiais a serem soldados, suas espessuras, o posicionamento e o ajuste das peças. Deve-se controlar as distorções por meio do gerenciamento da temperatura de pré-aquecimento e entre passes, além de garantir o manuseio e armazenamento corretos dos consumíveis. A limpeza entre passes e a limpeza final da junta são etapas indispensáveis, seguidas de uma inspeção visual detalhada para detectar possíveis imperfeições.
- 3) **Controle após a soldagem:** compreende a avaliação final da solda, considerando desenhos técnicos e especificações do projeto. Inclui também a limpeza da solda, que pode ser feita com agentes químicos ou lixadeiras de acabamento, e a execução de ensaios não destrutivos ou, quando possível, ensaios destrutivos em amostras representativas. Caso sejam identificadas falhas, realiza-se o controle de reparos e, se necessário, o tratamento térmico do componente. Por fim, todas as atividades de fabricação e inspeção devem ser devidamente documentadas, assegurando a rastreabilidade e a conformidade do processo.

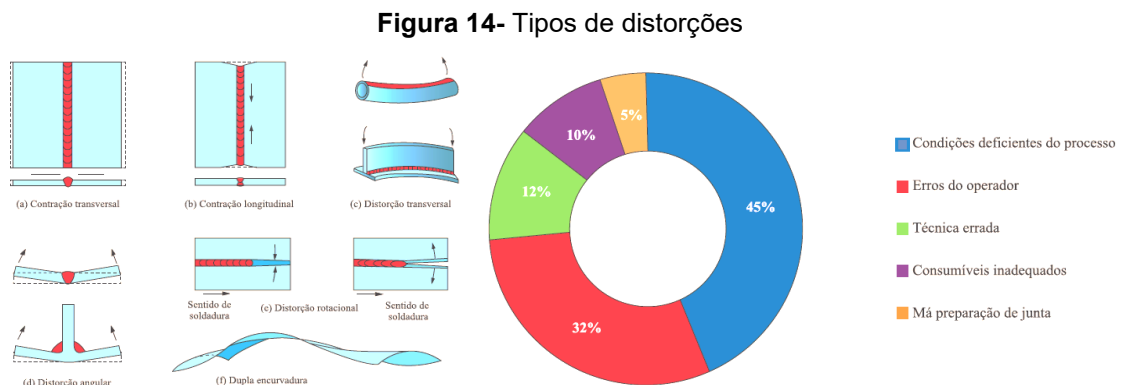
Para garantir uma soldagem de qualidade e manter os parâmetros adequados durante o processo, é fundamental observar atentamente os componentes e fatores que influenciam diretamente o resultado final. Entre esses fatores estão o tipo de eletrodo, os materiais consumíveis utilizados, a presença de resíduos superficiais na peça e o controle do resfriamento após a soldagem. Para assegurar esse controle e a conformidade com os padrões de qualidade, pode-se designar um inspetor de qualidade ou inspetores de soldagem especializados (COELHO *et al.*, 2015).

2.2.7. Normas aplicáveis

A AWS C3.2 (2001), é uma norma que foi utilizada para avaliar os ensaios de tração, dureza, para ser estudado a resistência mecânica da solda.

2.2.8. Controle dimensional

Para Silva (2023), existem defeitos geométricos apresentados na Figura 14, que estão normalmente associados a deformações que têm como origem um aquecimento exagerado das peças a soldar, devido à má regulação dos parâmetros de soldagem, técnica operatória usada durante a soldagem não ter sido a mais correta e/ou arrefecimento não cuidado da junta após soldagem.



Fonte: Adaptado de Silva (2023)

Segundo Silva (2023) *apud* Clifford Matthews, da ASME (*American Society of Mechanical Engineers*), entre as causas mais comuns para o aparecimento de defeitos de solda figuram as fracas condições na execução do projeto (45%), os erros do operador, onde se inclui a má parametrização do processo (32%), a má execução do processo no que diz respeito à sua técnica e processo selecionado (12%), má conjugação do binómio material base e material de adição (10%), e ainda a má preparação da junta a soldar (5%), como pode ser visto na Figura 14.

2.3. Metalurgia

Desde o seu surgimento na Terra, o ser humano tem usado ferramentas para alterar a natureza em seu benefício. Portanto, a história humana é uma história de tecnologia, uma narrativa onde os recursos do ambiente foram modificados de maneira a facilitar a vida humana. Desde os primórdios, o ser humano recorreu aos recursos que estavam ao seu alcance: paus, pedras, peles e ossos. Elementos que podiam ser manipulados para se tornarem eficientes, mas que, no final das contas, não demandavam nenhuma transformação profunda, nenhuma alteração nas suas propriedades estruturais, o que não é o caso dos metais (MOEN, 2000).

Moen (2000), cita que o metal, na sua maior parte, requer uma alteração trabalhosa e complicada das propriedades em que o encontramos em sua forma natural. O aparecimento da metalurgia é um aspecto recente na ampla cronologia da história, mas de tamanho significado para a humanidade que não seria viável entender a evolução da história e, evidentemente, das sociedades sem ela. Isso foi analisado desde tempos antigos, a ponto de ver sua descoberta como um divisor de águas nas sociedades pré-históricas.

De acordo com Brandão (2019), durante a soldagem os materiais metálicos são submetidos a alguma forma de energia, podendo ela estar na forma térmica, por fusão, ou na forma mecânica, no estado sólido. Então, por ação e reação, esses materiais respondem fisicamente, mecanicamente ou metalurgicamente podendo induzir variações nas propriedades originais dos materiais.

Reforça Brandão (2019), que essas alterações são decorrentes de alterações na microestrutura do metal-base adjacentes à solda; ou ainda a instabilidade dimensional por distorção, fragilização, empenamento, trincamento ou colapso da junta em função das tensões térmicas, contrações e/ou deformações mecânicas presentes na junta soldada. Conclui-se que as características e propriedades de uma junta soldada, é o somatório da microestrutura e estado de tensões que se resultam das ações impostas durante a soldagem do material.

2.3.1. Transformações na zona fundida

Segundo Xu (2019), quando se realiza a soldagem entre metais que apresentam pontos de fusão distintos, observe-se que o material de menor temperatura de fusão se liquefaz na superfície sólida das chapas, sendo posteriormente resfriado e solidificado, o que resulta na formação da junta soldada.

Menciona Xu e Shreyas *et al.* (2019), que no contexto específico da operação de chapas de aço galvanizado, ressalta-se que uma parcela do revestimento de zinco é volatilizada devido à ação do calor proveniente do arco elétrico, visto que o zinco apresenta temperatura de vaporização próxima a 906 °C. Cabe destacar, entretanto, que parte do zinco liquefeito pode condensar novamente e penetrar na superfície do aço, favorecendo a ocorrência de trincas macroscópicas na estrutura.

Cita Narayanan (2015), que além disso, é relevante mencionar que o cordão de solda pode ser significativamente impactado pela vaporização do zinco. Em componentes automotivos, é comum o emprego da soldagem por arco elétrico com proteção gasosa (GMAW), processo que pode interferir diretamente na camada de zinco. O material vaporizado tem potencial para se incorporar ao cordão durante a solidificação, originando porosidades tanto superficiais quanto internas. Ressalta o mesmo que de modo complementar, a presença de zinco vaporizado na atmosfera do arco tende a causar instabilidades durante a soldagem, como o aumento de respingos e variações na direcionalidade do cordão, fatores esses que prejudicam consideravelmente a qualidade final da solda.

2.3.2. Transformações na zona afetada pelo calor

De acordo com Bernardi *et al.* (2020), durante o processo de soldagem, a distribuição de temperatura não é uniforme, levando à formação de três regiões: a zona de fusão, a zona afetada pelo calor (ZAC) e a base de metal inalterado. O deslocamento da fonte de calor sobre a superfície da junta gera um gradiente de temperatura, causando uma mudança complexa na morfologia microestrutural da zona afetada pelo calor (ZAC), e de suas propriedades mecânicas.

2.3.3. Macroestrutura

Afirma Colpaert (2008), Macrografia é a análise visual da superfície de uma amostra metálica, após polimento e, normalmente, ataque químico. A estrutura resultante é chamada de macroestrutura e é examinada a olho nu ou com lupa.

O referido autor destaca que a técnica do preparo de um corpo de prova de macrografia abrange as seguintes fases:

- Escolha e localização da seção a ser estudada;
- Preparação de uma superfície plana e polida no lugar escolhido;
- Ataque dessa superfície por um reagente químico adequado.

Os materiais de consumo que foram utilizados na metalografia estão descritos na Figura 15.

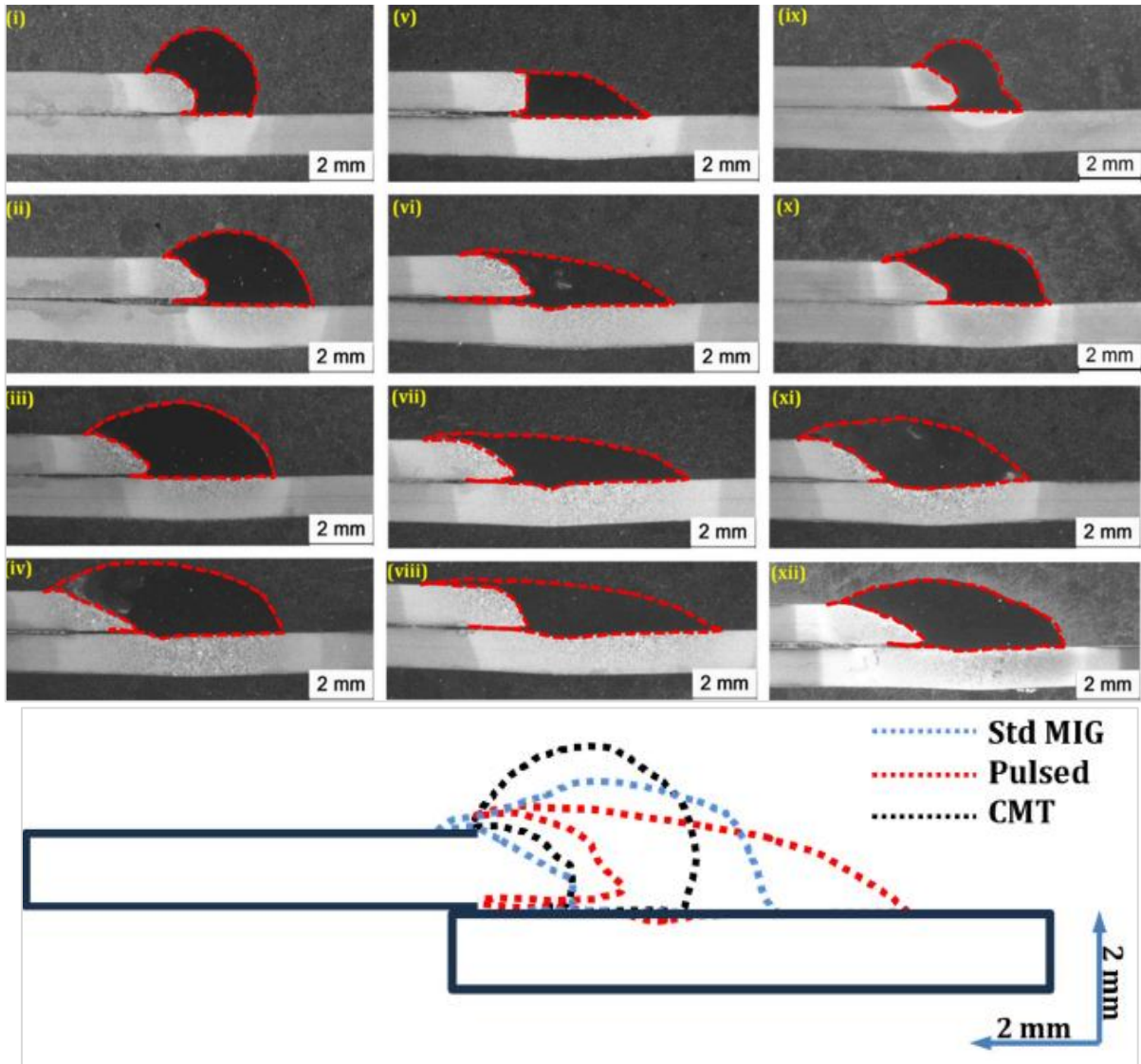
Figura 15- Materiais de Consumo para Metalografia



Fonte: Adaptado de UNIONTECH BRASIL (2025)

A Figura 16, existe a visualização da macrografias efetuadas em juntas sobrepostas unidas por MIG-Brazing, onde é possível observar o método de transferência por arco pulsado, refletiu em perfis possuindo maiores capilaridades e molhabilidade sobre as superfícies dos metais de base. Na parte inferior da Figura 16, nota-se como o tipo de transferência influenciou no perfil da união.

Figura 16- Vista da seção transversal dos cordões depositados por MIG-Brazing (i-iv) CMT-MIG com WFR de 4, 5, 6 e 6,5 m/min, (v-viii) MIG-Brazing Pulsado a 3, 3,5, 4 e 5 m/min e (ix-xii) MIG-Brazing Padrão 3, 4, 5 e 6 m/min.



Fonte: Adaptado de ARORA, OLIVEIRA e ASATI (2024)

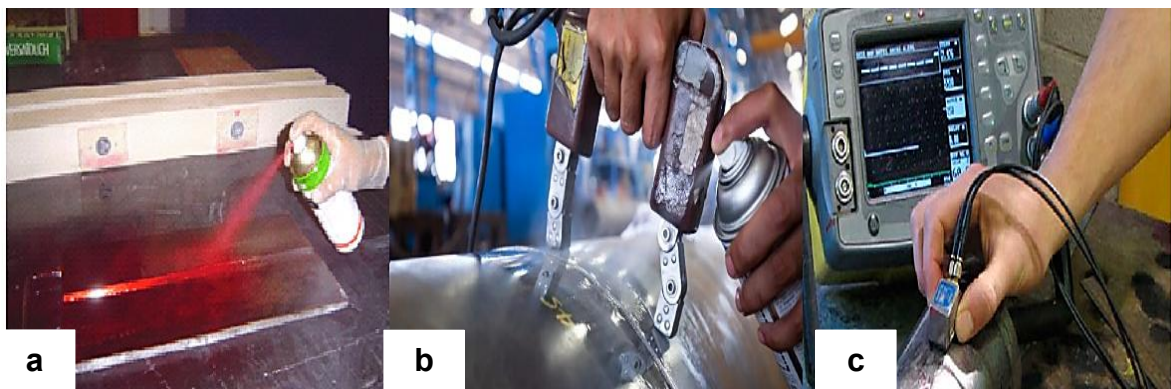
2.4. Ensaios não destrutivos

De acordo com Costa (2022), os ensaios não destrutivos (END) são aplicados para identificar possíveis discontinuidades ou falhas em materiais sem causar danos a eles. Esses métodos se apoiam em princípios físicos já bem estabelecidos, como o comportamento de líquidos, as características magnéticas dos materiais e a forma

como eles respondem à propagação de vibrações. Como não alteram as propriedades físicas, químicas ou mecânicas das peças avaliadas, os ENDs permitem que os componentes continuem sendo utilizados após a inspeção.

Menciona Costa (2022), que em várias situações, é possível analisar todo o volume da peça, gerando dados que auxiliam tanto na melhoria do projeto quanto na prevenção de falhas durante o uso. De modo geral, os ENDs reúnem técnicas capazes de identificar defeitos em produtos e acompanhar a degradação de estruturas, equipamentos e componentes ao longo do tempo. Na figura 17 vemos alguns desses ensaios descritos acima.

Figura 17- Tipos de ensaios não destrutivos (a) Líquido penetrante (b) Partículas magnéticas (c) Ultrassom



Fonte: Adaptado de INGUANTI ENGENHARIA (2025)

2.4.1. Ensaio visual

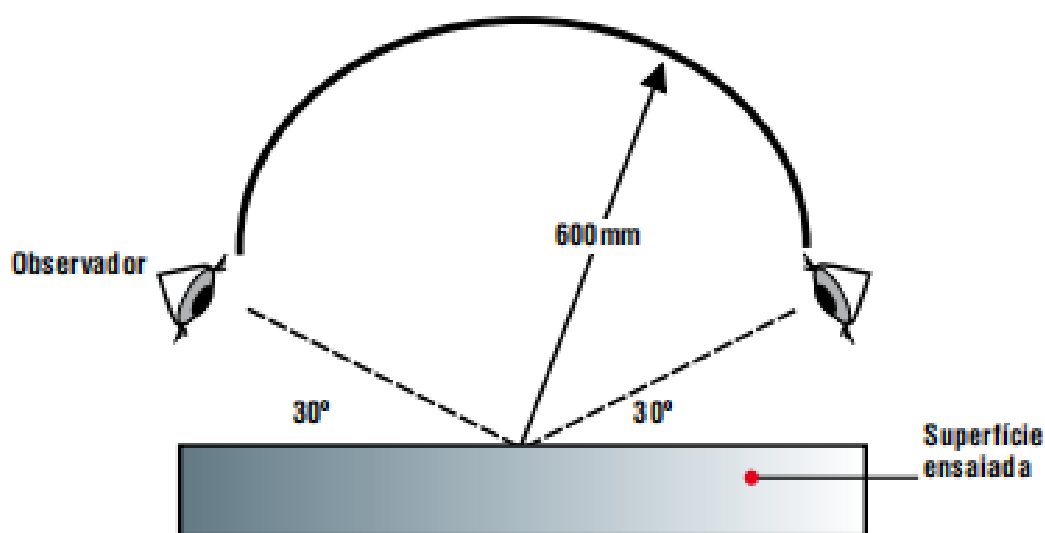
O ensaio visual (EV) é o método não destrutivo mais elementar e amplamente aplicado na inspeção de soldagens, consistindo na avaliação direta das soldas, com o uso de inspeção a olho nu ou por meio de juntas de instrumentos ópticos, como lupas e câmeras. A inspeção visual é uma etapa preliminar que antecede os demais ensaios não destrutivos, servindo como base para definir a necessidade e o tipo de ensaio complementar a ser executado. (DEEPAK, 2021).

Conforme a norma AWS D1.1 (2022), o ensaio visual é a primeira etapa crítica para identificar imperfeições superficiais tais como trincas, porosidade, falta de fusão e defeitos geométricos que possam comprometer a integridade estrutural da solda.

A norma AWS D1.1 (2022), diz que a eficácia do método depende da preparação adequada da superfície, da iluminação e da experiência técnica do inspetor para garantir a correta avaliação de acordo com os critérios aceitos internacionalmente.

Explica Teixeira *et al.* (2012), que no ensaio visual direto, a superfície examinada deve estar à distância máxima de 600 mm dos olhos do observador e formar com estes um ângulo mínimo de 30°. A Figura 18 demonstra a sistemática do ensaio visual.

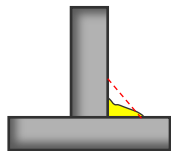
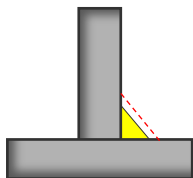
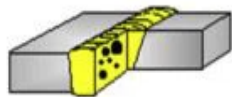
Figura 18- Representação sistemática do ensaio visual



Fonte: Adaptado de SENAI-CIMATEC (2012)

A Tabela 3 apresenta, de forma ampla e minuciosa, os critérios de tolerância estabelecidos pela norma AWS D1.1 (2022), que é uma das principais referências internacionais para a avaliação da qualidade de juntas soldadas. Nessa tabela, encontram-se descritas as diferentes categorias de descontinuidades consideradas pela norma, incluindo sua classificação, limites dimensionais permitidos e condições específicas para aceitação ou reprovação. Esse conjunto de informações permite compreender com precisão como cada tipo de descontinuidades é tratado no processo de inspeção, garantindo que a solda atenda aos requisitos mínimos de integridade, segurança estrutural e desempenho mecânico definidos pelo padrão normativo.

Tabela 3- Critérios de aceitação para Inspeção Visual

Categoria da descontinuidade e critérios da inspeção	
(1) Proibição de Trincas: São inaceitáveis.	
(2) Fusão entre metal base e solda: Deve existir fusão completa entre passes adjacentes do metal de solda e do metal base.	
(3) Cratera: Todas as crateras devem ser preenchidas para estabelecer a dimensão específica da solda, exceto nos terminais de soldas de filete intermitente externas aos seus comprimentos efetivos.	
(4) Perfil das soldas: Devem atender o item 7.23 da AWS D1.1.	
(5) Período de Inspeção: Após resfriamento completo em temperatura ambiente.	48 horas
(6) Soldas Subdimensionadas: A dimensão da solda de filete em qualquer trecho contínuo pode ser menor que o valor nominal especificado (L) sem correção pelos seguintes valores de (U): Dimensão nominal específica da solda(mm) Redução permitida de L (mm): [$< 5 < 2$]; [$6 < 2,5$]; [$> 8 < 3$]. Em todos os casos a porção de sobreposição não deve exceder a 10% do comprimento da solda.	
(7) Mordedura: Mordeduras não devem ser maiores que 1 mm em profundidade.	
(8) Porosidade: (B) A frequência em soldas de filete não deve exceder uma em cada 100 mm de comprimento de solda e com máximo diâmetro de 2,5 mm.	
(8) Porosidade: (C) Para outras soldas com chanfros, a frequência da porosidade não deve exceder uma em 100 mm de comprimento e o máximo diâmetro não deve exceder 2,5 mm.	

Fonte: Adaptado do AWS D1.1 (2022), adaptado de Silva (2023).

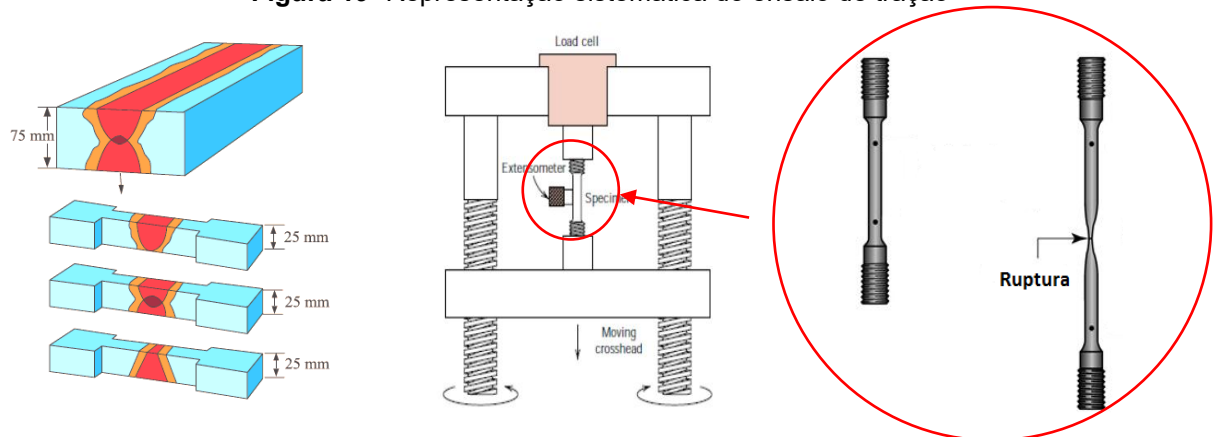
2.5. Ensaio destrutivos

A Inspeção por ensaios físicos, mecânicos, metalográficos e químicos de conformidade: caracteriza-se pelo não aproveitamento do item após inspeção, já que ocorrem alterações nas suas características originais, apesar de alguns ensaios também se caracterizarem como não destrutivos. (BRANDÃO, 2019, p.271)

2.5.1. Tração

Conforme Garcia *et al.* (2000), é um ensaio destrutivo onde se aplica uma força uniaxial crescente em um corpo de prova, com o intuito de recolher dados das características mecânicas do material. Essas características envolvem limite de resistência à tração, limite de escoamento, módulo de elasticidade e entre outros. Como ilustrado na Figura 19.

Figura 19- Representação sistemática do ensaio de tração



Fonte: Adaptado de SERRAMETAL e SILVA (2023)

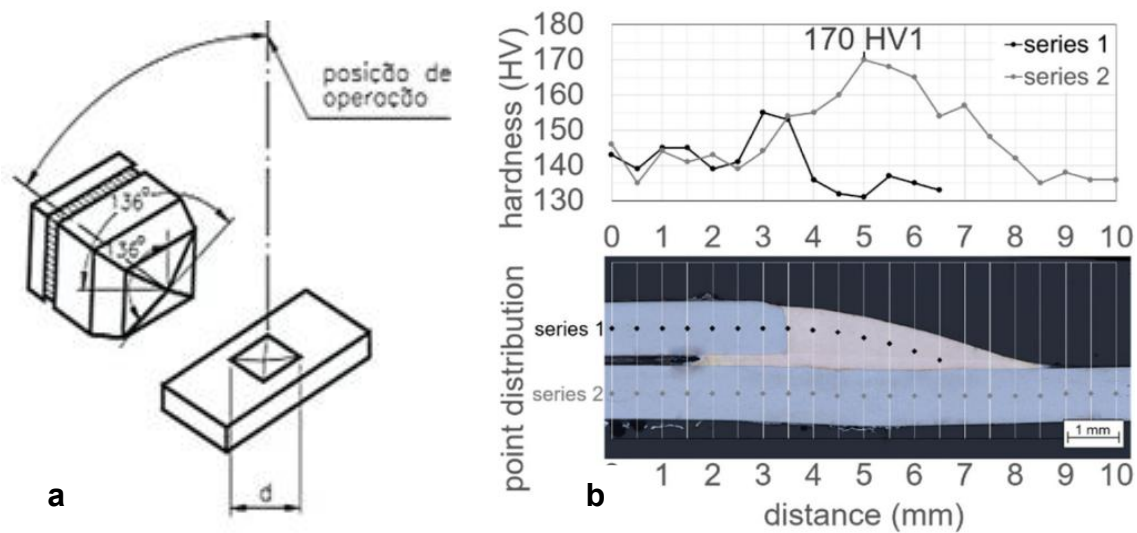
Cita Silva (2023), que os ensaios de tração têm como principal objetivo verificar se as propriedades mecânicas da junta soldada, especialmente no que diz respeito à resistência à tração, são equivalentes ou superiores às apresentadas pelo material de base. Essa verificação é fundamental para assegurar a integridade estrutural e o desempenho da junta em serviço.

2.5.2. Dureza

De acordo com Silva (2023), os ensaios de dureza em juntas soldadas têm como principal finalidade avaliar as alterações estruturais ocorridas ao longo da seção transversal do cordão de solda. Segundo o mesmo, é amplamente reconhecido que o aumento da dureza, em comparação ao valor apresentado pelo material de base, indica um acréscimo na resistência mecânica, o que, por sua vez, resulta em uma redução da ductilidade. Essas variações são particularmente relevantes na análise do desempenho mecânico da junta ao longo do tempo, podendo influenciar diretamente sua aprovação ou rejeição sendo obtida através dos seguintes ensaios:

- **Rockwell:** É definido como uma medição de dureza comum devido à sua simplicidade e facilidade de uso, sem necessidade de habilidades específicas. O método utiliza penetradores variados e cargas diferentes, tornando-o aplicável a uma ampla gama de materiais. O teste funciona medindo a diferença na profundidade de penetração sob cargas variáveis, com uma carga inicial para aumentar a precisão. Os equipamentos atuais são automatizados, exibindo os resultados diretamente e permitindo o controle do tempo de aplicação da carga, um fator importante na análise dos dados;
- **Brinell:** O teste de dureza Brinell utiliza um penetrador esférico de 10 mm para avaliar a dureza de um material. Uma carga, entre 500 kg e 3000 kg, é aplicada por um período específico (entre 10 e 30 segundos). A dureza é determinada medindo o diâmetro da impressão e consultando uma tabela de conversão para obter o valor HB, utilizando uma única escala;
- **Vickers:** A dureza Vickers envolve a aplicação de uma carga específica em uma superfície polida. Um penetrador piramidal com um ângulo de 136° é usado para criar uma impressão. A dureza é calculada a partir da média das duas diagonais da base da impressão (um losango), que são medidas com uma ocular. A Figura 20 exemplifica o ensaio sobre um junta unida por MIG-TIG-Brazing Torch.

Figura 20- Representação do ensaio Vickers em junta sobreposta de aço galvanizado utilizando MIG-TIG Brazing Hybrid Torch



Fonte: Autores (2025), (a) Adaptação da Figura disponível em: <https://www.labteste.com.br/ensaio-dureza-rockwell> com acesso em 19 maio 2025 (b) Adaptação de WEIS *et al.* (2022).

2.5.3 Aço galvanizado

Segundo Callister (2016), A galvanização é um processo simples que envolve a aplicação de uma camada de zinco sobre a superfície do aço, geralmente por imersão a quente. O zinco age como um ânodo na atmosfera e na maioria dos ambientes aquosos, o que significa que ele protege o aço catodicamente, mesmo que a superfície do aço seja danificada.

Conforme a Redação Siderurgia Brasil (2024), que a Galvanização por Imersão a Quente consiste em revestir o aço com uma camada de zinco fundido a cerca de 450 °C, protegendo-o contra a corrosão. O processo, regulamentado pelas normas ABNT NBR 6323 e ABNT NBR 7414, garante revestimento uniforme independentemente das condições ambientais. Essa técnica se destaca por oferecer dupla proteção: por barreira, isolando o metal do meio externo, e catódica, em que o zinco se oxida primeiro, preservando o aço.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho foi utilizado um aço carbono SAE 1005 galvanizado como material base. Duas chapas desse material foram unidas por brasagem em junta sobreposta com folga de 0,2 mm. A preparação das amostras envolveu o corte e a usinagem das chapas nas dimensões de 12,7 mm × 30 mm × 251 mm. Ao todo, foram confeccionados oito corpos de prova, destinados à execução das análises de microdureza e dos ensaios de tração.

3.1 Material de base

O aço SAE 1005 é um aço de baixo teor de carbono, contendo aproximadamente 0,05% de carbono em sua composição. Essa característica confere ao material uma boa conformabilidade, soldabilidade e usinabilidade, sendo amplamente utilizado em aplicações que não exigem alta resistência mecânica, mas que demandam boa ductilidade e facilidade de processamento. As propriedades deste material podem ser visualizadas nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4- Composição Química SAE 1005

SAE 1005 – Composição Química (%)				
Carbono %	Ferro %	Manganês %	Fósforo %	Enxofre %
0,05 a 0,10%	-	0,30 a 0,60%	Até 0,04%	Até 0,05%

Fonte: Adaptado de Metal Zenith (2025)

Tabela 5- Propriedades do SAE 1005

Propriedades	Unidades Métricas - SI	Método de Teste
Resistência à Tração	310 - 410 MPa	ASTM E8
Limite de Escoamento*	150 - 250 MPa	ASTM E8
Elongação	30 - 40%	ASTM E8
Dureza (Vickers)	140 HV	ASTM E8

***Nota:** Desvio de 0,2%

Fonte: Adaptado de Metal Zenith (2025)

3.2 Consumíveis

Utilizando-se a especificação do código ASME II Parte C SFA 5.7 (2023), foi definido o consumível Bronze-Alumínio ER CuAl-A2. Segundo o item A6.1 do código ASME II Parte C SFA 5.7. Dentro da mesma especificação, o item A6.4 para soldagem GMAW, utiliza-se eletrodo positivo de corrente contínua (DCEP). E recomenda o gás argônio, por ser o mais utilizado neste processo. As propriedades mecânicas deste material podem ser visualizadas na Tabela 6.

Tabela 6- Propriedades Mecânicas

Classificação AWS	Dureza (Vickers) HV	Resistência mínima à tração	
		PSi	MPa
ER CuAl-A2	130 – 150	60.000	415

Fonte: Adaptado do ASME II Parte C SFA-5.7 (2023)

Na Tabela 7 é possível observar a composição química do consumível que será utilizado:

Tabela 7- Composição Química do consumível

ER CuAl-A2						
Zn %	Sn%	Mn%	Fe%	Si%	Al%	Pb%
0.02%	-	-	0.5 -1.5%	0.10%	8.5-11%	0.02%

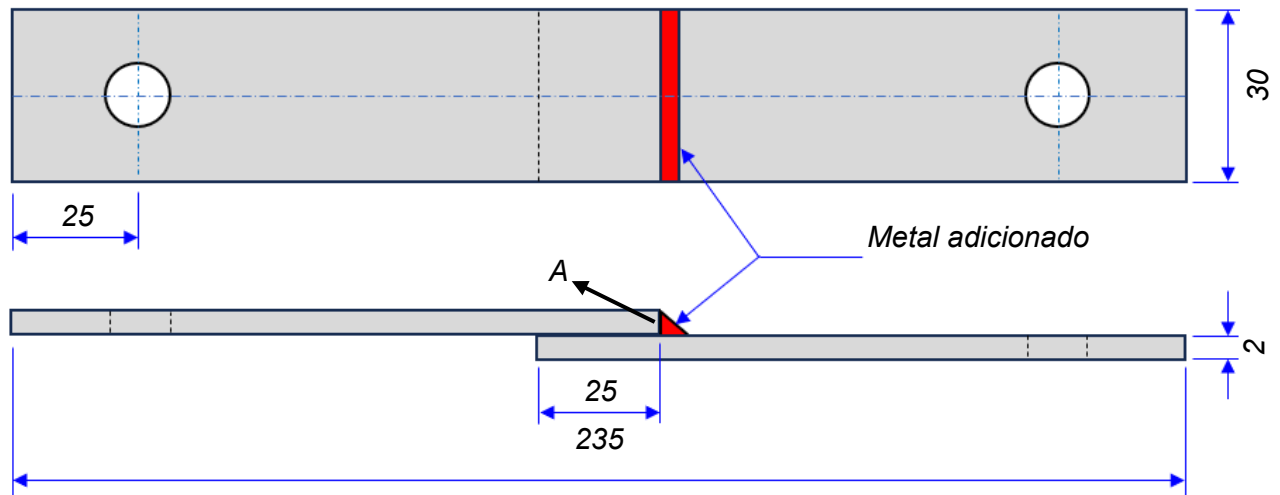
Fonte: Adaptado do ASME II Parte C SFA-5.7 (2023)

3.3 Dimensões da chapa

De acordo com a AWS C3.2 (2001), os corpos de prova foram produzidos seguindo as dimensões: largura de 30 mm, espessura de 2 mm e comprimento total de 235 mm apresentadas na Figura 21. Além disso, foram realizados furos posicionados a 25 mm das extremidades, e a junta foi localizada a 25 mm. Esta área

(A) indicada na Figura 21, possui maior restrição, pois se torna um concentrador de tensões quando submetido ao ensaio de tração.

Figura 21- Junta do tipo sobreposta



Fonte: Adaptado do AWS C 3.2 (2001)

3.4 Procedimento de MIG Brazing

O processo de MIG Brazing foi utilizado com o objetivo de unir chapas de aço galvanizado SAE 1005, utilizando o arame ER CuAl-A2 como material de adição. Esse processo foi escolhido por permitir a brasagem das chapas sem comprometer o revestimento de zinco, característica essencial para a preservação das propriedades anticorrosivas do material. O procedimento realizou-se por meio de uma fonte de soldagem MIG.

O arame ER CuAl-A2, composto predominantemente por cobre e alumínio, foi alimentado de forma contínua através da tocha de soldagem. Como gás de proteção, foi utilizado argônio, com vazão controlada, a fim de garantir uma atmosfera estável e livre de contaminações durante o processo. Durante a soldagem, os parâmetros operacionais como corrente, tensão, velocidade de avanço e distância do bico de contato foram ajustados conforme as recomendações e os requisitos experimentais definidos.

3.5 Equipamentos

3.5.1 Fonte de Soldagem Power Wave

Na execução do processo, foi utilizada uma fonte de soldagem com tecnologia inversora de frequência de 120kHz, com capacidade de multiprocessos de soldagem conforme a Figura 22, essa fonte possui a Tecnologia Power Connect que ajusta automaticamente a tensão de entrada entre 200 a 600V, mono ou trifásica, sua produção é monitorada via Internet com a utilização do sistema Lincoln Checkpoint Recurso True Energy que calcula a energia em kJ por cordão de solda, para cálculo do aporte de calor sua conexão ethernet atualiza o software e realiza sua configuração.

Figura 22- Fonte de Soldagem



1. Interface do Usuário da Série S Opcional (K3001-2) para Stick, TIG e MIG CC com alimentador de detecção de tensão
2. Luz de Status
3. Indicador de Falha Térmica
4. Terminais de Saída Cam-Lock estilo Tweco®
5. Tomada de Controle de Saída Opcional – 12 pinos (incluída com a Interface do Usuário da Série S K3001-2)
6. Tomada para Cabo de Sensoriamento de Trabalho
7. Interruptor Principal de Energia
8. Alças Reversíveis

Fonte: Adaptado de LINCOLN ELECTRIC (2025)

3.5.2 Refrigerador de água

O refrigerador acoplado à fonte de soldagem, foi projetado para integração direta com fontes de alimentação Power Wave série S e série R, ele é refrigerado a água é robusto, confiável e capaz de resfriar tochas com potência nominal de até 500 amperes.

3.5.3 Módulo

É um módulo avançado que expande as Capacidades de Soldagem, possui um controle de forma de onda CA para soldagem MIG Pulsada com uma partida de alta frequência para capacidade de soldagem TIG e seu modular permite fácil conexão e rápida comunicação digital com modelos Power Wave, também possui capacidade de processo STT® isso torna este módulo ideal para aplicações automotivas, de tubos e metais finos. Como é possível observar na Figura 23.

Figura 23- Módulo STT - Power Wave



Fonte: LINCOLN ELETRIC (2025)

3.5.4 Alimentador de arame

Foi utilizado o alimentador de arame Lincoln LF-45, como na Figura 24, o mesmo é refrigerado a ar/água, inclui rolos de 1,0-1,2 mm, ele foi construído para suportar condições ambientais extremas, sua robustez e dimensões reduzidas facilita o uso, sendo equipado de série com um chassi inferior para uso em condições industriais adversas. Sendo capaz de aceitar bobinas de arame D300 (15 kg), mas também pequenas bobinas D200 (5 kg).

Figura 24- Alimentador de arame LF-45 Lincoln K14072



Fonte: LINCOLN ELETRIC (2025)

3.5.5 Esmerilhadeira

A esmerilhadeira (Figura 25), foi utilizada para remover a oxidação e tornar a superfície lisa para as subseqüentes etapas.

Figura 25- Esmerilhadeira



Fonte: AUTORES (2025)

3.5.6 Serra Tico-Tico

A serra tico-tico Vonder TTV 800 (Figura 26), foi empregada na realização dos cortes das chapas.

Figura 26- Serra Tico-Tico



Fonte: AUTORES (2025)

3.5.7 Calibre de Folga

O calibre de folga foi empregado na medição de folga entre duas peças, sendo por uma haste e um conjunto de lâminas metálicas com espessuras conhecidas, conforme Figura 27.

Figura 27- Calibre de folga



Fonte: AUTORES (2025)

3.5.8 Paquímetro

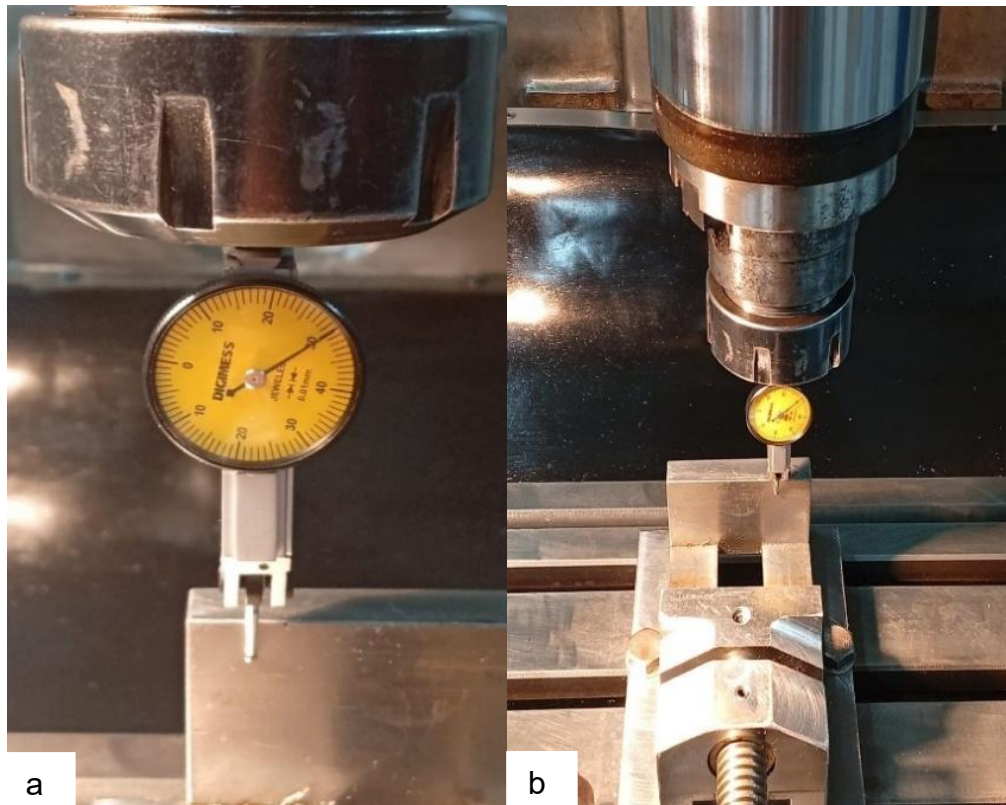
O paquímetro é um instrumento de medição de 150mm, com a precisão de 0,02mm, conforme a Figura 28. O mesmo foi utilizado para auxiliar nas medições dos diferentes processos empregados, principalmente na usinagem dos corpos de prova.

Figura 28- Paquímetro Mitutoyo

Fonte: AUTORES (2025)

3.5.9 Relógio Apalpador

O relógio apalpador demonstrado na Figura 29, é um instrumento mecânico de medição por comparação, usado para verificar excentricidade, alinhamento e outras características. Possuindo uma haste com uma ponta esférica que permite medir locais de difícil acesso.

Figura 29- Relógio Apalpador (a) e (b)

Fonte: AUTORES (2025)

3.6 Riscador

Trata-se de uma ferramenta manual semelhante a uma caneta (Figura 30), dotada de uma ponta de metal duro, utilizada para traçar linhas finas e precisas na superfície do material, facilitando a realização de cortes mais exatos.

Figura 30- Riscador



Fonte: AUTORES (2025)

3.6.1 Cortadora metalográfica

A cortadora metalográfica Cut-off CM 80 (Figura 31), possui um acionamento do corte através de alavanca de ação lateral que desloca o disco contra a amostra a ser cortada, a tampa tem um visor em policarbonato para que seja possível ver o corte e proteger o operador.

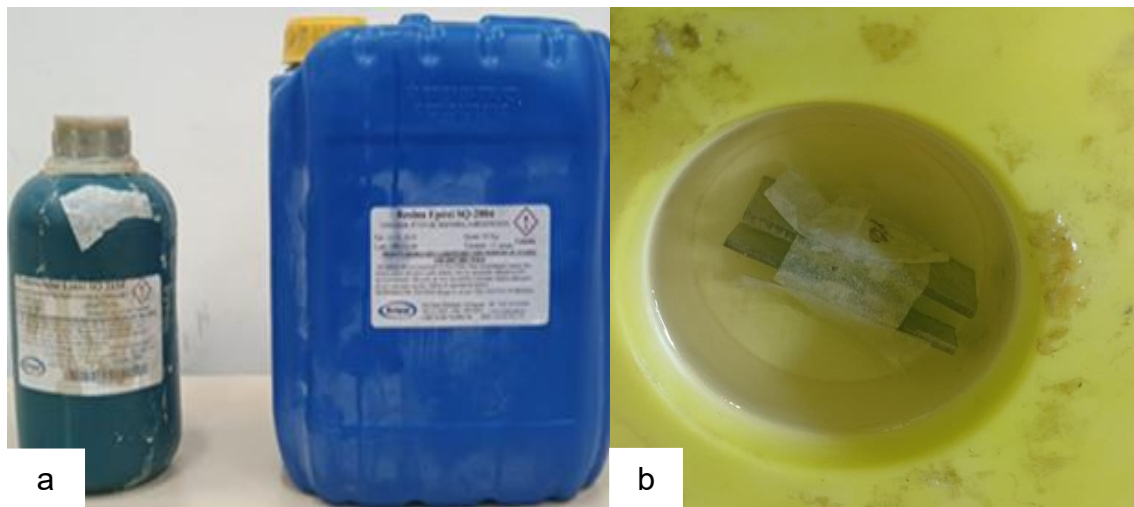
Com iluminação interna e um sistema de refrigeração de água com antioxidante refrigerante para evitar um aquecimento excessivo, preservando as características estruturais da amostra.

Figura 31- Cut-off

Fonte: AUTORES (2025)

3.6.2 Embutimento

O embutimento foi realizado a frio, conforme a Figura 32, onde foram utilizados dois produtos à base de resina e catalisador (a), para obter a amostra embutida e conseguir um bom resultado na preparação metalográfica. Após corte dos corpos de prova, os mesmos foram embutidos (b).

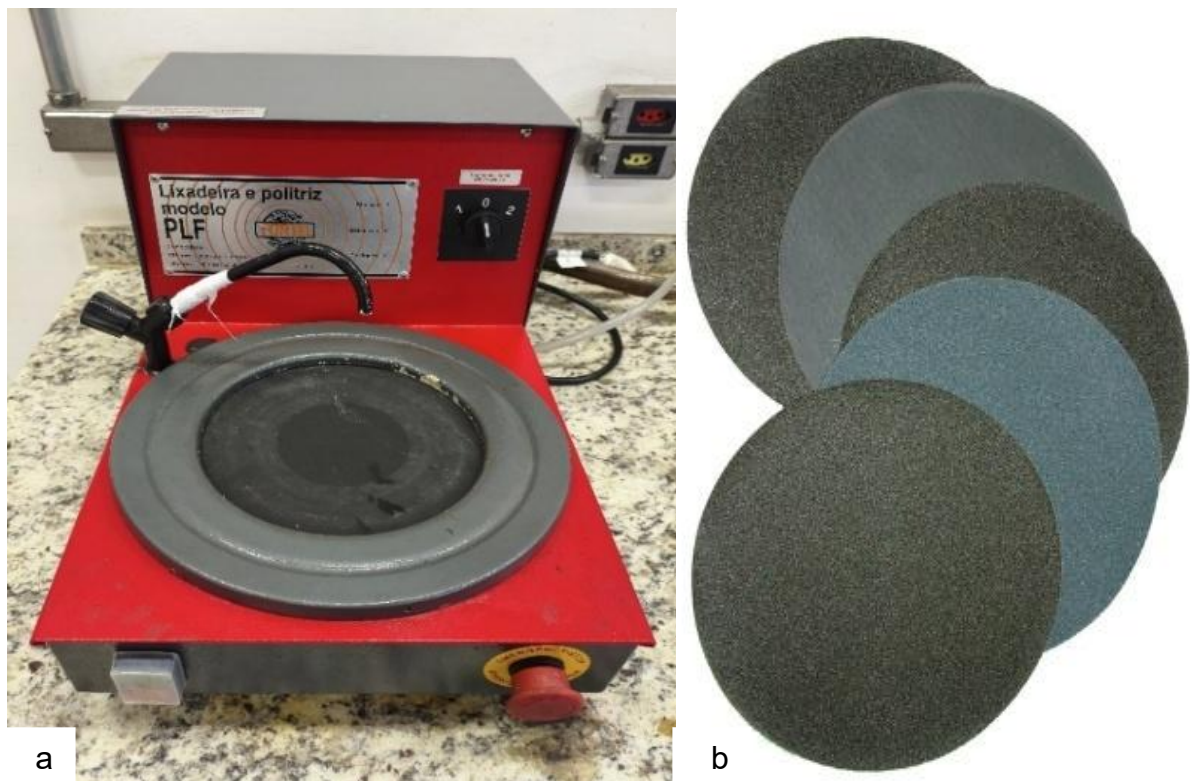
Figura 32- Embutimento dos Corpos de Prova

Fonte: AUTORES (2025)

3.6.3 Politriz para lixamento

As preparações dos corpos de prova para metalografia, foram lixados utilizando a lixadeira semiautomática, fazendo uso de lixas de granulometria 180 a 1200 com refrigeração com água como mostra a Figura 33.

Figura 33- Politriz e lixas



Fonte: AUTORES (2025)

3.6.4 Ensaios mecânicos e metalográficos

Os polimentos dos corpos de prova, foram realizados em uma politriz (a), utilizando pasta de diamante de 1 e 3 microns e feltros metalográficos(b), conforme a Figura 34.

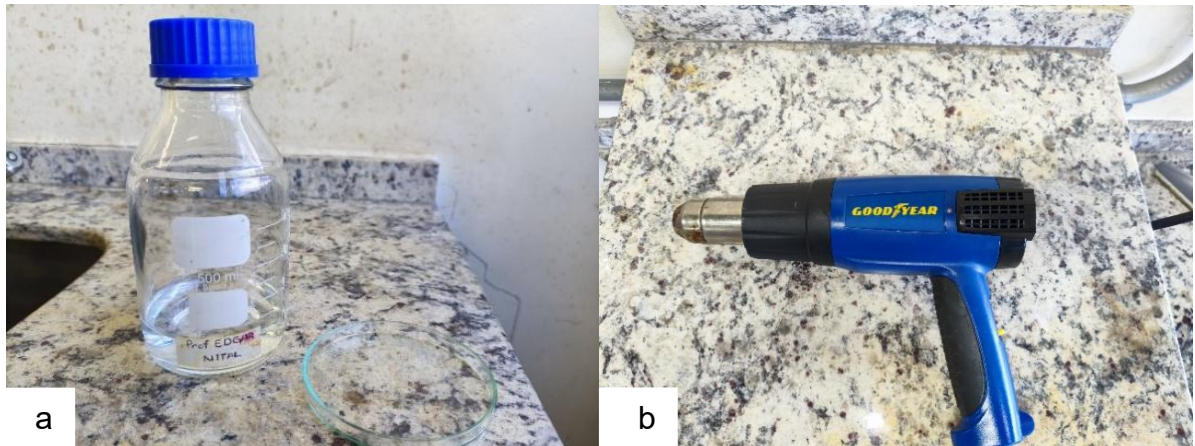
Figura 34- Politriz e a Pasta de Diamante

Fonte: AUTORES (2025)

3.6.5 Ataque químico

O ataque químico foi realizado com a finalidade de revelar a macroestrutura e do material foi utilizada uma solução nital 2%. Nesse processo a amostra foi mergulhada em uma solução nital (ácido nítrico e álcool) (a), depois a amostra foi colocada em água corrente para retirar a solução e em seguida utilizou-se um soprador térmico (B) para secar. conforme a Figura 35.

Figura 35- Solução nital (a) e Soprador térmico (b)

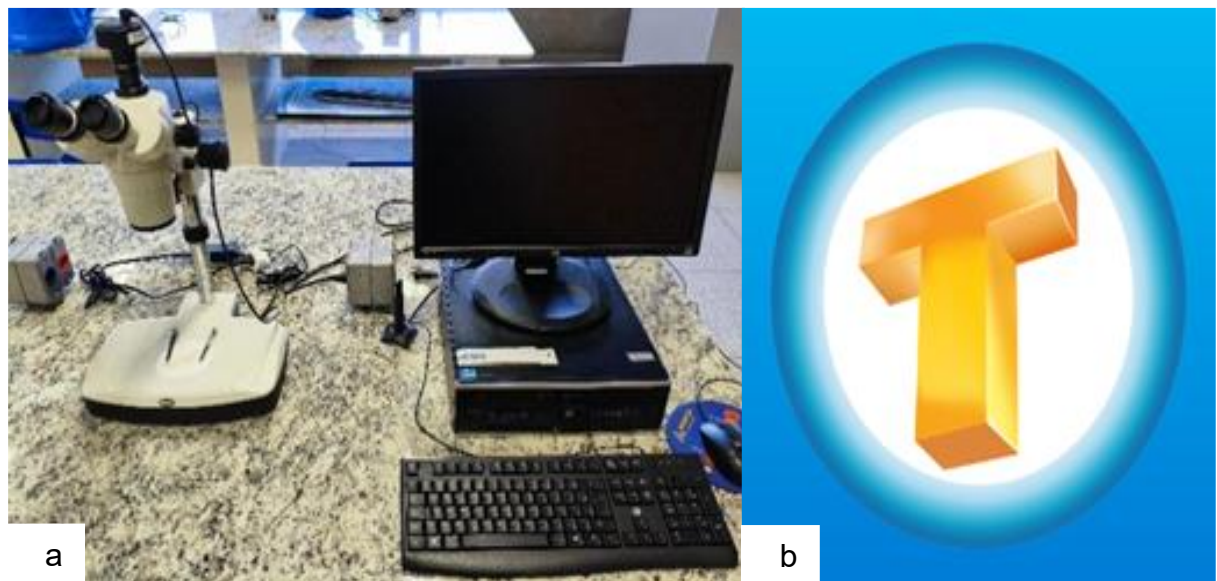


Fonte: AUTORES (2025)

3.6.6 Estereoscópio

Após a preparação das amostras será utilizado o estereoscópio ZEISS (a), que é um tipo de equipamento para realizar a macrografia, o mesmo é conectado a um computador e com o auxílio do software Top View 64 (b), foram coletadas as informações necessárias para as análises, conforme a Figura 36.

Figura 36- Estereoscópio com a utilização do software Top View 64

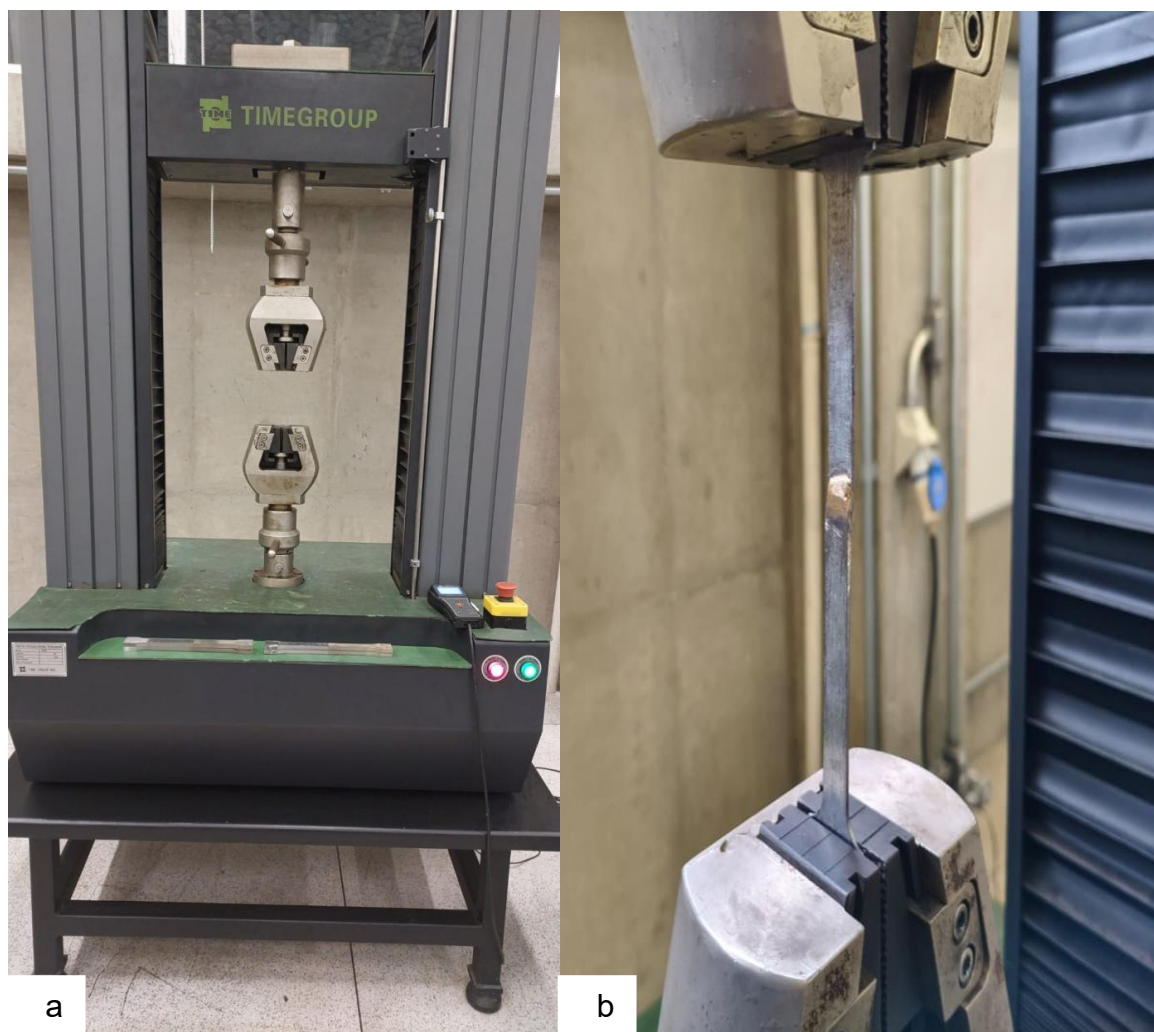


Fonte: AUTORES (2025)

3.6.7 Máquina universal de ensaios

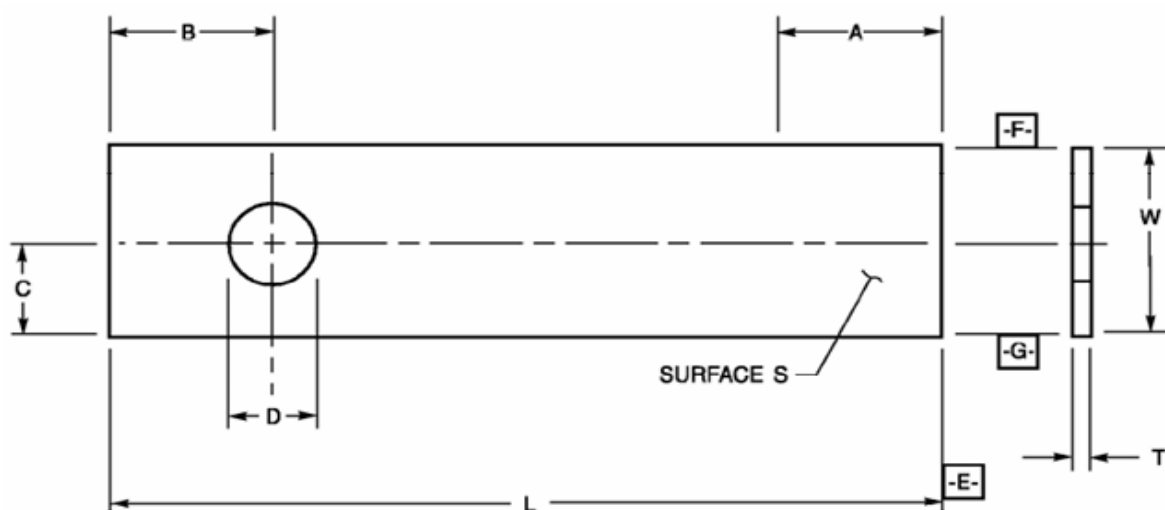
Para o ensaio de tração, os corpos de prova foram fixados nas garras da máquina universal, a qual é conectada a um computador que por meio do software dedicado, registra as curvas utilizadas na análise. A Figura 37 apresenta: (a) a visão geral da máquina de ensaios WDW 100E; e (b) o corpo de prova posicionado na garra durante o ensaio.

Figura 37- Máquina universal de ensaios (WDW 100E)



Fonte: AUTORES (2025)

Os corpos de prova de tração, foram usinados conforme descrição do AWS C 3.2 (2001), onde as dimensões do mesmo podem ser vistas na Figura 38.

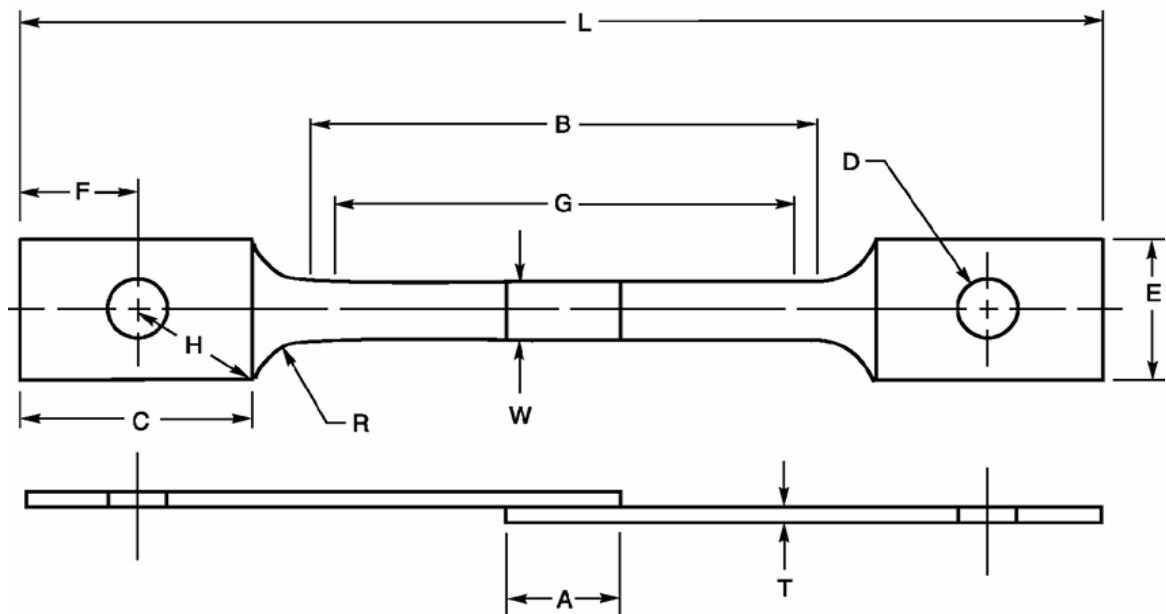
Figura 38- Chapa furada para ensaios de tração

Descrições	Dimensões (mm)
A= Área de sobreposição de junta soldada	25
B = Localização do furo	25
C = Localização do furo	16
D = Diâmetro do furo	13
L = Comprimento	130
W = Largura (típica)	30
T = Espessura	3nom.
S = Superfície plana	0.05máx
Superfície S = Quebra de aresta na superfície -E-, -F- e -G. = Perpendicularidade	Dentro de 0,05 leitura indicada total (TIR) Dentro de 0,12

Fonte: Adaptado do AWS C3.2 (2001)

Para atender os padrões normativos do AWS C3.2 (2001) e verificar a resistência mecânica da junta unida por MIG-Brazing, os corpos de prova foram usinados nas dimensões descritas conforme demonstrado na Figura 39 e submetidos ao ensaio de tração.

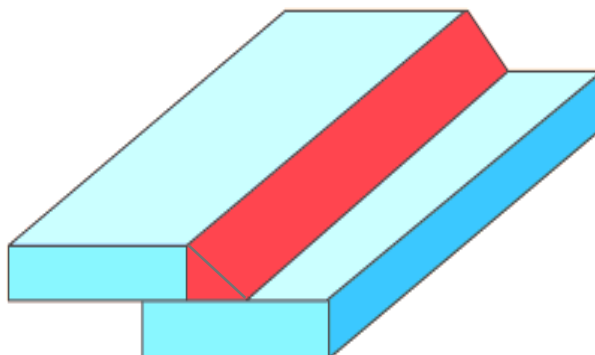
Figura 39- Corpo de tração



Descrições	Dimensões (mm)
G = Comprimento do medidor	50.0 ± 0.10
W = Largura	12.5 ± 0.25
T = Espessura do material	3
R = Raio, mín.	13
L = Comprimento total, mín.	203
B = Comprimento da seção reduzida, mín.	57
C = Comprimento da seção reduzida, aprox.	50
E = Largura da seção de aderência, aprox.	32
D = Diâmetro do furo para o pino	13
F = Distância da borda ao pino, aprox.	25
A = Área de sobreposição da junta soldada	Conforme especificado
H = Distância do furo ao filete, mín.	13
Tolerância = Localização do furo em relação à linha central	± 0.05 min.

Fonte: Adaptado do AWS C3.2 (2001)

A sobreposição das chapas foi realizada de acordo com a sugestão do AWS C3.2 (2001), vista na Figura 40.

Figura 40- Sobreposição de chapas conforme espessura

**Distâncias de sobreposição recomendadas
para a amostra de cisalhamento de volta única**

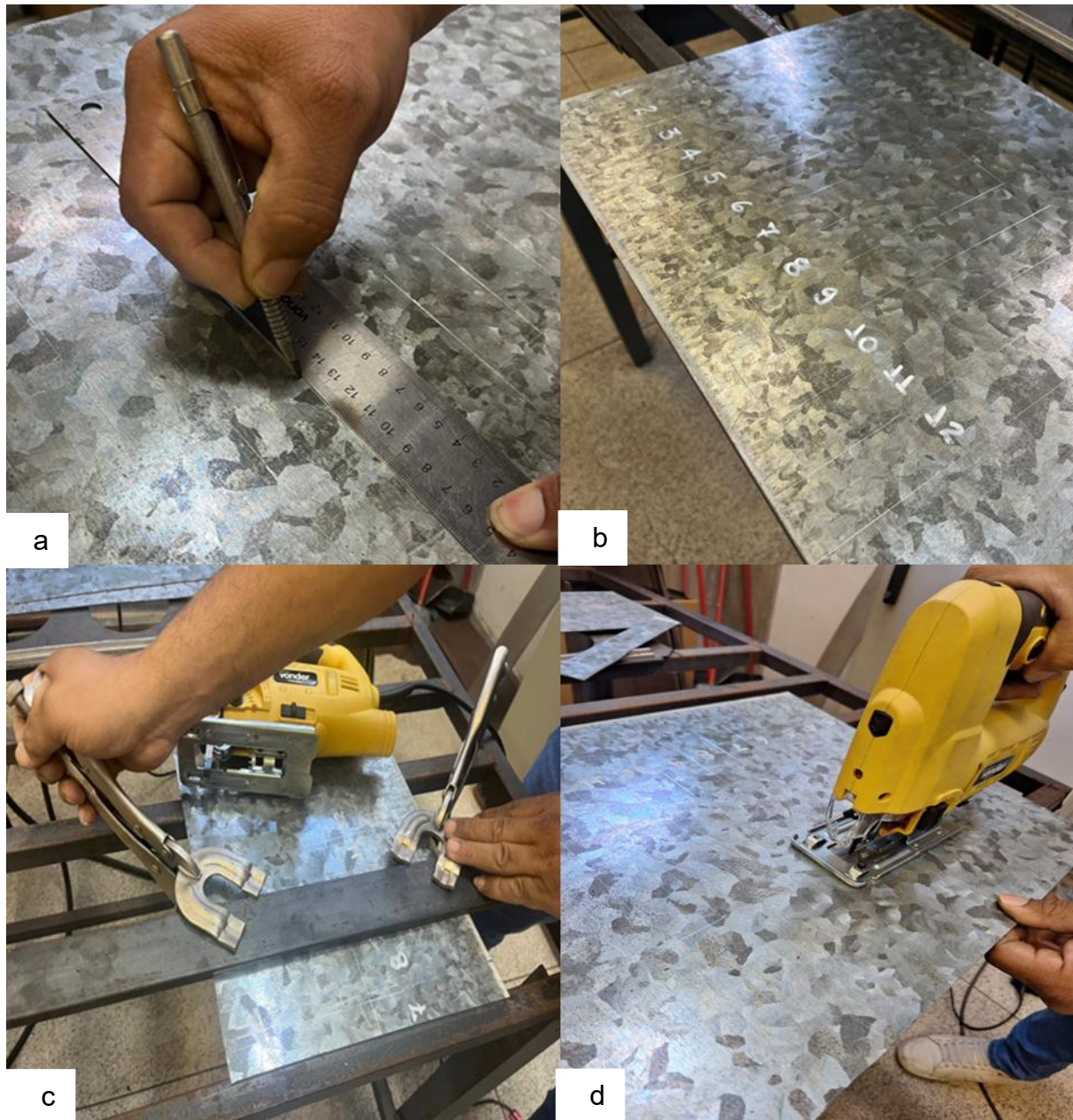
Sobreposição (A) como a relação entre a sobreposição e a espessura do material	Sobreposição real (A)
(T = 3 mm [0.125 in.])	mm
0.38	1.14
0.50	1.50
0.75	2.25
1.00	3.00
1.50	4.50
2.00	6.00
3.00	9.00
4.00	12.00

Fonte: Adaptado do AWS C3.2 (2001)

3.6.8 Construção dos Corpos de Prova

Com o auxílio de um riscador (a), foram realizadas doze marcações na chapa (b), também foram utilizados um esquadro de 90° e uma escala. Conforme as especificações estabelecidas pela norma AWS C3.2 (2001). Após a traçagem, a chapa foi fixada em uma bancada por meio de uma barra e dois alicates (c), o que possibilitou a execução do corte utilizando uma serra tico-tico (d), conforme demonstrado pela Figura 41.

Figura 41- Preparação para o corte dos corpos de prova (a) riscador, esquadro de 90° e escala (b) marcações na chapa. (c) Chapa fixada na bancada. (d) execução do corte

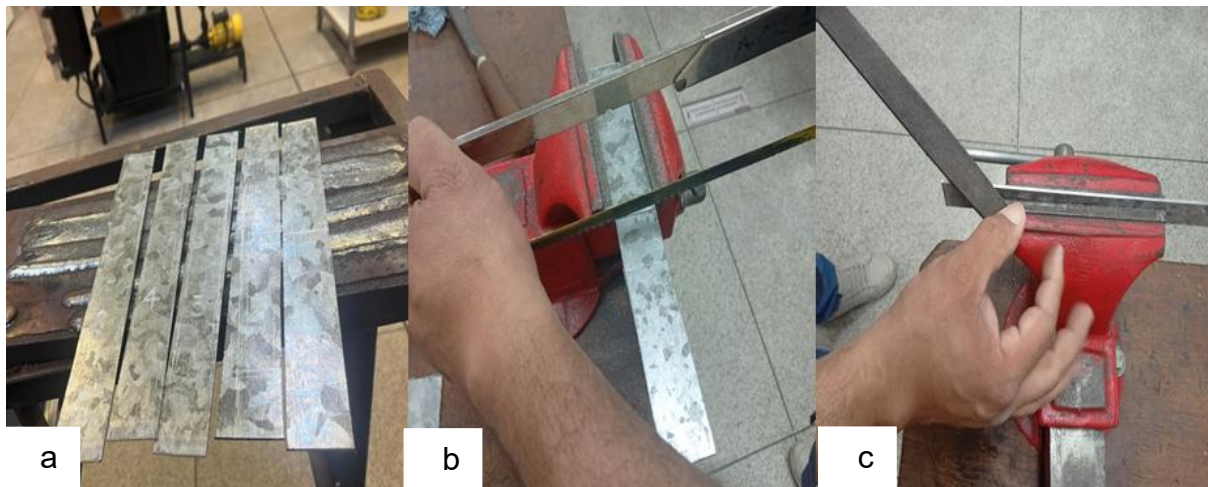


Fonte: AUTORES (2025)

Em seguida os corpos de prova obtidos foram separados com comprimento de 132 mm, preservando-se um sobremetal de 2 mm (a), que foi destinado à usinagem posterior em uma fresadora.

As peças foram serradas com o auxílio de uma serra manual (b), por fim foi realizado o processo de rebarbação com o uso de uma lima chata bastarda(c), como observa-se na Figura 42.

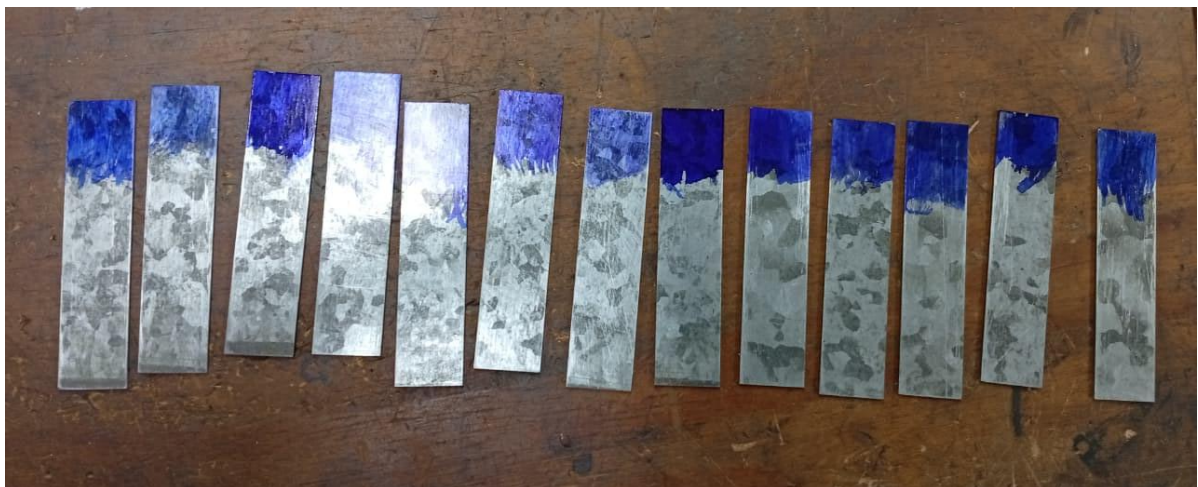
Figura 42- Preparação dos corpos de prova para usinagem



Fonte: AUTORES (2025)

Depois que os corpos de prova passaram pelo corte e pela etapa de limagem, eles foram identificados para seguir para a usinagem, como mostrado na Figura 43.

Figura 43- Marcação nos corpos de prova para a usinagem



Fonte: AUTORES (2025)

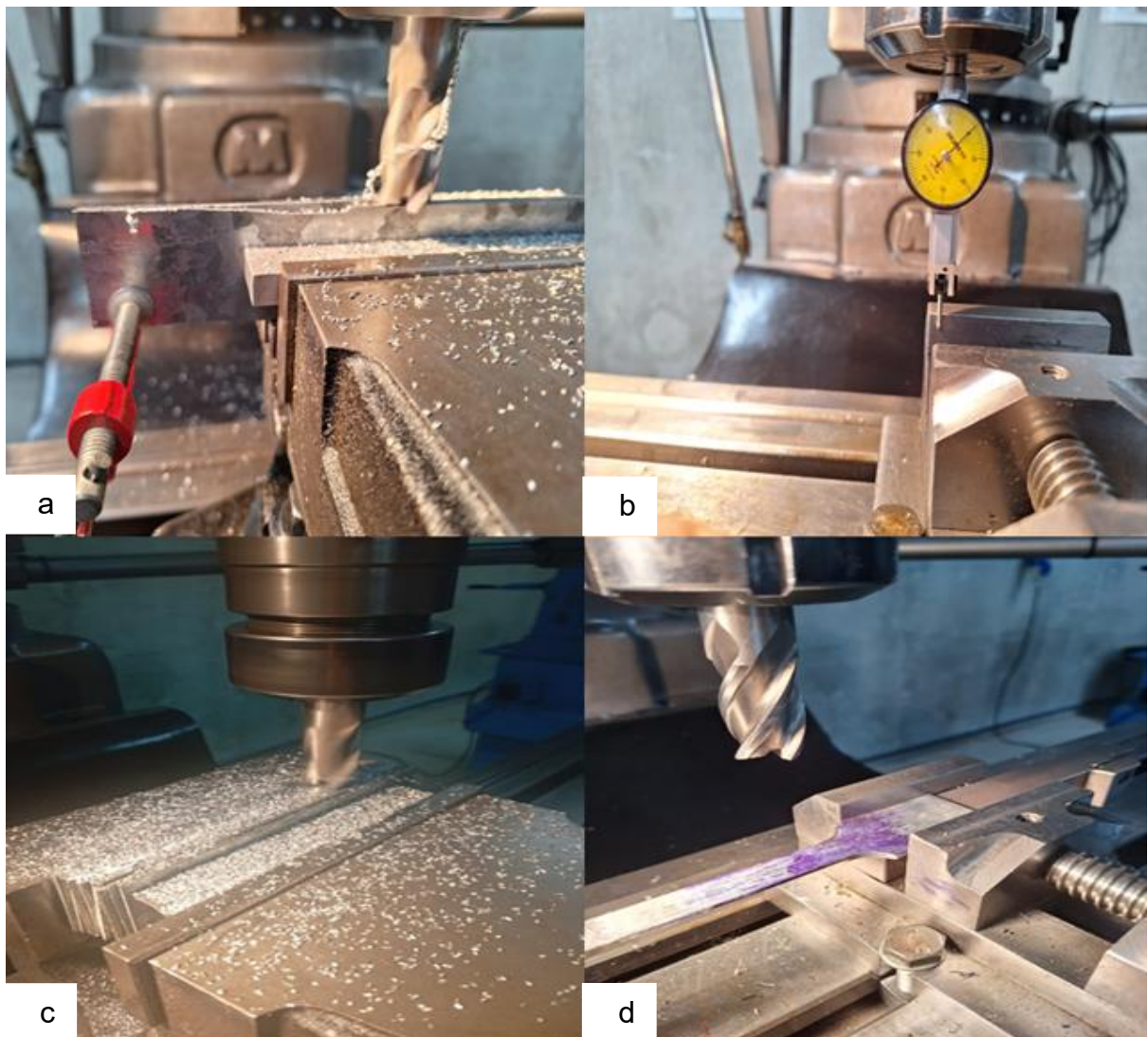
Na sequência as chapas foram submetidas a um processo de usinagem com o objetivo de obter superfícies planas, adequadas para o processo de brasagem. A operação foi realizada em uma fresadora universal, as chapas foram fixadas em uma morsa de precisão (Figura 44), garantindo estabilidade e alinhamento adequado durante a operação. Utilizando uma fresa cilíndrica de topo com diâmetro de 12 mm.

As amostras foram usinadas até atingirem as dimensões finais de 12,7 mm x 30 mm x 251 mm, com tolerâncias adequadas para o processo subsequente de brasagem.

Os parâmetros de corte adotados foram:

- Velocidade de rotação (n): 1200 rpm;
- Avanço (f): 60 mm/min;
- Profundidade de corte (ap): 0,3 mm por passe.

Figura 44- Usinagem dos corpos de prova



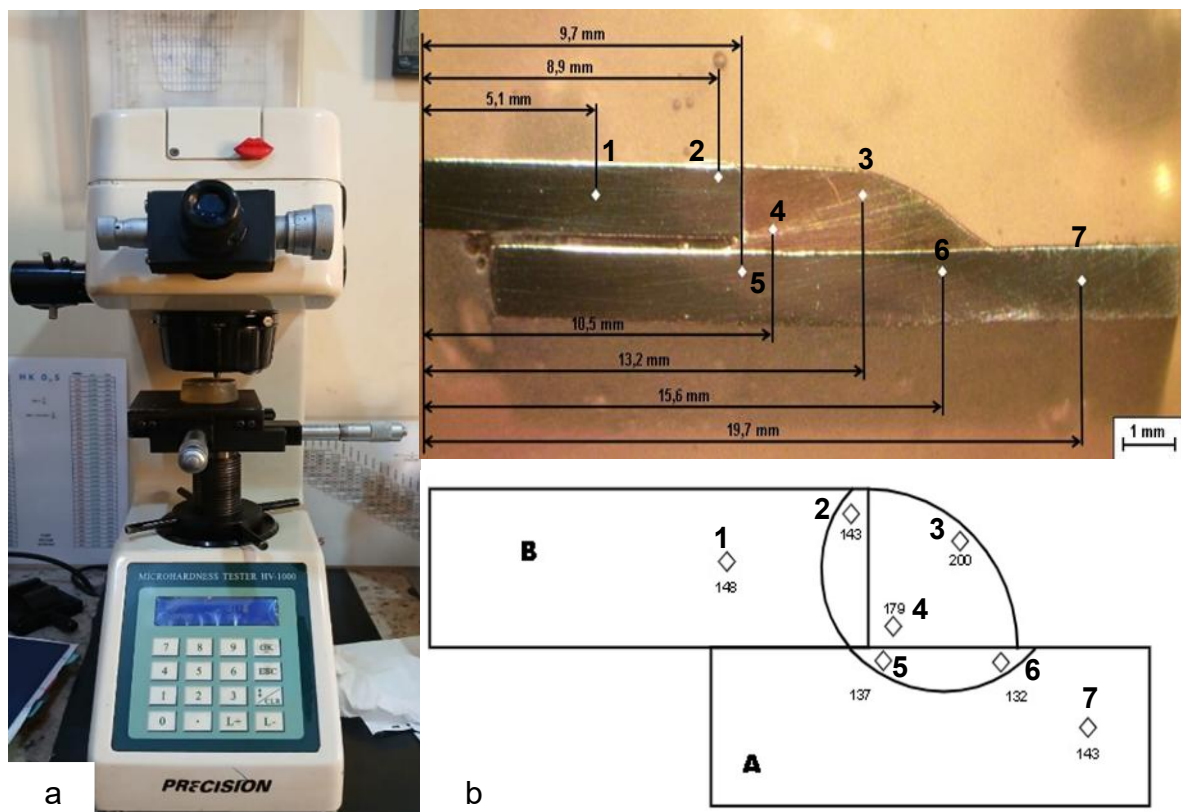
Fonte: AUTORES (2025)

Após a usinagem, as amostras foram limpas para remoção de partículas e cavacos metálicos, sendo então armazenadas em ambiente seco até a execução do processo de brasagem.

3.7 Microdurômetro

Para a análise de dureza, foi utilizado um microdurômetro Precision (a), conforme apresentado na Figura 45. O ensaio foi conduzido com aplicação de uma carga de 0,05 HV sobre os corpos de prova, utilizando um penetrador de diamante em formato piramidal de base quadrada, com ângulo de 136° entre faces opostas, responsável por produzir a indentação na superfície da amostra. A Figura 45 também apresenta (b) a distribuição dos pontos de medição ao longo da junta brasada, bem como o perfil de dureza dos valores obtidos para as peças A e B.

Figura 45- Microdurômetro



Fonte: AUTORES (2025)

3.7.1 Espectômetro

Para a caracterização química dos materiais, foi utilizada um espectrômetro de emissão óptica Solaris CCD Plus, apresentado na Figura 46. O equipamento (a) realizou a leitura por meio da abertura de um arco elétrico na superfície das amostras, permitindo identificar a composição dos elementos presentes.

A Figura 46 também mostra (b) a região da solda após a emissão do arco para leitura química e (c) a superfície do metal de base, onde se observam as crateras formadas durante o ensaio de espectrometria, resultantes da atuação do arco durante o processo de análise.

Figura 46- Espectrômetro



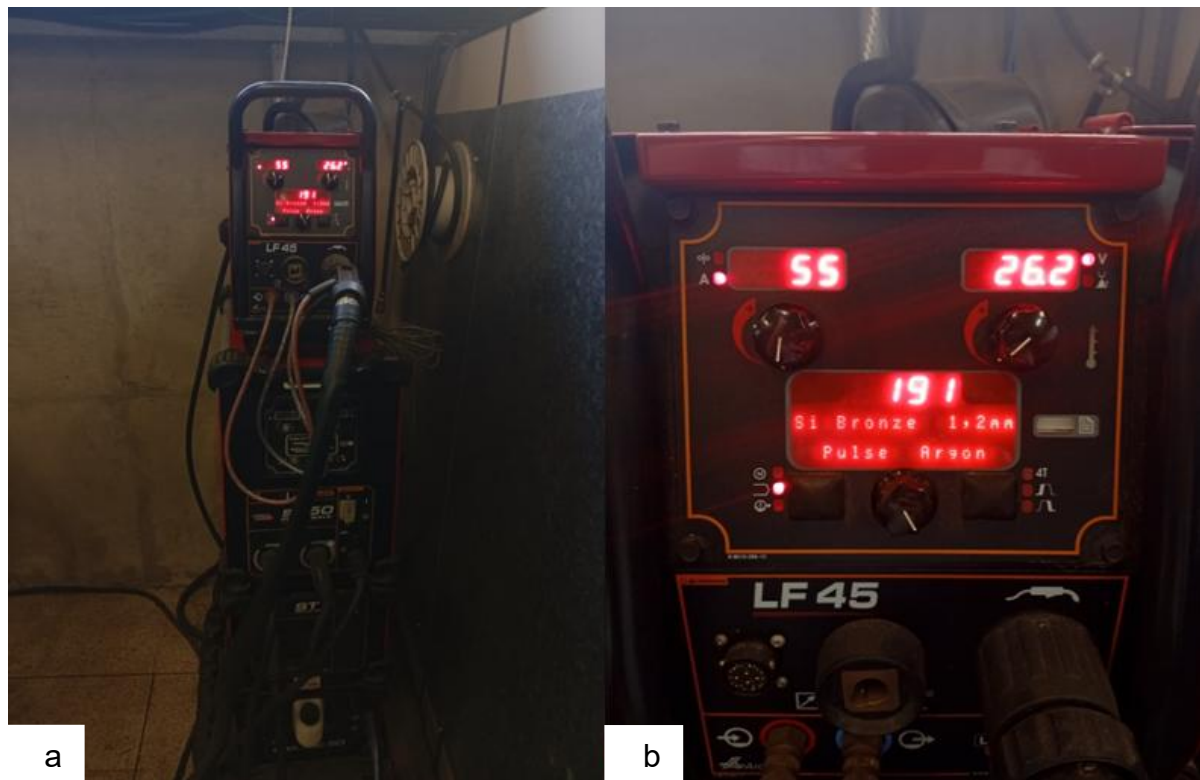
Fonte: AUTORES (2025)

3.7.2 Parâmetros do processo MIG-Brazing

Durante o processo de brasagem a arco com gás de proteção (MIG Brazing), os parâmetros de soldagem foram ajustados conforme apresentado na Figura 47.

A fonte utilizada (a) foi configurada para operar com corrente de 55 A e tensão de 26,2 V, em modo pulsado (Pulse) na curva característica *Weld Mode* 191, *Active Page* 0 e *Wave Control* 1 com valor -1; utilizando argônio (Ar) como gás de proteção, o tempo de arco aberto 3 a 4s. O painel de controle da máquina (b) exibe as condições aplicadas durante o processo. O metal de adição empregado foi o arame ERCuAl-A2, com diâmetro de 1,2 mm.

Figura 47- Parâmetros Ajustados na fonte



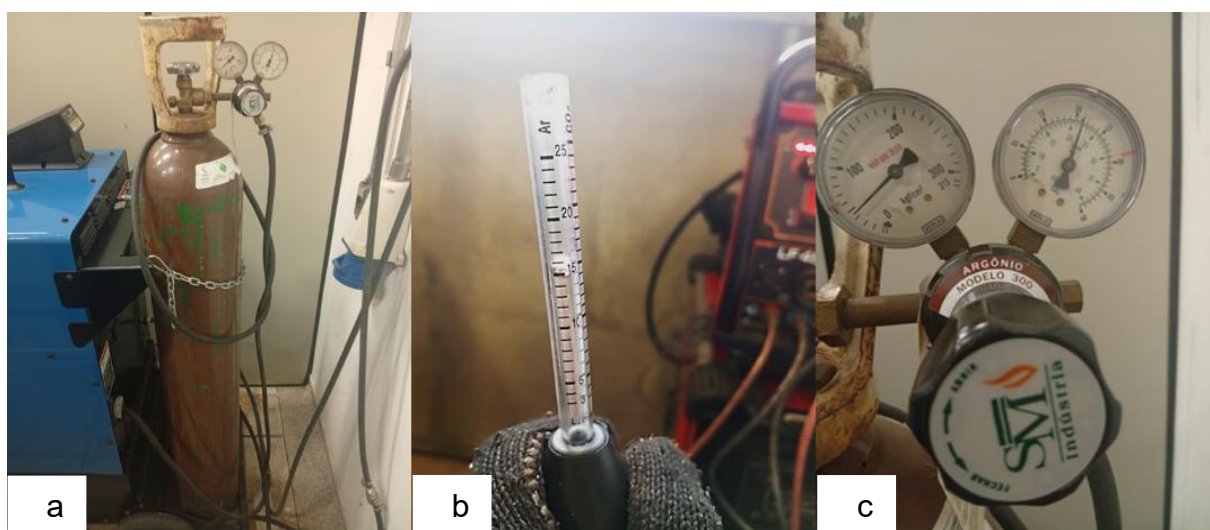
Fonte: AUTORES (2025)

O modo pulsado foi selecionado para garantir uma transferência metálica controlada, reduzindo o aporte térmico e preservando o máximo do revestimento de zinco do aço galvanizado SAE 1005. Esse controle também contribui para uma superfície de solda mais uniforme e com menor presença de respingos.

3.7.3 Vazão do Gás de proteção

O gás de proteção utilizado foi o argônio puro (a) com o auxílio de um Fluxômetro durante a regulagem do sistema(b), a leitura foi realizada alinhando o centro da esfera com a escala referente ao gás utilizado, garantindo precisão no ajuste. A pressão interna do cilindro encontrava-se em aproximadamente 100 kgf/cm² e a vazão de saída foi ajustada para cerca de 15 L/min, valor adequado para garantir a proteção da poça de fusão no processo de soldagem. O ajuste da vazão foi realizado por meio do manípulo frontal do regulador (c), permitindo um controle preciso do fluxo de argônio até a tocha de soldagem, conforme a figura 48.

Figura 48 - Fluxômetro para vazão de gás de proteção (Ar) durante o processo de MIG Brazing



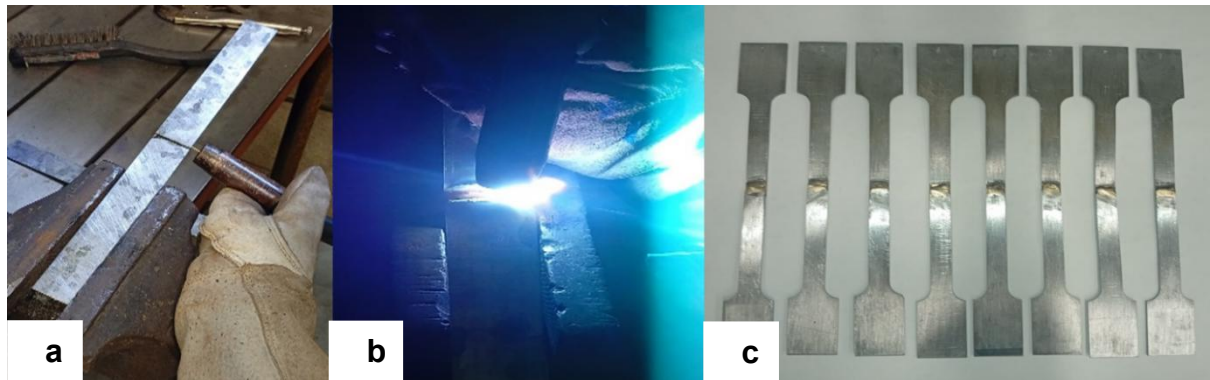
Fonte: AUTORES (2025)

3.7.4 Processo MIG Brazing

Utilizando os parâmetros previamente definidos para a fonte de soldagem MIG, foi realizada a operação de brasagem, garantindo estabilidade e repetibilidade no processo. Para manter a junta corretamente posicionada durante a execução, empregou-se uma morsa, assegurando a fixação adequada e contribuindo para a união permanente do material. Após a aplicação da brasagem, os corpos de prova foram finalizados conforme as condições estabelecidas no procedimento e ficaram prontos para os ensaios mecânicos subsequentes.

A Figura 49 ilustra essas etapas: (a) preparação da amostra para brasagem MIG; (b) execução da operação de MIG Brazing, evidenciando o arco elétrico durante o processo; e (c) os 8 corpos de prova já brasados e usinados preparados para avaliação mecânica.

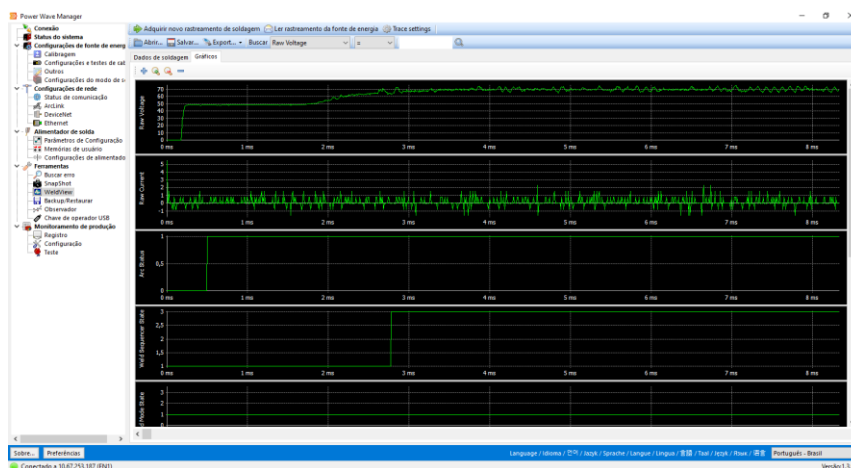
Figura 49 - Operação do MIG Brazing



Fonte: AUTORES (2025)

Os corpos de prova foram soldados utilizando o software Power Wave Manager, desenvolvido pela Lincoln Electric, que possibilita a configuração, o monitoramento e o registro detalhado dos parâmetros do processo de soldagem (Figura 50). A ferramenta gerou gráficos representativos das variáveis elétricas envolvidas, permitindo observar o comportamento do arco ao longo da execução. Durante as soldagens, o tempo de arco aberto registrado para os oito corpos de prova manteve-se na faixa de 3 a 4s, garantindo uniformidade no controle do processo e coerência entre os ciclos avaliados.

Figura 50- Demonstração do software Power Wave Manager

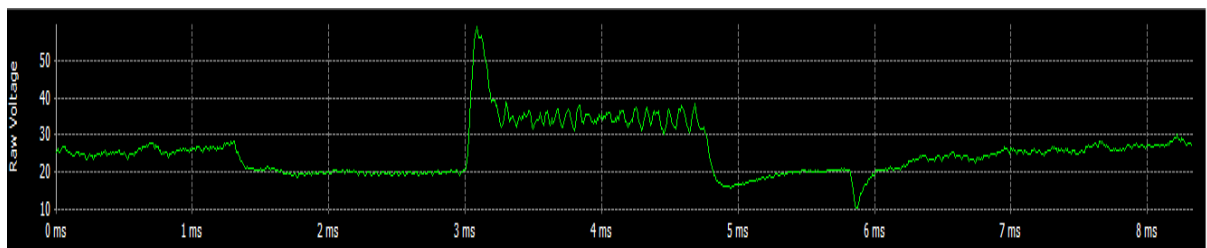


Fonte: AUTORES (2025)

As figuras dos gráficos apresentadas a seguir ilustram o comportamento das principais variáveis do processo de soldagem ao longo do tempo:

O corpo de prova 1 (CP1) apresentou as seguintes variáveis: a tensão do arco (Raw Voltage), ilustrada na Figura 51, exibiu oscilações características do processo, iniciando-se em aproximadamente 20 V e alcançando picos próximos de 45 V nos primeiros milissegundos (3–5 ms), correspondentes ao momento de acionamento do arco.

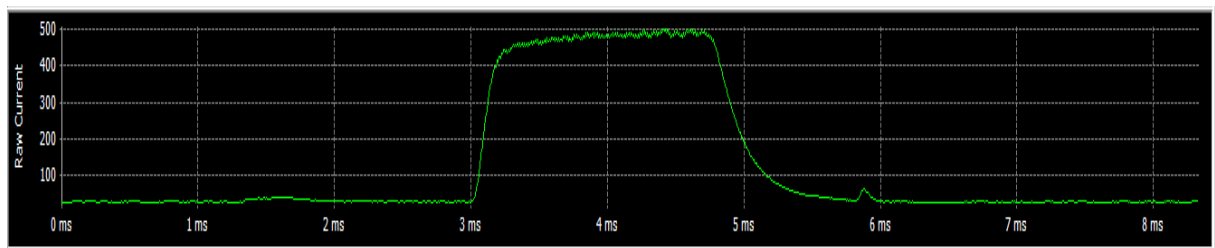
Figura 51- Tensão do arco do CP1



Fonte: AUTORES (2025)

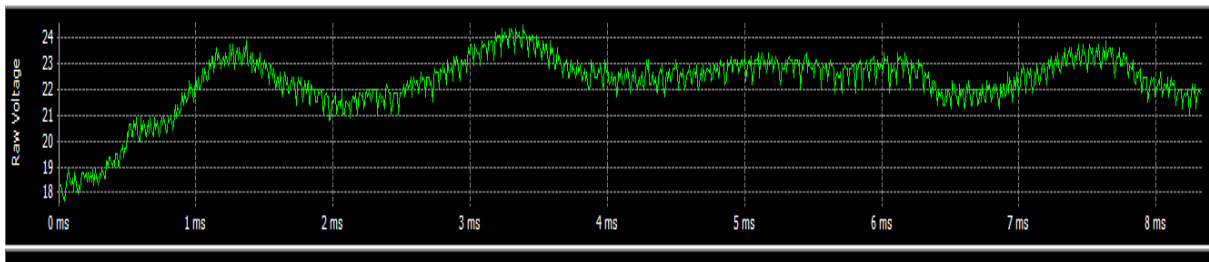
Na corrente de soldagem (Raw Current), apresentada na Figura 52, observou-se um aumento abrupto de 400 A entre 3 e 5 ms, após este tempo, houve a estabilização da corrente em torno de 50 A.

Figura 52- Corrente de soldagem do CP1



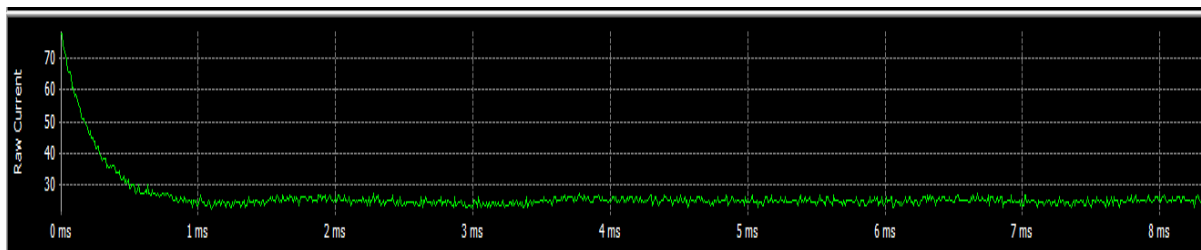
Fonte: AUTORES (2025)

O corpo de prova 2 (CP2) apresentou o seguinte comportamento em relação às variáveis monitoradas durante o processo, a tensão do arco (Raw Voltage), ilustrada na Figura 53, apresentou variações entre aproximadamente 16 e 24 V.

Figura 53- Tensão do arco do CP2

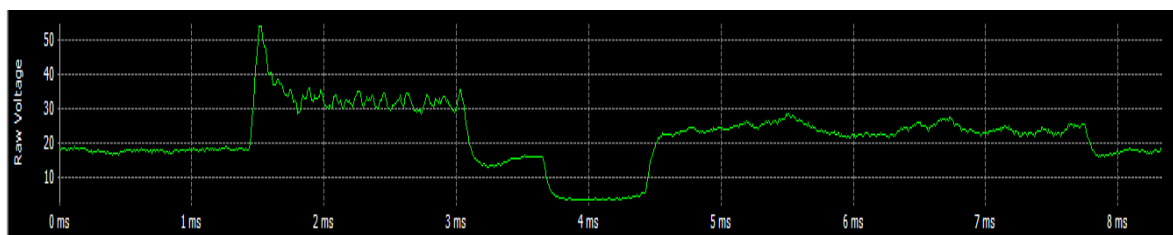
Fonte: AUTORES (2025)

A Corrente de soldagem mostrada na figura 54, partiu de aproximadamente 70 A e rapidamente decaiu para próximo de 30 A, estabilizou-se com pequenas variações.

Figura 54- Corrente de soldagem do CP2

Fonte: AUTORES (2025)

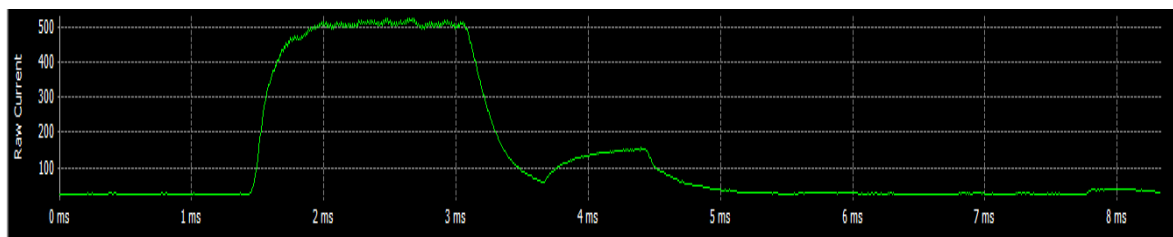
O corpo de prova 3 (CP3) apresentou comportamento característico quanto às variáveis analisadas durante o processo. Conforme ilustrado na Figura 55, a tensão do arco iniciou-se na faixa de 17 a 20 V, registrando um pico acentuado de aproximadamente 50 V após 1 ms. Em seguida, estabilizou-se com oscilações regulares entre 20 e 30 V ao longo do tempo.

Figura 55- Tensão do arco do CP3

Fonte: AUTORES (2025)

A corrente de soldagem, apresentada na Figura 56, evidenciou comportamento típico do processo, mantendo-se inicialmente em níveis próximos de zero e elevando-se rapidamente para aproximadamente 500 A após 1 ms. Em seguida, permaneceu em patamar elevado até cerca de 3 ms, quando iniciou um declínio acentuado, estabilizando-se posteriormente em valores reduzidos.

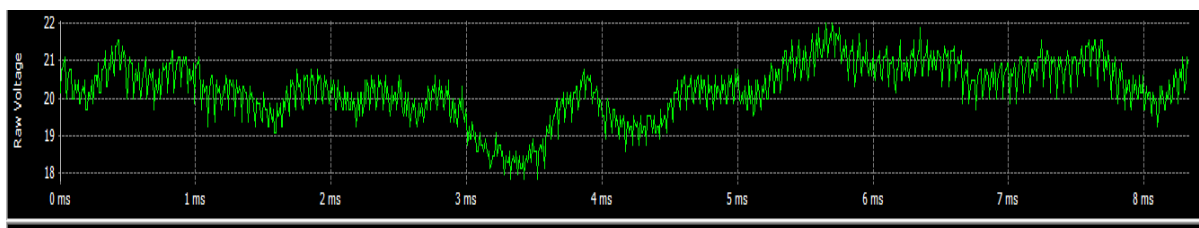
Figura 56- Corrente de soldagem do CP3



Fonte: AUTORES (2025)

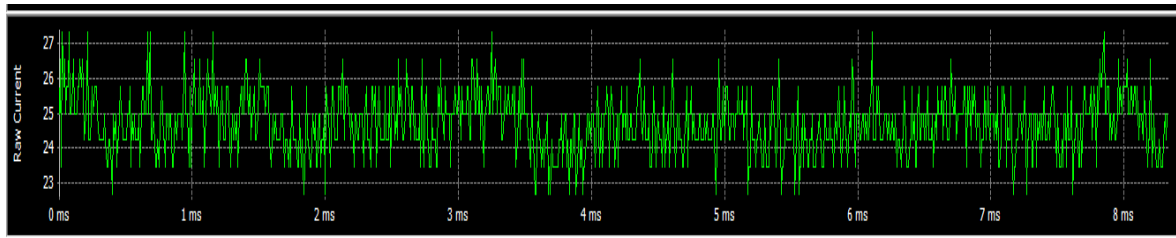
O corpo de prova 4 (CP4) apresentou comportamento estável em relação às variáveis monitoradas ao longo do processo. Conforme mostrado na Figura 57, a tensão do arco manteve-se entre 19 e 22 V durante todo o período analisado, exibindo pequenas oscilações características do comportamento sonoro do arco elétrico.

Figura 57- Tensão do arco do CP4



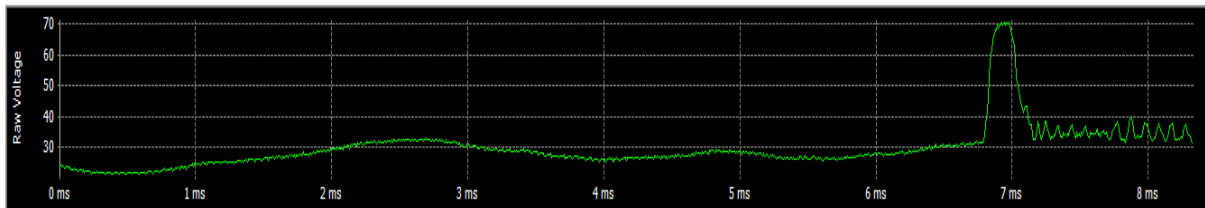
Fonte: AUTORES (2025)

A corrente de soldagem, apresentada na Figura 58, variou entre aproximadamente 23 e 27 A, exibindo oscilações rápidas e irregulares. Esse comportamento é característico de um processo operando em modo pulsado, refletindo a alternância controlada da corrente durante a soldagem.

Figura 58- Corrente de soldagem do CP4

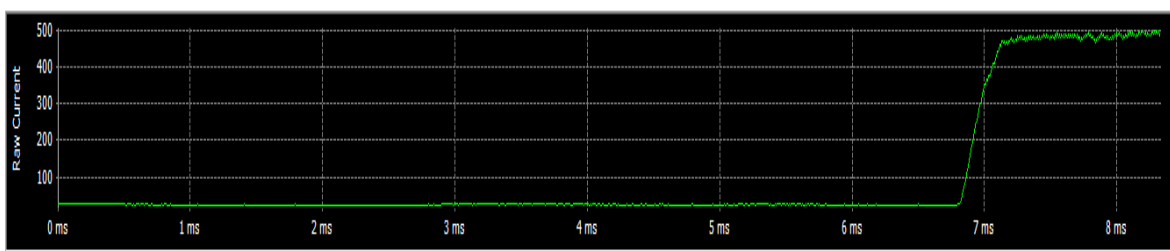
Fonte: AUTORES (2025)

O corpo de prova 5 (CP5) apresentou comportamento característico quanto às variáveis observadas durante o processo. Conforme ilustrado na Figura 59, a tensão do arco iniciou-se de forma estável, em torno de 30 V, apresentando um aumento gradual até aproximadamente 33 V nos primeiros 6 ms. Entre 6,8 ms e 7,2 ms, registrou-se um pico abrupto que atingiu cerca de 65 V, retornando rapidamente à faixa de 30 a 35 V, onde se manteve estável posteriormente.

Figura 59- Tensão do arco do CP5

Fonte: AUTORES (2025)

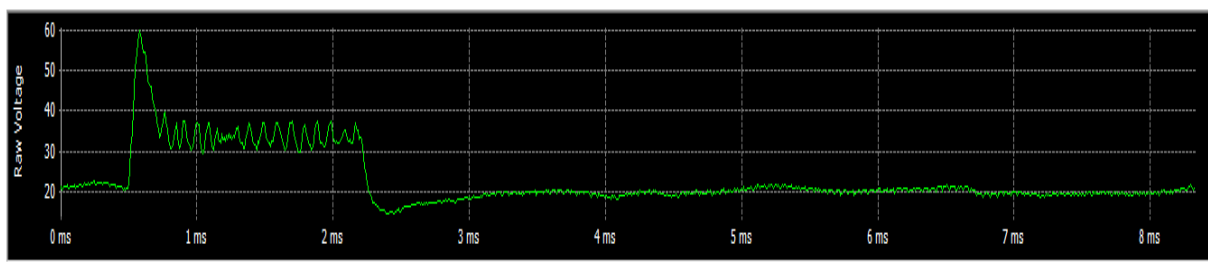
A corrente de soldagem, apresentada na Figura 60, manteve-se em níveis muito baixos, praticamente nulos, até aproximadamente 7 ms. A partir desse ponto, observou-se uma elevação brusca, partindo de valores próximos de zero e atingindo rapidamente um patamar em torno de 480 A, onde permaneceu estável até o término do registro.

Figura 60- Corrente de soldagem do CP5

Fonte: AUTORES (2025)

O corpo de prova 6 (CP6) apresentou comportamento dinâmico em relação às variáveis registradas durante o processo. Conforme ilustrado na Figura 61, a tensão do arco iniciou-se em torno de 20 V, elevando-se abruptamente para aproximadamente 60 V nos primeiros instantes (cerca de 0,5 ms). Após esse pico inicial, a tensão apresentou oscilações rápidas entre 30 e 40 V até cerca de 2 ms. Em seguida, observou-se uma queda acentuada para aproximadamente 18 V, estabilizando-se a partir de 3 ms e mantendo-se praticamente constante até o final do registro.

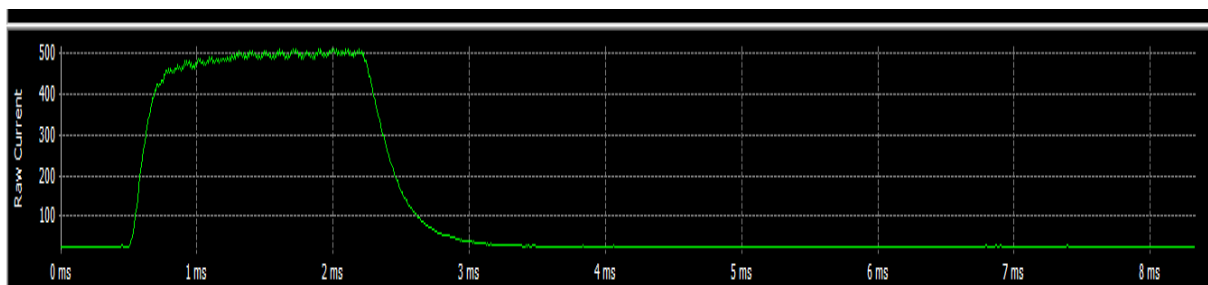
Figura 61- Tensão do arco do CP6



Fonte: AUTORES (2025)

A corrente de soldagem, apresentada na Figura 62, iniciou-se em níveis baixos, seguida por um aumento rápido que atingiu aproximadamente 450 a 500 A logo nos primeiros instantes do processo (em torno de 0,5 ms). Esse patamar manteve-se até cerca de 2 ms, quando ocorreu um declínio gradual da corrente, atingindo valores próximos de zero após 3 ms e permanecendo nessa condição até o final do registro.

Figura 62- Corrente de soldagem do CP6

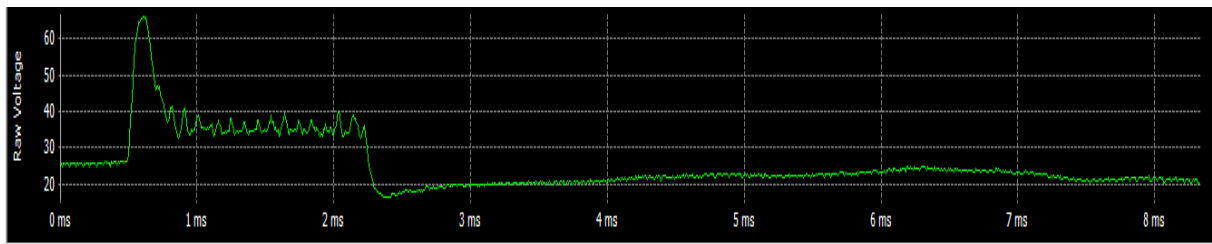


Fonte: AUTORES (2025)

O corpo de prova 7 (CP7) apresentou comportamento característico em relação às variáveis acompanhadas durante o processo. Conforme ilustrado na Figura 63, a

tensão do arco iniciou-se em torno de 20 V, apresentando um pico acentuado entre 0,5 ms e 1 ms, quando atingiu aproximadamente 60 V. Em seguida, ocorreram oscilações rápidas entre 30 e 40 V até cerca de 2 ms. A partir desse ponto, a tensão reduziu-se gradualmente, estabilizando-se na faixa de 18 a 20 V e mantendo-se constante até o final do registro.

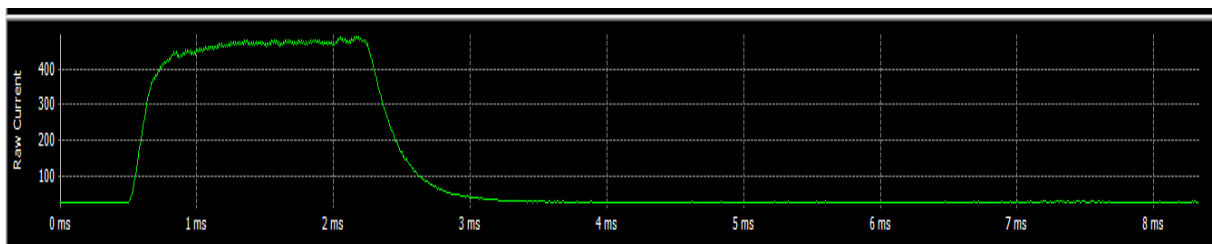
Figura 63- Tensão do arco do CP7



Fonte: AUTORES (2025)

A corrente de soldagem, apresentada na Figura 64, manteve-se inicialmente próxima de zero, elevando-se rapidamente após aproximadamente 0,5 ms e atingindo valores em torno de 450 a 480 A, que permaneceram sustentados até cerca de 2 ms. Após esse intervalo, observou-se um declínio relativamente rápido, seguido de estabilização em níveis baixos, próximos de zero, a partir do terceiro milissegundo até o final do registro.

Figura 64- Corrente de soldagem do CP7

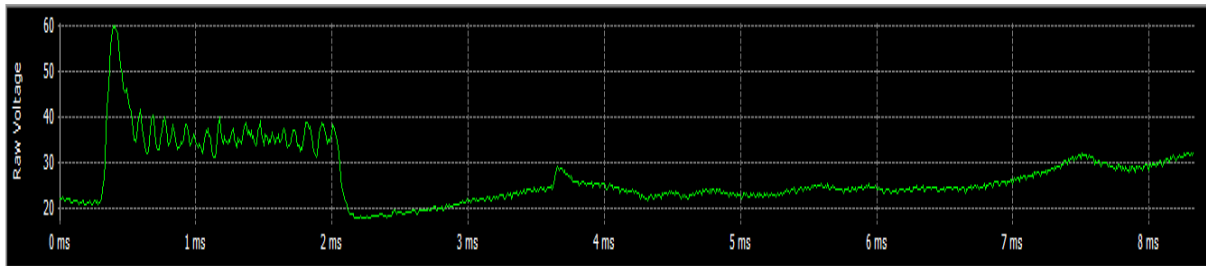


Fonte: AUTORES (2025)

O corpo de prova 8 (CP8) apresentou comportamento típico em relação às variáveis analisadas ao longo do processo. Conforme ilustrado na Figura 65, a tensão do arco iniciou-se próxima de 0 ms, apresentando um aumento rápido que atingiu cerca de 60 V. Em seguida, observou-se a ocorrência de oscilações, culminando em

uma estabilização em torno de 30 V a partir de aproximadamente 2 ms. Após esse ponto, a tensão manteve-se relativamente estável, apresentando apenas pequenas variações até o final do registro.

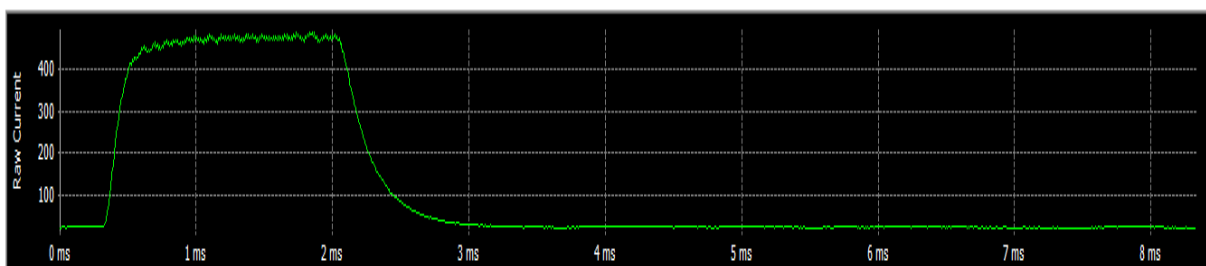
Figura 65- Tensão do arco do CP8



Fonte: AUTORES (2025)

A corrente de soldagem, apresentada na Figura 66, exibiu comportamento semelhante ao observado em outras amostras, iniciando com um aumento rápido que atingiu aproximadamente 400 A por volta de 1 ms. Logo após, verificou-se uma queda acentuada da corrente, que se estabilizou em níveis baixos, próximos de zero, a partir de aproximadamente 2 ms e manteve-se assim até o final do registro.

Figura 66- Corrente de soldagem do CP8



Fonte: AUTORES (2025)

A coleta dos dados de tensão do arco e corrente de soldagem, realizada por meio do software Power Wave Manager, evidencia o comportamento típico do modo pulsado. Os valores registrados se mantiveram muito próximos dos parâmetros previamente configurados na fonte, indicando estabilidade e precisão no controle do processo.

3.7.5 Preparação metalográfica

Após o processo de brasagem, os corpos de prova foram submetidos a um corte em máquina Cut-Off, conforme a figura 67, com o objetivo de ajustar suas dimensões de acordo com os requisitos necessários para o processo de embutimento subsequente.

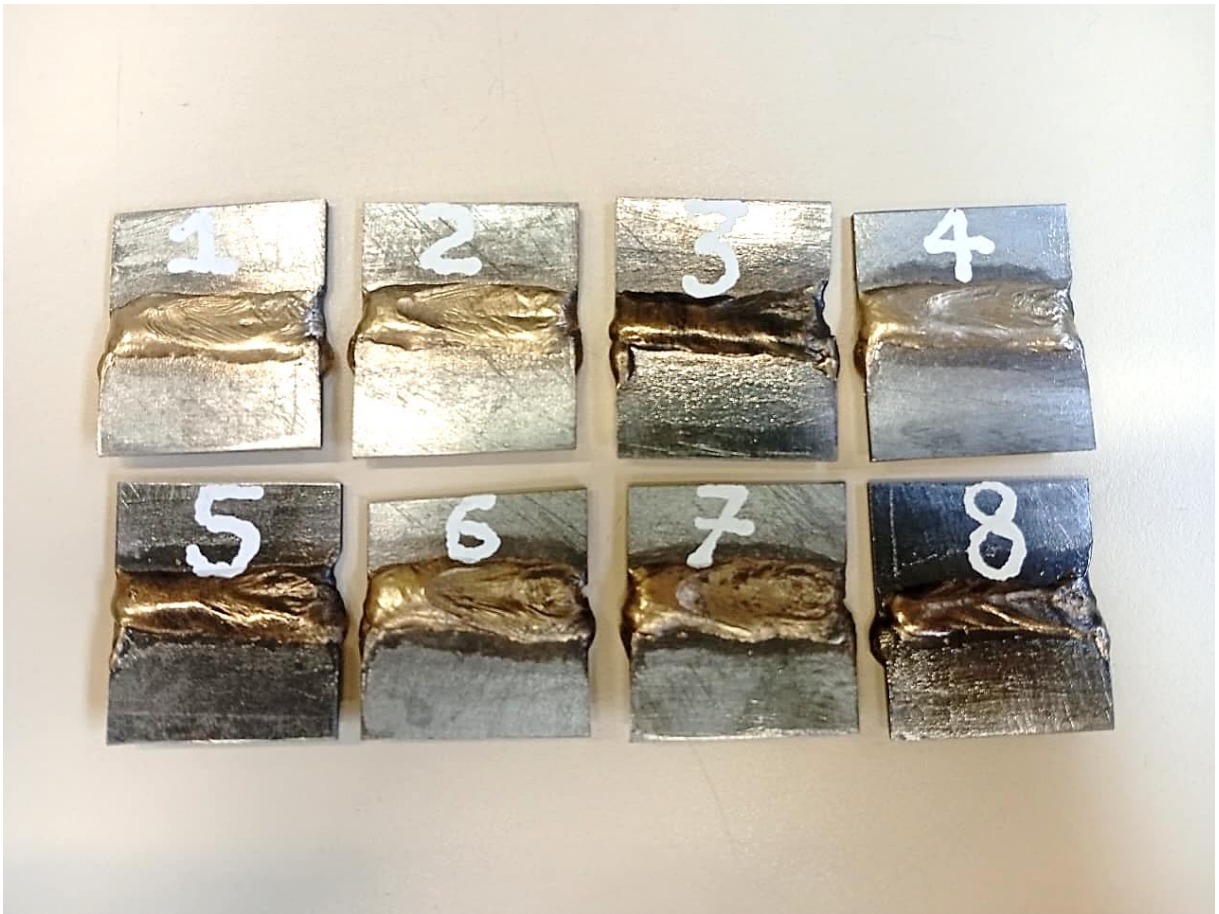
Figura 67- Corte feito em uma Cut-Off para o embutimento



Fonte: AUTORES (2025)

Em seguida, os corpos de prova foram devidamente identificados por meio de marcações, assegurando o controle de cada amostra para a etapa de embutimento, conforme ilustrado na Figura 68. Neste momento, executou-se o ensaio visual de soldagem seguindo os critérios de aceitação do AWS D1.1 (2020).

Figura 68- Corpos de prova identificados para o embutimento



Fonte: AUTORES (2025)

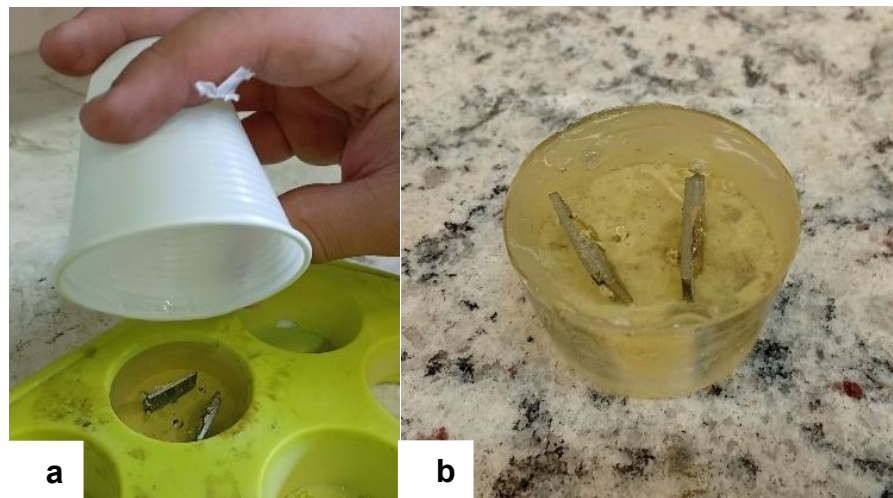
3.7.6 Embutimento metalográfico

O embutimento foi realizado a frio, empregando resina epóxi e catalisador na proporção de 2:1.

Durante o preparo, a mistura foi cuidadosamente homogeneizada e vertida sobre os corpos de prova previamente posicionados em moldes metálicos, garantindo o preenchimento completo(a), conforme a Figura 69.

Após o período de cura, as amostras foram removidas dos moldes (b), apresentando acabamento uniforme e firmeza adequada para as etapas seguintes de lixamento, polimento e análise macro e microscópica.

Figura 69- Procedimento de embutimento metalográfico e desmolde de corpos de prova



Fonte: AUTORES (2025)

3.7.7 Lixamento

Depois do embutimento, as amostras passaram por lixamento sequencial, começando na lixa 180 para remover as irregularidades iniciais e avançando pelas gramaturas 240, 320, 400, 600 e 1200, que foram refinando a superfície de forma progressiva. As lixas foram mantidas úmidas para evitar o aquecimento excessivo do material. Ao final, essa preparação deixou a superfície uniforme e pronta para o polimento e para a análise macroestrutural.

Figura 70- Lixamento dos corpos de prova



Fonte: AUTORES (2025)

Após o lixamento, os corpos de prova foram submetidos ao processo de polimento, etapa essencial para eliminar as marcas deixadas pelas lixas e proporcionar uma superfície espelhada e livre de deformações, adequada para a análise metalográfica.

3.7.8 Polimento

O método utilizou um feltro de polimento em rotação controlada, com lubrificação contínua de álcool. As pastas abrasivas de alumina foram utilizadas em duas fases: inicialmente a de 3 micra (μm) para remover riscos residuais, e posteriormente a de 1 micra (μm), conforme apresentado na Figura 71.

Figura 71- Polimento dos corpos de prova



Fonte: AUTORES (2025)

Após preparados e polidos, os corpos de prova passaram pelo teste de macrografia. Posteriormente, foram realizados os testes de microdureza e espectrometria para análise química.

Para aprofundar a interpretação desses dados, foi aplicado o coeficiente de correlação de Pearson, a fim de verificar se existia correlação linear entre as propriedades mecânicas analisadas e os efeitos decorrentes do processo de brasagem. O coeficiente foi determinado utilizando a seguinte expressão matemática representada pela Equação 2, deste trabalho:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

onde r representa o coeficiente de correlação, x_i e y_i são os valores individuais de cada variável estudada, e $\bar{x}$ e $\bar{y}$ correspondem às médias de cada conjunto de dados.

Esse procedimento permitiu identificar tendências, relações diretas ou inversas entre as variáveis e possíveis padrões ocultos que não seriam percebidos apenas pela observação isolada dos ensaios.

A utilização dessa análise estatística reforça a interpretação dos resultados experimentais, contribuindo para uma visão mais sólida sobre o comportamento das juntas brasadas e sua resposta mecânica.

Também foi realizado o cálculo de diluição para analisar a proporção entre o metal base e o metal de adição presente na zona fundida.

Essa avaliação é fundamental para compreender o grau de mistura ocorrido durante o processo, uma vez que a composição final da junta influencia diretamente seu comportamento mecânico e metalúrgico. A diluição foi determinada pela expressão apresentada na Equação 3:

$$D = \frac{B}{A + B} \times 100 \quad (3)$$

Onde B representa a área fundida pertencente ao metal base, e A corresponde à área do metal de adição incorporada à poça de fusão. O resultado, será expresso em porcentagem, logo adiante.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ensaio Visual

O ensaio visual foi conduzido de forma criteriosa, considerando possíveis trincas, porosidades, fissuras, inclusões ou irregularidades superficiais, não sendo identificada nenhuma anomalia. Os resultados da inspeção visual estão apresentados na Tabela 8, que foi ajustada para incluir apenas os itens relevantes para este estudo.

Tabela 8- Categoria da descontinuidade e critérios da inspeção visual

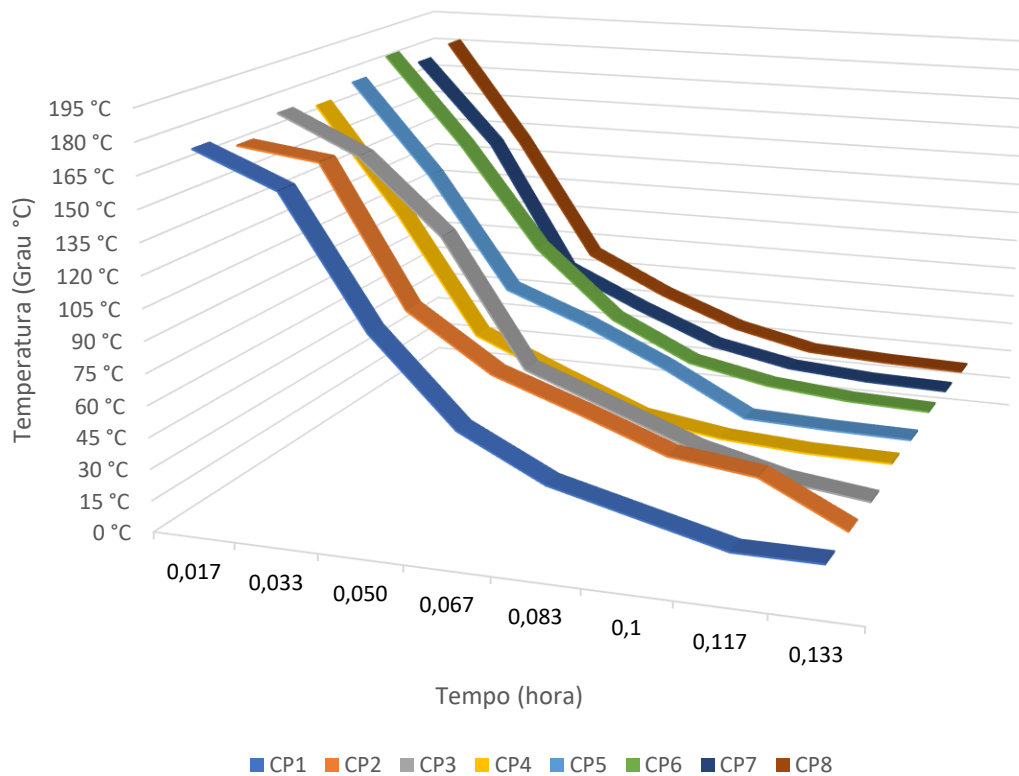
INSPEÇÃO VISUAL	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8
(1) Proibição de Trincas	C	C	C	C	C	C	C	C
(2) Fusão entre metal base e solda	C	C	C	C	C	C	C	C
(3) Crateras	C	C	C	C	C	C	C	C
(4) Perfil das soldas	C	C	C	C	C	C	C	C
(5) Período de Inspeção	C	C	C	C	C	C	C	C
(6) Soldas Subdimensionadas	C	C	C	C	C	C	C	C
(7) Mordedura	C	C	C	C	C	C	C	C
(8) Porosidade: Item (B)	C	C	C	C	C	C	C	C

- De acordo com a normativa: “C” indicam os itens conformes, e “NC” não conformes.

Fonte: AUTORES (2025), conforme critérios da norma AWS D.1/D1.1 (2020)

4.1.2 Taxa de Resfriamento

Conforme apresentado no Gráfico 1, as taxas de resfriamento dos corpos de prova diminuem progressivamente ao longo das amostras. Os primeiros corpos de prova apresentam as maiores velocidades de dissipação térmica, caracterizando um resfriamento significativamente mais acelerado.

Gráfico 1- Taxa de resfriamento dos corpos de prova

Fonte: AUTORES (2025)

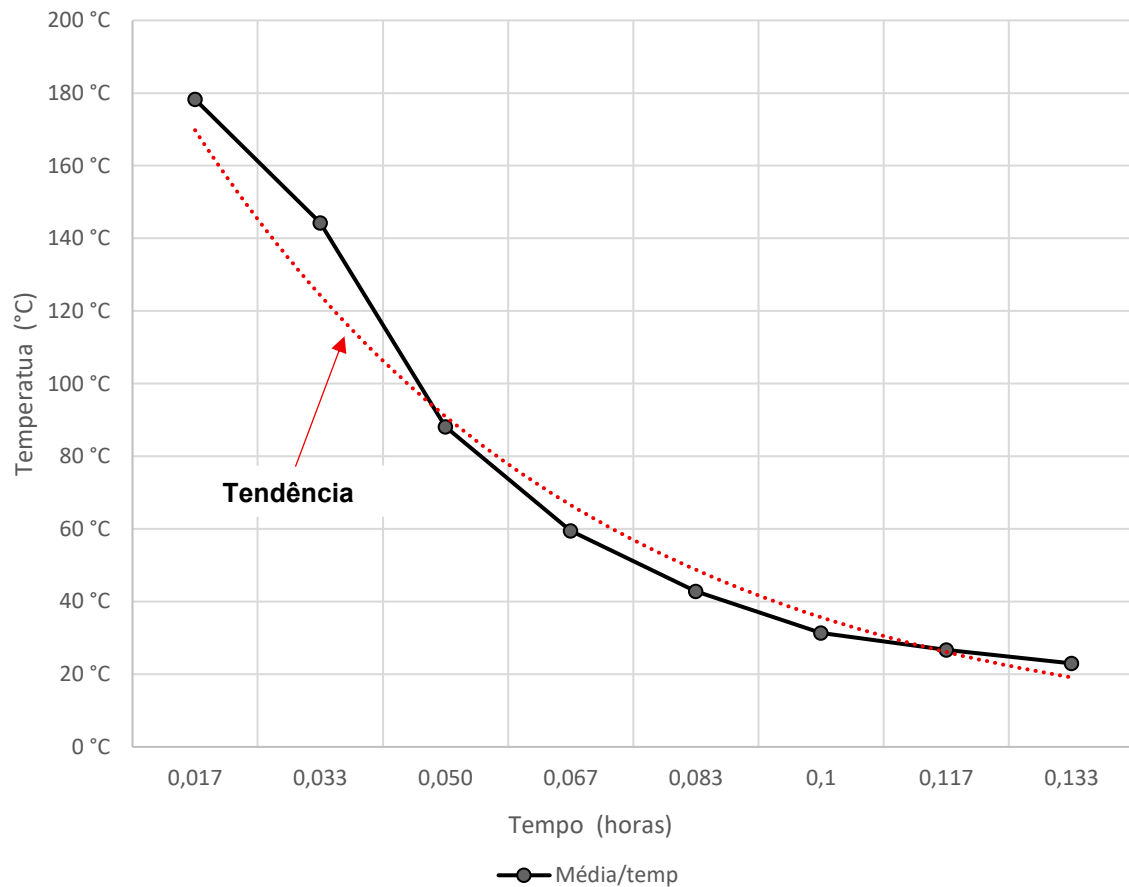
Observou-se que todos os corpos de prova apresentaram uma tendência geral semelhante: a temperatura inicial é elevada, seguida por uma queda acentuada nas primeiras frações de hora. Esta queda sugere uma rápida dissipação térmica. O tempo inicial (0,017 hora) corresponde aproximadamente a 1 minuto, o que evidencia que a redução de temperatura é mais notável nos primeiros minutos.

O CP1, representado pela curva azul, mostrou uma maior queda de temperatura entre os corpos de prova, o que pode indicar maior sensibilidade térmica ou menor capacidade de retenção de calor em relação aos demais.

CP2 a CP8 apresentam quedas mais graduais, sugerindo que esses corpos de prova retêm calor por mais tempo ou apresentam menor taxa de dissipação térmica.

O CP8 (curva marrom) parte de uma temperatura inicial ligeiramente superior comparada aos demais, mas acompanhou a tendência geral do grupo, com uma queda progressiva.

No Gráfico 2, observa-se uma média das temperaturas dos 8 corpos de prova.

Gráfico 2- Média das temperaturas dos corpos de prova

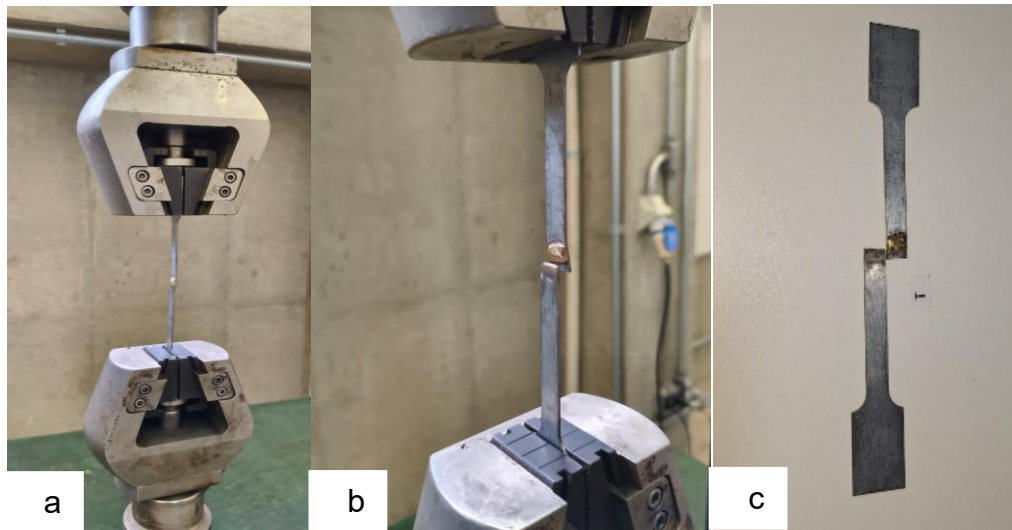
Fonte: AUTORES (2025)

4.1.3 Ensaio de Tração

Durante os ensaios de tração, observou-se que os corpos de prova apresentaram comportamentos mecânicos distintos, resultando em valores específicos de resistência e deformação onde foram convertidos através do cálculo de tensão, que é a força dividida pela área do material.

No caso do corpo de prova 1 (CP1), conforme ilustrado na Figura 72, em que (a) mostra o corpo de prova fixado na garra, (b) apresenta o corpo de prova rompido e (c) exhibe o CP1 após a tração verificou-se que a fratura ocorreu na região da solda, sob uma tensão máxima de 297 Mpa.

Figura 72- Corpo de prova 1 (CP1) após o ensaio de tração, evidenciando a região de fratura

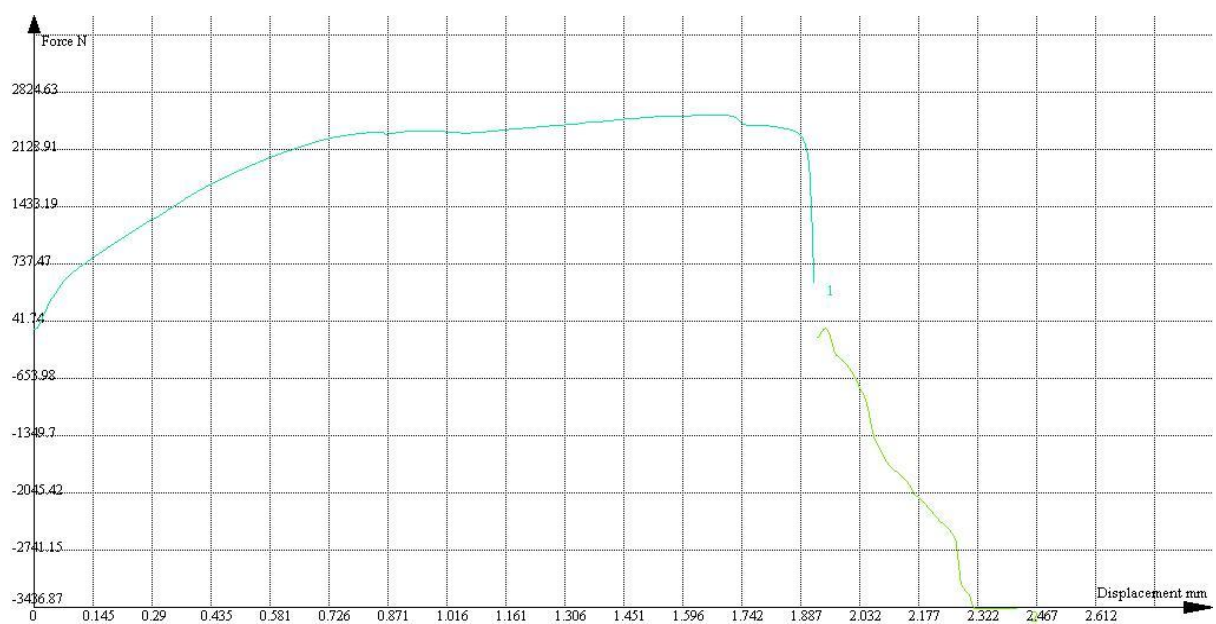


Fonte: AUTORES (2025)

O comportamento do CP1 durante o ensaio pode ser melhor compreendido por meio da Figura 73, que representa a relação entre a tensão e a deformação ao longo do processo de tração.

Observa-se no gráfico o aumento gradual da tensão até atingir o ponto máximo, seguido pela queda brusca que indica a ruptura do material, caracterizando o limite de resistência da amostra.

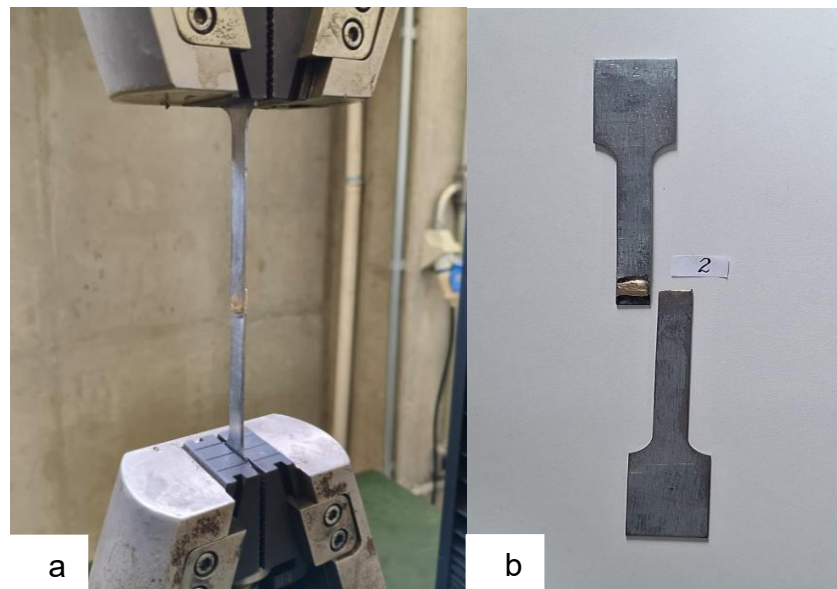
Figura 73- Tração CP1



Fonte: AUTORES (2025)

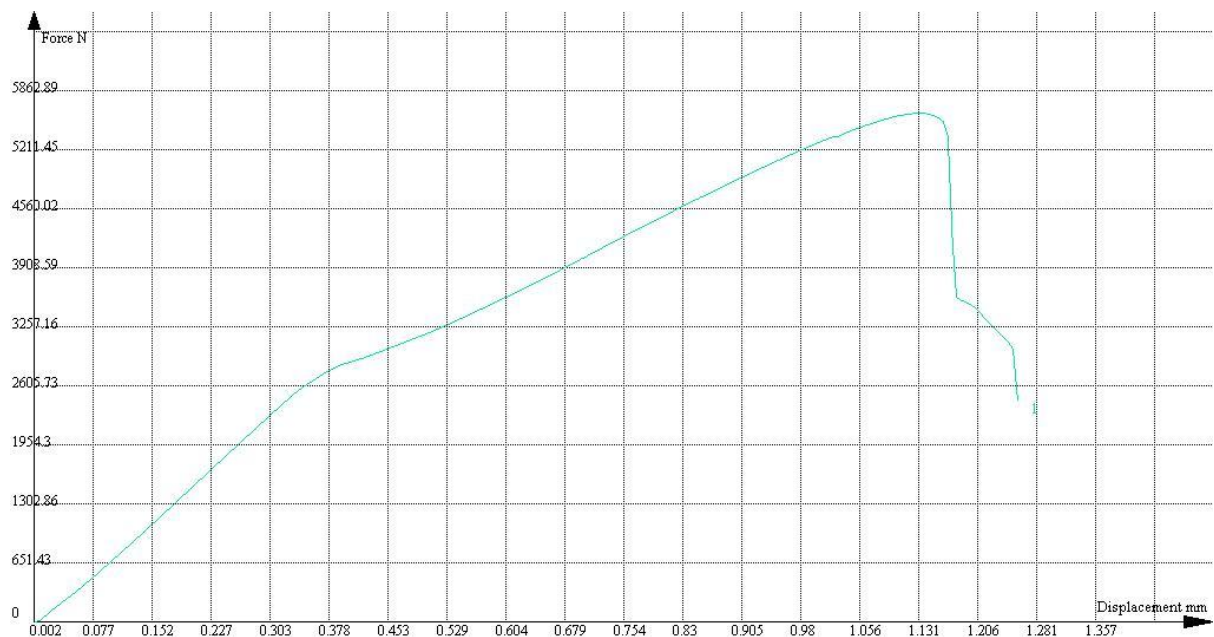
O corpo de prova 2 (CP2) rompeu-se sob uma tensão de 268 MPa, conforme ilustrado na Figura 74, em que (a) mostra o corpo de prova fixado na garra e (b) apresenta o corpo de prova após a ruptura, além de estar representado na Figura 76.

Figura 74- Corpo de prova 2 (CP2)



Fonte: AUTORES (2025)

Figura 75- Tração CP2



Fonte: AUTORES (2025)

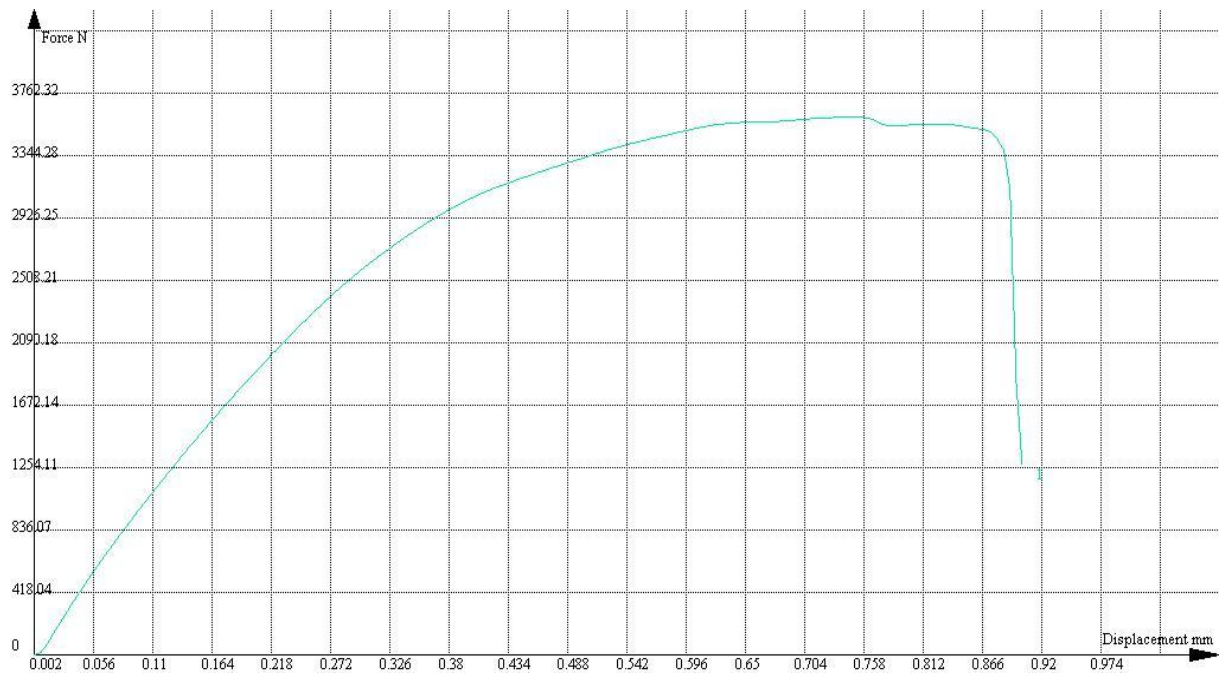
O corpo de prova 3 (CP3) rompeu sob uma tensão de 176 MPa, conforme ilustrado nas Figuras 76 e 77.

Figura 76- Corpo de prova 3 (CP3)



Fonte: AUTORES (2025)

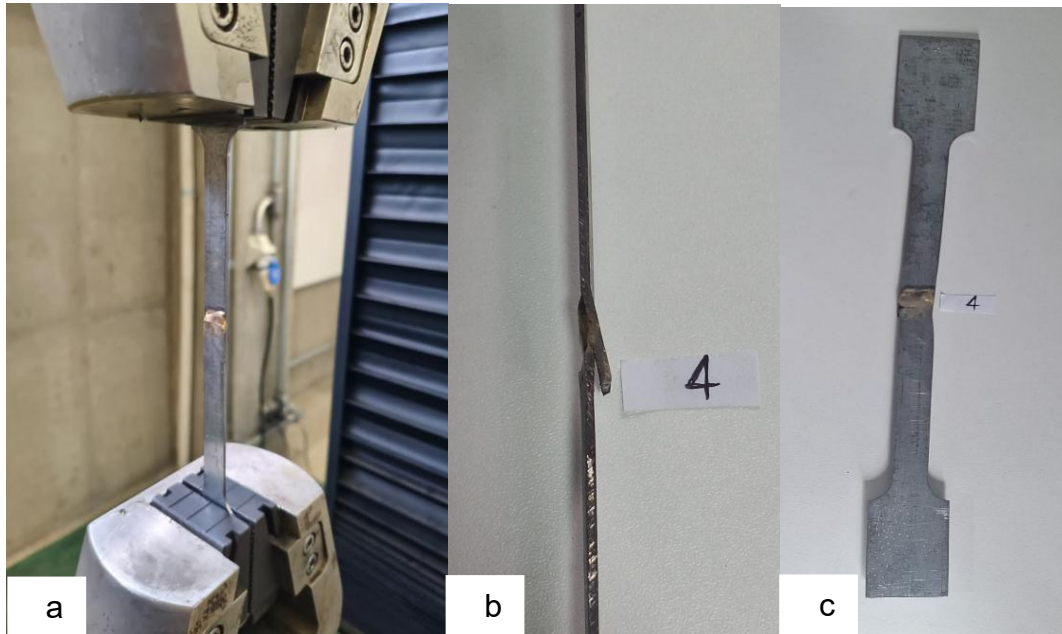
Figura 77- Tração CP3



Fonte: AUTORES (2025)

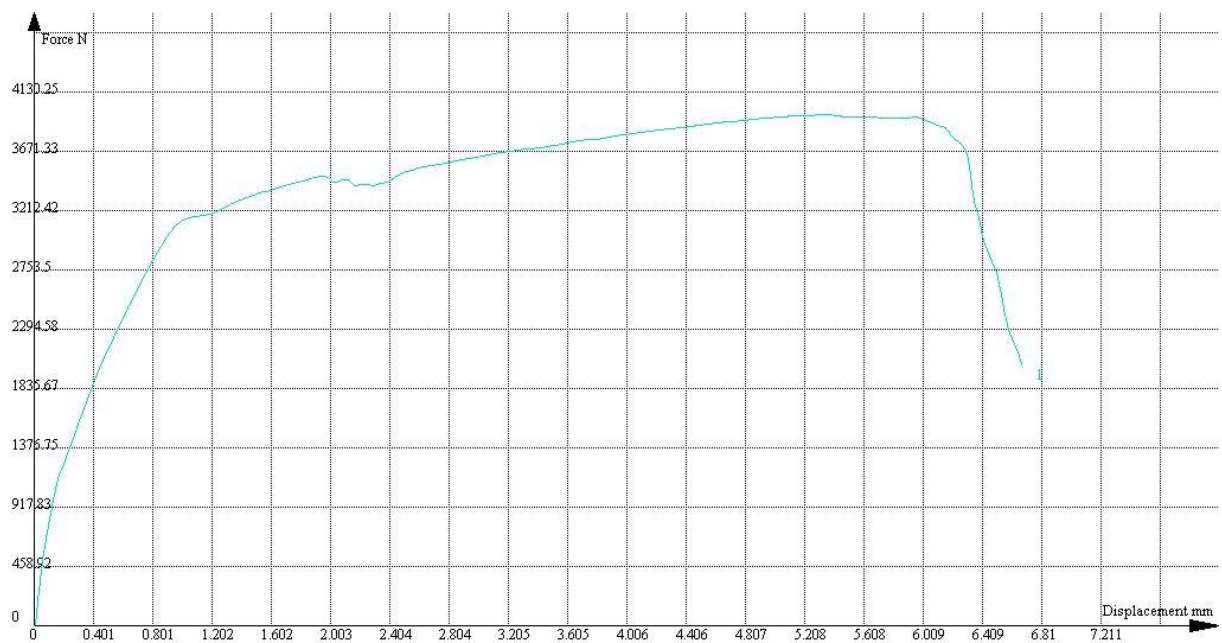
O corpo de prova 4 (CP4) rompeu sob uma tensão de 186 MPa, conforme ilustrado nas Figuras 78 e 79.

Figura 78- Corpo de prova 4 (CP4)



Fonte: AUTORES (2025)

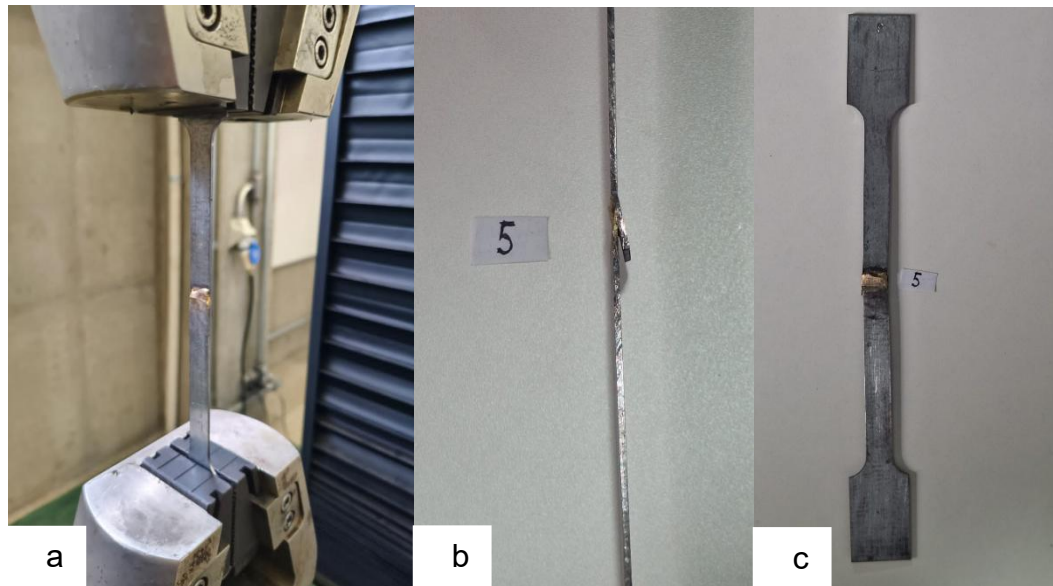
Figura 79- Tração CP4



Fonte: AUTORES (2025)

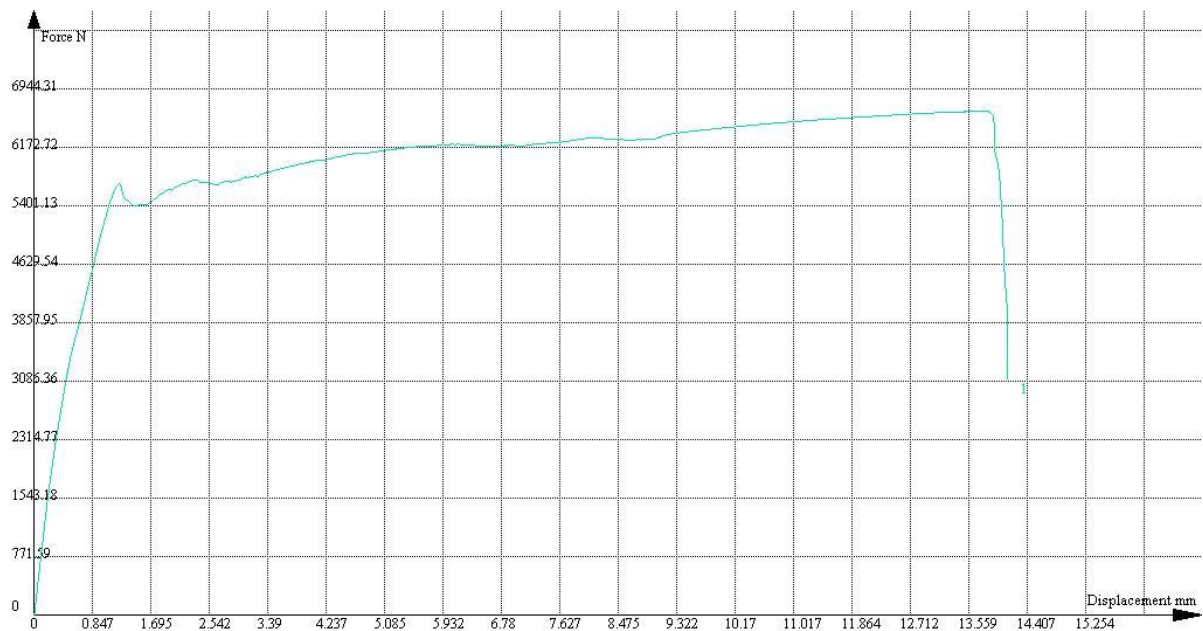
O corpo de prova 5 (CP5) rompeu sob uma tensão de 322 MPa, conforme ilustrado nas Figuras 80 e 81.

Figura 80- Corpo de prova 5 (CP5)



Fonte: AUTORES (2025)

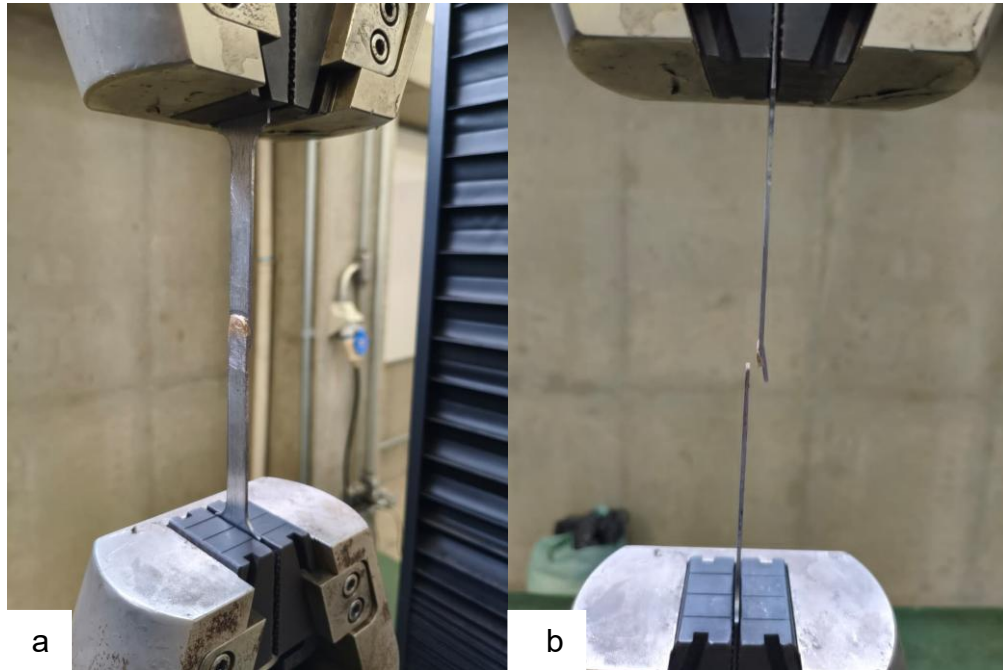
Figura 81- Tração CP5



Fonte: AUTORES (2025)

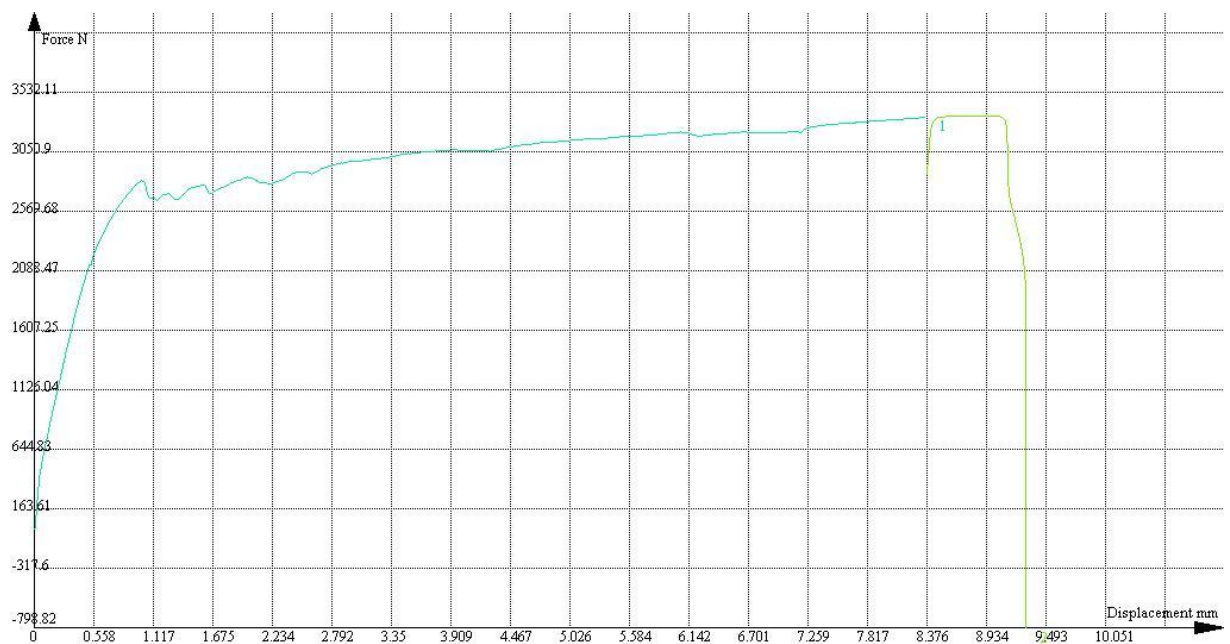
O corpo de prova 6 (CP6) rompeu sob uma tensão de 165 MPa, conforme ilustrado nas Figuras 82 e 83.

Figura 82- Corpo de prova 6 (CP6)



Fonte: AUTORES (2025)

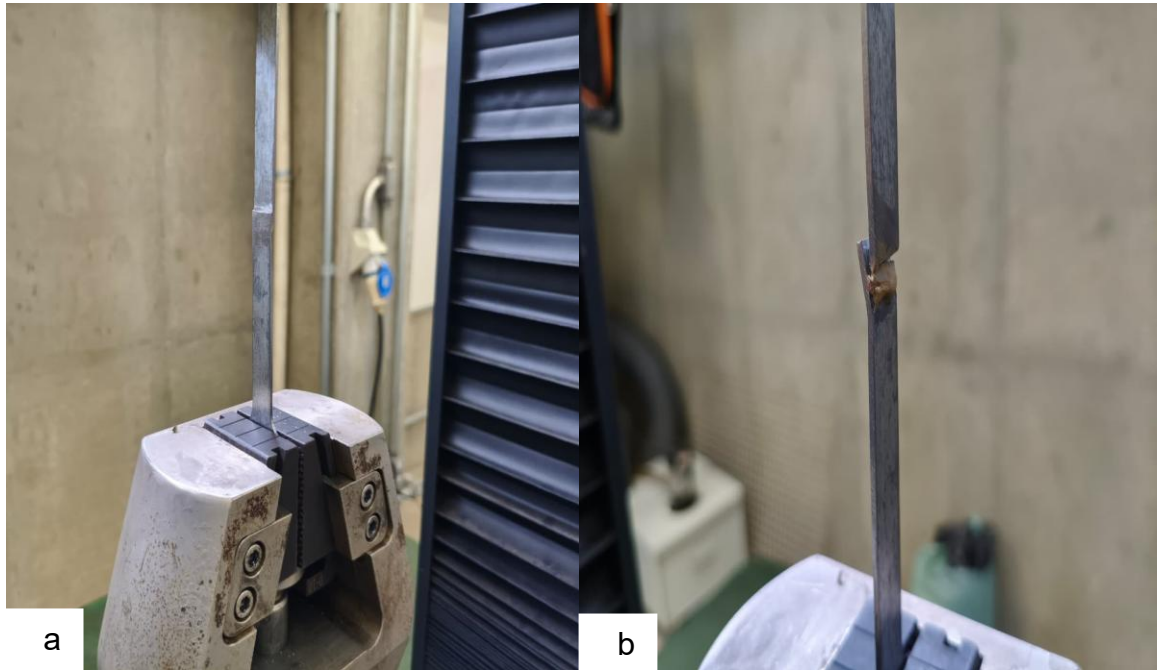
Figura 83- Tração CP6



Fonte: AUTORES (2025)

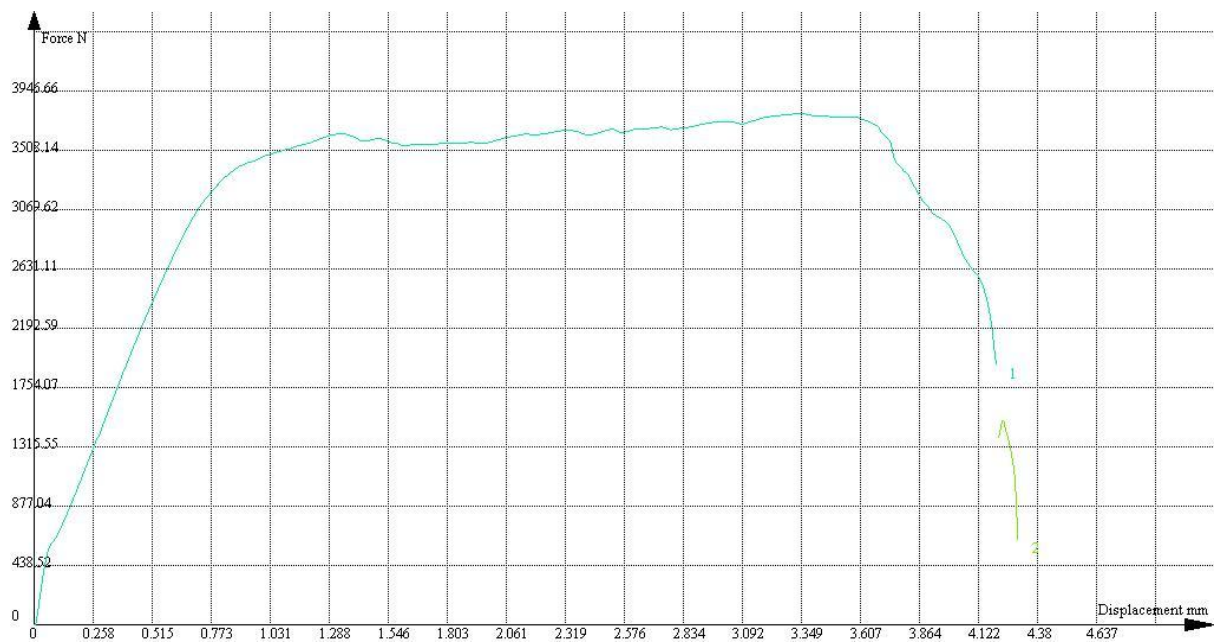
O corpo de prova 7 (CP7) rompeu sob uma tensão de 176 MPa, conforme ilustrado nas Figuras 84 e 85.

Figura 84- Corpo de prova 7 (CP7)



Fonte: AUTORES (2025)

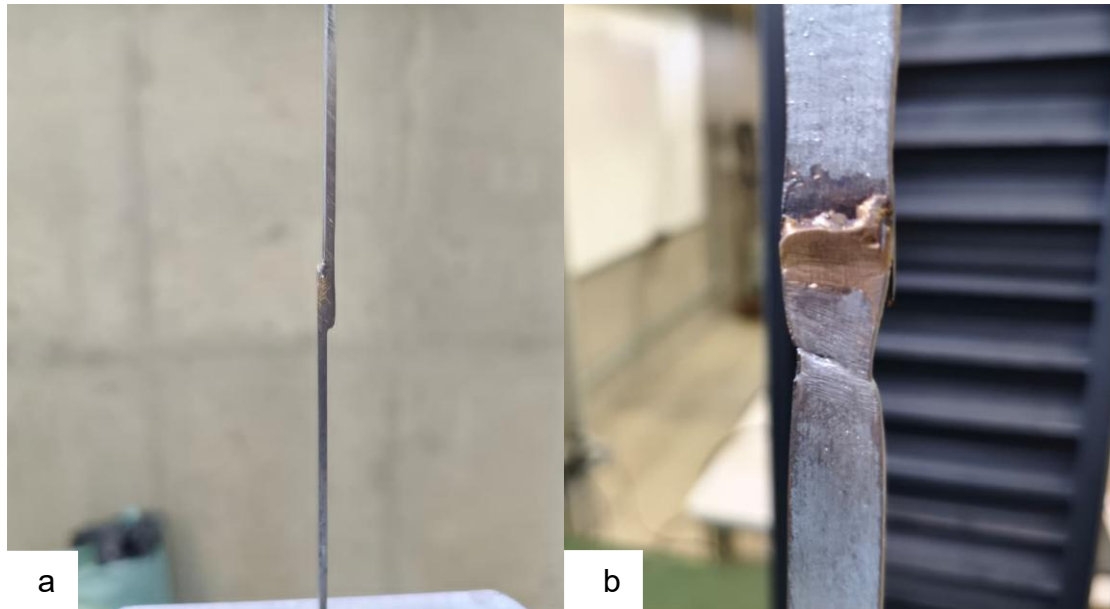
Figura 85- Tração CP7



Fonte: AUTORES (2025)

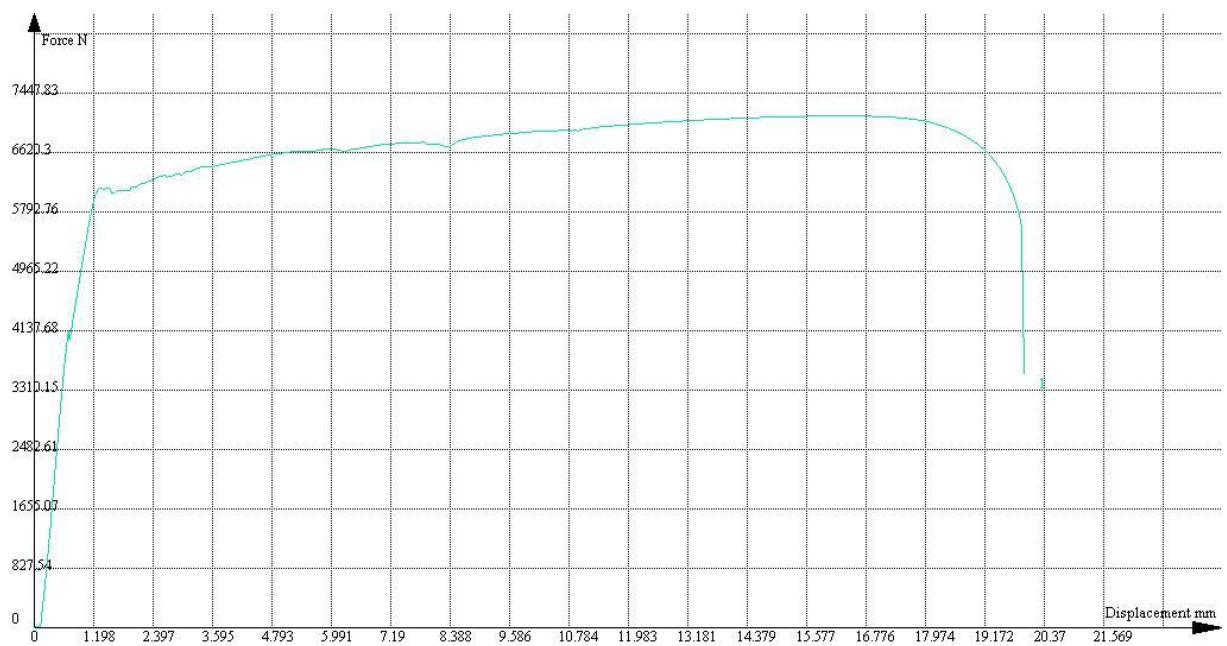
O corpo de prova 8 (CP8) rompeu sob uma tensão de 343 MPa, conforme ilustrado nas Figuras 86 e 87.

Figura 86- Corpo de prova 8 (CP8)



Fonte: AUTORES (2025)

Figura 87- Tração CP8



Fonte: AUTORES (2025)

Com base nos dados apresentados anteriormente, a Tabela 9 a seguir apresentam os resultados obtidos dos 8 corpos de prova. Os rompimentos ocorreram na linha de ligação entre a solda e metal de base, para a maioria dos corpos de prova, exceto o CP 8, obteve a ruptura no metal de base, o que refletiu em uma maior deformação após o ensaio.

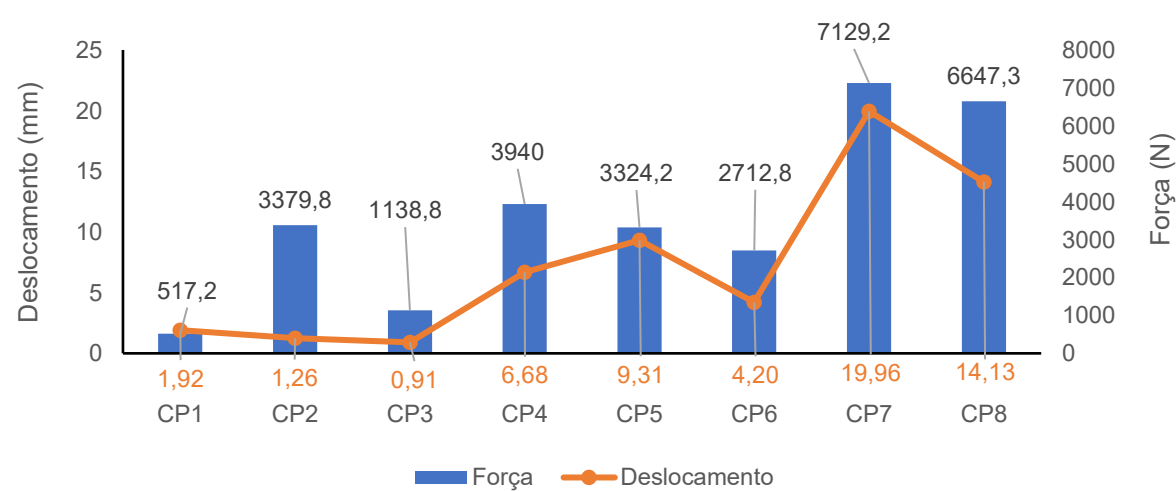
Tabela 9- Dados dos testes de tração

Peças	Força (N)	Deslocamento (mm)	Deformação (%)	Tempo (s)
CP1	517,2	1,9191	0,008	23,2
CP2	3379,8	1,2615	0,005	15,2
CP3	1138,8	0,9061	0,004	10,9
CP4	3940	6,6817	0,027	80,3
CP5	3324,2	9,3122	0,037	100,5
CP6	2712,8	4,2049	0,017	50,6
CP7	7129,2	19,956	0,079	240
CP8	6647,3	14,1289	0,056	169,8
Média	3598,7	7,2963	0,029	86,3

Fonte: AUTORES (2025)

No Gráfico 3 é demonstrado a relação entre a força e o deslocamento.

Gráfico 3- Dados dos testes de tração



Fonte: AUTORES (2025)

4.1.4 Ensaio de Microdureza (HV)

No ensaio de microdureza Vickers (HV 0,05), foi observada uma variação nos valores medidos em cada corpo de prova, tanto na região do metal de base quanto na zona de fundida. No Anexo A, são mostrados os pontos onde a junta foi perfurada pelo penetrador do equipamento durante a realização das medições, permitindo visualizar a distribuição das indentações ao longo da região analisada.

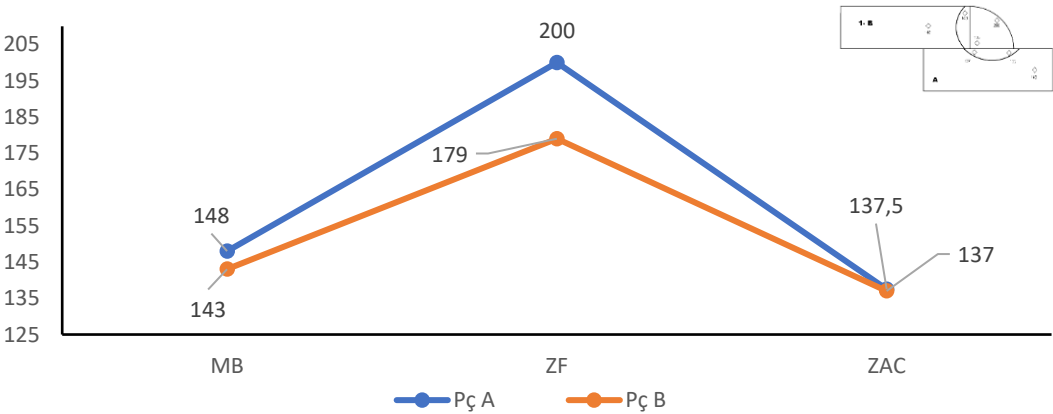
A fim de compreender de forma mais clara o comportamento da dureza nos corpos de prova, os dados obtidos no ensaio foram organizados em Tabelas e Gráficos, permitindo uma visualização mais completa e facilitando a interpretação dos resultados. A Tabela 10 e o Gráfico 4 apresentam, então, os valores de dureza obtidos para o corpo de prova 1 (CP1). A ZF na altura da Peça A, apresentou um valor de dureza de 200 HV onde o estimado pelo ASME II Parte C SFA 5.7 (2023) é de 130 a 150 HV.

Tabela 10- Resultados de microdureza CP1

CP1	MB	ZF	ZAC
Pç A	148 HV	200 HV	137,5 HV
Pç B	143 HV	179 HV	137 HV

Fonte: AUTORES (2025)

Gráfico 4- Microdureza CP1



Fonte: AUTORES (2025)

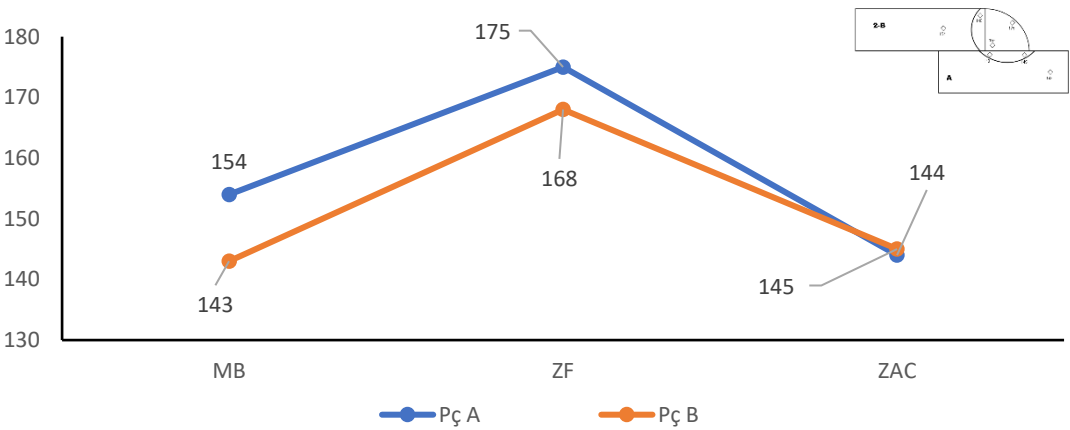
A Tabela 11 e o Gráfico 5 apresentam os resultados de dureza obtidos para o corpo de prova 2 (CP2), onde a ZF apresentou os maiores valores.

Tabela 11- Resultados de microdureza CP2

CP2	MB	ZF	ZAC
Pç A	154 HV	175 HV	144 HV
Pç B	143 HV	168 HV	145 HV

Fonte: AUTORES (2025)

Gráfico 5- Microdureza CP2



Fonte: AUTORES (2025)

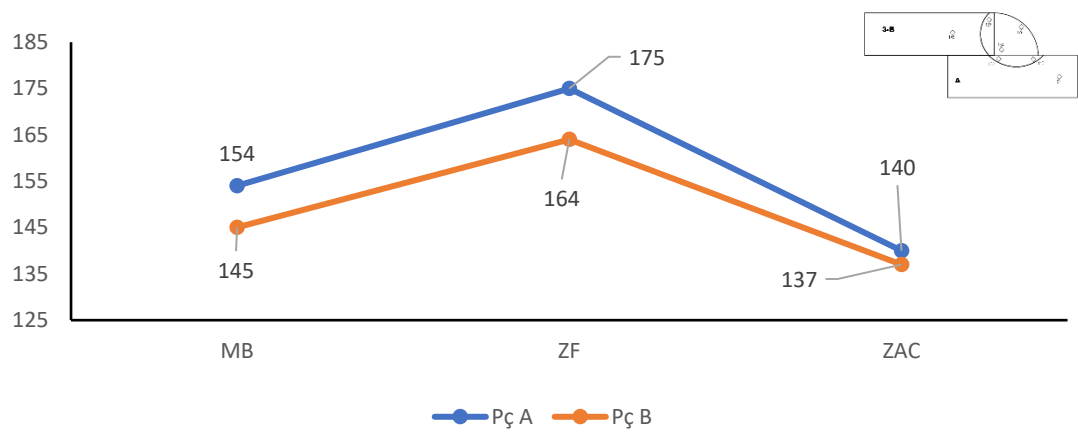
A Tabela 12 e o Gráfico 6 apresentam os resultados de dureza obtidos para o corpo de prova 3 (CP3) com valores mais significativos na ZF que chegaram a 175 HV na Peça A e 164 HV na Peça B. Tais valores superam os níveis de dureza estabelecido pelo código ASME II Parte C SFA 5.6 (2023).

Tabela 12- Resultados de microdureza CP3

CP3	MB	ZF	ZAC
Pç A	154 HV	175 HV	140 HV
Pç B	145 HV	164 HV	137 HV

Fonte: AUTORES (2025)

Gráfico 6- Microdureza CP3



Fonte: AUTORES (2025)

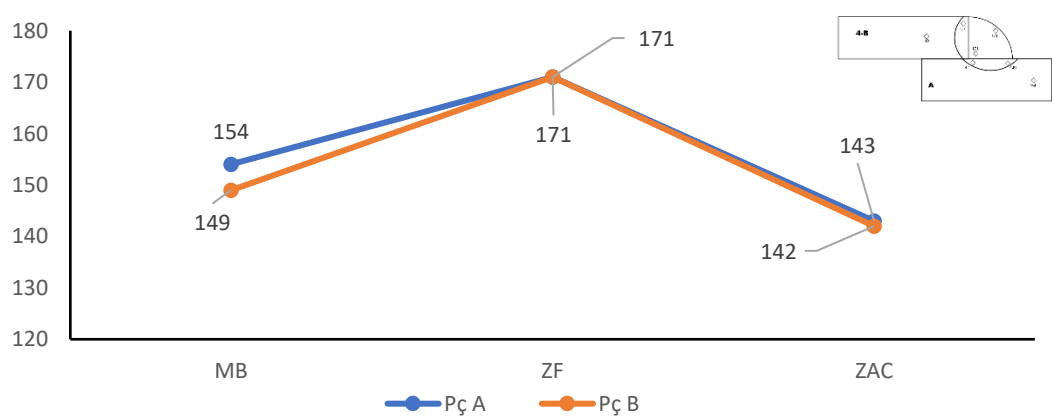
A Tabela 13 e o Gráfico 7 apresentam os resultados de dureza obtidos para o corpo de prova 4 (CP4), onde se observam valores sistemáticos elevados na ZF.

Tabela 13- Resultados de microdureza CP4

CP4	MB	ZF	ZAC
Pç A	154 HV	171 HV	143 HV
Pç B	149 HV	171 HV	142 HV

Fonte: AUTORES (2025)

Gráfico 7- Microdureza CP4



Fonte: AUTORES (2025)

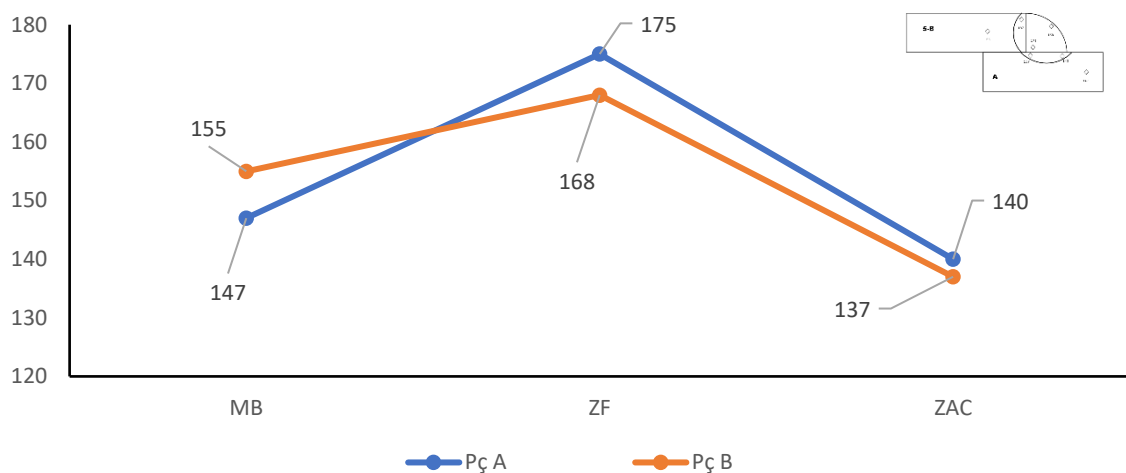
A Tabela 14 e o gráfico 8 apresentam os resultados de dureza obtidos para o corpo de prova 5 (CP5). Os valores superiores de dureza na zona fundida, continuam sendo os predominantes.

Tabela 14- Resultados de microdureza CP5

CP5	MB	ZF	ZAC
Pç A	147 HV	175 HV	140 HV
Pç B	155 HV	168 HV	137 HV

Fonte: AUTORES (2025)

Gráfico 8- Microdureza CP5



Fonte: AUTORES (2025)

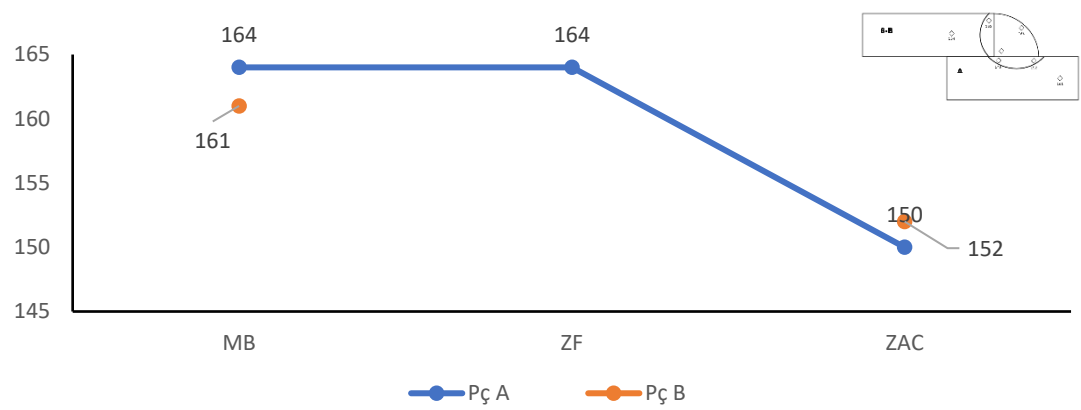
A Tabela 15 e o Gráfico 9 apresentam os resultados de dureza obtidos para o corpo de prova 6 (CP6). Os valores de dureza de ambas as partes analisadas, ficaram muito próximos, inclusive na região da ZF.

Tabela 15- Resultados de microdureza CP6

CP6	MB	ZF	ZAC
Pç A	164 HV	164 HV	150 HV
Pç B	161 HV	-	152 HV

Fonte: AUTORES (2025)

Gráfico 9- Microdureza CP6



Fonte: AUTORES (2025)

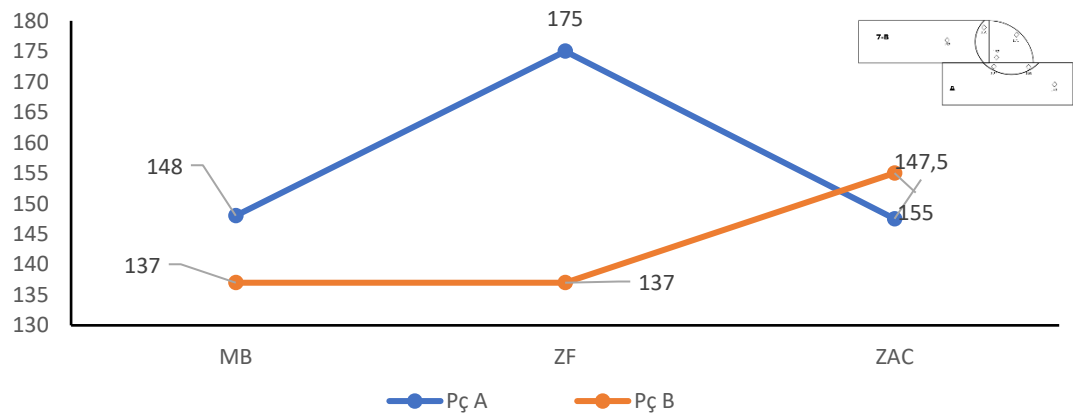
A Tabela 16 e o gráfico 10 apresentam os resultados de dureza obtidos para o corpo de prova 7 (CP7). Somente na Peça 2, um dos valores ficou dentro da faixa descrita no código ASME II Parte C SFA 5.7 (2023).

Tabela 16- Resultados de microdureza CP7

CP7	MB	ZF	ZAC
Pç A	148 HV	175 HV	147,5 HV
Pç B	137 HV	137 HV	155 HV

Fonte: AUTORES (2025)

Gráfico 10- Microdureza CP7



Fonte: AUTORES (2025)

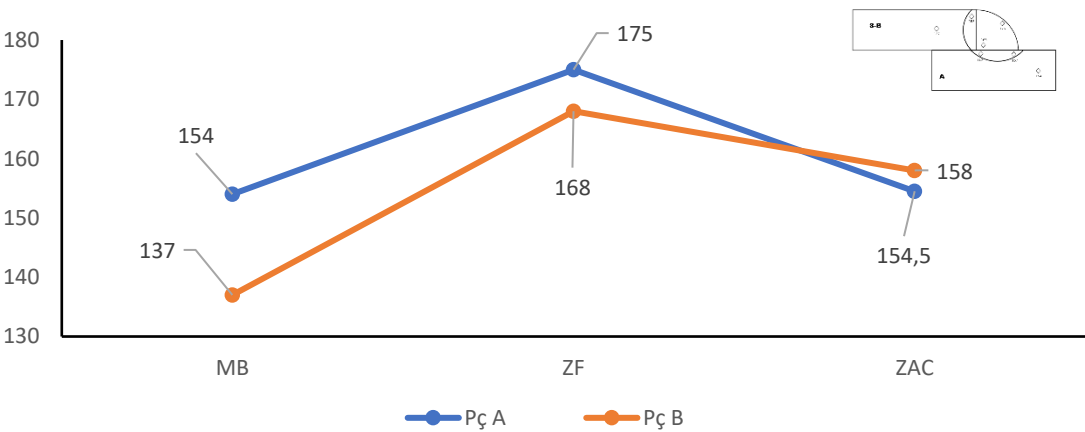
A Tabela 17 e o Gráfico 11 apresentam os resultados de dureza obtidos para o corpo de prova 8 (CP8). Os valores de dureza da ZF continuam elevados em ao código de referência utilizado para o consumível deste projeto.

Tabela 17- Resultados de microdureza CP8

CP8	MB	ZF	ZAC
Pç A	154 HV	175 HV	154,5 HV
Pç B	137 HV	168 HV	158 HV

Fonte: AUTORES (2025)

Gráfico 11- Microdureza CP8



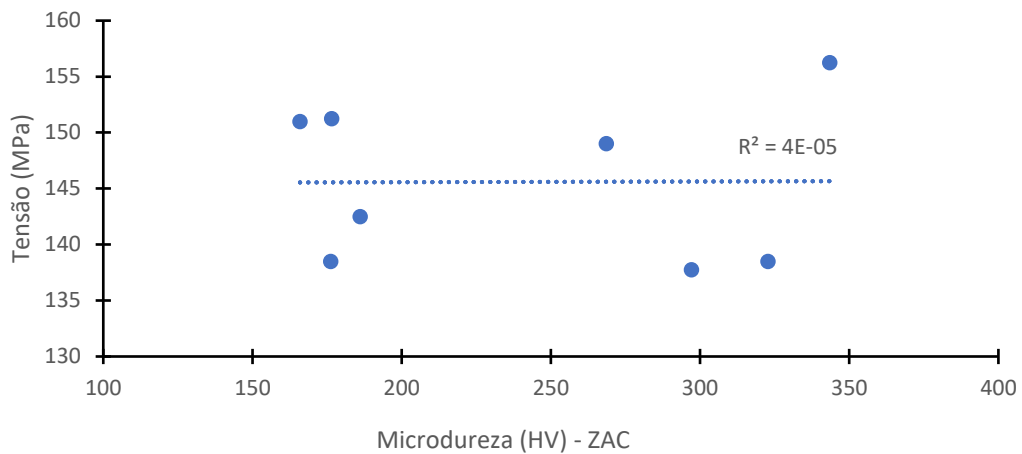
Fonte: AUTORES (2025)

Os Gráficos e Tabelas apresentados anteriormente reúnem, de forma organizada e comparativa, todos os resultados obtidos no ensaio de microdureza, permitindo uma análise mais profunda do comportamento da dureza tanto na junta sobreposta quanto na região da solda. A partir desses dados foi possível observar com clareza as variações de dureza entre as diferentes áreas avaliadas, destacando-se que a região da solda apresentou, de maneira consistente, os maiores valores de dureza entre todos os corpos de prova analisados.

Com o propósito de estabelecer eventuais relações entre os resultados de microdureza, foram elaborados gráficos específicos para cada região da junta. Onde permitiram observar como os valores de dureza se distribuem na ZAC, na ZF e no

MB, possibilitando identificar padrões que poderiam não ser perceptíveis apenas pela análise individual das tabelas. No Gráfico 12, é possível observar se existe uma correlação entre os valores de tensão e a microdureza obtida na região da ZAC, onde é possível observar que o valor de $R^2 = 4E-05$ confirma estatisticamente a ausência de correlação entre as propriedades analisadas, indicando que o aumento ou redução da microdureza não resulta em variações significativas na tensão obtida nos ensaios.

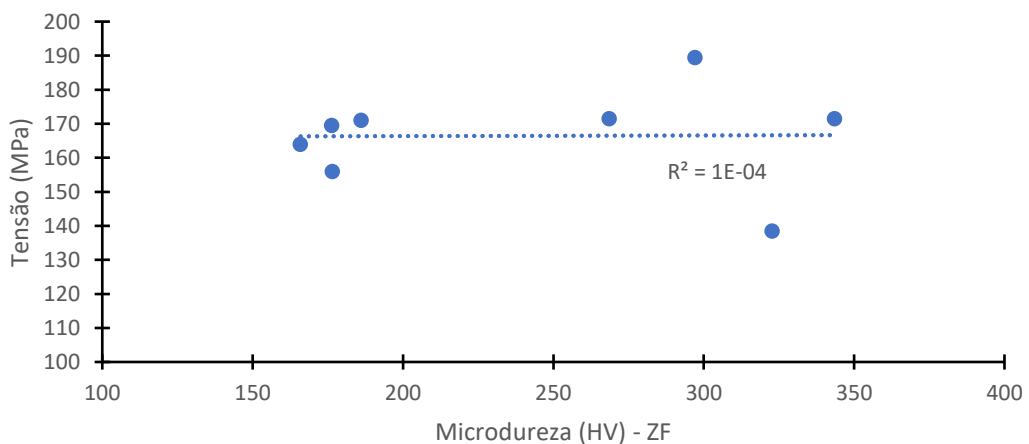
Gráfico 12- Correlação entre a Tensão e Microdureza na ZAC



Fonte: AUTORES (2025)

No Gráfico 13, observa-se o nível neutro de correlação entre os valores de tensão e a microdureza medida na região da ZF.

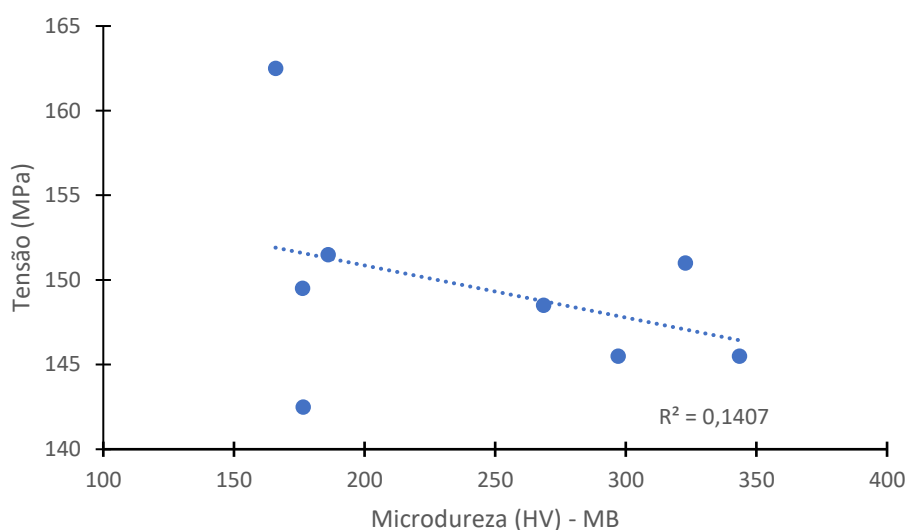
Gráfico 13- Correlação entre a Tensão e Microdureza na ZF



Fonte: AUTORES (2025)

No gráfico anterior, nota-se que o valor de $R^2 = 1E-04$ demonstra, de forma estatisticamente clara, que não há correlação entre as propriedades avaliadas. Isso significa que mudanças na microdureza não se refletiram nas variações relevantes nos valores de tensão obtidos nos ensaios mecânicos. No Gráfico 14, observa-se a relação entre os valores de tensão e a microdureza medida na região do MB.

Gráfico 14- Correlação entre a Tensão e Microdureza no MB



Fonte: AUTORES (2025)

No gráfico 14, nota-se que o valor de $R^2 = 0,1407$ demonstra uma pequena correlação negativa entre as propriedades avaliadas, como os resultados descritos anteriormente. Os dados obtidos ao longo das análises gráficas permitem concluir que nenhuma das variáveis avaliadas apresentou relação significativa com a resistência mecânica das juntas soldadas.

Em todos os gráficos construídos observou-se a mesma tendência: os pontos permaneceram dispersos, sem formação de padrões ou tendências lineares que indicassem qualquer tipo de correlação consistente. Essa ausência de relação ficou evidente pelos valores muito baixos de coeficiente de determinação (R^2) obtidos, reforçando que, dentro das condições estudadas, as variáveis analisadas não influenciaram de maneira direta ou previsível o comportamento mecânico final.

Os resultados do processo indicaram valores típicos de dureza para o metal de base (MB), variando entre 137 e 164 HV. Na zona fundida (ZF), os valores situaram-se entre 137 e 200 HV, enquanto a zona afetada pelo calor (ZAC) apresentou durezas entre 137 e 158 HV, com variações dependentes de cada corpo de prova e dos pontos específicos analisados. Esses comportamentos foram coerentes com o observado no estudo de Weis *et al.* (2022), que investigou a brasagem híbrida MIG-TIG utilizando arame CuSi3.

Nesse trabalho, o MB apresentou dureza em torno de 146 HV, enquanto a região de fusão atingiu valores superiores, chegando a aproximadamente 170 HV, efeito atribuído à maior concentração térmica, sem indícios de fragilização associada ao cobre. A ZAC, por sua vez, manteve durezas semelhantes ou inferiores às do MB, evidenciando a influência da expansão térmica e dos processos de recristalização.

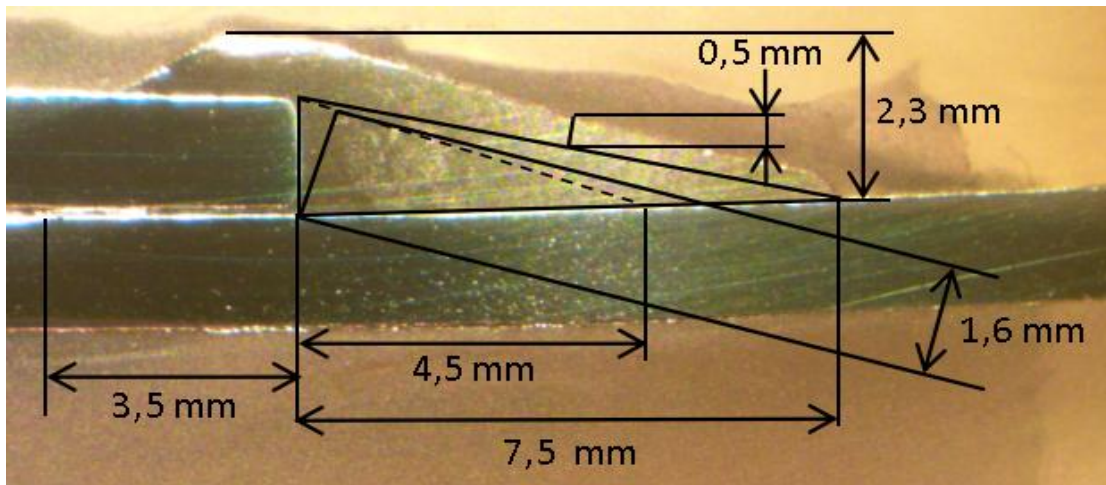
4.2 Caracterização Macrográfica

4.2.1 Determinação das Dimensões do Cordão de Solda e da ZAC

As dimensões dos cordões de solda e da Zona Afetada pelo Calor (ZAC) foram obtidas por meio do software Image J. Os valores registrados estão apresentados nas figuras a seguir, permitindo uma análise detalhada das características dimensionais das regiões estudadas.

No corpo de prova 1 (CP1), a solda apresentou uma garganta acima do ideal, com o maior nível de molhamento entre todos os corpos de prova, sem ocorrência de diluição, conforme ilustrado na Figura 88.

Figura 88- Macrografia da junta sobreposta soldada do CP1

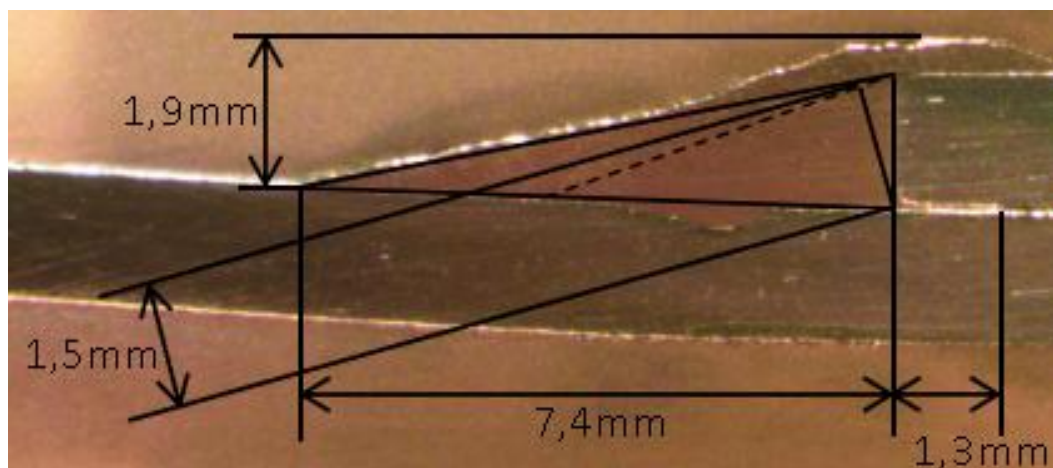


Fonte: AUTORES (2025)

As dimensões da região de sobreposição foram as seguintes: comprimento de 7,5 mm; comprimento ideal de 4,5 mm; molhamento de 3,5 mm; altura de 2,3 mm; garganta ideal de 1,6 mm; e reforço de solda de 0,5 mm.

No corpo de prova 2 (CP2), a solda apresentou garganta acima do ideal, sem formação de reforço, com o segundo maior nível de molhamento entre os corpos de prova e diluição de 3,3% no metal base A, conforme ilustrado na Figura 89.

Figura 89- Macrografia da junta sobreposta soldada do CP2



Fonte: AUTORES (2025)

As dimensões da região de sobreposição foram as seguintes: comprimento de 7,4 mm; molhamento de 1,3 mm; altura de 1,9 mm; garganta ideal de 1,5 mm.

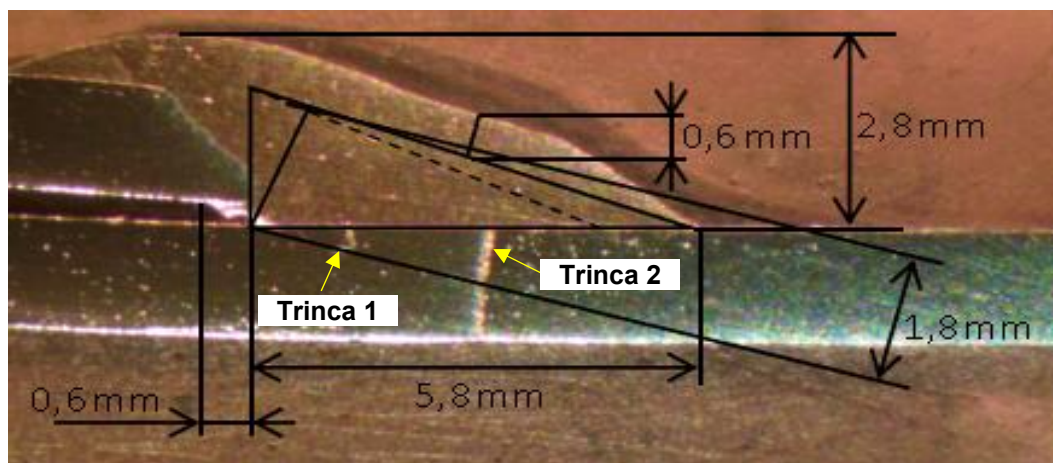
No corpo de prova 3 (CP3), a solda apresentou uma garganta acima do valor ideal, além de evidenciar pouco molhamento ao longo da junta. Foram identificadas duas trincas a quente no metal base A.

A formação dessas trincas está diretamente relacionada à diferença entre os pontos de fusão dos materiais envolvidos, fator essencial para compreender o mecanismo de trincamento induzido pelo aquecimento. O cobre utilizado no processo possui ponto de fusão de aproximadamente 1085 °C, enquanto o aço SAE 1005 apresenta um ponto de fusão muito mais elevado, variando entre 1480 °C e 1520 °C, valores típicos para aços de baixo carbono.

No caso do aço galvanizado, soma-se ainda a presença da camada de zinco, cujo ponto de fusão é consideravelmente mais baixo, cerca de 419 °C, intensificando ainda mais os gradientes térmicos durante a soldagem.

Essa diferença acentuada entre as temperaturas de fusão faz com que o cobre, ao atingir o estado líquido, se difunda e se aloje nos contornos de grão enquanto o aço ainda se encontra parcialmente sólido. Durante o resfriamento e a solidificação final, a incompatibilidade térmica e mecânica entre as fases gera tensões residuais nos contornos de grão, favorecendo a nucleação e propagação de trincas a quente. Essa condição foi observada no CP3 e é ilustrada na Figura 90.

Figura 90- Macrografia da junta sobreposta soldada do CP3

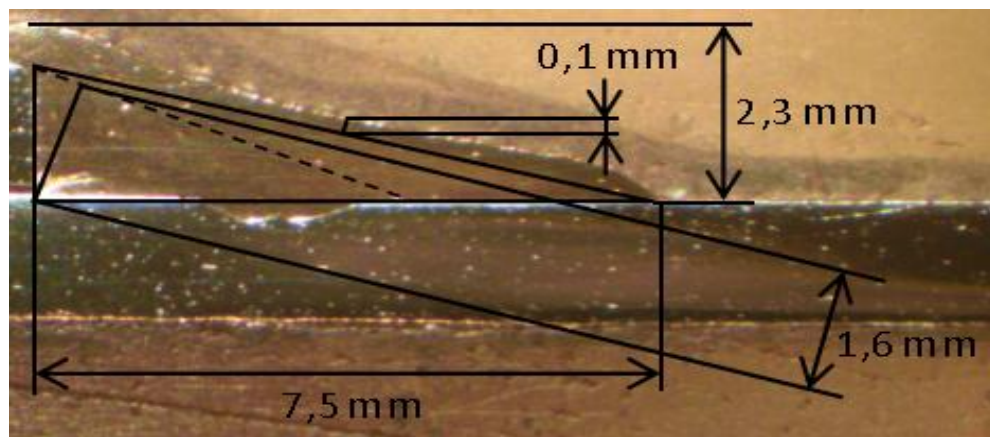


Fonte: AUTORES (2025)

As dimensões da região de sobreposição foram as seguintes: comprimento de 5,8 mm; comprimento ideal de 4,5 mm; molhamento de 0,6 mm; altura de 2,8 mm; garganta ideal de 1,8 mm; e reforço de solda de 0,6 mm.

No corpo de prova 4 (CP4), a solda apresentou garganta acima do ideal, sem molhamento, e diluição de 2,9% no metal base A, conforme ilustrado na Figura 91.

Figura 91- Macrografia da junta sobreposta soldada do CP4

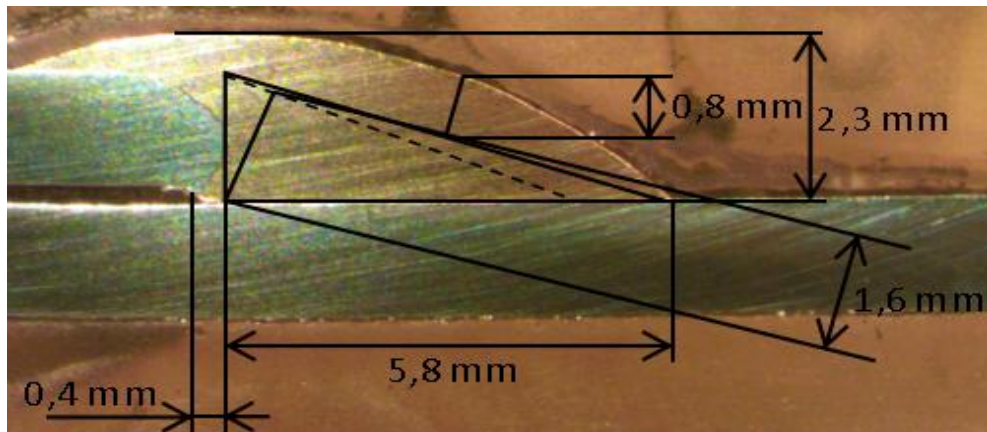


Fonte: AUTORES (2025)

As dimensões da região de sobreposição foram as seguintes: comprimento de 7,5 mm; comprimento ideal de 4,5 mm; altura de 2,3 mm; garganta ideal de 1,6 mm; e reforço de solda de 0,1 mm.

No corpo de prova 5 (CP5), a solda apresentou garganta acima do ideal, com o menor nível de molhamento entre todos os corpos de prova, conforme ilustrado na Figura 92.

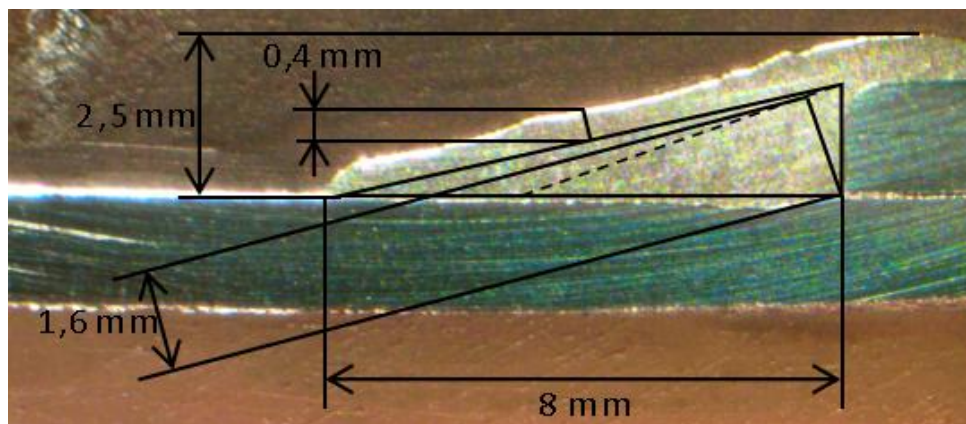
Figura 92- Macrografia da junta sobreposta soldada do CP5



Fonte: AUTORES (2025)

As dimensões da região de sobreposição foram as seguintes: comprimento de 5,8 mm; comprimento ideal de 4,5 mm; molhamento de 0,4 mm; altura de 2,3 mm; garganta ideal de 1,6 mm; e reforço de solda de 0,8 mm. No corpo de prova 6 (CP6), a solda apresentou garganta acima do ideal, sem molhamento, com diluição de 1,7% em ambos os metais base A. conforme ilustrado na Figura 93.

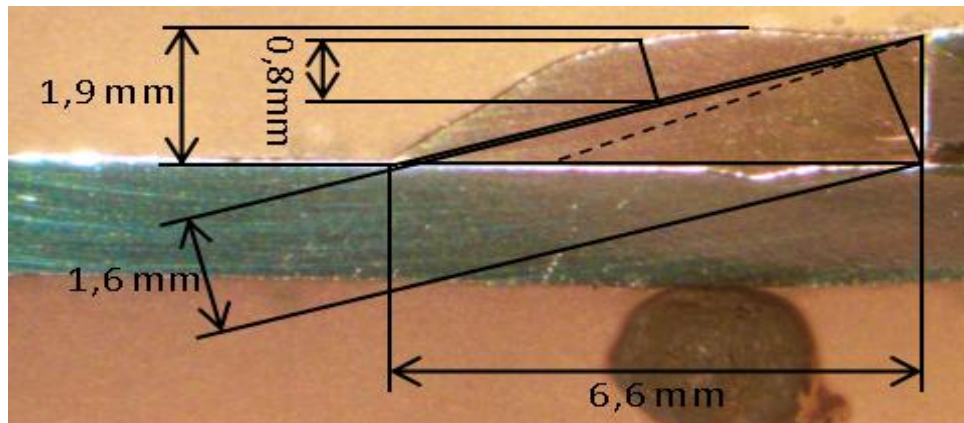
Figura 93- Macrografia da junta sobreposta soldada do CP6



Fonte: AUTORES (2025)

As dimensões da região de sobreposição foram as seguintes: comprimento de 8 mm; comprimento ideal de 4,5 mm; altura de 2,5 mm; garganta ideal de 1,6 mm; e reforço de solda de 0,4 mm. No corpo de prova 7 (CP7), a solda apresentou garganta acima do ideal, sem molhamento, e diluição de 0,9% no metal base A, conforme ilustrado na Figura 94.

Figura 94- Macrografia da junta sobreposta soldada do CP7

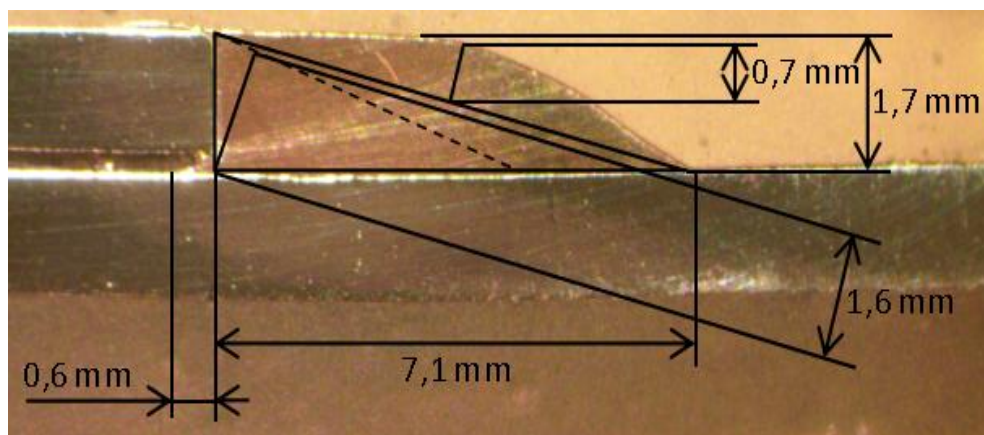


Fonte: AUTORES (2025)

As dimensões da região de sobreposição foram as seguintes: comprimento de 6,6 mm; comprimento ideal de 4,5 mm; altura de 1,9 mm; garganta ideal de 1,6 mm; e reforço de solda de 0,8 mm.

No corpo de prova 8 (CP8), a solda apresentou garganta acima do ideal, com pouco molhamento e sem ocorrência de diluição, conforme ilustrado na Figura 95.

Figura 95- Macrografia da junta sobreposta soldada do CP8



Fonte: AUTORES (2025)

As dimensões da região de sobreposição foram as seguintes: comprimento de 7,1mm; comprimento ideal de 4,5 mm; molhamento de 0,6 mm; altura de 1,7 mm; garganta ideal de 1,6 mm; e reforço de solda de 0,7 mm.

Os cordões de solda obtidos pelo processo MIG Brazing com arco pulsado, obtiveram um perfil similar aos resultados demonstrados nos estudos de Arora *et al.* (2024), nas mesmas condições de transferência metálica pulsada.

4.3 Análise de Composição Química

Os dados apresentados na Tabela 18 foram obtidos por meio de análise espectrométrica realizada no metal base do aço galvanizado SAE 1005, essa técnica possibilitou a identificação precisa da composição química do material. Entre os principais elementos de liga e impurezas identificados, destacam-se o carbono (C) com 0,051%, o silício (Si) com 0,001%, o manganês (Mn) com 0,198% e o alumínio (Al) com 0,068%, conforme mostrado na Tabela 18 e detalhado integralmente no Anexo B.

Tabela 18- Composição do Metal base

	C%	Mn%	Al%	Si%	Mo%	Cu%
1	0,054%	0,199%	0,046%	0,000%	0,002%	0,018%
2	0,048%	0,197%	0,089%	0,001%	0,009%	0,016%
Média	0,051%	0,198%	0,068%	0,001%	0,005%	0,017%

Fonte: AUTORES (2025)

Também foram observadas pequenas quantidades de fósforo (P) com 0,007%, enxofre (S) com 0,004%, cobre (Cu) com 0,017%, níquel (Ni) com 0,000%, cromo (Cr) com 0,000% e titânio (Ti) com 0,002%, portanto quase todos os elementos químicos apresentaram teores inferiores a 0,01%. Também foi realizada a mesma análise no metal de adição, conforme visto no Anexo C.

Na Tabela 19, foi obtida a composição química do arame utilizado. O arame analisado mostrou teores médios de 8,21% de alumínio (Al), 7,20% de ferro (Fe), 0,14% de zinco (Zn), 0,013% de silício (Si) e 0,007% de chumbo (Pb), sendo o percentual restante de aproximadamente 84%, composto por cobre (Cu).

Tabela 19- Composição Química do arame

ER CuAl – A2						
	Zn%	Fe%	Si%	Al%	Pb%	Outros*
Especificado	0,02%	1,5%	0,10%	8,5%	0,02%	0,5%
1	0,14%	7,30%	0,013%	8,25%	0,006%	0,084%
2	0,15%	7,10%	0,012%	8,17%	0,008%	0,103%
Média	0,14%	7,20%	0,013%	8,21%	0,007%	0,093%

*Soma das composições químicas (Sn, Mn, Ni, Co, P, Zr, Sb, Bi, As, Be, Cr, S, Mg, Te, Pb, Cd e Ag)

Fonte: AUTORES (2025) e adaptado do ASME II parte C (2023)

Na tabela 19, os valores estabelecidos pelo ASME II, Parte C (2023), comparados aos resultados obtidos neste procedimento, mostraram que o consumível utilizado apresentou diferenças em sua composição.

Os elementos químicos que foram citados como “outros” pela mesma tabela, apresentaram os seguintes teores médios: Estanho (Sn) com 0,000%, Manganês (Mn) com 0,029%, Níquel (Ni) com 0,000%, Cobalto (Co) com 0,029%, Fósforo (P) com 0,036%, Zircônio (Zr) com 0,002%, Antimônio (Sb) com 0,010%, Bismuto (Bi) com 0,013%, Arsênio (As) com 0,037%, Berílio (Be) com 0,069%, Cromo (Cr) com 0,033%, Enxofre (S) com 0,014%, Magnésio (Mg) com 0,001%, Telúrio (Te) com 0,000%, Chumbo (Pb) com 0,007%, Cádmio (Cd) com 0,000% e Prata (Ag) com 0,000%, conforme o Anexo C.

A presença de zinco (Zn) foi de 0,14%, representando um aumento de aproximadamente sete vezes em relação ao valor especificado. Já o ferro (Fe) apresentou média de 7,20%, valor quase cinco vezes superior ao limite indicado pela norma.

5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos e nas análises elaboradas, foi possível compreender o comportamento do processo MIG-Brasagem em chapas de aço SAE 1005 galvanizado, especialmente em relação às propriedades mecânicas e metalúrgicas das juntas formadas.

Os ensaios de tração indicaram resistências variáveis entre os corpos de prova, destacando-se o CP8 com maior tensão de ruptura de 343 MPa e o CP6 com menor valor, 165 MPa. Outros corpos de prova como CP1 e CP5 alcançaram máximas de 297 MPa e 322 MPa, respectivamente, evidenciando a influência dos parâmetros de soldagem e do comportamento térmico sobre a integridade das juntas. As fraturas ocorreram predominantemente na região da linha de ligação da solda, apontando para zonas de fragilidade relacionadas à penetração e diluição da solda.

Os ensaios de microdureza Vickers confirmaram o comportamento geral já observado: a zona fundida (ZF) foi a região com maiores valores de dureza, alcançando cerca de 200 HV no CP1, 175 HV no CP2 e CP5, além de manter aproximadamente 175 HV na maioria dos corpos de prova. Esses valores mais elevados refletem o refinamento microestrutural típico do rápido resfriamento. A zona afetada pelo calor (ZAC) apresentou durezas intermediárias, variando de 137 a 150 HV, enquanto o metal de base (MB) manteve valores entre 137 e 164 HV, compatíveis com os efeitos térmicos do processo de brasagem.

Esses resultados se alinham ao estudo de Weis *et al.* (2022), que investigou a brasagem híbrida MIG Brazing e TIG Brazing com arame CuSi3. No trabalho deles, o MB apresentou dureza próxima de 146 HV, e a região de fusão atingiu valores superiores, chegando a cerca de 170 HV devido à maior concentração térmica, sem sinais de fragilização por cobre.

A ZAC permaneceu com valores semelhantes ou ligeiramente inferiores aos do MB, comportamento atribuído à expansão térmica e aos mecanismos de recristalização. Esse paralelismo reforça a consistência entre os resultados obtidos e a literatura, evidenciando o efeito combinado do aporte térmico e da solidificação sobre a resposta mecânica da junta.

A caracterização macrográfica confirmada de cordões de solda com gargantas acima do ideal e variações consideráveis na molhabilidade e diluição entre os corpos

de prova, destacando a necessidade de ajustes finos nas configurações elétricas para melhorar a uniformidade dimensional e as propriedades mecânicas.

Em suma, o processo MIG-Brazing mostrou-se eficiente para unir chapas galvanizadas SAE 1005, mas os resultados mecânicos e metalúrgicos indicam que o controle especificamente dos parâmetros de soldagem e do perfil térmico é essencial para evitar zonas frágeis e melhorar a qualidade e desempenho das juntas. A análise integrada dos dados experimentais contribui para a compreensão das limitações e potencialidades do processo, auxiliando futuras aplicações industriais.

REFERÊNCIAS

ACESITA, S. A. **Soldagem dos Aços Inoxidáveis** - Acesita S.A. Associada à USINOR. (2011)

ARORA, Kanwer *et al.* ***Correction: Comparative analysis of MIG brazing modes: Process stability, bead morphology, microstructure, and mechanical properties. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology***, v. 135, p. 155-155, 2024. DOI: 10.1007/s00170-024-14589-2.

ASM HANDBOOK. ***Welding Brazing and Soldering.*** ASM HANDBOOK COMMITTEE, 1993. 617-1057 p. v. 6.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ***ASME Boiler and Pressure Vessel Code an International Code:*** Part C. 2023. p.222.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14842:2020** – Inspeção visual de solda. Rio de Janeiro: ABNT, 2020. P. 9.

BERNARDI, R. A. *et al.* ***Análise da zona afetada pelo calor em soldagem dupla camada utilizando o método dos elementos finitos.*** Rio de Janeiro, v. 25, n. 2, 2020.

BRANDÃO, J. E. ***Tecnologia da Soldagem.*** Belo Horizonte: Editora PUC Minas, 2019; ISBN (versão digital): 978-85-829-120-7. (E-book) Livro eletrônico: 1371 páginas.

CALLISTER, William D. ***Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.*** 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 471-744 p.

COELHO, C. F *et al.* **O monitoramento da Soldagem como Controle da Qualidade na Indústria Naval.** Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense. Campos dos Goytacazes – RJ, 2015.

COSTA, Adilson R. D. **Ensaaios não destrutivos:** Fundamentação teórica para aulas práticas. Volume I. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2022.

CROZETTA, Natan D. *et al.* **Análise comparativa entre os processos de soldagem MIG/MAG e a laser em chapas de aço carbono SAE 1005.**

Revista Vincci, Santa Catarina, p. 350, 2025.

Disponível em: <https://revistavincci.satc.edu.br/index.php/Revista-Vincci/article/view/461/435>. Acesso em: 06 nov. 2025.

DEEPAK, J. R. *et al.* **Non-destructive testing (NDT) techniques for low carbon steel welded joints:** A review and experimental study. Materials Today: Proceedings, v. 44, p. 3732-3737, 2021

GARCIA, Amauri. **Ensaaios dos Materiais.** 2. ed. São Paulo: LTC, 2000.

GIMENES, Luiz *et al.* **Gases de proteção para soldagem a arco elétrico.** FATEC SP.2016. p.4

LIMA, J. E. S. *et al.* **Determinação do ângulo de contato, tensão superficial e trabalho de adesão de um primer adesivo uretânico.** Revista Eniac Pesquisa, Guarulhos, 2020. Disponível em: <https://ojs.eniac.com.br/index.php/Anais/article/view/525/0>. Acesso em: 9 dez. 2025.

LOPES, Fábio E. *et al.* **Estudo sobre a evolução dos processos de união na indústria automobilista.** UFMG, 2020. p.31.

MOEN, B. ***Low back pain and widespread pain predict sickness absence among industrial workers.*** BMC Musculoskelet Disord. 2003; 4: 21.

NARAYANAN, BK. *et al.* ***Solutions for welding zinc coated steels***, 2015. Disponível em: <https://m.lincolnelectric.com/assets/US/EN/literature/mc1595.pdf>. Acesso em: 18 nov, 2019.

NASCIMENTO, R. S. *et al.* **Qualidade na Soldagem em uma Empresa Fabricante de Estruturas Metálicas Soldadas do Setor de Óleo e Gás.** VI Congresso Nacional de Excelência em Gestão. Niterói, RJ, Brasil 5, 6 e 7 de agosto de 2010.

OKIMOTO. **Soldagem:** 3ª Aula Brasagem. UFPR.2016. p.1-10.

PIKUŁA, JANUSZ *et al.* **Influência do gás de proteção nas propriedades de juntas soldadas por brasagem MIG/MAG VP em chapas de aço zincadas.** ResearchGate, 2014. p.36.

REDAÇÃO SIDERURGIA BRASIL. **Galvanização a fogo:** o revestimento eficiente e sustentável aplicações. Ed. 181, Galvanização, galvanizado, ICZ, 30 out. 2024. Disponível em: <https://siderurgiabrasil.com.br/2024/10/30/galvanizacao-a-fogo-o-revestimento-eficiente-e-sustentavel-aplicacoes/>. Acesso em: 10 nov. 2025.

SCOTTI, A. *et al.* **Soldagem MIG/MAG:** melhor entendimento, melhor desempenho. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2014. p.288.

SHREYAS, P. *et al.* ***Mechanical properties and microstructure of 316L: galvanized steel weld. Material Today: Proceedings***, [s. l.], v. 23, 15 jul. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785319313859>. Acesso em: 18 nov. 2025.

SILVA, Flávio J. D. *et al.* **Eroso-corrosão do aço ABNT 8550 nitretado.** Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v.3, n.4, p. 46-51, abril-jun. 2007.

SILVA, Francisco J. G. **Tecnologia da Soldadura**: Uma Abordagem Técnico-didática. 3. ed. Porto: Engebook, 2023. p.272-273.

TEIXEIRA, P. E. F. *et al.* **Avaliação das Perdas no Processo de Colheita da Cultura da Cana-de-Açúcar na Região do Vale do Ivilhema**. Revista Aracê. São José dos Pinhais, v. 6, n. 2, p; 3317-3334, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.56238/arev6n2-172>>. Acesso em 05 nov. 2024.

WAINER, Emílio *et al.* **Soldagem**: Processos e metalurgia. 4. ed. São Paulo, SP: Blücher, 1992. p.441.

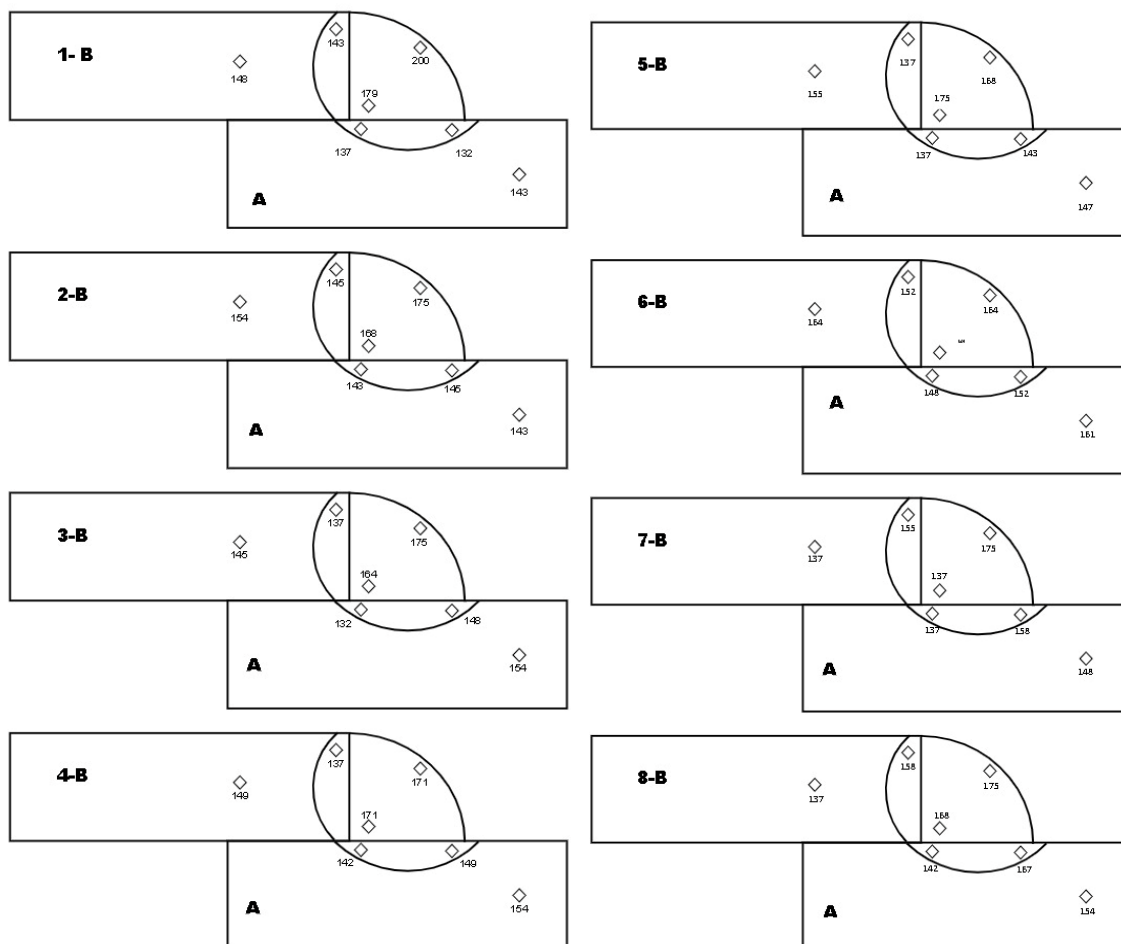
WEIS, Sebastian *et al.* **Study on MIG-TIG hybrid brazing of galvanised thin sheet. Welding in the World, Le Soudage Dans Le Monde**, 2022, p. 1-7. DOI: 10.1007/s40194-022-01449-4.

XU, C. **The influence of Al content from filler metals on tungsten inert gas welding-brazing of Mg-Ti**. Materials Research Express, [s. l.], v. 6, n. 11, 11 out. 2019. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2053-1591/ab4a68>. Acesso em: 18 nov. 2025.

ANEXOS

ANEXO A- Distribuição das Indentações na junta soldada após a perfuração pelo penetrador do Microdurômetro

MICRODUREZA – HV 0,05



ANEXO B- Composição química obtida por Espectrometria do Metal de base

Data: 07/10/25 08:46:21					Programma: Aço_Carbono					
Campione: metal de base					Operatore: Aguinaldo					
Lega:					Modo d'analisi: Concentrazione					
	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %	Ni %	Nb %	Al %
1	0.054	0.000	0.199	0.004	0.003	0.000	0.002	0.000	0.000	0.046
2	0.048	0.001	0.197	0.011	0.004	0.000	0.009	0.000	0.000	0.089
Med.	0.051	0.001	0.198	0.007	0.004	0.000	0.005	0.000	0.000	0.068
	Cu %	Co %	B %	Ti %	V %	W %	Ca %	Ce %	La %	Pb %
1	0.018	0.000	0.0003	0.002	0.000	0.000	0.001	0.001	0.003	0.002
2	0.016	0.000	0.0001	0.002	0.000	0.000	0.001	0.000	0.003	0.003
Med.	0.017	0.000	0.0002	0.002	0.000	0.000	0.001	0.001	0.003	0.003
	Sn %	Sb %	Te %	Zr %	Fe %					
1	0.000	0.000	0.008	0.000	99.657					
2	0.000	0.000	0.007	0.000	99.609					
Med.	0.000	0.000	0.007	0.000	99.633					

