

Soldadura do aço SAE 1020 com processo MAG: Influência do recozimento e otimização pelo método Taguchi

Renato Augusto do Carmo Turone

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Bragança para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica num trabalho desenvolvido no âmbito do programa de intercâmbio de duplo diploma entre o Instituto Politécnico de Bragança (IPB) e o Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Trabalho orientado por:

Professor Dr. João Eduardo Pinto Castro Ribeiro (IPB)

Professor Dr. Júlio César de Souza Francisco (UTFPR)

Bragança

2025

Agradecimentos

Agradeço à Universidade e a todos os colaboradores que contribuíram para minha formação, incluindo os professores, que se dedicam a transmitir conhecimento, os projetos de extensão, que enriquecem a experiência profissional, e os programas de incentivo à pesquisa acadêmica. Sou grato também ao NUAPE, pelo suporte acadêmico e emocional ao longo da graduação, e ao auxílio estudantil, que cobriu despesas essenciais e garantiu minha permanência nos estudos.

Aos meus orientadores, cuja paciência e domínio do conhecimento foram fundamentais para sanar dúvidas e guiar este trabalho, tornando possível a realização desta dissertação de mestrado, expresso minha mais profunda gratidão.

À professora Dra. Marilu Martens Oliveira, que, em um período desafiador em que fiquei sem o auxílio estudantil, estendeu-me a mão com sua generosidade, permitindo que eu prosseguisse no curso e chegasse até este momento de conclusão, deixo meu reconhecimento e sincera gratidão.

À minha família, que sempre me ofereceu apoio emocional e fez o possível – e o impossível – para que este sonho se concretizasse, agradeço imensamente. Em especial, à minha querida mãe, Alessandra, com quem compartilho os desafios enfrentados e para quem essa conquista tem um significado imensurável.

Por fim, ao técnico Eng. Jorge Paulo, do laboratório de Tecnologia Mecânica do IPB, que auxiliou no manuseio dos equipamentos e na resolução de imprevistos durante a preparação dos corpos de prova, estendo meu muito obrigado.

Resumo

O processo de soldadura MIG/MAG é amplamente utilizado na indústria devido à sua alta eficiência na união de materiais por fusão com arco elétrico. A definição adequada dos parâmetros operacionais impacta diretamente na qualidade do cordão de solda. Com o ajuste correto desses parâmetros, é possível reduzir o consumo de material de adição, otimizar propriedades mecânicas e, por consequência, elevar a produtividade do processo. Este estudo teve como finalidade selecionar um conjunto de variáveis de soldadura e otimizá-las por meio da metodologia de Taguchi, além de analisar sua influência com base na Análise de Variância (ANOVA). Foi utilizado um arranjo ortogonal L_9 , envolvendo três fatores (tensão de soldadura, velocidade de avanço e ângulo da tocha), cada um em três níveis distintos. Após a realização das nove combinações experimentais, foram efetuadas análises macrográficas e ensaios de flexão, tanto para amostras submetidas ao recozimento quanto para aquelas sem tratamento térmico, de modo a determinar características geométricas e mecânicas.

A otimização foi conduzida com o auxílio das razões sinal-ruído, enquanto a ANOVA permitiu identificar a relevância de cada parâmetro de entrada sobre os resultados obtidos, como largura, reforço, penetração e limite de resistência à flexão do cordão de solda. Observou-se que a velocidade de soldadura teve maior impacto sobre o reforço nas amostras sem recozimento (33,08%), ao passo que nas recozidas, a tensão foi predominante (53,05%). Em relação à largura, a tensão demonstrou maior influência em ambos os casos, com 36,94% e 34,89% para amostras sem e com recozimento, respectivamente. Para a penetração, o ângulo da tocha foi o fator de maior relevância, contribuindo com 59,47% nas amostras sem recozimento e 48,24% nas recozidas. Quanto à resistência à flexão,

a velocidade foi dominante nas amostras não recozidas (27,59%), enquanto o ângulo da tocha prevaleceu nas recozidas (26,54%). As combinações otimizadas encontradas para os diferentes parâmetros foram: para o reforço, 25°, 23,7 V e 400 mm/min nas amostras sem recozimento, e 0°, 24,1 V e 250 mm/min nas recozidas; para a largura, 0°, 24,1 V e 400 mm/min nas não recozidas, e 25°, 23,7 V e 325 mm/min nas recozidas; para a penetração, 0°, 24,1 V e 400 mm/min nas amostras sem recozimento, e 15°, 22,4 V e 325 mm/min nas recozidas; e, por fim, para o limite de resistência à flexão, as melhores condições foram 25°, 23,7 V e 250 mm/min sem recozimento, e 0°, 23,7 V e 250 mm/min com recozimento.

Palavras-chave: soldadura MIG/MAG; Recozimento; Método Taguchi; ANOVA.

Abstract

The MIG/MAG welding process is widely used in industry due to its high efficiency in joining materials through electric arc fusion. The proper selection of operating parameters directly affects the quality of the weld bead. By accurately adjusting these parameters, it is possible to reduce filler material consumption, enhance mechanical properties, and consequently increase process productivity. This study aimed to select a set of welding variables and optimize them using the Taguchi method, in addition to analyzing their influence through Analysis of Variance (ANOVA). An L_9 orthogonal array was applied, involving three factors (welding voltage, travel speed, and torch angle), each at three levels. After conducting the nine experimental combinations, macrographic analyses and bending tests were performed for both annealed and non-annealed specimens to determine their geometric and mechanical characteristics.

Optimization was carried out using signal-to-noise ratios, while ANOVA was used to identify the contribution of each input parameter to the output results, such as bead width, reinforcement, penetration, and bending strength. It was found that the welding speed had the greatest influence on reinforcement in non-annealed samples (33.08%), whereas voltage was predominant in annealed samples (53.05%). Regarding bead width, voltage had the most significant effect in both cases, contributing 36.94% and 34.89% for non-annealed and annealed samples, respectively. Torch angle was the most influential parameter for penetration, with 59.47% in non-annealed samples and 48.24% in annealed ones. As for bending strength, welding speed was the most relevant factor in non-annealed samples (27.59%), while torch angle prevailed in annealed samples (26.54%). The optimal combinations found for each parameter were: for reinforcement, 25° , 23.7 V, and 400

mm/min in non-annealed samples, and 0°, 24.1 V, and 250 mm/min in annealed ones; for width, 0°, 24.1 V, and 400 mm/min in non-annealed, and 25°, 23.7 V, and 325 mm/min in annealed samples; for penetration, 0°, 24.1 V, and 400 mm/min in non-annealed, and 15°, 22.4 V, and 325 mm/min in annealed specimens; and finally, for bending strength, the best conditions were 25°, 23.7 V, and 250 mm/min in non-annealed samples, and 0°, 23.7 V, and 250 mm/min in annealed ones.

Keywords: MIG/MAG welding; Annealing; Taguchi method; ANOVA.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	3
1.2	Estrutura do Documento	3
2	Fundamentação Teórica	5
2.1	Processo de soldadura	5
2.2	Soldadura GMAW	6
2.2.1	Classificação do modo de transfência	8
2.2.2	Influência dos parâmetros de soldadura na qualidade da junta	9
2.3	Macrografia das juntas soldadas	12
2.3.1	Largura	14
2.3.2	Penetração	14
2.3.3	Reforço	15
2.4	Aço SAE 1020	15
2.5	Influência do tratamento térmico de recozimento na soldadura	16
2.5.1	Recozimento: Conceitos e objetivos	17
2.5.2	Efeitos do recozimento na microestrutura do aço SAE 1020	20
2.5.3	Impacto do recozimento nas propriedades mecânicas das juntas soldadas	21
2.6	Ensaio de flexão em três pontos	23
2.6.1	Princípios do ensaio de flexão	24

2.6.2	Parâmetros avaliados no ensaio	25
2.6.3	Aplicação do ensaio na análise da soldadura	26
2.7	Método Taguchi para otimização do processo	27
2.7.1	Conceitos fundamentais do método Taguchi	28
2.7.2	Planejamento experimental com matrizes ortogonais	29
2.7.3	Razão sinal-ruído e sua aplicação na soldadura	30
2.8	Análise de variância (ANOVA)	31
2.8.1	Conceitos e fundamentos da ANOVA	32
2.8.2	Interpretação do resultados da ANOVA na soldadura	34
3	Metogologia	36
3.1	Materiais utilizados	36
3.2	Planejamento experimental	37
3.3	Preparação dos corpos de prova	40
3.4	Procedimento experimentais	42
3.4.1	Realização dos cordões de solda	42
3.4.2	Recozimento	47
3.5	Ensaio de flexão em três pontos	49
3.6	Análise macrográfica dos cordões de solda	50
3.6.1	Obtenção das amostras	50
3.6.2	Ensaio de macrografia para medição do perfil dos cordões	51
3.7	Tratamento do dados	52
4	Resultados	55
4.1	Reforço	55
4.2	Largura	61
4.3	Penetração	67
4.4	Limite de resistência à flexão	73
5	Conclusão e propostas para trabalhos futuros	82

Lista de Tabelas

2.1	Composição química típica do aço SAE 1020 (% em massa) [21].	16
2.2	Propriedades mecânicas típicas do aço SAE 1020 [20]; [21].	16
2.3	Dimensões normalizadas dos provetes de acordo com a norma [35].	27
2.4	Cálculos para análise de variância que compõem a tabela ANOVA [41]. . .	34
3.1	Composição química do aço SAE 1020 [48].	37
3.2	Composição química do arame elétrico AWS ER70S-6 [49].	37
3.3	Parâmetros de estudo e seus níveis.	38
3.4	Matriz ortogonal L_9 (3^4) de Taguchi [41].	39
3.5	Matriz L_9 de Taguchi com os parâmetros de estudo.	39
3.6	Valores de velocidade em (mm/min).	41
3.7	Matriz ortogonal adaptada para fins de cálculo.	54
4.1	Medições, média e razão sinal-ruído para o reforço.	56
4.2	Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros de soldadura para o reforço.	57
4.3	Análise de variância para obter a influência dos parâmetros no reforço. . .	58
4.4	Medições, média e razão sinal-ruído para o reforço das juntas recozidas. . .	59
4.5	Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros de soldadura para o reforço das juntas recozidas.	60
4.6	Análise de variância para obter a influência dos parâmetros no reforço das juntas recozidas.	61
4.7	Medições, média e razão sinal-ruído para a largura.	62

4.8	Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros de soldadura para a largura.	63
4.9	Análise de variância para obter a influência dos parâmetros na largura. . .	64
4.10	Medições, média e razão sinal-ruído para a largura das juntas recozidas. . .	65
4.11	Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros de soldadura para a largura das juntas recozidas.	66
4.12	Análise de variância para obter a influência dos parâmetros na largura das juntas recozidas.	67
4.13	Medições, média e razão sinal-ruído para a penetração.	68
4.14	Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros de soldadura para a largura.	69
4.15	Análise de variância para obter a influência dos parâmetros na penetração.	70
4.16	Medições, média e razão sinal-ruído para a penetração das juntas recozidas.	71
4.17	Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros de soldadura para a largura das juntas recozidas.	72
4.18	Análise de variância para obter a influência dos parâmetros na penetração das juntas recozidas.	73
4.19	Medições, média e razão sinal-ruído para o limite de resistência à flexão. . .	75
4.20	Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros de soldadura para o limite de resistência à flexão.	76
4.21	Análise de variância para obter a influência dos parâmetros no limite de resistência à flexão.	77
4.22	Medições, média e razão sinal-ruído para o limite de resistência à flexão das juntas recozidas.	79
4.23	Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros de soldadura para o limite de resistência à flexão das juntas recozidas.	80
4.24	Análise de variância para obter a influência dos parâmetros no limite de resistência à flexão das juntas recozidas.	81

Lista de Figuras

2.1	Ilustração do processo MIG/MAG [9].	7
2.2	Efeito da corrente de soldadura na penetração da solda – aço carbono, curto-circuito, Ar-25%CO ₂ [13].	10
2.3	Efeito da tensão de soldadura na penetração da solda [13].	10
2.4	Efeito da velocidade de soldadura na penetração da solda – alumínio, aerossol, árgon [13].	11
2.5	Efeito da orientação da tocha no cordão de soldadura para o sentido empurrando (A), perpendicular (B) e puxando (C) [14].	12
2.6	Principais dimensões do cordão de solda [14].	13
2.7	Diagrama de Tensão x Deformação convencional e real para material dúctil. [28].	25
2.8	Representação do corpo de prova de acordo com a norma [34].	27
2.9	Distribuições populacionais quando a hipótese nula é (a) verdadeira ($\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu$) e (b) falsa ($\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$) [41].	33
3.1	Chapas cortadas nas dimensões propostas.	40
3.2	Gabarito.	42
3.3	Gabarito com corpo de prova.	42
3.4	Aparato experimental de CNC [41].	43
3.5	Mecanismo de soldadura com seus respectivos eixos [14].	43
3.6	Soldadura com ângulo 0°.	44
3.7	Ângulo de 15° com transferidor.	45

3.8	Ângulo de 15°	45
3.9	Soldadura na direção X com ângulo de 15°	46
3.10	Ângulo de 25°	46
3.11	Gráfico do tempo x temperatura do recozimento.	48
3.12	Amostras recozidas.	48
3.13	Equipamento utilizado para os ensaios de flexão.	49
3.14	Indicação dos cortes realizados nas amostras.	50
3.15	Amostras de cordão de solda embutidas.	51
3.16	Medições realizadas nas amostras de solda.	52
4.1	Curva S/N médio de cada parâmetro para o reforço.	57
4.2	Curva S/N médio de cada parâmetro para o reforço das juntas recozidas.	60
4.3	Curva S/N médio de cada parâmetro para a largura.	63
4.4	Curva S/N médio de cada parâmetro para a largura das juntas recozidas.	66
4.5	Curva S/N médio de cada parâmetro para a penetração.	69
4.6	Curva S/N médio de cada parâmetro para a penetração.	72
4.7	Gráficos de ensaios de flexão em 3 pontos.	74
4.8	Curva S/N médio de cada parâmetro para o limite de resistência à flexão.	76
4.9	Gráficos de ensaios de flexão em 3 pontos das juntas recozidas.	78
4.10	Curva S/N médio de cada parâmetro para o limite de resistência à flexão das juntas recozidas.	80

Siglas

ANOVA Análise de Variância. 2

CC Corrente Contínua. 7

EPI Equipamento de Proteção Individual. 6

GMAW *Gas Metal Arc Welding*. 1, 6

GTAW *Gas Tungsten Arc Welding*. 6

IPB Instituto Politécnico de Bragança. i

ISO *International Organization for Standardization*. 14

MIG/MAG *Metal Inert Gas/Metal Active Gas*. 1

SAE *Society of Automotive Engineers*. 1

SMAW *Shielded Metal Arc Welding*. 6

UTFPR Universidade Tecnológica Federal do Paraná. i

ZAC Zona afetada térmicamente. 21

ZTA Zona Termicamente Afetada. 13

Capítulo 1

Introdução

A soldadura constitui um dos métodos mais empregados para união de materiais no setor industrial, com aplicações nos segmentos metalúrgico, automotivo, construção naval e aeroespacial. Dentre as diversas técnicas existentes, o processo de soldadura a arco elétrico com proteção gasosa *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), denominado comercialmente como *Metal Inert Gas/Metal Active Gas* (MIG/MAG), sobressai-se devido à sua elevada eficiência produtiva, adaptabilidade a processos automatizados e versatilidade na união de metais diversos. Contudo, a qualidade da união soldada pode ser afetada por múltiplas variáveis, incluindo parâmetros operacionais, escolha do metal de adição e realização de tratamentos térmicos pós-deposição.

Os aços carbono representam materiais de grande relevância industrial, destacando-se por sua adequada combinação de resistência mecânica, facilidade de soldadura e relação custo-benefício favorável. Particularmente, o aço *Society of Automotive Engineers* (SAE) 1020, classificado como aço de baixo teor de carbono, é amplamente utilizado na fabricação de componentes estruturais, elementos mecânicos e sistemas de tubulação. A seleção adequada do metal de adição é determinante para assegurar a qualidade da junta, sendo o arame ER70S-6 frequentemente escolhido para essas aplicações em virtude de suas características de fluidez, estabilidade de arco e composição química balanceada, que promovem melhores propriedades mecânicas na zona soldada.

Um dos principais desafios associados à soldadura do aço SAE 1020 refere-se às alterações nas propriedades mecânicas e na microestrutura da junta, as quais são influenciadas tanto pelos parâmetros de soldadura quanto pela aplicação de tratamentos térmicos como o recozimento. Este tratamento térmico específico tem como objetivos principais a redução de tensões residuais, o incremento da ductilidade e a uniformização microestrutural, fatores que podem modificar significativamente o desempenho mecânico da junta soldada. Neste contexto, abordagens estatísticas, particularmente o método Taguchi, têm sido amplamente adotadas para otimização de parâmetros, visando a minimização de variações processuais e ao aprimoramento da qualidade das juntas.

Complementarmente, a macrografia assume papel fundamental na caracterização geométrica da solda, permitindo a avaliação de parâmetros críticos como largura do cordão, profundidade de penetração e altura de reforço, todos diretamente relacionados ao desempenho estrutural da junta. Paralelamente, a aplicação da análise de variância (Análise de Variância (ANOVA)) possibilita a identificação sistemática dos fatores mais significativos que afetam as propriedades mecânicas, proporcionando uma base quantitativa robusta para interpretação de dados experimentais.

Considerando este panorama, o presente trabalho tem como finalidade investigar os efeitos do recozimento no processo de soldadura do aço SAE 1020 utilizando arame ER70S-6. A metodologia compreende a aplicação do método Taguchi para otimização paramétrica, avaliação da resistência mecânica mediante ensaios de flexão em três pontos, caracterização macrográfica e análise estatística via ANOVA. Os resultados obtidos têm como objetivo fornecer informações técnicas fundamentadas sobre a influência do recozimento na soldabilidade do aço SAE 1020, especialmente quanto à qualidade geométrica e ao desempenho mecânico das juntas soldadas. Esses dados são úteis para orientar decisões na seleção de parâmetros de soldadura e tratamentos térmicos, contribuindo diretamente para a melhoria dos processos de fabricação e para o aumento da confiabilidade no controle de qualidade na indústria metal-mecânica.

1.1 Objetivos

Dessa forma, o objetivo geral deste estudo é analisar a influência do recozimento na soldadura do aço SAE 1020 com arame ER70S-6, utilizando o método Taguchi para otimização dos parâmetros e avaliando a resistência mecânica por meio do ensaio de flexão em três pontos, além da caracterização macrográfica e análise estatística via ANOVA.

Para alcançar esse objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Investigar o efeito do tratamento térmico de recozimento sobre a resistência mecânica das juntas soldadas de aço SAE 1020.
- Aplicar o método Taguchi para determinar a influência dos parâmetros de soldadura na qualidade da junta.
- Realizar ensaios de flexão em três pontos para avaliar a resistência mecânica das amostras soldadas.
- Realizar a análise macrográfica das juntas soldadas, avaliando largura, penetração e reforço da solda.
- Aplicar a análise de variância (ANOVA) para identificar os fatores mais significativos no desempenho mecânico das juntas soldadas.

1.2 Estrutura do Documento

O primeiro capítulo apresenta uma breve introdução ao tema, com referências a estudos relacionados, contextualização e motivação para o desenvolvimento da pesquisa, além dos objetivos propostos e da organização da tese. Este trabalho está dividido em cinco capítulos:

- Capítulo 1: Descreve uma visão geral do tema abordado, contextualizando o problema e apresentando os objetivos da pesquisa.

- Capítulo 2: Aborda a fundamentação teórica, discutindo as características dos materiais, os processos de soldadura e os parâmetros envolvidos.
- Capítulo 3: Detalha a metodologia utilizada, incluindo os materiais, equipamentos e procedimentos adotados para a realização dos ensaios.
- Capítulo 4: Apresenta os resultados obtidos, como índice de convexidade, largura, reforço, penetração do cordão de solda e resistência à flexão em três pontos.
- Capítulo 5: Conclui o trabalho, sintetizando os principais achados da pesquisa e suas implicações.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 Processo de soldadura

A soldadura é um processo de união de materiais que envolve a fusão localizada das peças a serem conectadas. O processo pode ou não utilizar material de adição. Esse método é amplamente empregado na fabricação e manutenção de estruturas metálicas devido à sua capacidade de proporcionar juntas com alta resistência mecânica e integridade estrutural. A eficácia da soldadura depende de diversos fatores, incluindo o tipo de processo escolhido, as propriedades dos materiais envolvidos e os parâmetros operacionais adotados, como corrente elétrica, temperatura e tipo de material de adição [1]; [2].

A escolha do processo de soldadura mais adequado depende do tipo de material a ser soldado, da espessura das peças, da posição de soldadura e dos requisitos de resistência e acabamento da junta. O mercado apresenta diversas técnicas de soldadura, cada uma com características próprias, que atendem a necessidades específicas. A soldadura por arco elétrico é a mais comum, empregando uma fonte de calor gerada por um arco elétrico entre o eletrodo e a peça. Esse processo pode ser executado com ou sem a utilização de material de adição. A soldadura a gás é outra técnica amplamente utilizada, principalmente em aplicações que exigem alta precisão e qualidade na solda [3]; [4].

A soldadura por arco elétrico é uma das técnicas mais comuns e abrange vários processos, como o método de soldadura com eletrodo revestido, *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW), soldadura a gás com eletrodo não consumível, *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) e soldadura a arco com gás metálico, *Gas Metal Arc Welding* (GMAW). Cada um desses processos tem suas vantagens e desvantagens, dependendo da aplicação, sendo escolhido com base em critérios como custo, tempo de execução, e exigências de qualidade e resistência das juntas soldadas. A utilização de processos como o GMAW, por exemplo, é comum em ambientes industriais onde se exige maior produtividade e resultados com pouca necessidade de acabamento [2]; [5].

A precisão no controle dos parâmetros de soldadura é crucial para garantir a qualidade da junta soldada. Fatores como a corrente de soldadura, a velocidade do arco, a tensão, o tipo de gás de proteção e a taxa de deposição de material de adição são variáveis que afetam diretamente as propriedades mecânicas da solda. O controle inadequado desses parâmetros pode resultar em defeitos como porosidade, trincas, inclusões e falta de fusão, comprometendo a integridade da junta. A análise cuidadosa desses fatores permite otimizar a resistência e a durabilidade da solda [3]; [4].

Além dos aspectos técnicos, a soldadura também envolve considerações de segurança e saúde ocupacional. A exposição a fumos metálicos e radiação ultravioleta, além do risco de choques elétricos, exige o uso de Equipamento de Proteção Individual (EPI) adequados. O não cumprimento das normas de segurança pode resultar em sérios riscos à saúde dos trabalhadores, como doenças respiratórias e lesões oculares, além de acidentes fatais. Portanto, é fundamental que os profissionais da área estejam devidamente capacitados e preparados para seguir as normas de segurança [1]; [5].

2.2 Soldadura GMAW

A Soldadura por Arco com Gás de Proteção, também conhecida como soldadura MIG/-MAG, é um processo de soldadura a arco elétrico que utiliza um eletrodo consumível de arame sólido alimentado continuamente e um gás de proteção para fundir e unir metais.

O arco elétrico é estabelecido entre o arame e a peça de trabalho, causando a fusão do material de adição e do metal base, formando assim a poça de fusão que, ao solidificar, resulta na junta soldada. O gás de proteção tem a função de proteger a poça de fusão da contaminação atmosférica, prevenindo defeitos na solda [6].

Este processo é amplamente utilizado na indústria devido à sua eficiência, versatilidade e capacidade de produzir soldas de alta qualidade em diversas posições e para uma variedade de metais, incluindo aços carbono, aços inoxidáveis e ligas de alumínio. A soldadura GMAW permite altas taxas de deposição e é adequada para aplicações automatizadas e robotizadas, tornando-se uma escolha popular em setores como o automotivo, construção naval e fabricação de estruturas metálicas [7].

O equipamento básico para a soldadura GMAW consiste em uma fonte de energia elétrica, um alimentador de arame, uma tocha de soldadura e um sistema de fornecimento de gás de proteção. A fonte de energia geralmente fornece Corrente Contínua (CC) com polaridade direta ou inversa, dependendo da aplicação específica. O gás de proteção pode ser inerte, como o argônio (no caso do processo MIG), ou ativo, como o dióxido de carbono (no caso do processo MAG), influenciando diretamente as características do arco e da poça de fusão, conforme ilustrado na Figura 2.1 [8].

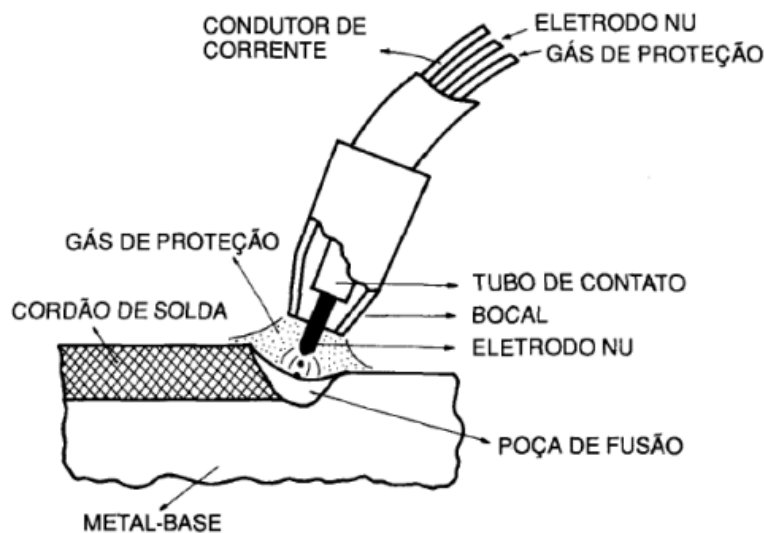


Figura 2.1: Ilustração do processo MIG/MAG [9].

A seleção adequada dos parâmetros de soldadura, como tensão, corrente, velocidade de alimentação do arame e tipo de gás de proteção, é crucial para garantir a qualidade da solda e minimizar defeitos. Além disso, a escolha correta do tipo de transferência metálica (curto-circuito, globular, spray ou pulsado) influencia significativamente as propriedades mecânicas e a aparência da solda final [6].

2.2.1 Classificação do modo de transfência

A transferência metálica no processo de soldadura por arco elétrico com gás (GMAW) é um fenômeno crítico que influencia diretamente a qualidade da solda e as propriedades mecânicas da junta. Existem diferentes modos de transferência de metal, classificados de acordo com o comportamento do arco e a maneira como o metal de adição é transferido do eletrodo para a poça de fusão. Os principais modos de transferência são: o modo globular, o modo spray, o modo de transferência pulsada e o modo curto-circuito.

O modo globular ocorre quando o metal fundido é transferido em grandes gotas, o que pode gerar uma solda de qualidade inferior devido à instabilidade do arco e à possibilidade de respingos. Este modo é comum em correntes de soldadura mais baixas e oferece uma penetração reduzida, além de uma maior geração de calor, o que pode resultar em distorções [6].

No modo spray, as gotas de metal são transferidas de forma mais estável e fina, sem a formação de respingos. Esse modo é geralmente empregado com altas correntes de soldadura e resulta em uma solda com maior penetração e melhor acabamento superficial. O modo spray é caracterizado pela alta eficiência do processo e pela qualidade da junta soldada, sendo utilizado principalmente para soldaduras de ligas leves, como por exemplo ligas de alumínio [7].

O modo de transferência pulsada, por sua vez, combina as características do modo spray com a modulação da corrente de soldadura, o que permite maior controle sobre o processo e minimiza a formação de respingos. A modulação da corrente permite o controle da velocidade de deposição e melhora a penetração da solda, além de ser ideal

para soldaduras finas e materiais de alta resistência [10].

Já o modo de curto-circuito, utilizado em baixas correntes e com um arco mais instável, apresenta uma transferência de metal mais intermitente, onde o eletrodo toca repetidamente a poça de fusão. Esse modo é particularmente útil para soldaduras em posições verticais e horizontais, embora possa gerar maior quantidade de respingos e menor penetração na junta [7]; [10].

Esses diferentes modos de transferência metálica são cruciais para a otimização do processo GMAW, sendo sua escolha influenciada pela espessura do material, a posição de soldadura e os requisitos de qualidade da junta soldada. O correto entendimento e controle desses modos permitem um processo de soldadura mais eficiente e com melhores resultados [6]; [7]; [10].

2.2.2 Influência dos parâmetros de soldadura na qualidade da junta

A qualidade das juntas soldadas no processo de soldadura por arco elétrico com gás (GMAW) é fortemente influenciada pelos parâmetros de soldadura adotados. Elementos como a corrente elétrica, a tensão, a velocidade de soldadura, a escolha do gás protetor e a posição de soldadura são fatores determinantes para a integridade e as propriedades mecânicas da junta soldada. A variação desses parâmetros pode afetar diretamente a resistência à tração, dureza e outros critérios que influenciam a durabilidade e a performance da junta soldada [11]; [12].

A corrente de soldadura é um dos parâmetros mais críticos, pois afeta diretamente a penetração e a distribuição do calor na peça. Uma corrente de soldadura inadequada pode resultar em uma penetração insuficiente ou excessiva, levando à formação de defeitos como a falta de fusão ou distorções na peça [11]. As diferenças em relação à penetração podem ser vistas na Figura 2.2.

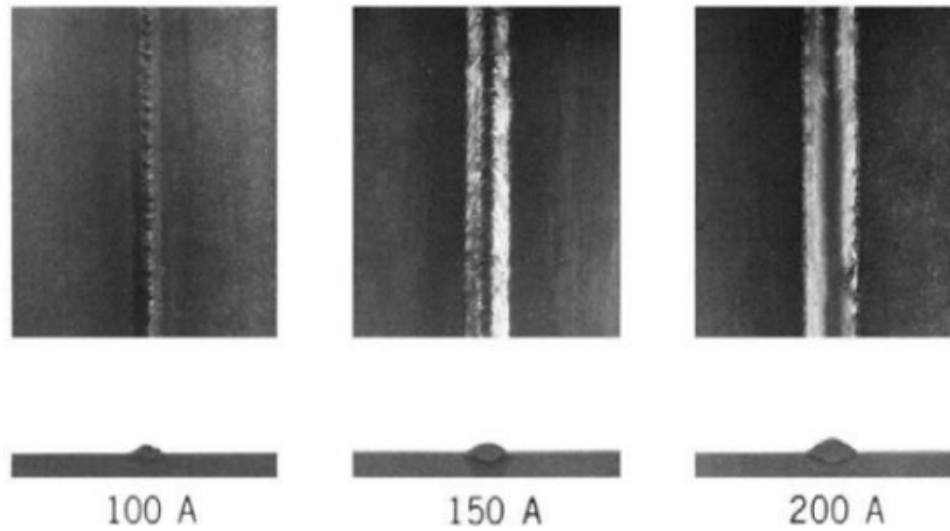


Figura 2.2: Efeito da corrente de soldadura na penetração da solda – aço carbono, curto-circuito, Ar-25%CO₂ [13].

A tensão de soldadura também desempenha um papel importante, pois influencia a estabilidade do arco e a fluidez do metal fundido, impactando diretamente a estética e as propriedades mecânicas da junta [11]. Como ilustrado na Figura 2.3.

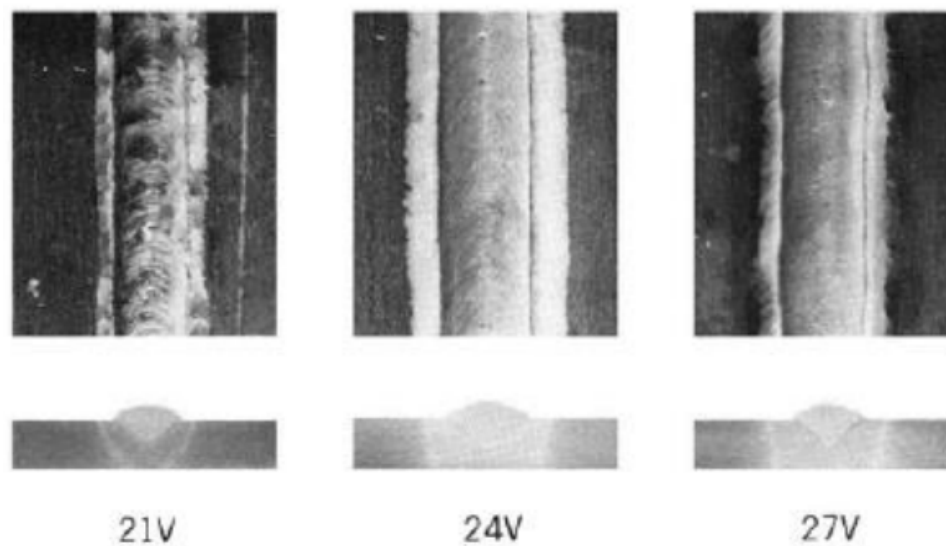


Figura 2.3: Efeito da tensão de soldadura na penetração da solda [13].

Já a velocidade de soldadura afeta a taxa de deposição do material e o controle da formação da poça de fusão, sendo essencial para evitar defeitos como porosidade ou fusão

excessiva do metal [11]. A seguir na Figura 2.4 encontram-se cordões de soldadura para diferentes valores de avanço.

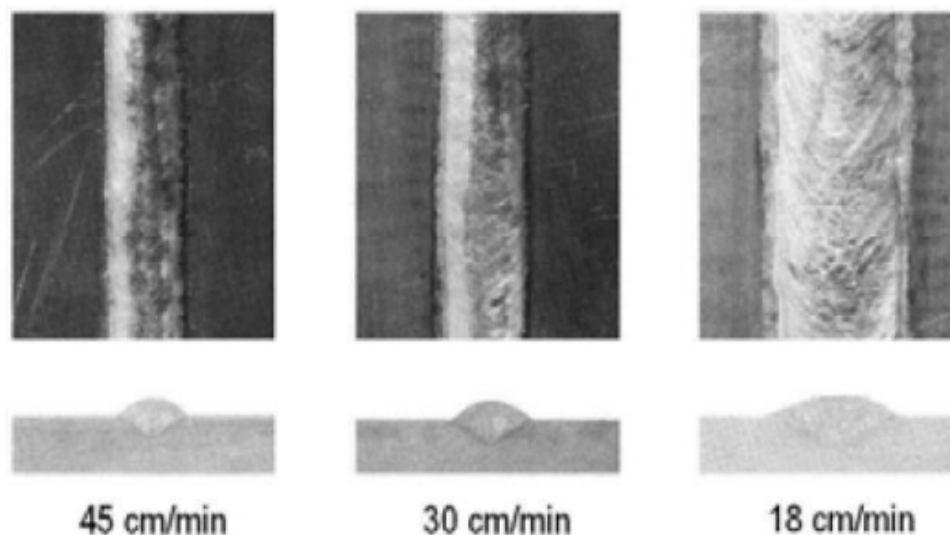


Figura 2.4: Efeito da velocidade de soldadura na penetração da solda – alumínio, aerosol, árgon [13].

Além disso, o tipo de gás de proteção escolhido no processo GMAW tem um papel fundamental na qualidade da solda. A escolha do gás, como o argônio ou misturas de argônio e dióxido de carbono, impacta a estabilidade do arco elétrico e a proteção contra a contaminação atmosférica. Gases de proteção adequados ajudam a reduzir a porosidade e melhoram as propriedades mecânicas das juntas soldadas [12].

A inclinação da tocha de soldadura influencia tanto o formato do cordão quanto a profundidade de penetração. Essa inclinação pode ser descrita em duas direções: o ângulo entre o eixo do eletrodo e a direção de movimentação da tocha, e o ângulo entre o eixo do eletrodo e a superfície da peça. Quando o fio de solda é alimentado em direção contrária ao movimento do arco elétrico, utiliza-se a chamada técnica de retração, na qual o metal de adição é depositado sobre o material já fundido. Por outro lado, quando a alimentação do eletrodo ocorre no mesmo sentido do deslocamento da tocha, emprega-se a técnica de avanço, onde o arame é inserido diretamente na região a ser soldada [14]. A Figura 2.5 apresenta o efeito do ângulo entre o eletrodo e o sentido de deslocamento da tocha no

cordão de soldadura.

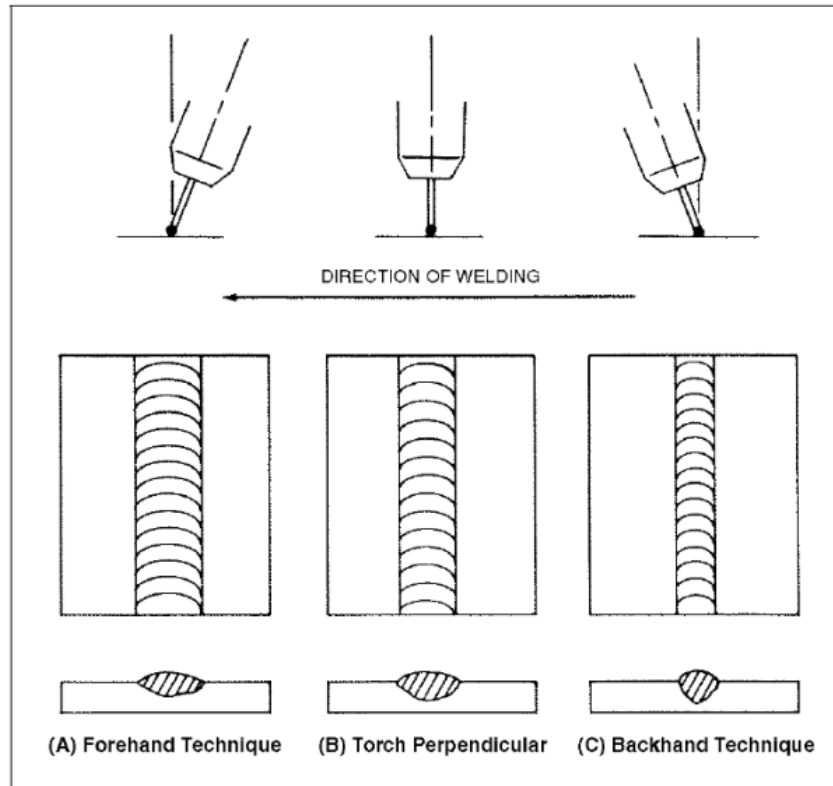


Figura 2.5: Efeito da orientação da tocha no cordão de soldadura para o sentido empurrando (A), perpendicular (B) e puxando (C) [14].

Portanto, o controle preciso de todos esses parâmetros de soldadura é essencial para garantir a formação de uma solda de alta qualidade, com propriedades mecânicas e resistência adequadas para suportar as condições exigidas pelas aplicações industriais [11]; [12].

2.3 Macrografia das juntas soldadas

A macrografia é uma técnica fundamental na análise de juntas soldadas, permitindo a avaliação visual das características macroestruturais das soldas. Essa análise é essencial para identificar descontinuidades, defeitos e a conformidade geométrica dos cordões de solda, além de fornecer informações sobre a qualidade do processo de soldadura [15].

A análise macroscópica permite a observação das diferentes zonas da junta soldada, como a zona fundida, a Zona Termicamente Afetada (ZTA) e o metal base, sendo crucial para compreender a influência do processo de soldadura na microestrutura e nas propriedades mecânicas da junta [16].

A análise macroscópica das juntas soldadas é uma etapa preliminar importante antes da realização de ensaios mais detalhados, como a micrografia e a análise de dureza. A macrografia permite a identificação de possíveis falhas superficiais e internas que podem comprometer a integridade da solda [15].

A preparação adequada das amostras para a macrografia é essencial para obter resultados confiáveis. Isso inclui o corte transversal da junta soldada, seguido de lixamento e ataque químico para revelar as diferentes zonas da solda. O ataque químico adequado destaca as regiões de interesse, facilitando a análise visual e a documentação fotográfica das características da solda [15].

A macrografia também desempenha um papel importante na validação de procedimentos de soldadura e na qualificação de soldadores, conforme estabelecido por normas técnicas e códigos de construção. Através da análise macroscópica, é possível verificar se a solda atende aos requisitos especificados e identificar áreas que necessitam de retrabalho ou ajustes no processo [16]. A seguir serão vistas as principais dimensões do cordão de solda na Figura 2.6.

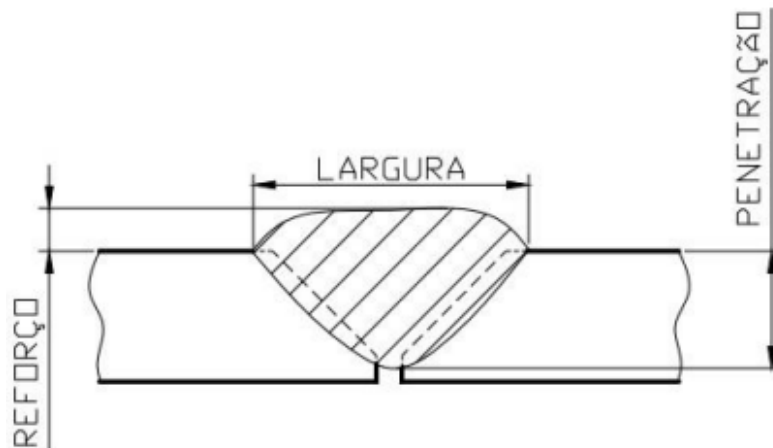


Figura 2.6: Principais dimensões do cordão de solda [14].

2.3.1 Largura

A largura da junta soldada é um parâmetro geométrico fundamental na análise macroscópica, pois influencia diretamente na resistência mecânica e na integridade estrutural da solda. Essa medida corresponde à distância entre as extremidades laterais da zona fundida, sendo determinada pela extensão do cordão de solda na direção transversal à junta [17].

Esse parâmetro está diretamente relacionado ao aporte térmico e à técnica de soldadura empregada, impactando significativamente a distribuição de tensões residuais e a constituição microestrutural da zona termicamente afetada (ZTA). Larguras excessivas podem indicar sobreaquecimento, resultando em aumento da ZTA, enquanto larguras reduzidas podem representar baixa penetração ou falta de fusão adequada [18].

A norma *International Organization for Standardization* (ISO) 15614-1 estabelece critérios para a avaliação da largura da solda durante a qualificação de procedimentos de soldadura, visando garantir a conformidade com os requisitos de projeto e a repetibilidade do processo [17].

2.3.2 Penetração

A penetração da solda refere-se à profundidade alcançada pelo metal fundido na junta durante o processo de soldadura. Esse parâmetro é crucial para garantir a resistência mecânica adequada e a integridade estrutural da solda. A análise macroscópica permite avaliar visualmente a extensão da penetração, identificando possíveis falhas, como falta de fusão ou penetração incompleta, que podem comprometer o desempenho da junta soldada [17].

A profundidade de penetração é influenciada por diversos fatores, incluindo o tipo de junta, os parâmetros de soldadura e as técnicas empregadas. Por exemplo, em processos de soldadura GMAW, a realização de múltiplos passes pode ser necessária para assegurar a penetração total, especialmente em juntas de maior espessura. A avaliação adequada da penetração é essencial para garantir a qualidade da solda e a conformidade com os

requisitos técnicos [19].

2.3.3 Reforço

O reforço da solda é definido como a altura adicional do metal depositado que excede a superfície do metal base após a soldadura. Este parâmetro é crucial na análise macroscópica, pois influencia diretamente na resistência mecânica e na integridade estrutural da junta soldada. Um reforço adequado contribui para a distribuição uniforme das tensões e para a prevenção de falhas, enquanto um reforço excessivo pode introduzir concentrações de tensão e afetar negativamente o desempenho da junta soldada [17].

A medição precisa do reforço é essencial para garantir a conformidade com os critérios de qualidade estabelecidos pelas normas técnicas. A análise macroscópica permite a avaliação visual do perfil do reforço, identificando possíveis irregularidades que possam comprometer a funcionalidade da solda. Além disso, o controle adequado do reforço está associado à melhoria da resistência à fadiga das estruturas soldadas, especialmente em aplicações sujeitas a carregamentos cíclicos [18].

2.4 Aço SAE 1020

O aço SAE 1020 é um aço carbono de baixo teor de carbono (aproximadamente 0,20%), classificado como de baixa resistência mecânica, porém com excelentes características de conformabilidade, usinabilidade e soldabilidade. Por possuir uma estrutura ferrita-perlita em sua condição bruta de laminação, é amplamente utilizado na fabricação de componentes estruturais leves, eixos, parafusos, engrenagens e peças que não exigem altos níveis de dureza ou resistência à tração. Além disso, este aço pode ser submetido a tratamentos térmicos como têmpera e revenimento, embora sua baixa temperabilidade limite o endurecimento efetivo em seções espessas [20].

Do ponto de vista metalúrgico, sua composição química favorece a boa soldabilidade e ductilidade, e o seu uso é comum em processos de soldagem, conformação mecânica e usinagem. A Tabela 2.1 apresenta a composição química típica do aço SAE 1020, enquanto

a Tabela 2.2 exibe suas propriedades mecânicas usuais na condição de fornecimento bruto de laminação [21].

Tabela 2.1: Composição química típica do aço SAE 1020 (% em massa) [21].

C	Mn	P (máx)	S (máx)	Si	Fe
0,17 - 0,23%	0,30 - 0,60%	0,040%	0,050%	0,15 - 0,35%	Balanceado

Tabela 2.2: Propriedades mecânicas típicas do aço SAE 1020 [20]; [21].

Propriedade	Valor Típico	Unidade
Limite de resistência à tração	395 - 540	MPa
Limite de escoamento	295 - 390	MPa
Alongamento (em 50 mm)	30	%
Dureza Brinell (HB)	111 - 180	HB
Módulo de Elasticidade	205.000	MPa

Essas características tornam o aço SAE 1020 uma escolha adequada para processos de soldagem com baixa exigência de resistência final, como os realizados neste trabalho. A presença ou ausência de tratamentos térmicos, como o recozimento, pode alterar significativamente suas propriedades, reduzindo tensões internas e melhorando a ductilidade do material.

2.5 Influência do tratamento térmico de recozimento na soldadura

O tratamento térmico de recozimento é essencial na soldadura, visando aliviar tensões residuais, refinar a microestrutura e restaurar as propriedades mecânicas dos materiais. Durante a soldadura, especialmente em aços com alto teor de manganês, formam-se microestruturas endurecidas na zona termicamente afetada (ZTA), o que pode comprometer

a tenacidade da junta. O recozimento pós-soldadura promove a homogeneização da microestrutura, reduzindo a dureza excessiva e melhorando a ductilidade da solda [22].

Estudos revelam que o recozimento pode transformar estruturas endurecidas, como martensita e bainita, em fases mais estáveis e dúcteis, como ferrita e perlita. Esse processo resulta na diminuição dos valores de dureza na ZTA, aproximando-os dos do metal de base, o que contribui para a integridade estrutural da junta soldada [22].

Além disso, o recozimento é eficaz na redução de tensões residuais geradas durante a soldadura. Essas tensões, se não aliviadas, podem levar a deformações indesejadas e comprometer a integridade estrutural. Um tratamento térmico adequado assegura a estabilidade dimensional e a longevidade das estruturas soldadas [23].

2.5.1 Recozimento: Conceitos e objetivos

O processo de recozimento é uma das técnicas mais importantes no tratamento térmico dos aços, com a finalidade de modificar suas propriedades mecânicas e microestruturais, conforme os objetivos específicos de cada aplicação. Esse tratamento envolve o aquecimento do aço a uma temperatura elevada, seguida de um arrefecimento controlado, e pode ter diversas variações dependendo da finalidade. A seguir, são abordados os principais objetivos e métodos de recozimento.

O recozimento tem como principais objetivos a eliminação de tensões internas, a melhoria da maquinabilidade, a homogeneização da estrutura e a preparação do material para tratamentos subsequentes. Entre os principais objetivos estão:

- Alívio de tensões: A remoção de tensões internas originadas durante processos de fabricação, como soldadura, deformação a frio ou maquinagem, é um dos principais objetivos do recozimento. Essas tensões podem levar a distorções ou até falhas no material, e o recozimento é eficaz para dissipá-las, garantindo a integridade da peça [24].
- Melhoria da maquinabilidade: O recozimento também tem como objetivo melhorar a maquinabilidade dos aços, especialmente os que possuem carbonetos difíceis de

trabalhar. Esse efeito é obtido principalmente através da transformação das estruturas de cementite em formas mais globulares ou esferoidais, o que facilita o corte e a maquinagem do material [25].

- Homogeneização da microestrutura: O recozimento pode ser utilizado para homogeneizar a microestrutura de peças fundidas, corrigindo segregações de composição e melhorando a uniformidade do material. Esse processo é essencial para a obtenção de propriedades mecânicas mais estáveis e previsíveis em componentes fundidos ou lingotados [24].
- Preparação para tratamentos subsequentes: Em muitos casos, o recozimento serve como um estágio preparatório para outros tratamentos térmicos, como a tempera e o revenido, ou mesmo para processos de soldadura, garantindo que o material possua as características desejadas antes do tratamento final [25].

O recozimento pode ser classificado em diferentes tipos, conforme o objetivo desejado, incluindo:

- Recozimento de difusão: Esse processo visa melhorar a homogeneidade da estrutura do aço através da difusão de componentes solúveis, como carbono, entre outros elementos de liga. O recozimento de difusão é realizado a temperaturas superiores a 1050°C e pode durar de 2 a 45 horas, dependendo do tipo de aço e do grau de homogeneização desejado [25].
- Recozimento para alívio de tensões (subcrítico): Esse tipo de recozimento ocorre a temperaturas abaixo da linha A1 (geralmente entre 550°C e 700°C) e tem como principal objetivo aliviar as tensões internas geradas por processos mecânicos ou térmicos anteriores. O arrefecimento deve ser lento para evitar distorções, e o processo não deve causar transformações de fase no material [24].
- Recozimento para recristalização: Utilizado principalmente para eliminar o encruamento gerado pela deformação a frio, este tratamento térmico aquecerá o material

até temperaturas adequadas para a recristalização dos grãos, sem provocar mudanças de fase [24].

- Recozimento para homogeneização: Este processo é realizado em temperaturas mais elevadas do que o recozimento de alívio de tensões, com o objetivo de melhorar a uniformidade da microestrutura, especialmente em peças fundidas, corrigindo segregações e outras imperfeições [24].
- Recozimento isotérmico ou cíclico: O recozimento isotérmico melhora a homogeneidade da microestrutura, realizando o aquecimento do aço a temperaturas próximas ou ligeiramente acima da linha A3, seguido de um arrefecimento rápido, geralmente em um banho de sais fundidos. Este tratamento é mais econômico do que o recozimento completo e é aplicável principalmente em aços hipoeutectoides e hipereutectoides [24].
- Esferoidização ou coalescimento: Com o objetivo de gerar uma estrutura globular de carbonetos, esse tipo de recozimento melhora a maquinabilidade de aços com alto teor de carbono, facilitando o processo de maquinagem [24].

A temperatura e o arrefecimento no processo de recozimento são cruciais para o sucesso do tratamento. Dependendo do tipo de recozimento, as temperaturas podem variar entre 550°C e 1200°C, e o controle do arrefecimento (lento ou rápido) também influencia diretamente as propriedades do material final. A temperatura de recozimento deve ser cuidadosamente escolhida para garantir que as transformações desejadas ocorram sem comprometer a integridade da estrutura do aço.

Em resumo, o recozimento é um tratamento térmico versátil com diversos objetivos, que vão desde a melhoria da maquinabilidade até a preparação do aço para tratamentos subsequentes. A escolha do tipo de recozimento e das condições específicas de temperatura e arrefecimento dependerá das propriedades desejadas no produto final.

2.5.2 Efeitos do recozimento na microestrutura do aço SAE 1020

O aço SAE 1020 é um aço carbono de baixo teor (aproximadamente 0,20% de C), classificado como hipoeutetoide. Devido à sua composição simples, boa soldabilidade e razoável resistência mecânica, é amplamente utilizado em componentes estruturais, eixos, pinos e peças que requerem boa usinabilidade. No entanto, para atender às exigências de conformação mecânica e estabilidade dimensional, o recozimento é frequentemente empregado para modificar sua microestrutura e propriedades [20].

O recozimento, quando aplicado ao aço SAE 1020, promove alterações significativas na microestrutura, resultando, em geral, em uma matriz composta por ferrita e perlita, com uma distribuição mais homogênea e uma morfologia refinada [24].

Os tratamentos de recozimento, principalmente o recozimento de amaciamento, têm por objetivo transformar a estrutura perlítica lamelar em uma estrutura esferoidizada, facilitando a maquinagem e reduzindo tensões internas. Nos aços de baixo carbono, como o SAE 1020, esse processo ocorre abaixo da linha crítica inferior (A_c), geralmente entre 680°C e 700°C, promovendo a globulização parcial dos carbonetos, sem formação de austenita durante o aquecimento [25].

Já o recozimento subcrítico, ou de alívio de tensões, é eficaz em aços como o SAE 1020 para eliminar tensões residuais oriundas de processos como laminação a frio, corte e soldadura, sem causar transformação de fase — o que contribui para a estabilidade dimensional da peça [24].

Durante o recozimento, há redução da energia interna do material, favorecendo a recristalização dos grãos deformados e a esferoidização da cementita. Tais transformações são responsáveis pelo aumento da ductilidade e pela redução da dureza, propriedades desejáveis em aplicações industriais diversas [20].

Na prática, os efeitos do recozimento no aço SAE 1020 dependem das condições térmicas adotadas (temperatura, tempo de permanência e velocidade de arrefecimento):

- Recozimento subcrítico (alívio de tensões): promove o relaxamento das tensões

internas sem alteração significativa da microestrutura, preservando a distribuição de ferrita e perlita. É especialmente indicado para peças que passaram por soldadura, corte ou conformação leve [24].

- Recozimento de amaciamento: proporciona a transformação da perlita lamelar em perlita globular ou esferoidita parcial, resultando em uma estrutura mais macia e de melhor maquinabilidade, favorecendo processos como torneamento e furação [25].
- Recozimento de recristalização: utilizado após deformações a frio (trefilação, laminação, etc.), restaura a ductilidade e reduz a dureza por meio da formação de novos grãos equiaxiais de ferrita e perlita refinada [20].

Do ponto de vista metalográfico, observa-se uma redução no tamanho de grão, o desaparecimento de texturas orientadas (como a fibrosidade) e uma distribuição mais uniforme da perlita na matriz de ferrita. A presença de cementita globular em substituição às lamelas típicas da perlita é indicativo de um recozimento eficaz [20].

O recozimento do aço SAE 1020 é uma etapa crucial na engenharia metalúrgica, permitindo adequações microestruturais conforme as exigências de fabricação e desempenho. Os diversos tipos de recozimento — amaciamento, alívio de tensões e recristalização — conferem flexibilidade ao tratamento térmico, sendo úteis desde as etapas de conformação até o acabamento final [25]; [24]; [20].

Além disso, o conhecimento dos efeitos microestruturais associados ao recozimento possibilita uma melhor seleção de tratamentos térmicos, otimizando propriedades como dureza, ductilidade, tenacidade e maquinabilidade. Isso assegura tanto a eficiência do processo produtivo quanto a confiabilidade do desempenho final da peça [20].

2.5.3 Impacto do recozimento nas propriedades mecânicas das juntas soldadas

Durante o processo de soldadura, a região da junta e sua Zona afetada termicamente (ZAC) sofrem alterações microestruturais intensas, acompanhadas pela introdução de

tensões residuais e heterogeneidade de fases. Para restaurar as propriedades mecânicas e promover estabilidade dimensional, o recozimento pleno é uma alternativa eficaz, especialmente em aços de baixo carbono como o SAE 1020.

Nas amostras analisadas neste trabalho, foi empregado o recozimento pleno a uma temperatura de 880°C, seguido de arrefecimento lento no forno. Esse tipo de recozimento promove a formação de uma microestrutura predominantemente composta por ferrita e perlita lamelar refinada, além de contribuir para uma homogeneização mais profunda da junta e das regiões adjacentes.

Esse tratamento proporciona os seguintes benefícios:

- Dissolução parcial de estruturas endurecidas na ZAC: A temperatura elevada permite a austenitização da microestrutura, dissolvendo regiões martensíticas ou bainíticas formadas pela soldadura e promovendo uma posterior transformação controlada durante o resfriamento [20].
- Redução das tensões residuais internas: O recozimento pleno relaxa significativamente os esforços internos gerados pelo ciclo térmico da soldadura, reduzindo o risco de fissuras e deformações [25].
- Refinamento de grãos e melhora da ductilidade: A recristalização completa durante o aquecimento e o crescimento controlado de novos grãos resultam em maior ductilidade e menor dureza, tornando a junta mais tenaz e menos suscetível à fratura frágil [24].

As mudanças promovidas pelo recozimento pleno impactam diretamente propriedades como:

- Dureza: Os valores de dureza caem consideravelmente após o recozimento, tornando a região soldada mais uniforme em comparação com o metal base e a ZAC.
- Tenacidade: O aumento da tenacidade é particularmente relevante em aplicações sujeitas a choques ou impactos, pois reduz a tendência à fratura abrupta em zonas termicamente alteradas.

- Resistência à tração e flexão: Apesar de uma possível leve redução nos valores máximos de resistência, a redistribuição homogênea das fases e a eliminação de estruturas endurecidas garantem uma performance mecânica mais previsível e segura.
- Resistência à fadiga: A eliminação de tensões residuais e a regularização da microestrutura aumentam a vida útil sob cargas cíclicas, favorecendo aplicações estruturais.

O recozimento pleno a 880°C, conforme aplicado nas amostras deste estudo, demonstrou ser eficaz na modificação das propriedades mecânicas das juntas soldadas de aço SAE 1020. Sua aplicação permite não apenas o alívio de tensões, mas também a transformação microestrutural completa, gerando uma estrutura equilibrada, macia e dúctil, ideal para subseqüentes processos de maquinagem ou conformação.

2.6 Ensaio de flexão em três pontos

O ensaio de flexão em três pontos é um método de caracterização mecânica amplamente utilizado para avaliar o comportamento de materiais submetidos a esforços de flexão. Nesse tipo de teste, um corpo de prova é apoiado em dois pontos fixos, enquanto uma carga é aplicada no ponto central, gerando uma deformação que pode ser analisada para determinar propriedades como resistência à flexão, módulo de elasticidade e comportamento de fratura [20]. O ensaio é realizado de forma a observar a deformação do material sob uma força aplicada, o que pode fornecer informações sobre a ductilidade, resistência e comportamento à fratura do material.

Este tipo de ensaio é essencial na análise de materiais metálicos e plásticos, especialmente em componentes estruturais que podem estar sujeitos a diferentes condições de carga. A sua aplicação em materiais soldáveis permite uma compreensão detalhada das tensões que as juntas soldadas podem suportar e das mudanças nas propriedades do material após tratamentos térmicos, como o recozimento, que pode influenciar diretamente no desempenho e na integridade das soldas .

2.6.1 Princípios do ensaio de flexão

O ensaio de flexão em três pontos é um método amplamente utilizado para a avaliação da resistência de materiais submetidos a esforços de flexão. Consiste na aplicação de uma carga concentrada no centro de uma viga ou corpo de prova apoiado em duas extremidades, gerando uma região de tração em uma face e compressão na face oposta. O objetivo principal do ensaio é determinar propriedades como o módulo de elasticidade em flexão, o limite de resistência à flexão e o comportamento do material até a fratura [26].

Durante o teste, a carga aplicada provoca uma curvatura no corpo de prova, sendo a máxima tensão gerada na seção central, onde ocorre a aplicação da força. Essa condição permite analisar a resposta do material frente a deformações e rupturas, sendo um ensaio particularmente útil para materiais frágeis ou compósitos. A simplicidade de execução, aliada à possibilidade de extração de informações importantes para o projeto mecânico, faz do ensaio de flexão em três pontos uma ferramenta essencial na caracterização mecânica de materiais [27].

Como resultado do ensaio, obtém-se um gráfico que relaciona a Tensão com a Deformação do material. A partir dessa representação gráfica, é possível identificar as propriedades mecânicas mencionadas anteriormente, bem como verificar se o material apresenta comportamento dúctil ou frágil. O percurso da curva (ilustrado na Figura 2.7) é construído com base no registro das deformações que ocorrem no material na direção da força aplicada, correspondendo a cada valor de tensão durante o processo de carregamento [14].

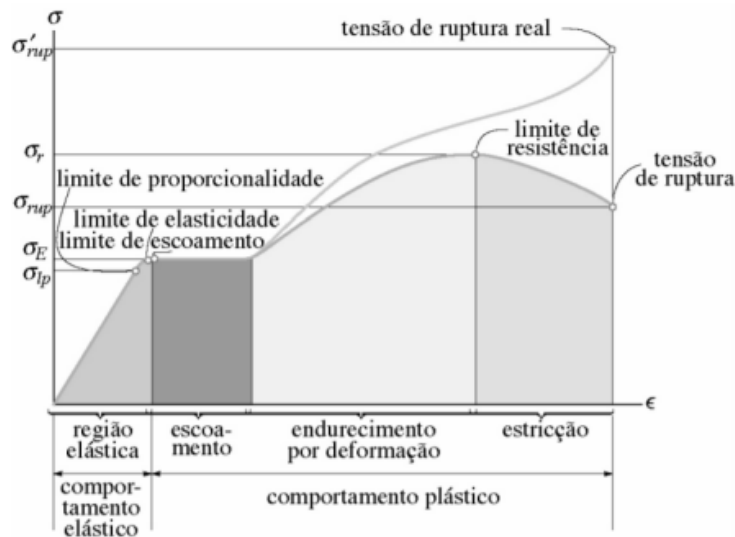


Figura 2.7: Diagrama de Tensão x Deformação convencional e real para material dúctil. [28].

2.6.2 Parâmetros avaliados no ensaio

No ensaio de flexão em três pontos, diversos parâmetros são analisados para caracterizar o comportamento mecânico do material. Um dos principais é a resistência à flexão, que representa a tensão máxima suportada pelo material antes da fratura. Este valor é especialmente relevante para materiais frágeis, como cerâmicas e compósitos, pois pode diferir significativamente do limite de tração obtido em ensaios convencionais [29].

Outro parâmetro fundamental é o módulo de elasticidade em flexão, que indica a rigidez do material sob carregamento flexural. Ele é obtido a partir da inclinação da curva carga versus deflexão na fase elástica do ensaio. Além disso, a tenacidade à fratura pode ser inferida por meio da área sob a curva carga-deslocamento, permitindo a análise da energia absorvida até a ruptura [30].

Também são observados aspectos como a deformação máxima, a curvatura na região central do corpo de prova e o modo de fratura, que pode ser analisado visualmente ou por meio de microscopia, permitindo identificar se o comportamento foi predominantemente dúctil ou frágil. Em materiais metálicos soldados, como o aço SAE 1020, essa análise é útil para avaliar a integridade das juntas e os efeitos de tratamentos térmicos, como o

recozimento [31].

2.6.3 Aplicação do ensaio na análise da soldadura

O ensaio de flexão em três pontos é amplamente utilizado na análise de juntas soldadas, pois permite avaliar a integridade mecânica da solda e detectar possíveis falhas, como fissuras e descontinuidades. Esse método é eficaz na identificação de defeitos internos que não são visíveis externamente, proporcionando uma avaliação confiável da qualidade da soldadura [32].

Além disso, o ensaio de flexão é sensível às variações microestruturais resultantes do processo de soldadura, permitindo a análise da tenacidade e da ductilidade da junta soldada. A flexão imposta no ensaio gera uma distribuição de tensões que evidencia a fragilidade de regiões comprometidas, sendo uma ferramenta eficaz na avaliação da resistência à fratura da solda [33].

Em estudos experimentais, o ensaio de flexão em três pontos tem sido empregado para avaliar o comportamento de juntas soldadas submetidas a diferentes condições de carregamento. Por exemplo, em minerodutos, esse ensaio é utilizado para simular as condições reais de operação e avaliar a vida útil da solda sob ciclos de carregamento, contribuindo para a prevenção de falhas catastróficas [32].

Conforme estabelece a norma ISO 5173 e ISO 7438, o corpo de prova destinado à realização do ensaio de flexão em três pontos deve ser extraído da seção transversal do cordão de solda e apresentar dimensões determinadas de acordo com as medidas do material de origem. As medidas padronizadas dos corpos de prova para o teste de flexão (Figura 2.8) estão indicadas na Tabela 2.3.

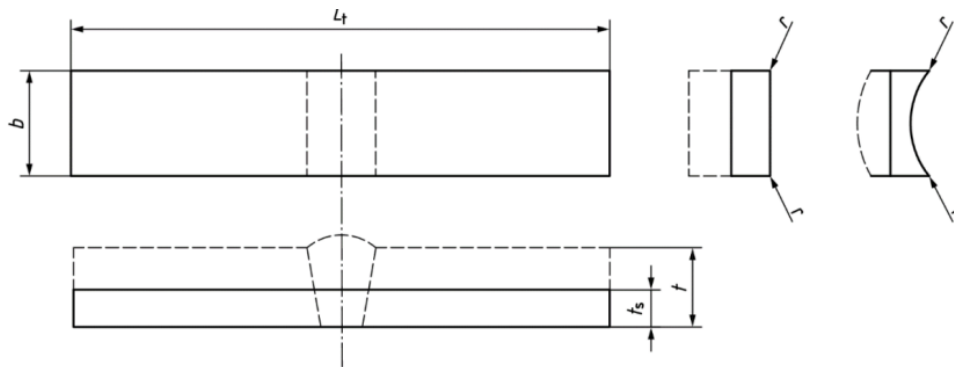


Figura 2.8: Representação do corpo de prova de acordo com a norma [34].

Tabela 2.3: Dimensões normalizadas dos provetes de acordo com a norma [35].

Denominação	Símbolo
b	largura do corpo de prova
L_t	comprimento total do corpo de prova
r	raio das bordas do espécime de teste
t	espessura da peça de teste
T_s	espessura do corpo de prova

2.7 Método Taguchi para otimização do processo

O método Taguchi, desenvolvido por Genichi Taguchi, é amplamente reconhecido por sua eficácia na otimização de processos industriais, visando a redução de variações e o aprimoramento da qualidade do produto final. Esse método se baseia em princípios estatísticos robustos, utilizando matrizes ortogonais para reduzir o número de experimentos necessários para avaliar as diferentes variáveis envolvidas no processo [36]. O método tem sido aplicado com sucesso em diversas áreas da engenharia, incluindo na soldadura, onde as condições de operação podem ser ajustadas para obter resultados de alta qualidade, minimizando falhas e variações indesejadas no produto final [37].

O método Taguchi é especialmente útil na soldadura porque permite controlar fatores

como corrente de soldadura, velocidade de avanço e temperatura, identificando a combinação ideal desses parâmetros para obter melhores propriedades mecânicas das juntas soldadas [38]. A aplicação da razão sinal-ruído (S/N), uma das principais métricas do método, busca otimizar o desempenho do processo, maximizando a resposta desejada (como a resistência ou a dureza das soldas) e minimizando a influência de fatores perturbadores, como as flutuações de temperatura e a presença de impurezas [37].

Dessa forma, o método Taguchi não só contribui para a melhoria da qualidade do processo de soldadura, mas também para a redução de custos, ao permitir ajustes precisos e rápidos nos parâmetros do processo [36].

2.7.1 Conceitos fundamentais do método Taguchi

O método Taguchi é uma abordagem estatística desenvolvida com o objetivo de melhorar a qualidade de produtos e processos industriais por meio da robustez frente a variações externas. O cerne da metodologia está no planejamento experimental eficiente, que permite identificar as melhores condições de operação com o menor número possível de ensaios. Taguchi introduziu a ideia de que a qualidade deve ser projetada desde o início do desenvolvimento do produto, e não apenas controlada após a fabricação [36].

Um dos pilares do método é a utilização de matrizes ortogonais para o planejamento dos experimentos. Essas matrizes possibilitam a análise de múltiplos fatores e níveis com um número reduzido de testes, facilitando a identificação dos parâmetros mais influentes e suas interações. Isso resulta em economia de tempo e recursos, sem comprometer a confiabilidade dos dados [38].

Outro conceito-chave é a função perda de Taguchi, que quantifica o impacto financeiro da variação de um processo fora de seu valor ideal, mesmo que esteja dentro das especificações de tolerância. Essa função reforça a ideia de que qualquer desvio do valor ideal representa perda para o consumidor e para a empresa, incentivando o foco na estabilidade e previsibilidade dos processos [37].

Além disso, a razão sinal-ruído (S/N) é empregada como critério de otimização. Essa

métrica busca maximizar o efeito desejado (sinal) e minimizar o efeito de ruídos ou variações não controladas no processo. Dessa forma, é possível obter um desempenho mais robusto e confiável do sistema mesmo sob condições variáveis [36].

2.7.2 Planejamento experimental com matrizes ortogonais

O método Taguchi é amplamente reconhecido por sua eficácia na condução de experimentos com múltiplos fatores de forma simplificada e estatisticamente robusta. O uso de matrizes ortogonais é um dos pilares dessa abordagem, permitindo a avaliação de diversos parâmetros com um número reduzido de testes. Em vez de realizar todas as combinações possíveis entre os fatores e níveis (como nos experimentos fatoriais completos), o método utiliza uma seleção criteriosa de combinações que preserva a independência estatística entre os fatores. Isso é possível porque as matrizes ortogonais são construídas de forma que cada fator seja avaliado de maneira equilibrada em relação aos demais [17].

Essas matrizes são tabelas pré-definidas que orientam o planejamento dos experimentos. Por exemplo, a matriz $L9(3^3)$ permite estudar três fatores em três níveis, utilizando apenas nove experimentos em vez dos vinte e sete que seriam exigidos em um planejamento fatorial completo. Essa estrutura possibilita avaliar os efeitos principais dos fatores, mesmo sem considerar as interações entre eles. A escolha da matriz mais adequada depende do número de fatores e níveis envolvidos na análise. O uso dessas matrizes reduz drasticamente o tempo e os custos experimentais, mantendo a confiabilidade dos resultados [39].

Além disso, a lógica por trás das matrizes ortogonais garante que cada nível de cada fator apareça o mesmo número de vezes ao longo dos experimentos, assegurando equilíbrio e imparcialidade na comparação dos efeitos. Isso facilita a análise estatística posterior, como a avaliação da razão sinal-ruído e da variância dos resultados. Por essas razões, o método tem sido amplamente aplicado em estudos relacionados com a soldadura, maquinagem, moldação e outros processos industriais, onde a otimização de parâmetros operacionais é essencial para garantir desempenho e qualidade [40].

2.7.3 Razão sinal-ruído e sua aplicação na soldadura

A razão sinal-ruído (S/N) é uma métrica estatística fundamental no método Taguchi, utilizada para avaliar a robustez de um processo frente a variações indesejadas, denominadas "ruído". Essa métrica visa maximizar o "sinal" (o efeito desejado) e minimizar o "ruído" (as variações indesejadas), garantindo que o desempenho do processo seja estável mesmo diante de incertezas externas. Existem diferentes tipos de funções S/N, e a escolha depende do objetivo do processo: maior é melhor, menor é melhor ou valor nominal desejado [17].

No contexto da soldadura, a análise da razão S/N permite identificar os parâmetros ideais, como corrente, velocidade de soldadura e vazão de gás, que garantem melhores resultados em termos de penetração, resistência mecânica e uniformidade do cordão. Essa análise estatística facilita a tomada de decisões com base em critérios quantitativos e permite identificar quais fatores têm maior impacto sobre a qualidade final da solda [41].

A aplicação da razão S/N é especialmente valiosa em processos de soldadura MIG/MAG e TIG, onde pequenas flutuações nos parâmetros operacionais podem comprometer a qualidade do cordão. Ao utilizar o método Taguchi e a função S/N, pesquisadores e engenheiros conseguem projetar experimentos de forma eficiente e obter configurações otimizadas do processo. A robustez resultante garante não apenas melhor desempenho técnico, mas também maior confiabilidade e redução de retrabalhos, refletindo diretamente na economia de recursos e no aumento da produtividade [14].

Quando o objetivo é reduzir a resposta para a característica de qualidade selecionada, adota-se o critério "quanto menor, melhor", e a razão S/Ns é determinada de acordo com a Equação 2.1 [42]:

$$\frac{S}{N_s} = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) \quad (2.1)$$

Quando o objetivo é otimizar a resposta da característica de qualidade, escolhe-se o critério "quanto maior, melhor" e a razão sinal-ruído é determinada conforme a Equação 2.2 [42]:

$$\frac{S}{N_L} = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right) \quad (2.2)$$

Para as equações 1 e 2, n representa o número de medições efetuadas e Y_i os dados registrados. Quando afirmamos que um valor nominal é o ideal, ou seja, existe um valor ótimo para essa característica de qualidade, a razão sinal-ruído é calculada conforme a Equação 2.3 [14]:

$$\frac{S}{N_N} = -10 \times \log \left(\frac{\bar{Y}^2}{\sigma^2} \right) \quad (2.3)$$

A variável \bar{Y} representa a média dos resultados dos experimentos, enquanto σ é o desvio padrão. Nessa situação, é definida uma resposta alvo, e a razão sinal-ruído é calculada com base apenas nas médias e no desvio padrão.

2.8 Análise de variância (ANOVA)

A Análise de Variância (ANOVA) é uma técnica estatística amplamente utilizada para avaliar a influência de diferentes fatores sobre uma variável resposta, permitindo identificar se as médias de três ou mais grupos são estatisticamente distintas. Através da decomposição da variabilidade total dos dados, a ANOVA auxilia na compreensão das fontes de variação e na determinação da significância estatística dos fatores envolvidos em um experimento [43].

No campo da soldadura, a ANOVA tem papel essencial na avaliação da influência dos parâmetros de processo sobre as propriedades das juntas soldadas. Fatores como corrente de soldadura, velocidade de avanço e tipo de gás de proteção são analisados para verificar sua significância sobre resultados como resistência mecânica, dureza ou geometria do cordão. Em estudos aplicados à soldadura de aços inoxidáveis austeníticos pelo processo TIG, a ANOVA demonstrou ser eficiente para identificar quais parâmetros influenciam significativamente na resistência à tração e na dureza, otimizando a qualidade do processo [44].

A aplicação da ANOVA também é comum em processos de soldadura por fricção e mistura mecânica. Em pesquisas com ligas de alumínio, por exemplo, a técnica permitiu avaliar a contribuição de fatores como profundidade de penetração e tempo de soldadura na resistência ao cisalhamento das juntas. Com base nos resultados da ANOVA, foi possível ajustar os parâmetros para alcançar melhores propriedades mecânicas, demonstrando a robustez e aplicabilidade da ferramenta estatística em contextos industriais complexos [45].

2.8.1 Conceitos e fundamentos da ANOVA

A análise de variância (ANOVA) é uma técnica estatística utilizada para determinar se existem diferenças significativas entre as médias de três ou mais grupos independentes. O método foi desenvolvido por Ronald A. Fisher em 1925 e é amplamente utilizado para a análise de experimentos, como os de controle de qualidade e de otimização de processos industriais [46].

O principal objetivo da ANOVA é testar a hipótese nula de que todas as médias populacionais são iguais, sendo então necessário comparar a variabilidade entre os grupos com a variabilidade dentro dos grupos. Caso a razão entre essas variabilidades seja significativamente grande, isso indica que pelo menos uma das médias é diferente das outras [47].

A ANOVA pode ser realizada de diferentes formas, sendo as mais comuns a ANOVA de um fator e a ANOVA de dois fatores. A ANOVA de um fator é utilizada quando se tem uma única variável independente, enquanto a ANOVA de dois fatores envolve duas variáveis independentes. A escolha entre esses métodos depende do tipo de experimento e das perguntas de pesquisa [46]; [47].

Essa abordagem visa verificar a hipótese de que as médias de duas ou mais populações em estudo são equivalentes. A relevância de um ou mais fatores é analisada por meio da ANOVA, que compara as médias das variáveis dependentes em diferentes categorias do fator avaliado. Para isso, são formuladas duas hipóteses (conforme ilustrado na Figura

2.9): a hipótese nula, que propõe que as médias dos grupos populacionais (μ) são idênticas, e a hipótese alternativa, que sugere que pelo menos uma dessas médias difere das demais [41].

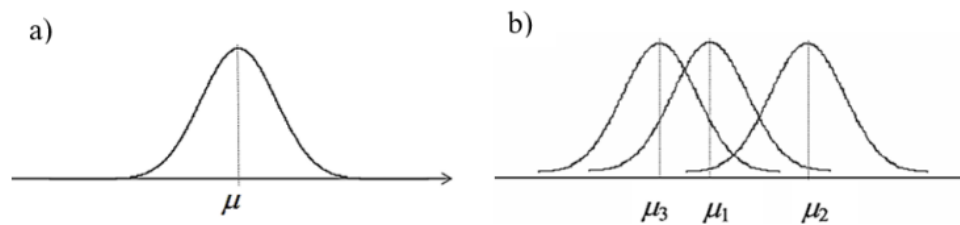


Figura 2.9: Distribuições populacionais quando a hipótese nula é (a) verdadeira ($\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu$) e (b) falsa ($\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$) [41].

De forma geral, uma análise de variância é examinada por meio de uma tabela ANOVA (Tabela 2.4), a qual é constituída por [41]:

- Fonte ou Parâmetros de Entrada;
- Graus de liberdade (GDL) das variáveis;
- Soma dos Quadrados (SQ): apresentam uma medida de desvio da média e inclui o cálculo do erro na soma total;
- Quadrados Médios (QM): razão da soma dos quadrados pelos graus de liberdade;
- Valor F: representa uma proporção de médias quadradas em relação à média quadrada do erro;

Tabela 2.4: Cálculos para análise de variância que compõem a tabela ANOVA [41].

Fonte de Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Variância (Soma Média dos Quadrados)	Razão F
Entre Grupos	$SS_A = n \sum_{j=1}^n (\bar{x}_j - \bar{x})^2$	$k - 1$	$S_b^2 = MS_A = \frac{SS_A}{k-1}$	$F = \frac{S_b^2}{S_p^2} = \frac{MS_A}{MS_E}$
Dentro dos Grupos Residuais	$SS_E = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2$	$k(n - 1)$	$S_p^2 = MS_E = \frac{SS_E}{k(n-1)}$	
Total	$SS_T = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x})^2$	$nk - 1$		

2.8.2 Interpretação do resultados da ANOVA na soldadura

A análise de variância (ANOVA) é amplamente utilizada na soldadura como uma ferramenta estatística para identificar a influência de diferentes parâmetros do processo nas características do cordão de solda. Por meio da ANOVA, é possível determinar quais fatores exercem efeito significativo sobre a variável de resposta, como penetração, largura ou altura do cordão, permitindo otimizações baseadas em evidências. A análise gera uma tabela com dados como soma de quadrados, graus de liberdade, valor de F e valor-p, sendo este último utilizado para avaliar a significância estatística dos fatores. Valores de p inferiores a 0,05 indicam, com 95% de confiança, que o fator analisado possui influência relevante sobre o resultado [14].

No contexto da soldadura GMAW, a aplicação da ANOVA permite avaliar a significância dos parâmetros do processo, como corrente de soldadura, velocidade de avanço e tensão de arco, sobre as propriedades geométricas e mecânicas do cordão. Essa análise estatística auxilia na identificação dos fatores mais relevantes, orientando ajustes nos parâmetros de soldadura para garantir melhor desempenho do processo e maior qualidade das juntas soldadas. A interpretação correta dos valores de p, somada à análise dos gráficos de interação, fortalece a tomada de decisão técnica durante a otimização dos

procedimientos de soldadura [41].

Capítulo 3

Metodologia

Neste capítulo, serão descritas as metodologias e os procedimentos adotados para a execução deste estudo, desde o planejamento dos experimentos até a obtenção dos resultados, assim como os materiais empregados para esse propósito. As práticas e experimentos mencionados a seguir foram realizados nas instalações do Laboratório de Tecnologia Mecânica (LTM), Laboratório de Materiais de Construção Mecânica (LMCM), Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais (LERM) e no FabLab. Todos esses laboratórios estão localizados na Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTiG) do Instituto Politécnico de Bragança (IPB).

Nesta fase, serão descritos os procedimentos e as decisões adotadas para a execução das experimentações e atividades realizadas no estudo, desde o planejamento até a obtenção dos resultados finais.

3.1 Materiais utilizados

O material escolhido como metal base foi um aço carbono de baixa liga DIN C20, também conhecido como aço SAE 1020, cuja composição química é apresentada na Tabela 3.1. Como metal de adição, utilizou-se um arame eletrodo AWS ER70S-6, composto de aço revestido com cobre, cuja composição química está detalhada na Tabela 3.2.

Tabela 3.1: Composição química do aço SAE 1020 [48].

C	Mn	P máx	S máx
0,17 - 0,23%	0,30 - 0,60%	0,04%	0,05%

Tabela 3.2: Composição química do arame elétrico AWS ER70S-6 [49].

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
0,06 - 0,15%	1,40 - 1,85%	0,80 - 1,15%	0,025 máx	0,035 máx	0,15 máx	0,15 máx	0,15 máx	0,03 máx	0,50 máx

As chapas de aço DIN C20 têm uma espessura de 3 mm, sendo utilizado como metal de adição o arame AWS ER 70S-6, com diâmetro de $\varnothing 0,8$ mm. Buscou-se, por meio de um processo de otimização, definir uma geometria do cordão de solda em que o reforço ficasse próximo de 0 mm, atingindo um valor de penetração e largura semelhante à espessura da chapa, ou seja, 3 mm neste caso, além de alcançar o limite máximo de resistência transversal.

3.2 Planejamento experimental

Para conduzir uma experimentação eficaz e obter resultados satisfatórios, é essencial adotar uma metodologia bem fundamentada. Assim, o planejamento dos experimentos foi baseado no método de Taguchi, também conhecido como método das matrizes ortogonais. Essa abordagem tem como objetivo alcançar conclusões confiáveis por meio da diminuição do número de testes realizados, o que implica, por sua vez, na economia de recursos e tempo para se atingir os objetivos propostos.

O objetivo foi otimizar as características como penetração, largura, reforço e resistência à tração de juntas soldadas, utilizando um equipamento que permite a execução automatizada do processo de soldadura MIG/MAG. Foram utilizadas chapas de aço DIN C20 com espessura de 3 mm e metal de adição AWS ER 70S-6, apresentado na forma de

arame com diâmetro de $\varnothing 0,8$ mm. Por meio de um procedimento de otimização, buscou-se definir uma geometria de cordão de solda em que o reforço se aproximasse de 0 mm, atingindo valores de penetração e largura compatíveis com a espessura da chapa (3 mm neste caso), além de maximizar o limite de resistência à flexão transversal.

Os parâmetros de entrada selecionados para o estudo foram a tensão, a velocidade de soldadura e o ângulo de ataque da solda, onde, para cada um, foram atribuídos três níveis como indica a Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Parâmetros de estudo e seus níveis.

Parâmetros	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Tensão (V)	22,4	23,7	24,1
Velocidade de soldadura (mm/min)	250	325	400
Ângulo da tocha ($^{\circ}$)	0	15	25

A abordagem de Taguchi conta com diversas matrizes ortogonais. Para seis graus de liberdade, poderia ser empregada a matriz L_8 , no entanto, como essa matriz opera apenas com dois níveis, optou-se pela utilização da matriz ortogonal L_9 , exibida na Tabela 3.4, pois foram definidos três níveis para cada fator [14].

Com base na matriz, foi possível estruturar nove combinações de fatores, que posteriormente foram submetidas a testes. Para garantir uma análise estatística adequada, cada uma das nove combinações foi testada três vezes, totalizando 57 experimentos, sendo 27 sem tratamento térmico, 27 recozidas e 3 para calibração da máquina para a realização do ensaio de flexão em 3 pontos. Na Tabela 3.5, os fatores e seus respectivos níveis de análise foram incorporados à matriz L_9 [14].

Tabela 3.4: Matriz ortogonal L_9 (3^4) de Taguchi [41].

N°	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1
	a	b	a	a
			b	b ²
GRUPO	1	2		

Tabela 3.5: Matriz L_9 de Taguchi com os parâmetros de estudo.

Ensaio	Ângulo da tocha (°)	Tensão (V)	Velocidade de soldadura (mm/min)
1	0	22,4	250
2	0	23,7	325
3	0	24,1	400
4	15	22,4	325
5	15	23,7	400
6	15	24,1	250
7	25	22,4	400
8	25	23,7	250
9	25	24,1	325

Elementos como a velocidade de alimentação do arame e a distância entre o bico da tocha e a peça (*stick-out*) não foram objeto de análise direta neste estudo. Contudo, ambos os fatores foram ajustados de maneira específica em cada ensaio, levando em consideração os parâmetros empregados, com o objetivo de evitar falhas no processo de soldadura.

A velocidade de alimentação do arame foi regulada conforme a combinação de parâmetros aplicada em cada teste, sendo mantida dentro do intervalo de 3,2 a 4 m/min. No caso do *stick-out*, foi utilizada uma distância aproximada de 10 mm para soldaduras com ângulo de 0° , e de 15 mm para os ensaios com ângulos de tocha de 15° e 25° , assegurando que o bocal da tocha não tocasse o metal base. Todas as soldaduras realizadas com ângulos de 15° e 25° foram executadas na orientação de "puxar". Para o ângulo de 0° , a tocha foi posicionada perpendicularmente à superfície da peça, não se caracterizando como uma orientação do tipo "empurrar" ou "puxar", sendo, portanto, considerada uma condição neutra em termos de direção de soldadura.

3.3 Preparação dos corpos de prova

Para a realização dos cordões de solda, foram utilizadas uma chapa de aço SAE 1020 com dimensões de $160 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$, sendo duas chapas de 80 mm e realizado o processo de soldadura na união de ambos. Essas dimensões foram definidas de acordo com as normas ISO 7438 e ISO 5173 [35]; [34]. Para cortar as chapas nessas dimensões, utilizou-se uma guilhotina modelo Cutil Mini 320. A Figura 3.1 mostra as chapas após o corte na guilhotina, conforme as dimensões especificadas.



Figura 3.1: Chapas cortadas nas dimensões propostas.

Até o desenvolvimento deste trabalho, a máquina automática CNC havia sido utilizada

em um número reduzido de operações de soldadura. Assim, para garantir resultados satisfatórios, foi essencial verificar seu estado de funcionamento. Para isso, foram realizados diversos testes preliminares a fim de identificar possíveis falhas que exigissem intervenção, além de avaliar a repetibilidade dos movimentos executados pelo equipamento.

Dessa forma, foram executados códigos numéricos para avaliar o desempenho do equipamento e de seus componentes. Elementos como rolamentos e eixos-guia foram devidamente lubrificados para otimizar os movimentos de translação. Durante esses testes iniciais, constatou-se que o equipamento não estava calibrado, tendo problemas mecânicos e eletrônicos. Da parte mecânica os eixos roscados, às vezes "rodava em falso", fazendo com que a tocha não se desloca-se, ficando parado no mesmo lugar. Na componente eletrônica, verificou-se que a fonte de alimentação inicial trabalha no limite de energia, não fornecendo potência suficiente para os motores, que no meio do processo a mesmo acabou queimando e necessitou comprar uma nova fonte de alimentação. Um outro fator que foi necessário determinar estava relacionado com o cálculo da velocidade e distância percorrida pela máquina CNC com base no comando do programa e constatou que os valores eram divergentes, para tal correção, usou um fator de correção de 1,26, para melhor visualização a Equação 3.1 a seguir nos mostra.

$$V_m = \frac{V_r}{1,26} \quad (3.1)$$

Sendo V_m = Velocidade da máquina (mm/min), V_r = velocidade real (mm/min). A Tabela 3.6 mostra os valores corrigidos utilizados com base no fator de correção.

Tabela 3.6: Valores de velocidade em (mm/min).

V_r	V_m
250	198,42
325	257,94
400	317,46

Para facilitar a montagem e a soldadura no equipamento, foi realizado um gabarito

para agilizar o processo conforme mostrado nas Figura 3.2 e Figura 3.3.



Figura 3.2: Gabarito.



Figura 3.3: Gabarito com corpo de prova.

3.4 Procedimento experimentais

3.4.1 Realização dos cordões de solda

Para a realização dos procedimentos de soldadura, foi utilizado um dispositivo de controle numérico. Esse equipamento, mostrado na Figura 3.4, foi previamente projetado e construído por alunos do Instituto Politécnico de Bragança [41]. Esse mecanismo possibilita a movimentação da tocha de soldadura nos três eixos (X, Y e Z) e o acionamento do

arco elétrico, permitindo a execução dos cordões com maior precisão e estabilidade, sem depender da habilidade de um soldador para movimentar e acionar a tocha mostrado na Figura 3.5. O equipamento é conectado a um computador e, por meio do software Grbl Controller, que utiliza código G, é possível definir o percurso do cordão com alta precisão.

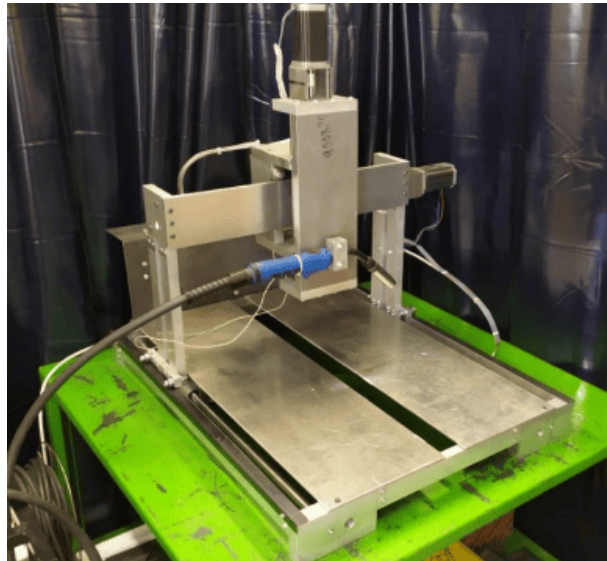


Figura 3.4: Aparato experimental de CNC [41].

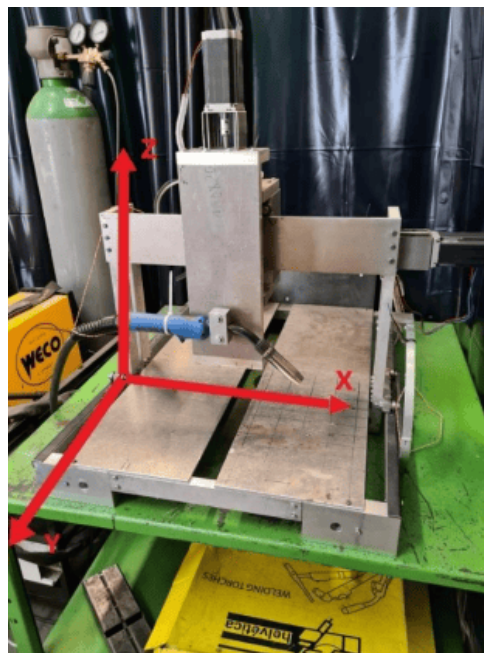


Figura 3.5: Mecanismo de soldadura com seus respectivos eixos [14].

Para a realização do processo de soldadura, o aparato experimental foi utilizado em conjunto com uma máquina de soldadura MIG 453 Modular, composta por uma fonte de energia, um alimentador de arame eletrodo e um cilindro de gás de proteção contendo uma mistura de argônio (Ar) 82% e dióxido de carbono (CO₂) 18%. A fonte de energia possibilitou a regulação dos níveis de tensão aplicados ao processo e, para cada nível de tensão, foi ajustada uma velocidade de alimentação do arame eletrodo, garantindo a deposição adequada do metal de adição, sem excessos ou deficiências. O gás de proteção desempenhou a função de criar uma atmosfera controlada na região da solda, prevenindo a contaminação por componentes do ar atmosférico, como nitrogênio (N₂), oxigênio (O₂) e vapor de água (H₂O).

Seguindo a ordem da Tabela 3.5, iniciou os processos de soldadura com a tocha em ângulo 0° conforme Figura 3.6 a seguir.

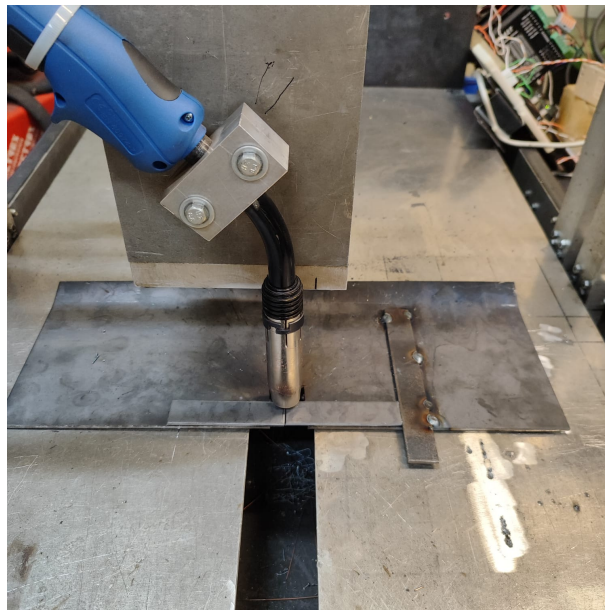


Figura 3.6: Soldadura com ângulo 0°.

Posteriormente, utilizando um transferidor para posicionar a tocha com ângulo de 15°, Figura 3.7 e Figura 3.8. Enquanto em ângulo 0° a soldadura foi feita na direção Y, para os ângulos de 15° foi realizado na direção X como Figura 3.9.

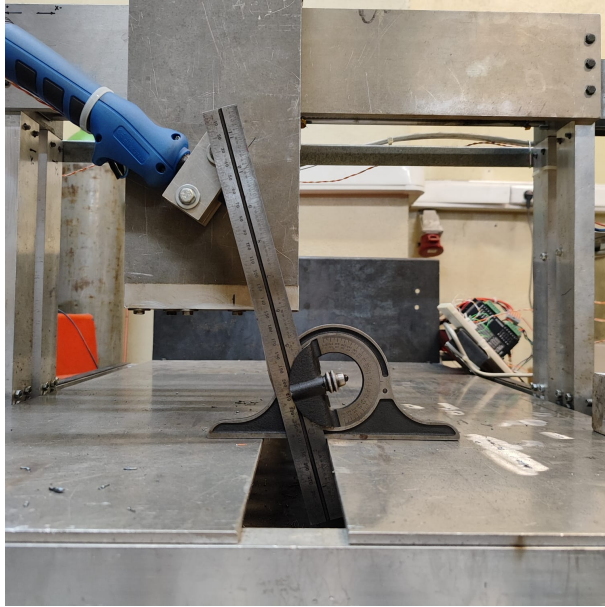


Figura 3.7: Ângulo de 15° com transferidor.

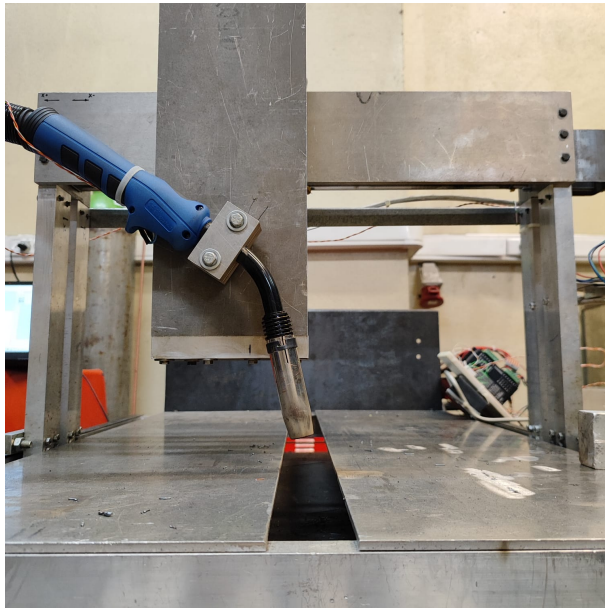


Figura 3.8: Ângulo de 15° .

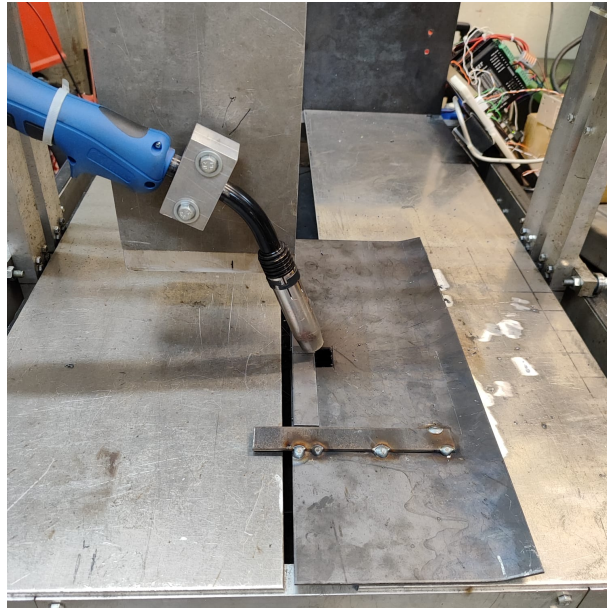


Figura 3.9: Soldadura na direção X com ângulo de 15° .

Por último, foi realizada a soldadura com ângulo de tocha de 25° , utilizando o transferidor novamente para deixar no ângulo desejado e sendo efetuado na direção X na Figura 3.10.

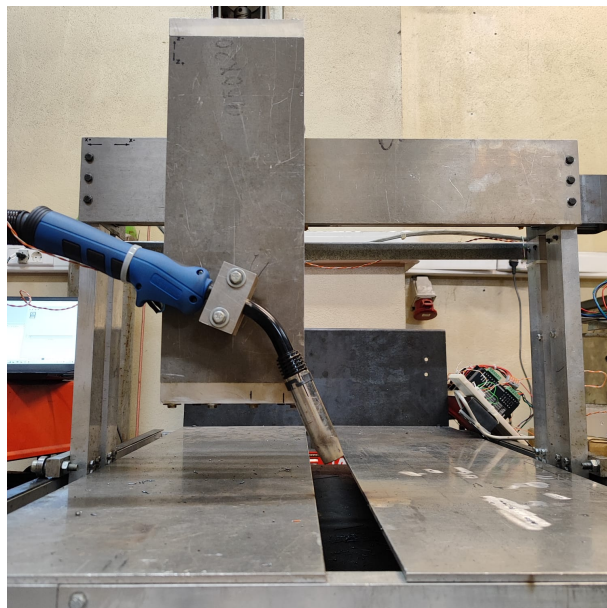


Figura 3.10: Ângulo de 25° .

Após a soldadura dos corpos de prova, sendo feito 12 amostras para cada nível, totalizando 108 amostras, 54 amostras para o ensaio de flexão em 3 pontos, sendo 27 com recozimento e 54 amostras para a análise da macrografica no qual 27 passou pelo recozimento e mais 3 amostras como teste para calibração da máquina de flexão em 3 pontos.

3.4.2 Recozimento

Para o recozimento dos corpos de prova foi utilizado um forno da empresa B THERM modelo L120 com capacidade de até 1320°C.

Utilizou o termopar TC66 da Bentrup para controlar com precisão a temperatura e o tempo durante as etapas de pré-aquecimento, recozimento e resfriamento do forno, garantindo um tratamento térmico adequado

De forma inicial, no pré-aquecimento a cada 1 hora teve um aumento de 200°, ou seja, na primeira hora 200°, na segunda hora 400° e na terceira hora 600°, na quarta hora realizou o aumento de 280° chegando na temperatura de 880°, temperatura utilizada para o recozimento conforme [25], a seguir a Figura 3.11 demonstra via gráfico os tempos em minutos e temperatura em graus abordados. Devido à geometria dos corpos de prova, ser relativamente pequenos, o tempo de recozimento adotado foi de 10 minutos, e para o arrefecimento foi desligado o forno e deixado arrefecer lentamente dentro do forno até atingir a temperatura ambiente (aproximadamente 20°C) e retirando as peças conforme 3.12. Lembrando que das 54 amostras recozidas, 27 foram para o ensaio de flexão em 3 pontos e a outra metade para a análise macrografica, sendo necessario realizar o corte das amostras para o embutimento na baquelite.

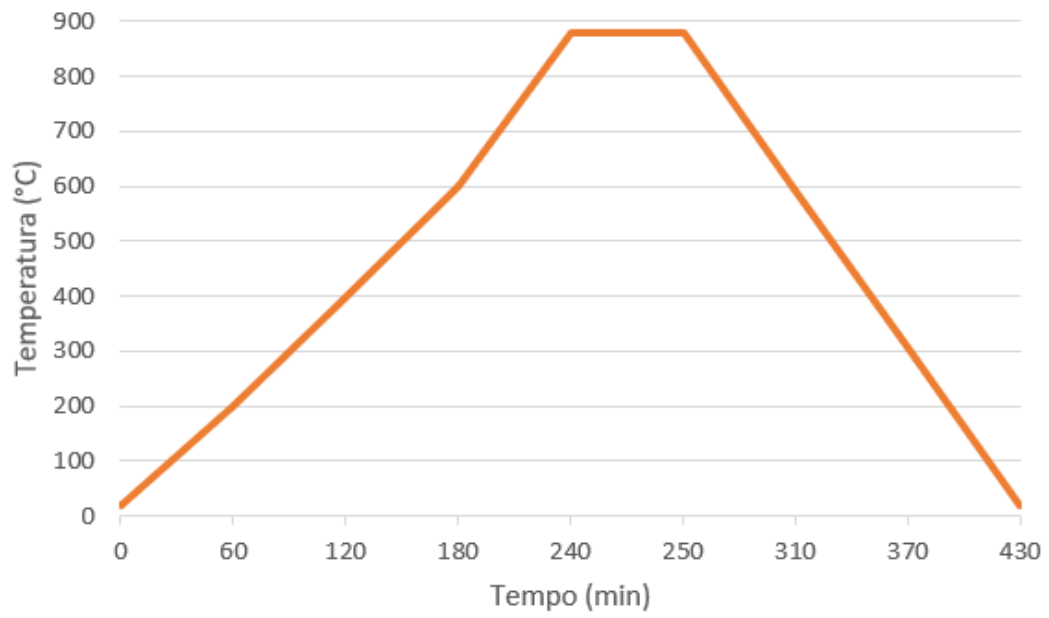


Figura 3.11: Gráfico do tempo x temperatura do recozimento.



Figura 3.12: Amostras recozidas.

3.5 Ensaio de flexão em três pontos

Os ensaios de flexão em 3 pontos foram realizados utilizando uma máquina universal de ensaios, modelo autograph AGS-X, da fabricante Shimadzu, utilizando uma cécula de carga com capacidade máxima de 10KN, Figura 3.13. Todos os testes foram conduzidos em conformidade com as normas ISO 7438:2016 e ISO 5173:2023 [35]; [34].



Figura 3.13: Equipamento utilizado para os ensaios de flexão.

Todos os ensaios foram realizados à temperatura ambiente (aproximadamente 20°C) e a uma velocidade de 1 mm/s. Os corpos de prova foram fixados pelos apoios do equipamento, no qual a distância entre os centros desses apoios corresponde a 30 mm.

Durante os ensaios, foram registrados os valores da força aplicada e do deslocamento do cutelo em cada instante de tempo, com os corpos de prova sendo comprimido até o limite de deslocamento da máquina, fixado em 14,51 mm, ou ruptura do corpo de prova. Ao término do procedimento, todos os dados coletados foram processados utilizando o software Microsoft Excel, permitindo o cálculo da tensão, da deformação e a construção da curva Tensão x Deformação. Os dados obtidos incluíram a força (em N) e o deslocamento do corpo de prova (em mm).

3.6 Análise macrográfica dos cordões de solda

3.6.1 Obtenção das amostras

As preparações foram conduzidas no Laboratório de Materiais de Construção Mecânica (LMCM), o qual dispõe da infraestrutura necessária para executar todas as etapas do preparo metalográfico, incluindo a análise posterior das amostras obtidas.

O preparo teve início com o seccionamento dos cordões de solda em partes menores, adequadas ao processo de embutimento. Para isso, utilizou-se uma serra de bancada com disco abrasivo Strues Labatom, que permitiu remover o excesso de material e realizar cortes perpendiculares ao cordão de solda. Com esse procedimento, cada cordão deu origem a uma pequena amostra conforme Figura 3.14.

Um dos benefícios da utilização desse equipamento é o sistema de refrigeração por jato de água, que evita o aquecimento excessivo durante o corte, prevenindo alterações térmicas na estrutura interna do material.

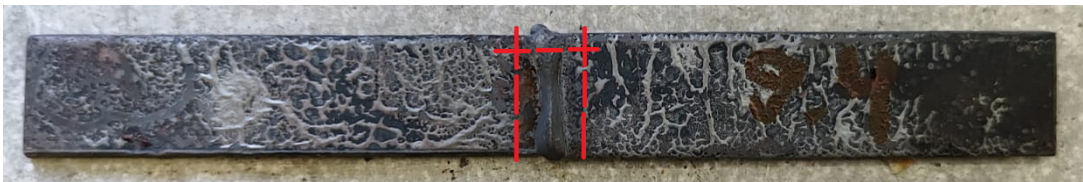


Figura 3.14: Indicação dos cortes realizados nas amostras.

Após a realização dos cortes, as amostras passaram pelo processo de embutimento. Nessa etapa, duas seções do cordão de solda foram posicionadas no compartimento da prensa de embutimento Struers LaboPress-1 e envoltas por pó de resina fenólica (baquelite). As amostras permaneceram submetidas a uma temperatura de 180°C e a uma força de 30kN por um período de 10 minutos. Em seguida, foi realizado o arrefecimento utilizando água corrente por cerca de 5 minutos.

A etapa seguinte consistiu em submeter as amostras embutidas ao processo de lixamento e polimento. Essa operação foi realizada por meio de uma politriz rotativa Struers

LaboPol-25, responsável pelo desgaste controlado da superfície das amostras. Foram empregadas lixas d'água com granulações progressivas de 180, 240, 320, 500, 600, 800, 1000 e 1200. O método segue a ordem crescente de granulometria, iniciando com as mais abrasivas e finalizando com as mais finas. Como etapa final, foi aplicada uma suspensão coloidal de sílica para polimento ultrafino, utilizando partículas de $0,06\mu\text{m}$ dispersas em meio aquoso, garantindo uma superfície com rugosidade mínima.

Após terminado o polimento, as superfícies das amostras foram lavadas em água corrente e, posteriormente, imersas em uma solução de Nital (HNO_3) 7% durante 10 segundos. Para remover o reagente químico, as amostras foram novamente lavadas e sua superfície foi seca por meio de um equipamento gerador de corrente de ar quente. O especto final das amostras encontra-se na Figura 3.15.

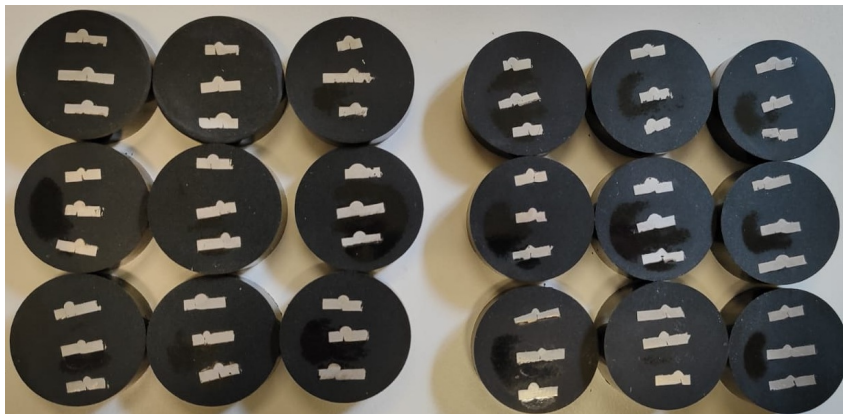


Figura 3.15: Amostras de cordão de solda embutidas.

3.6.2 Ensaio de macrografia para medição do perfil dos cordões

Após a etapa de preparação das amostras, procedeu-se à obtenção das medidas dos aspectos geométricos dos cordões de soldadura. Para essa finalidade, foi utilizado o microscópio digital Veho VMS-005-LCD, o qual possui uma câmera integrada capaz de capturar imagens de alta definição da região soldada. As imagens adquiridas foram analisadas, posteriormente, por meio do software PortableCapture Pro, disponível no computador do laboratório.

Cada amostra foi posicionada de forma a possibilitar a captura individual de cada perfil, considerando que cada corpo de prova embutido contém três seções distintas do cordão de solda. Dessa maneira, a aquisição das imagens foi realizada por meio do software mencionado anteriormente. Esse programa possui a funcionalidade de medir os parâmetros geométricos da junta soldada, convertendo o comprimento de pixels da imagem em valores de distância reais. Para essa conversão, é necessário fornecer ao sistema uma referência dimensional, a qual foi definida com o auxílio de uma régua calibrada presente na imagem.

Dessa forma, foi possível obter as medidas correspondentes ao reforço, à penetração e à largura do cordão para as 54 amostras, conforme está apresentado no anexo B. A Figura 3.16 ilustra uma das imagens utilizadas para a realização dessas medições.

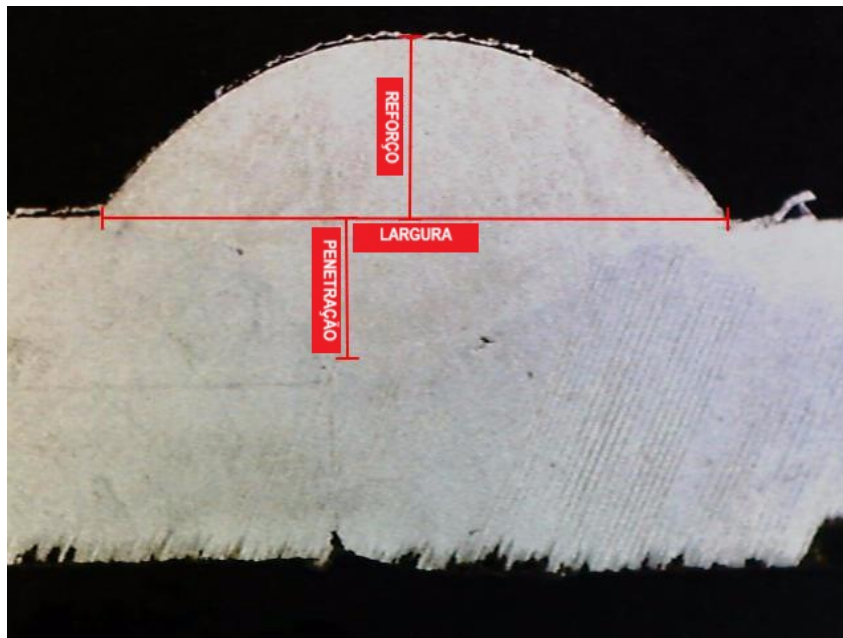


Figura 3.16: Medições realizadas nas amostras de solda.

3.7 Tratamento do dados

Os dados obtidos nas etapas anteriores foram organizados de forma a possibilitar a aplicação do método de Taguchi. A matriz L9 contempla nove experimentos distintos, contudo, para aumentar a confiabilidade estatística dos resultados, cada conjunto experimental foi

repetido, totalizando 27 execuções. Conforme preconiza o método, para cada combinação de parâmetros experimentais foi calculada a razão sinal-ruído correspondente, levando em consideração o critério de otimização desejado.

No caso do reforço, o objetivo era que sua altura fosse a menor possível, alinhando-se à superfície da chapa, portanto, aplicou-se o critério "menor é melhor". Já para os parâmetros de largura e penetração, utilizou-se o critério "nominal é melhor", pois ambos deveriam atingir uma dimensão-alvo de 3 mm, equivalente à espessura da chapa soldada. Por fim, para o limite de resistência à flexão, buscava-se maximizar o valor obtido, sendo assim adotado o critério "maior é melhor".

Com nove combinações envolvendo três fatores em três níveis distintos, atribuíram-se letras de A (tensão), B (velocidade) e C (ângulo de soldadura), para representar os parâmetros e níveis 1, 2 e 3, conforme mostrado na Tabela 3.7. Assim, foram obtidos nove valores de razão sinal-ruído para cada combinação experimental. Posteriormente, calcularam-se os valores médios de sinal-ruído para cada parâmetro em cada nível. Esses cálculos e as respectivas representações gráficas foram realizados utilizando o software Microsoft Excel. Nos gráficos resultantes, os maiores valores de sinal-ruído indicam o melhor desempenho experimental, permitindo, portanto, a identificação da combinação ótima dos fatores para a característica estudada.

Tabela 3.7: Matriz ortogonal adaptada para fins de cálculo.

N°de Ensaio	Matrix Ortogonal L_9		
1	A1	B1	C1
2	A1	B2	C2
3	A1	B3	C3
4	A2	B1	C2
5	A2	B2	C3
6	A2	B3	C1
7	A3	B1	C3
8	A3	B2	C1
9	A3	B3	C2

Para analisar a influência dos parâmetros de entrada sobre os parâmetros de saída, foi utilizado o modelo linear geral da análise de variância (ANOVA). Essa análise foi conduzida por meio do software Minitab, que executou a ANOVA para cada variável de resposta, utilizando como base a matriz experimental composta pelos parâmetros de soldadura.

A partir dos resultados obtidos através dessas metodologias, foi possível identificar a influência individual de cada parâmetro no desempenho final da solda, além de definir a combinação ótima dos parâmetros de processo para atingir os melhores valores de reforço, penetração, largura e limite de resistência à flexão.

Capítulo 4

Resultados

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir dos experimentos e procedimentos descritos no Capítulo 3, acompanhados da respectiva análise. Sempre que pertinente, serão incluídos gráficos, imagens e tabelas que auxiliem na interpretação e entendimento dos dados.

Inicialmente, serão expostos individualmente os resultados referentes ao reforço, largura, penetração e limite de resistência à flexão das juntas soldadas.

4.1 Reforço

Os valores das medições obtidas para o reforço do cordão de solda estão apresentados na Tabela 4.1, onde foram mostradas três medições, correspondendo à amostra 1, amostra 2 e amostra 3, respectivamente. Além disso, foi calculada a média das medições e a razão sinal-ruído para cada uma delas.

Tabela 4.1: Medições, média e razão sinal-ruído para o reforço.

Experimento	Amostra 1 (mm)	Amostra 2 (mm)	Amostra 3 (mm)	Média (mm)	S/N (dB)
1	1,988	1,976	1,653	1,872	-5,477
2	1,144	1,757	1,664	1,522	-3,781
3	1,352	1,618	1,479	1,483	-3,446
4	1,202	1,664	1,56	1,475	-3,455
5	1,502	1,502	1,549	1,518	-3,624
6	1,595	1,56	1,618	1,591	-4,034
7	1,733	1,271	1,318	1,441	-3,261
8	1,364	1,41	1,618	1,464	-3,335
9	1,364	1,641	1,56	1,522	-3,672

Relativamente ao reforço, prevê-se que o índice sinal-ruído seja máximo no ensaio cujo reforço apresente o valor mais baixo de altura. De fato, o teste número 7 obteve o maior índice sinal-ruído e, conforme esperado, registrou também a menor altura média de reforço entre todos os ensaios, com valor de 1,441 mm.

A partir dos valores de razão sinal-ruído foram calculadas as médias do sinal-ruído para parâmetro de entrada e níveis atribuídos. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.2 e podem ser melhor visualizados pelo gráfico da Figura 4.1.

Tabela 4.2: Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros de soldadura para o reforço.

Fator	S/N Médio (dB)
A1	-4,235
A2	-3,705
A3	-3,423
B1	-4,064
B2	-3,580
B3	-3,717
C1	-4,282
C2	-3,636
C3	-3,444

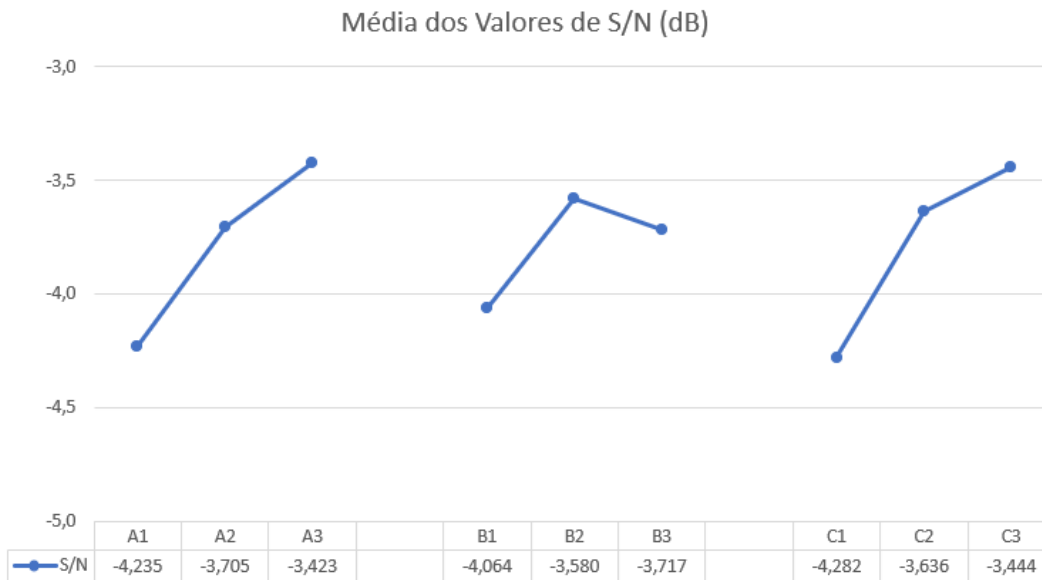


Figura 4.1: Curva S/N médio de cada parâmetro para o reforço.

Valores mais altos da razão sinal-ruído indicam os níveis e parâmetros com desempenho superior. Dessa forma, selecionar os maiores valores de S/N no gráfico permite identificar a condição ou combinação ótima. No caso específico do reforço, a configuração considerada

ideal é A3B2C3. Isso significa que a menor altura de reforço pode ser alcançada ao realizar a soldadura com ângulo de 25°, uma tensão de 23,7 V e velocidade de 400 mm/min.

A Tabela 4.3 apresenta a avaliação do impacto da tensão, da velocidade de soldadura e do ângulo de inclinação da tocha sobre o reforço, conforme os resultados obtidos por meio da análise de variância.

Tabela 4.3: Análise de variância para obter a influência dos parâmetros no reforço.

Fonte	GDL	SQ	QM	Valor F	Valor P	Contribuição (%)
Ângulo	2	0,035	0,017	0,810	0,552	25,40
Tensão	2	0,014	0,007	0,330	0,754	10,22
Velocidade	2	0,045	0,023	1,060	0,486	33,08
Erro	2	0,043	0,021	—	—	31,30
Total	8	0,137	—	—	—	100

Com base nos dados da análise de variância (ANOVA), o fator que exerceu maior impacto sobre a altura do reforço do cordão de solda foi a velocidade de soldadura, responsável por 33,08% da variação observada. Em seguida, destacam-se o ângulo da tocha, com uma contribuição de 25,4%, e a tensão aplicada, que influenciou em 10,22%.

Os resultados das medições referentes ao reforço do cordão de solda nas juntas submetidas ao recozimento estão dispostos na Tabela 4.4, na qual são apresentadas três avaliações, seguindo a mesma classificação adotada anteriormente. Além disso, foram determinadas a média dos valores obtidos e a razão sinal-ruído correspondente a cada conjunto de dados.

Tabela 4.4: Medições, média e razão sinal-ruído para o reforço das juntas recozidas.

Experimento	Amostra 1 (mm)	Amostra 2 (mm)	Amostra 3 (mm)	Média (mm)	S/N (dB)
1	1,202	1,19	1,121	1,171	-1,375
2	1,214	1,352	1,525	1,364	-2,732
3	1,109	1,56	0,844	1,171	-1,639
4	1,584	1,329	1,41	1,441	-3,197
5	1,791	1,999	1,537	1,776	-5,036
6	0,763	1,248	1,341	1,117	-1,181
7	1,225	1,098	1,988	1,437	-3,462
8	1,271	1,676	1,109	1,352	-2,753
9	1,294	1,109	1,04	1,148	-1,234

Com relação ao reforço das juntas recozidas, estima-se que o maior valor da razão sinal-ruído ocorra no ensaio cuja altura do reforço seja mais próxima de zero. Esse comportamento foi observado no ensaio número 6, que apresentou o maior índice S/N e, como previsto, registrou a menor média de altura de reforço entre todos os testes, atingindo 1,117 mm.

Com base nos valores obtidos da razão sinal-ruído, foram calculadas as médias correspondentes para cada parâmetro de entrada e seus respectivos níveis. Esses dados estão dispostos na Tabela 4.5 e representados graficamente na Figura 4.2.

Tabela 4.5: Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros de soldadura para o reforço das juntas recozidas.

Fator	S/N Médio (dB)
A1	-1,915
A2	-3,138
A3	-2,483
B1	-2,678
B2	-3,507
B3	-1,352
C1	-1,770
C2	-2,388
C3	-3,379



Figura 4.2: Curva S/N médio de cada parâmetro para o reforço das juntas recozidas.

Assim, a escolha dos maiores índices de razão sinal-ruído no gráfico possibilita determinar a condição mais favorável ou a combinação ideal de parâmetros. Especificamente para o reforço em juntas submetidas ao recozimento, a configuração considerada ótima é A1B3C1. Isso indica que a menor altura de reforço pode ser obtida ao executar a

soldadura com ângulo de 0°, tensão de 24,1 V e velocidade de 250 mm/min.

A Tabela 4.6 apresenta a investigação do efeito da tensão, da velocidade de soldadura e do ângulo da tocha sobre o reforço do cordão nas juntas submetidas ao recozimento, conforme os dados obtidos por meio da análise de variância (ANOVA).

Tabela 4.6: Análise de variância para obter a influência dos parâmetros no reforço das juntas recozidas.

Fonte	GDL	SQ	QM	Valor F	Valor P	Contribuição (%)
Ângulo	2	0,067	0,034	11,960	0,077	19,03
Tensão	2	0,187	0,094	33,340	0,029	53,05
Velocidade	2	0,093	0,047	16,540	0,057	26,33
Erro	2	0,006	0,003	—	—	1,59
Total	8	0,353	—	—	—	100

A partir dos resultados obtidos na análise de variância (ANOVA), observa-se que a tensão foi o fator que mais influenciou a altura do reforço do cordão de solda, sendo responsável por 33,34% da variação total. Em segundo lugar, a velocidade de soldadura contribuiu com 16,54%, enquanto o ângulo da tocha teve uma influência de 11,96%.

4.2 Largura

Os dados obtidos nas medições da largura do cordão de solda estão apresentados na Tabela 4.7. Nela, são exibidas três aferições, identificadas como amostra 1, amostra 2 e amostra 3, respectivamente. Além disso, foram calculadas a média entre os valores medidos e a correspondente razão sinal-ruído para cada conjunto.

Tabela 4.7: Medições, média e razão sinal-ruído para a largura.

Experimento	Amostra 1 (mm)	Amostra 2 (mm)	Amostra 3 (mm)	Média (mm)	S/N (dB)
1	3,652	3,987	3,825	3,821	28,923
2	3,109	3,767	4,992	3,956	14,100
3	3,675	3,536	3,733	3,648	32,895
4	2,716	3,744	1,029	2,496	6,968
5	3,929	2,959	3,19	3,359	18,191
6	5,454	4,484	3,883	4,607	17,047
7	3,224	2,774	2,693	2,897	21,870
8	3,987	2,531	3,536	3,351	14,818
9	3,502	3,583	3,802	3,629	29,139

Ao comparar os valores das razões sinal-ruído referentes à largura, observa-se que o ensaio de número 3 foi o que apresentou o maior índice. Todavia, o valor-alvo estabelecido para esta análise era alcançar uma largura próxima de 3 mm. O teste que mais se aproximou desse objetivo foi o de número 7. Ainda assim, sua razão sinal-ruído não foi a mais elevada, o que pode ser explicado pela variação significativa entre os resultados obtidos nas amostras 1, 2 e 3.

No caso do ensaio 3, as diferenças entre as medições foram de 0,139 mm entre as amostras 1 e 2, e de 0,197 mm entre as amostras 2 e 3, indicando maior uniformidade. Já o ensaio 7 apresentou variações de 0,45 mm entre as duas primeiras amostras e de 0,081 mm entre a segunda e a terceira, evidenciando uma maior dispersão nos dados.

Com base nos valores obtidos de razão sinal-ruído, foram determinadas as médias correspondentes para cada parâmetro de entrada e seus respectivos níveis. Esses resultados estão organizados na Tabela 4.8 e são ilustrados de forma mais clara no gráfico da Figura 4.3.

Tabela 4.8: Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros de soldadura para a largura.

Fator	S/N Médio
A1	25,306
A2	14,069
A3	21,942
B1	19,254
B2	15,703
B3	26,360
C1	20,263
C2	16,736
C3	24,319



Figura 4.3: Curva S/N médio de cada parâmetro para a largura.

Os maiores valores da razão sinal-ruído indicam os parâmetros e níveis que proporcionam o melhor desempenho. Assim, ao selecionar os pontos com maior razão S/N no gráfico, é possível identificar a condição ideal ou a combinação mais favorável. No que diz respeito à largura, a configuração ótima corresponde à combinação A1B3C3. Em termos práticos de soldadura, isso significa que a largura mais próxima ou equivalente a 3 mm

pode ser alcançada utilizando um ângulo de 0° , uma tensão de 24,1 V e uma velocidade de 400 mm/min durante o processo de soldadura.

A Tabela 4.9 apresenta os efeitos da tensão, da velocidade de soldadura e do ângulo de inclinação da tocha sobre a largura do cordão, conforme os resultados obtidos pela análise de variância (ANOVA).

Tabela 4.9: Análise de variância para obter a influência dos parâmetros na largura.

Fonte	GDL	SQ	QM	Valor F	Valor P	Contribuição (%)
Ângulo	2	0,415	0,207	1,080	0,482	18,58
Tensão	2	0,824	0,412	2,140	0,318	36,94
Velocidade	2	0,607	0,304	1,580	0,388	27,23
Erro	2	0,385	0,193	—	—	17,26
Total	8	2,231	—	—	—	100

Com base na Tabela ANOVA, observa-se que o fator com maior influência sobre a largura do cordão de solda foi a tensão, responsável por 36,94% da variação, seguido pela velocidade de soldadura, com 27,23%, e pelo ângulo de inclinação da tocha, que contribuiu com 18,58%.

Os resultados das medições da largura do cordão de solda nas juntas submetidas ao recozimento estão dispostos na Tabela 4.10. Essa tabela apresenta três verificações distintas, designadas como amostra 1, amostra 2 e amostra 3, respectivamente. Adicionalmente, foram determinadas a média dos valores obtidos e a respectiva razão sinal-ruído para cada grupo de medições.

Tabela 4.10: Medições, média e razão sinal-ruído para a largura das juntas recozidas.

Experimento	Amostra 1 (mm)	Amostra 2 (mm)	Amostra 3 (mm)	Média (mm)	S/N (dB)
1	3,398	3,848	3,525	3,590	25,554
2	3,594	3,687	3,583	3,621	37,800
3	4,854	2,809	3,329	3,664	12,510
4	3,201	2,993	3,363	3,186	26,459
5	4,555	5,062	3,721	4,446	18,107
6	4,034	5,097	4,75	4,627	20,386
7	2,912	2,889	3,71	3,170	18,387
8	3,733	3,548	3,79	3,690	31,059
9	3,582	3,317	3,398	3,432	29,815

Verifica-se que o ensaio número 2 obteve o maior valor de índice sinal-ruído. Contudo, o objetivo desta análise era atingir uma largura próxima de 3 mm. O teste que mais se aproximou dessa meta foi o ensaio número 7. Apesar disso, sua razão sinal-ruído não foi a mais alta, o que pode ser atribuído à variação significativa entre os dados das amostras 1, 2 e 3.

No caso do ensaio 2, as discrepâncias entre as medições foram de 0,023 mm entre as amostras 1 e 2, e de 0,093 mm entre as amostras 2 e 3, demonstrando maior consistência. Em contrapartida, o ensaio 7 revelou diferenças de 0,023 mm entre a primeira e a segunda amostra, e de 0,821 mm entre a segunda e a terceira, indicando maior variação nos resultados.

A partir dos valores de razão sinal-ruído, foram calculadas as médias para cada fator de entrada e seus respectivos níveis. Os dados obtidos estão dispostos na Tabela 4.11 e são visualizados de forma mais intuitiva no gráfico da Figura 4.4.

Tabela 4.11: Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros de soldadura para a largura das juntas recozidas.

Fator	S/N Médio (dB)
A1	25,288
A2	21,651
A3	26,421
B1	23,467
B2	28,989
B3	20,904
C1	25,666
C2	31,358
C3	16,335



Figura 4.4: Curva S/N médio de cada parâmetro para a largura das juntas recozidas.

Os maiores índices de razão sinal-ruído indicam quais parâmetros e níveis resultam no desempenho mais eficiente. Dessa forma, ao identificar os pontos com os valores mais altos de S/N no gráfico, é possível determinar a condição ideal ou a combinação mais vantajosa. No caso da largura, a combinação considerada ideal é A3B2C2. Na prática da soldadura, isso implica que a obtenção de uma largura próxima ou igual a 3 mm pode

ser alcançada aplicando um ângulo de 25°, tensão de 23,7 V e velocidade de 325 mm/min durante o processo.

A Tabela 4.12 exibe os efeitos da tensão, da velocidade de soldadura e do ângulo de inclinação da tocha sobre a largura do cordão em juntas submetidas ao recozimento, com base nos resultados da análise de variância (ANOVA).

Tabela 4.12: Análise de variância para obter a influência dos parâmetros na largura das juntas recozidas.

Fonte	GDL	SQ	QM	Valor F	Valor P	Contribuição (%)
Ângulo	2	0,681	0,340	3,750	0,211	33,18
Tensão	2	0,715	0,358	3,940	0,202	34,89
Velocidade	2	0,473	0,237	2,610	0,277	23,08
Erro	2	0,182	0,091	—	—	8,86
Total	8	2,051	—	—	—	100

Com base na Tabela 4.12, verifica-se que o fator com maior impacto na largura do cordão de solda foi a tensão, respondendo por 34,89% da variação; em seguida, destaca-se o ângulo de inclinação da tocha, com 33,18%, e, por fim, a velocidade de soldadura, que contribuiu com 23,08%.

4.3 Penetração

Os resultados das medições referentes à penetração do cordão de solda estão dispostos na Tabela 4.13. Nela, são apresentadas duas aferições identificadas como amostra 1, amostra 2 e amostra 3, respectivamente. A tabela também inclui o valor médio das medições e a razão sinal-ruído correspondente a cada conjunto.

Tabela 4.13: Medições, média e razão sinal-ruído para a penetração.

Experimento	Amostra 1 (mm)	Amostra 2 (mm)	Amostra 3 (mm)	Média (mm)	S/N (dB)
1	0,705	0,867	0,971	0,848	17,780
2	0,774	0,994	1,213	0,994	14,877
3	1,098	1,017	1,457	1,191	15,886
4	0,89	1,549	3,143	1,861	5,877
5	1,387	1,862	0,925	1,391	11,215
6	1,225	1,41	0,959	1,198	16,221
7	0,855	0,971	1,005	0,944	23,344
8	1,618	0,67	0,867	1,052	8,215
9	1,133	0,821	1,213	1,056	15,907

Para os dados referentes à penetração, observou-se uma situação semelhante àquela verificada nos resultados de largura. O ensaio que obteve a maior razão sinal-ruído foi o de número 7; no entanto, a resposta mais próxima do valor-alvo de 3 mm foi obtida no ensaio número 4. A divergência entre as razões sinal-ruído pode ser explicada pelas diferenças entre as amostras: no ensaio 7, a variação entre as amostras 1 e 2 foi de 0,116 mm, e entre as amostras 2 e 3 foi de 0,034 mm; por outro lado, o ensaio 4 apresentou uma diferença de 0,659 mm entre as amostras 1 e 2 e de 1,594 mm entre as amostras 2 e 3.

Com base nos valores de razão sinal-ruído, foram determinadas as médias correspondentes para cada parâmetro de entrada e seus respectivos níveis. Esses dados estão consolidados na Tabela 4.14 e são melhor ilustrados pelo gráfico da Figura 4.5.

Tabela 4.14: Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros de soldadura para a largura.

Fator	S/N Médio (dB)
A1	16,181
A2	11,104
A3	15,822
B1	15,667
B2	11,436
B3	16,004
C1	14,072
C2	12,220
C3	16,815



Figura 4.5: Curva S/N médio de cada parâmetro para a penetração.

As maiores razões sinal-ruído indicam os níveis e parâmetros com desempenho mais eficiente. Portanto, ao selecionar os valores mais altos de S/N representados no gráfico, é possível identificar a configuração ideal. No contexto da penetração, a combinação considerada mais adequada é A1B3C3. Isso significa que uma penetração próxima ou igual a 3 mm pode ser alcançada quando a soldadura é executada com um ângulo de 0°,

tensão de 24,1 V e velocidade de 400 mm/min.

Na Tabela 4.15, é possível verificar a influência da tensão, da velocidade de soldadura e do ângulo de ataque da tocha, conforme obtido pela análise de variância para a penetração.

Tabela 4.15: Análise de variância para obter a influência dos parâmetros na penetração.

Fonte	GDL	SQ	QM	Valor F	Valor P	Contribuição (%)
Ângulo	2	0,440	0,220	2,450	0,290	59,48
Tensão	2	0,010	0,005	0,060	0,947	1,35
Velocidade	2	0,110	0,055	0,610	0,620	14,90
Erro	2	0,180	0,090	—	—	24,27
Total	8	0,740	—	—	—	100

De acordo com a tabela ANOVA, o parâmetro de entrada que mais influenciou na dimensão da penetração do cordão de solda foi o ângulo da tocha contribuindo com 59,48%, seguido pela velocidade de soldadura com 14,90% e a tensão com 1,35%.

Os dados obtidos nas medições da penetração do cordão de solda em juntas recozidas estão organizados na Tabela 4.16. Nessa tabela, são exibidas três avaliações designadas como amostra 1, amostra 2 e amostra 3, respectivamente. Além disso, foram calculados a média dos valores aferidos e o respectivo índice sinal-ruído para cada conjunto de dados.

Tabela 4.16: Medições, média e razão sinal-ruído para a penetração das juntas recozidas.

Experimento	Amostra 1 (mm)	Amostra 2 (mm)	Amostra 3 (mm)	Média (mm)	S/N (dB)
1	1,167	1,294	1,109	1,190	23,752
2	1,1214	1,341	0,959	1,140	17,250
3	1,248	0,648	1,399	1,098	10,595
4	1,086	1,029	1,098	1,071	31,025
5	1,271	1,445	1,583	1,433	21,004
6	1,433	1,526	1,144	1,368	18,495
7	0,705	1,352	1,006	1,021	11,737
8	1,156	0,971	1,352	1,160	17,448
9	0,971	0,924	0,774	0,890	20,498

No que se refere aos dados de penetração, verificou-se uma situação análoga à observada nos resultados de largura. O teste que apresentou o maior valor de razão sinal-ruído foi o de número 4; contudo, a medição mais próxima do valor desejado de 3 mm foi registrada no ensaio número 5. A discrepância entre os índices de sinal-ruído pode ser atribuída às variações entre as medições: no ensaio 4, a diferença entre as amostras 1 e 2 foi de 0,057 mm, e entre as amostras 2 e 3 foi de 0,069 mm. Em contraste, o ensaio 5 revelou diferenças de 0,174 mm entre as duas primeiras amostras e de 0,138 mm entre a segunda e a terceira.

Com base nesses valores de sinal-ruído, calcularam-se as médias correspondentes a cada parâmetro de entrada, bem como aos níveis atribuídos. Os resultados estão sistematizados na Tabela 4.17 e representados graficamente na Figura 4.6.

Tabela 4.17: Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros de soldadura para a largura das juntas recozidas.

Fator	S/N Médio (dB)
A1	17,199
A2	23,508
A3	16,561
B1	22,171
B2	18,567
B3	16,529
C1	19,898
C2	22,924
C3	14,445

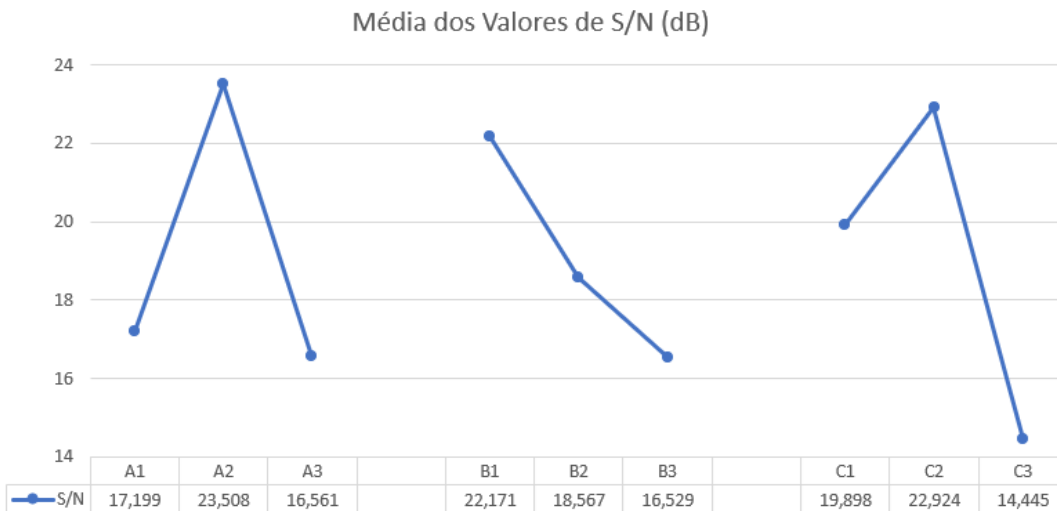


Figura 4.6: Curva S/N médio de cada parâmetro para a penetração.

Os maiores valores da razão sinal-ruído correspondem aos parâmetros e níveis com melhor eficiência. Assim, ao analisar os pontos mais elevados de S/N no gráfico, torna-se possível determinar a configuração mais apropriada. No caso da penetração, a combinação ideal é representada por A2B1C2. Em termos práticos de soldadura, isso implica que uma profundidade de penetração próxima ou equivalente a 3 mm pode ser obtida ao aplicar

um ângulo de 15°, tensão de 22,4 V e velocidade de 325 mm/min.

Na Tabela ANOVA, é possível verificar a influência da tensão, da velocidade de soldadura e do ângulo de ataque da tocha, conforme obtido pela análise de variância para a penetração das juntas recozidas.

Tabela 4.18: Análise de variância para obter a influência dos parâmetros na penetração das juntas recozidas.

Fonte	GDL	SQ	QM	Valor F	Valor P	Contribuição (%)
Ângulo	2	0,107	0,054	13,040	0,071	48,24
Tensão	2	0,039	0,020	4,740	0,174	17,52
Velocidade	2	0,068	0,034	8,250	0,108	30,54
Erro	2	0,008	0,004	—	—	3,70
Total	8	0,223	—	—	—	100

De acordo com a tabela 4.18, o parâmetro de entrada que mais influenciou na dimensão da penetração do cordão de solda das juntas recozidas foi o ângulo da tocha, contribuindo com 48,24%, seguido pela velocidade de soldadura com 30,54% e pela tensão com 3,70%.

4.4 Limite de resistência à flexão

Os ensaios de flexão em 3 pontos, foram realizados em triplicado para cada combinação de parâmetros, permitindo o cálculo de um valor médio entre os três testes. A Figura 4.7 exibe os gráficos de Tensão (MPa) x Deformação (mm/mm), comparando os ensaios de cada conjunto. Com base nos dados fornecidos pela máquina de força e deslocamento, foi possível realizar o cálculo da tensão e da deformação com as seguintes equações 4.1 e 4.2 [28].

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (4.1)$$

$$\varepsilon = \frac{6hD}{L^2} \quad (4.2)$$

Sendo F = força aplicada no centro da chapa (N), L = a distância entre os apoios (mm), b = largura da seção transversal (mm), h = espessura da chapa, D = deslocamento.

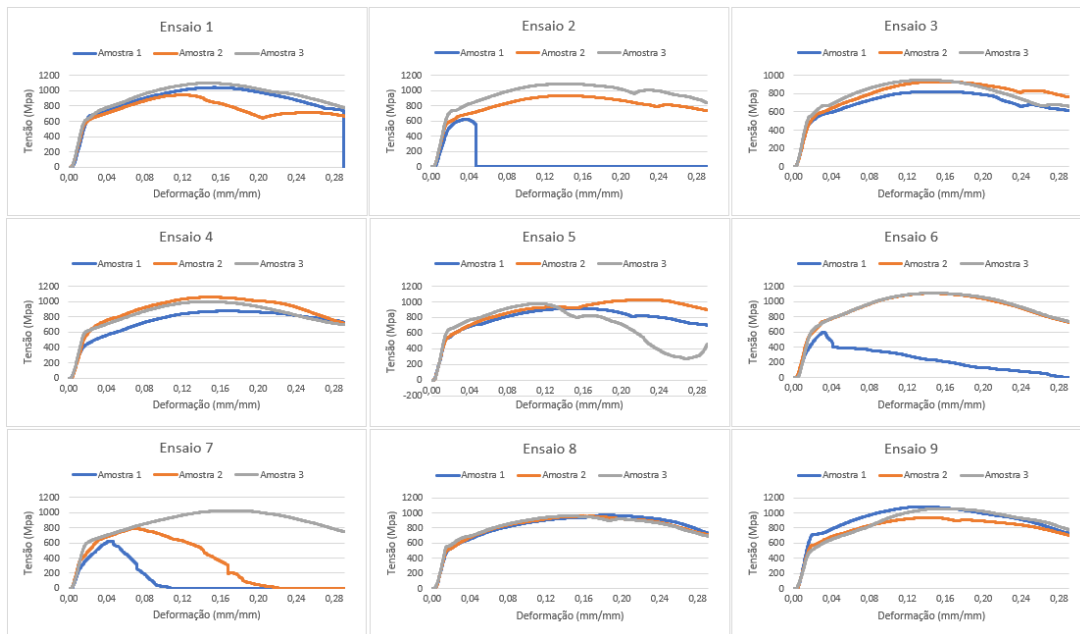


Figura 4.7: Gráficos de ensaios de flexão em 3 pontos.

A maioria dos ensaios apresentam curvas com comportamentos semelhantes, porém a amostra 2 do ensaio 1, aconteceu um pequeno rompimento do cordão.

Amostra 1 do ensaio 2, foi interrompido no processo devido a sensibilidade da máquina que estava ligada, e quando o cutelo houve um leve deslocamento por conta das diferenças de altura entre as chapas e o mesmo cancelou o ensaio.

O mesmo rompimento ocasionado no ensaio 1, aconteceu no ensaio 5 da amostra 3.

No ensaio 6 amostra 1 houve o rompimento do cordão de solda, fazendo com que tenha a discrepância no gráfico.

As amostras 1 e 2 do ensaio 7, também houve a fratura do cordão de solda ocasionando no decaimento do gráfico.

Uma possível justificativa para essas fraturas de algumas amostras, pode ser pela

presença de defeitos na soldadura, como inclusões, falta de fusão no material base ou presença de poros. Além disso, o desalinhamento sutil entre as chapas de aço, causado pela distorção do metal devido ao excesso de calor durante o processo de soldadura, também pode ser um fator determinante. Tanto as imperfeições na solda quanto o desalinhamento das chapas geram regiões de concentração de tensão que, no ensaio de flexão em 3 pontos, exercem grande influência, pois essas áreas fragilizam o material e definem o local onde ocorrerá a ruptura.

Destes ensaios foram obtidos os valores máximos de tensão, estes valores representam a tensão transversal máxima que a junta soldada suportou. Sendo assim, tais valores foram apresentados na Tabela 4.19, onde também foram introduzidos a média e a razão sinal-ruído para os limites de resistência à flexão transversal da solda.

Tabela 4.19: Medições, média e razão sinal-ruído para o limite de resistência à flexão.

Experimento	Amostra 1 (MPa)	Amostra 2 (MPa)	Amostra 3 (MPa)	Média (MPa)	S/N (dB)
1	1043,723	945,598	1101,117	1030,146	24,106
2	619,416	932,574	1086,197	879,396	13,117
3	822,430	929,848	947,754	900,011	24,224
4	877,022	1056,760	1000,300	978,027	22,300
5	916,403	1032,016	978,756	975,725	26,299
6	596,224	1106,984	1110,189	937,799	11,783
7	624,787	787,143	1025,803	812,577	13,863
8	970,355	955,614	957,715	961,228	43,384
9	1080,828	936,183	1056,824	1024,612	24,184

Em relação ao limite de resistência à tração, é previsto que o maior valor da razão sinal-ruído esteja associado ao ensaio que apresenta o valor mais elevado dessa propriedade mecânica. Nesse contexto, o ensaio número 8 apresentou a maior razão S/N. No entanto, ele não corresponde ao que registrou a maior resistência à flexão, a qual foi observada no

ensaio 1, com um valor de 1030,146 MPa. Essa divergência pode ser atribuída a fatores já mencionados anteriormente, como a ruptura do cordão de solda causada por imperfeições ou contaminações.

Com base nos valores de razão sinal-ruído, calcularam-se as médias correspondentes para cada parâmetro de entrada e seus respectivos níveis. Os resultados obtidos estão organizados na Tabela 4.20 e representados graficamente na Figura 4.8.

Tabela 4.20: Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros de soldadura para o limite de resistência à flexão.

Fator	S/N Médio
A1	20,482
A2	20,127
A3	27,144
B1	20,090
B2	27,600
B3	20,064
C1	26,424
C2	19,867
C3	21,462

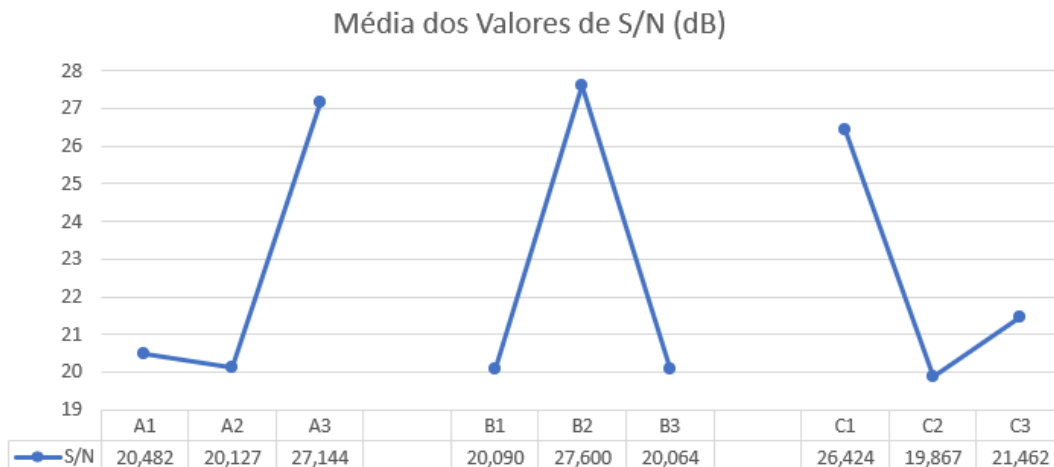


Figura 4.8: Curva S/N médio de cada parâmetro para o limite de resistência à flexão.

As razões sinal-ruído mais altas indicam os parâmetros e níveis com melhor performance. Assim, a escolha dos maiores valores de S/N no gráfico indica a condição ou combinação ideal. No caso do limite de resistência à tração transversal, a configuração considerada ideal é A3B2C1. Em termos de parâmetros de soldadura, isso significa que a maior resistência à flexão pode ser atingida quando o processo é executado com um ângulo de 25°, tensão de 23,7 V e velocidade de 250 mm/min.

Na Tabela 4.21 é possível verificar a influência da tensão, da velocidade de soldadura e do ângulo de ataque da tocha, conforme obtido pela análise de variância para a resistência à flexão.

Tabela 4.21: Análise de variância para obter a influência dos parâmetros no limite de resistência à flexão.

Fonte	GDL	SQ	QM	Valor F	Valor P	Contribuição (%)
Ângulo	2	1724,6	862,3	0,06	0,939	4,33
Tensão	2	431	215,5	0,02	0,984	1,08
Velocidade	2	10862,6	5431,3	0,41	0,711	27,29
Erro	2	26780,1	13390,1	—	—	67,29
Total	8	39798,3	—	—	—	100

De acordo com a tabela ANOVA, o parâmetro de entrada que mais influenciou o limite de resistência à flexão do cordão de solda foi a velocidade de soldadura, contribuindo com 27,29%, seguida pelo ângulo da tocha, com 4,33%, e pela tensão, com 1,08%.

O elevado valor do erro residual identificado na ANOVA, correspondente a 67,29%, pode ser atribuído à significativa variação observada entre os valores de resistência à flexão das amostras submetidas aos mesmos parâmetros de soldadura. Essa variabilidade foi amplificada pela ocorrência de fraturas em algumas das amostras, enquanto outras resistiram ao ensaio sem apresentar ruptura. Tal disparidade compromete a homogeneidade dos dados e, conseqüentemente, dificulta a capacidade do método Taguchi em identificar com precisão a influência individual de cada fator analisado. Como resultado, uma parcela substancial da variabilidade total permanece não explicada pelos parâmetros controlados,

refletindo-se diretamente no alto valor do erro residual.

A Figura 4.9 apresenta os gráficos de Tensão (MPa) versus Deformação (mm/mm) correspondentes às juntas submetidas ao recozimento, comparando os resultados dos ensaios realizados para cada grupo. Com base nas informações obtidas por meio da máquina de ensaio, que registra força e deslocamento, foi possível calcular os valores de tensão e deformação utilizando as Equações 4.1 e 4.2.

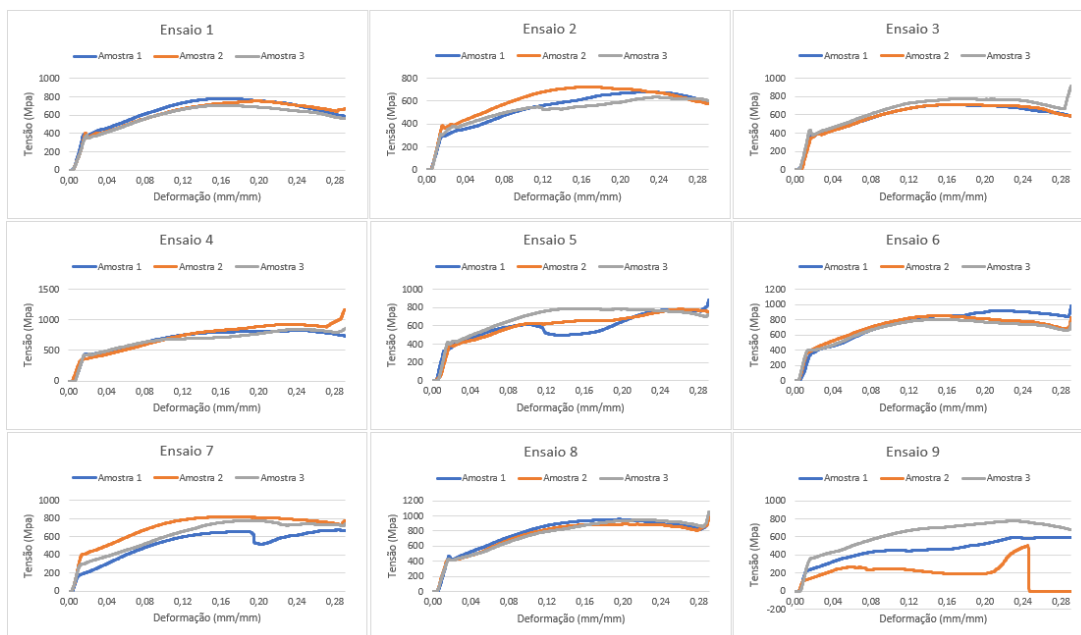


Figura 4.9: Gráficos de ensaios de flexão em 3 pontos das juntas recozidas.

Todas as amostras e ensaios apresentaram curvas com comportamentos semelhantes, exceto o ensaio 9, amostra 2, no qual ocorreu a fratura do cordão de solda, resultando na queda abrupta da curva.

De modo geral, em todos os ensaios conduzidos sob os mesmos parâmetros, observou-se uma redução nos valores de tensão nas amostras recozidas em comparação às que não passaram por recozimento, o que era esperado devido ao alívio das tensões residuais promovido pelo tratamento térmico.

A partir desses ensaios, foram determinados os valores máximos de tensão, representando o limite máximo de resistência transversal suportado pelas juntas soldadas. Esses

dados estão organizados na Tabela 4.22, que também apresenta a média dos valores e a razão sinal-ruído associada à resistência à flexão transversal da solda.

Tabela 4.22: Medições, média e razão sinal-ruído para o limite de resistência à flexão das juntas recozidas.

Experimento	Amostra 1 (MPa)	Amostra 2 (MPa)	Amostra 3 (MPa)	Média (MPa)	S/N (dB)
1	783,349	754,568	707,768	748,5617	27,616
2	679,230	723,846	634,569	679,215	25,407
3	709,747	712,486	913,293	778,5087	18,242
4	829,182	1171,957	857,404	952,8473	15,754
5	882,070	783,750	792,539	819,4528	25,319
6	983,362	851,798	807,101	880,7537	21,417
7	673,973	815,594	780,036	756,5344	21,991
8	999,570	988,221	1056,888	1014,893	30,570
9	595,858	503,583	775,973	625,138	14,849

No que diz respeito ao limite de resistência à flexão, espera-se que o maior índice sinal-ruído esteja relacionado ao ensaio que apresenta o valor mais alto dessa característica mecânica. Nesse sentido, o ensaio número 8 destacou-se por registrar a maior razão S/N, coincidindo com o maior valor de resistência à flexão entre os ensaios recozidos, atingindo 1014,893 MPa. Para fins comparativos, o mesmo ensaio realizado sem recozimento apresentou a segunda maior resistência à flexão, com 1024,612 MPa, evidenciando a esperada redução de resistência decorrente do processo de recozimento.

A partir dos valores de razão sinal-ruído, foram determinadas as médias correspondentes para cada variável de entrada e seus respectivos níveis. Esses resultados estão sintetizados na Tabela 4.23 e ilustrados no gráfico da Figura 4.10.

Tabela 4.23: Razão sinal-ruído média para os níveis dos parâmetros de soldadura para o limite de resistência à flexão das juntas recozidas.

Fator	S/N Médio (dB)
A1	23,755
A2	20,830
A3	22,470
B1	21,787
B2	27,099
B3	18,170
C1	26,535
C2	18,670
C3	21,850



Figura 4.10: Curva S/N médio de cada parâmetro para o limite de resistência à flexão das juntas recozidas.

Os valores mais elevados da razão sinal-ruído apontam os níveis e parâmetros com o desempenho mais eficaz. Dessa forma, a seleção dos maiores índices S/N no gráfico permite identificar a condição ou combinação mais vantajosa. No caso específico do limite de resistência à tração transversal, a combinação ótima identificada foi A1B2C1. Isso implica que a resistência à flexão mais elevada pode ser alcançada ao realizar a soldadura

com um ângulo de 0°, uma tensão de 23,7 V e uma velocidade de 250 mm/min.

Na Tabela 4.24, são apresentados os efeitos da tensão, da velocidade de soldadura e do ângulo de ataque da tocha, conforme revelado pela análise de variância para a resistência à flexão das juntas recozidas.

Tabela 4.24: Análise de variância para obter a influência dos parâmetros no limite de resistência à flexão das juntas recozidas.

Fonte	GDL	SQ	QM	Valor F	Valor P	Contribuição (%)
Ângulo	2	33511	16755	0,6	0,626	26,54
Tensão	2	9525	4762	0,17	0,855	7,54
Velocidade	2	27019	13510	0,48	0,675	21,40
Erro	2	56201	28100	—	—	44,51
Total	8	126255	—	—	—	100

De acordo com a tabela ANOVA, o parâmetro de entrada que mais influenciou o limite de resistência à flexão do cordão de solda das juntas recozidas foi o ângulo da tocha, contribuindo com 26,54%, seguido pela velocidade de soldadura, com 21,40%, e pela tensão, com 7,54%.

Capítulo 5

Conclusão e propostas para trabalhos futuros

Este estudo teve como propósito identificar a combinação mais eficaz dos níveis dos parâmetros de soldadura analisados, visando alcançar as melhores respostas de desempenho, além de investigar quais as variáveis é que exercem maior influência sobre os resultados obtidos.

Para isso, aplicou-se o Método de Taguchi tanto no delineamento dos experimentos quanto na otimização dos parâmetros via análise das razões sinal-ruído. A influência relativa de cada fator sobre as variáveis de resposta foi quantificada por meio da Análise de Variância (ANOVA).

A utilização do Método de Taguchi mostrou-se eficaz para a otimização de múltiplas variáveis, possibilitando a identificação de configurações ideais com um número reduzido de ensaios. Isso resultou em uma significativa economia de tempo e de recursos, como materiais consumíveis (arame, gás de proteção, corpos de prova), energia elétrica, e desgaste de equipamentos, além de otimizar o uso da infraestrutura e da mão de obra envolvida nos testes.

A ANOVA, por sua vez, possibilitou compreender o impacto dos fatores de processo não apenas sobre as propriedades mecânicas das juntas soldadas — como a resistência à

flexão — mas também sobre as características geométricas do cordão de solda. Embora o número de amostras tenha sido limitado, os métodos aplicados demonstraram coerência nos resultados e relevância na avaliação dos efeitos dos parâmetros.

Em relação ao reforço do cordão, os parâmetros ideais foram: ângulo da tocha de 25°, tensão de 23,7 V e velocidade de 400 mm/min para as amostras sem tratamento térmico; e ângulo de 0°, tensão de 24,1 V e velocidade de 250 mm/min para as recozidas.

Para a largura, a configuração ótima foi: ângulo de 0°, tensão de 24,1 V e velocidade de 400 mm/min nas amostras sem recozimento; e ângulo de 25°, tensão de 23,7 V e velocidade de 325 mm/min nas amostras tratadas termicamente.

No que se refere à penetração, a melhor combinação para as amostras sem recozimento foi: ângulo de 0°, tensão de 24,1 V e velocidade de 400 mm/min; enquanto para as amostras recozidas, os parâmetros ideais foram: ângulo de 15°, tensão de 22,4 V e velocidade de 325 mm/min.

Por fim, para maximizar a resistência à flexão, os níveis ótimos foram: ângulo de 25°, tensão de 23,7 V e velocidade de 250 mm/min para as amostras sem recozimento; e ângulo de 0°, tensão de 23,7 V e velocidade de 250 mm/min para as amostras com tratamento térmico.

A comparação entre as amostras com e sem recozimento evidenciou que o tratamento térmico influenciou significativamente tanto os valores médios de resistência à flexão quanto a variabilidade dos resultados. As amostras sem recozimento apresentaram, em geral, valores médios de resistência à flexão mais elevados, como observado no ensaio 1 (1030 MPa) e no ensaio 9 (1024 MPa). No entanto, essa condição também resultou em maior dispersão entre as amostras e ocorrência frequente de fraturas no cordão de solda, evidenciada por rompimentos em diversos ensaios (1.2, 2.1, 5.3, 6.1, 7.1 e 7.2), que contribuíram para o alto erro residual de 67,29% na análise de variância. Por outro lado, as amostras submetidas ao recozimento apresentaram menor resistência média em alguns casos, mas demonstraram maior consistência nos resultados e menor incidência de fraturas, com exceção apenas da amostra 2 do ensaio 9. Isso indica que o tratamento térmico

promoveu o alívio das tensões internas e uma redução da fragilidade do material, favorecendo um comportamento mais dúctil e estável sob carregamento, mesmo com valores médios de resistência um pouco menores. Esses resultados reforçam que o recozimento, embora reduza ligeiramente a resistência à flexão, melhora a integridade estrutural e a confiabilidade do processo, sendo especialmente benéfico para aplicações que demandam maior tenacidade.

Para aprimorar a precisão dos resultados e reduzir o erro residual, recomenda-se a realização de novos experimentos com matrizes ortogonais de maior dimensão, explorando mais níveis por parâmetro ou incluindo variáveis adicionais. No entanto, é importante salientar que o aumento da complexidade do arranjo experimental eleva também os custos e o tempo necessários para sua execução.

Embora eficaz, o método de Taguchi apresenta limitações quando a característica de interesse é do tipo “nominal é melhor”, uma vez que sua fórmula de razão sinal-ruído prioriza a consistência (baixa variabilidade) em vez da exatidão em relação ao valor alvo. Ainda assim, os resultados obtidos demonstram que a metodologia continua útil e aplicável, mesmo nesses casos, desde que interpretada com critério.

Com base nos resultados obtidos e nas limitações identificadas neste estudo, diversas direções podem ser exploradas em trabalhos futuros, visando ampliar o conhecimento sobre o processo de soldadura MIG/MAG aplicado ao aço SAE 1020.

Uma primeira possibilidade consiste na ampliação do número de ensaios experimentais, com a utilização de matrizes ortogonais mais complexas no método Taguchi, contendo mais níveis e fatores. Essa abordagem permitiria analisar com maior precisão as interações entre variáveis e reduzir o erro residual observado, especialmente nas análises de resistência à flexão.

Outra linha de investigação interessante seria a exploração de diferentes tipos de tratamentos térmicos pós-soldagem, como normalização, têmpera e revenimento. A comparação entre esses tratamentos e o recozimento pode revelar impactos distintos na microestrutura e nas propriedades mecânicas do cordão de solda, contribuindo para a escolha de procedimentos mais eficazes conforme a aplicação.

Além disso, é recomendável complementar as análises macrográficas com estudos microestruturais mais detalhados, por meio de microscopia óptica e eletrônica. Essa análise mais refinada pode fornecer uma melhor compreensão da influência dos parâmetros de soldagem e do tratamento térmico sobre a formação da zona termicamente afetada (ZTA) e da zona fundida (ZF).

Também se sugere a realização de novos experimentos com diferentes tipos de aço carbono, ligas metálicas ou consumíveis alternativos, como arames de soldagem com composições químicas variadas. Essa abordagem permitiria avaliar a aplicabilidade e a robustez do método de otimização em outros contextos industriais.

Outra contribuição relevante seria a aplicação de simulações numéricas, utilizando softwares baseados no método dos elementos finitos para prever a distribuição térmica e de tensões residuais durante a soldagem. Essa estratégia possibilita a validação dos dados experimentais, além de otimizar tempo e recursos.

Por fim, recomenda-se que futuras pesquisas também abordem a análise de fadiga e durabilidade das juntas soldadas, especialmente sob condições de carregamento cíclico. Essa análise complementar aos ensaios estáticos realizados neste trabalho e forneceria dados importantes sobre a vida útil das peças com e sem tratamento térmico.

Essas propostas visam expandir a compreensão sobre os fatores que influenciam o desempenho de soldaduras em aço carbono, contribuindo para o aperfeiçoamento de práticas industriais mais eficientes, seguras e econômicas.

Bibliografia

- [1] J. F. de Oliveira Almeida, “Conversão de um processo de soldadura manual em soldadura automática”, tese de mestrado, Universidade do Porto, Porto-PT, 2018, p. 108.
- [2] T. E. P. Marques, “Desenvolvimento e melhoria dos processos de soldadura por ultrassons de fios de cobre”, tese de mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa-PT, 2014, p. 74.
- [3] A. H. de Lima Silva, “Desenvolvimento e Implementação do Processo de Soldadura para Reparação de Peças em Ligas de Titânio para Turbinas e Próteses”, tese de mestrado, Universidade do Porto, Porto-PT, 2015, p. 227.
- [4] F. F. Fraga, “Estudo numérico e experimental dos processos de transferência de calor em prototipagem rápida por soldagem a arco”, tese de mestrado, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2013, p. 118.
- [5] E. Pegorini, *Análise dos parâmetros do processo de soldagem a ponto po resistência na qualidade das juntas em estruturas automotivas*, Caxias do Sul-RS, 2021.
- [6] M. E. MFG., *Guidelines For Gas Metal Arc Welding (GMAW)*, 1^a ed. Illinois-USA: Miller Electric Mfg. LLC, 2018, p. 17.
- [7] W. H. Minnick e J. Mosman, *GMAW/FCAW Handbook*, 2^a ed. Illinois-USA: Goodheart-Willcox, 2023, p. 223.
- [8] L. Eletric, *Gas Metal Arc Welding Product and Procedure Selection*, 1^a ed. Cleveland-USA: Lincoln Global Inc, 2014, p. 95.

- [9] J. E. P. C. Ribeiro, ““Caracterização experimental e numérica de campos de tensões residuais provocadas por processos de fabrico”, tese de doutoramento, Universidade do Porto, Porto-PT, 2006, p. 280.
- [10] T. W. Eagar e Y. S. Kim, “Analysis of metal transfer in gas metal arc welding”, *Welding Journal*, vol. 72, pp. 269–278, 1993.
- [11] C. Á. de Paula Gomes, *Influência da alteração de parâmetros de soldagem na qualidade do passe raiz*, Belo Horizonte-MG, 2024.
- [12] T. M. Maquiné, M. C. G. de Araújo Lima, P. A. de Oliveira, S. R. de Medeiros e J. C. de Macedo Neto, “Influência da variação dos parâmetros do processo de soldagem MIG/GMAW no comportamento das propriedades mecânicas de juntas soldadas em aço naval ASTM 131 grau A”, *Revista de Educação, Ciência e Tecnologia do IFAM*, vol. 13, pp. 44–54, 2019.
- [13] E. S. A. Bolaget, *Soldagem MIG / MAG*, 1ª ed. Contagem-MG: ESAB, 2005, p. 135.
- [14] C. R. de Lacerda, “Otimização de Parâmetros de Soldadura GMAW Utilizando o Método Taguchi com a Análise Relacional de Grey”, tese de mestrado, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança-PT, 2021, p. 92.
- [15] S. M. da Costa, “Estudo da qualidade micrográfica de juntas soldadas em ligas de alumínio pelo processo MIG”, tese de mestrado, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança-PT, 2019, p. 198.
- [16] W. A. de Moraes¹, C. P. Diogo, A. J. Blanco, M. A. Nunes e J. S. Higa, “Caracterização e estudo das propriedades mecânicas de uma junta soldada”, *15º Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas (ENEMET)*, vol. 70, pp. 2923–2932, 2015.
- [17] A. I. Pereira, E. C. Martins e M. P. Lopes, “Taguchi method application in the pilot production phase-a case study”, *Elsevier Ltd*, vol. 30, pp. 1069–1075, 2020.

- [18] P. R. da Silva, C. da Silva Terra, E. A. Ferreira, J. A. O. Huguenin e L. da Silva, “Análise de Superfície de Junta Soldada de Aço Inoxidável AISI 304”, *Contribuição técnica ao 72º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 16º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas*, vol. 72, pp. 1315–1322, 2017.
- [19] T. de Menezes Maia, *Análise das tensões residuais geradas nos processos de soldagem MIG/MAG e Plasma*, Rio de Janeiro-MG, 2015.
- [20] D. G. Callister JR. William D.; Rethwisch, *Fundamentos da Ciência e Engenharia dos Materiais*, 8ª ed. Rio de Janeiro-RJ: LTC, 2012, p. 705.
- [21] A. S. Ltda, *Aços Sacchelli Ltda*, Disponível em: <<https://sacchelli.com.br/aco-sae-1020/>>, 2024.
- [22] J. C. de Sousa Zorzi, T. M. F. de Melo e D. B. Santos, “Efeito da temperatura de recozimento nas propriedades mecânicas e na microestrutura de um aço com alto teor de Mn laminado a frio”, *51 Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos*, vol. 51, pp. 207–2017, 2014.
- [23] E. J. Fagundes, “Análise da Influência do Ciclo de Recozimento de Esferoidização nas Propriedades Mecânicas do Aço SAE 1050”, tese de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, 2006, p. 50.
- [24] A. R. M. do Vale, *Tratamento Térmico*, 1ª ed. Belém-PA: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, 2011, p. 130.
- [25] P. Soares, *Aços: Características e Tratamentos*, 6ª ed. Porto-PT: PUBLINDÚSTRIA, 2010, p. 371.
- [26] M. S. P. P. da Veiga, “Implementação Laboratorial de Ensaios para Avaliação das Características de Fratura das Misturas Betuminosas”, tese de mestrado, Universidade do Minho, Guimarães-PT, 2012, p. 130.
- [27] D. J. C. Morais, “Conceção e Projeto de uma Máquina de Ensaio Universal de 15kN”, tese de mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa-PT, 2021, p. 162.

- [28] R. C. Hibbeler, *Resistência dos Materiais*, 5^a ed. São Paulo-SP: Prentice Hall, 2004, p. 670.
- [29] L. A. de Souza Neto, Y. Y. F. L. Leite, L. G. A. dos Santos, L. G. O. da Gama, I. R. Pinho, R. de Sales França, N. C. S. da Silva e J. L. Peralta, “Ensaio de flexão de três pontos numa placa de vidro com variações de carga e comprimento do vão entre os apoios”, *Revista Foco*, vol. 18, pp. 1–9, 2025.
- [30] N. R. Daltro, “Desenvolvimento de um laminado compósito híbrido a base de fibras de vidro/licuri”, tese de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2011, p. 95.
- [31] G. C. de Oliveira Filho, “Efeitos da Hibritização nas Propriedades Mecânicas de Compósitos Reforçados por Tecido de Fibra de Piaçava”, tese de doutoramento, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2019, p. 105.
- [32] C. H. C. Félix, “Aplicação de ensaios de fadiga por flexão em três pontos em corpos de prova de tubos contendo a solda para utilização de avaliação em fadiga de minerodutos”, tese de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, 2019, p. 115.
- [33] C. A. Fernandes, “Avaliação da Integridade Estrutural de Juntas Soldadas do aço API 5 L X70 pelo Processo de Soldagem Híbrido Laser-Arco Através da Análise Microestrutural e da Tenacidade à Fratura por CTOD”, tese de doutoramento, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2023, p. 115.
- [34] I. O. for Standardization, *Destructive tests on welds in metallic materials — Bend tests*, 1^a ed. Geneva-CH: International Organization for Standardization, 2023, p. 29.
- [35] —, *Metallic materials - Bend test*, 1^a ed. Geneva-CH: International Organization for Standardization, 2005, p. 14.
- [36] G. Taguchi, *Introduction to Quality Engineering: Designing Quality into Products and Processes*, 1^a ed. Cleveland-USA: Quality Resources, 1986, p. 191.

- [37] O. dos Santos Pereira, “Aplicação do Método Taguchi para Otimização de Parâmetros na Furação do aço ABNT 4340 com Brocas de aço Rápido Revestidas e não Revestidas”, tese de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, 2019, p. 100.
- [38] R. E. Faria, “Modelagem e Otimização da Soldagem a Ponto em Chapas de aço Galvanizado Utilizando os Métodos Taguchi e Superfície de Resposta”, tese de mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, 2017, p. 80.
- [39] F. G. C. Pereira, “Experimental Study of Laser Beam Machining Applied to the Production of Mold Cavities”, *Instituto Superior Técnico-Universidade de Lisboa*, vol. 1, pp. 1–10, 2017.
- [40] C. B. F. V. Pinto, “Study of the influence of a gecko-inspired adhesive structure on the mechanical properties of specimens reinforced with glass and carbon fibres”, tese de mestrado, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança-PT, 2024, p. 50.
- [41] A. Casarini, “Estudo dos Parâmetros de Soldadura MIG/MAG para Otimização das Propriedades Mecânicas e Geométricas do Cordão de Solda”, tese de mestrado, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança-PT, 2019, p. 87.
- [42] J. Ribeiro, L. Queijo e D. Pereira, “Otimização de Parâmetros de Fresagem Usando o Método Taguchi com a Análise Relacional de Grey”, *Iberoamerican Journal of Industrial Engineering*, vol. 10, pp. 56–70, 2018.
- [43] R. R. de Moraes Junior, *Estudo do Desempenho da Soldagem por Eletrodo Revestido em Diferentes Posições por meio de Análise de Variância*, Bagé-RS, 2015.
- [44] H. I. Kurt, M. Oduncuoglu, E. Ergul e R. Asmatulu, “A Comparative Study on the Effect of Welding Parameters of Austenitic Stainless Steels Using Artificial Neural Network and Taguchi Approaches with ANOVA Analysis”, *Metals*, vol. 8, pp. 1–13, 2018.

- [45] Y. da Silva Mota, *Análise da Influência e Otimização no processo de soldagem a ponto por fricção e mistura mecânica com preenchimento em uma liga de alumínio aeronáutico*, Joinville-SC, 2019.
- [46] P. Doncaster e A. Davey, *Analysis of Variance and Covariance: How to Choose and Construct Models for the Life Sciences*, 1ª ed. Nova Iorque-USA: Cambridge University Press, 2007, p. 287.
- [47] S. F. Sawyer, “Analysis of Variance: The Fundamental Concepts”, *The Journal of manual manipulative therapy*, vol. 17, pp. 27–38, 2009.
- [48] M. S. Online, *Metal Suppliers Online*, Disponível em: <<https://www.metalsuppliersonline.com/propertypages/1020.asp>>, 1995.
- [49] WeldWire, *WeldWire*, Disponível em: <https://www.weldwire.net/weld_products/ww70s-6/>, 2021.

Anexos

A Programas CNC usado para soldadura

Para a soldadura em 0° foi realizado na direção X da máquina, e para os ângulos de 15° e 25° na direção Y, por causa da utilização da soldadura como puxar, o comando M3S1 liga a máquina, X ou Y a direção e o valor de 10, a distância percorrida pela tocha em milímetros, sendo que o corpo de prova tem 20 mm de espessura, mas como a máquina estava descalibrada, ela percorria o dobro do valor fornecido e o comando M5 desliga a máquina.

A.1

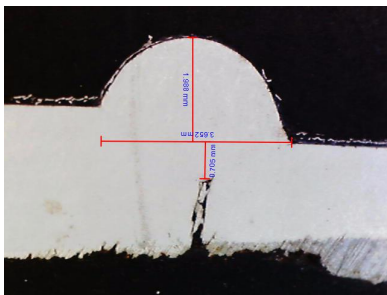
N1 M3S1
N2 X10
N3 M5

A.2

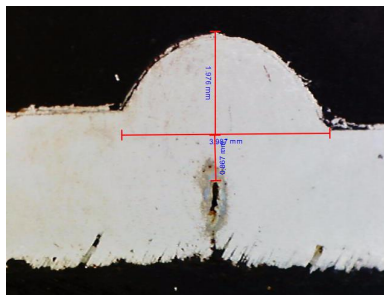
N1 M3S1
N2 Y10
N3 M5

B Macrografias dos Cordões de Solda

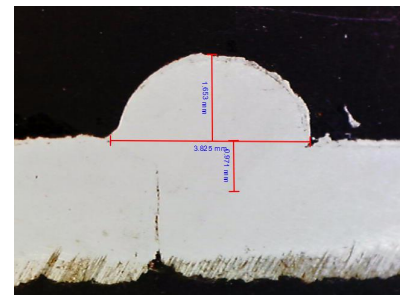
B.1 Amostras Sem Recozimento



a: Amostra 1

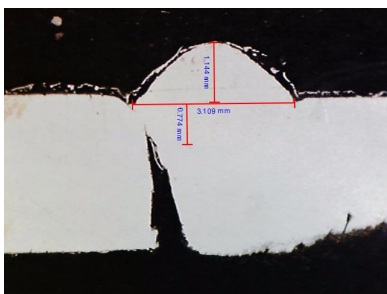


b: Amostra 2

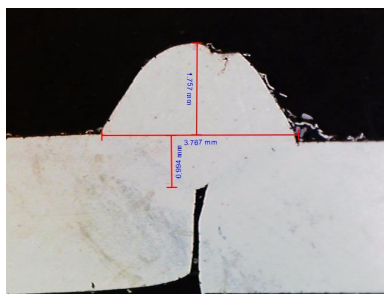


c: Amostra 3

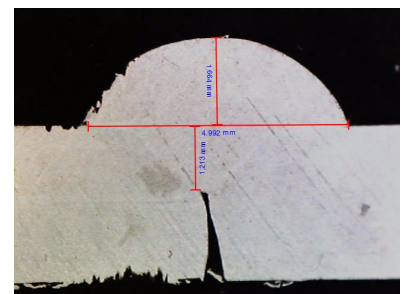
Figura B.1: Macrografias do Ensaio 1 (sem recozimento)



a: Amostra 1

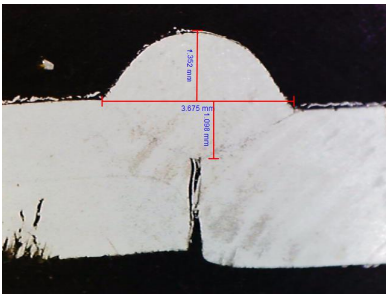


b: Amostra 2

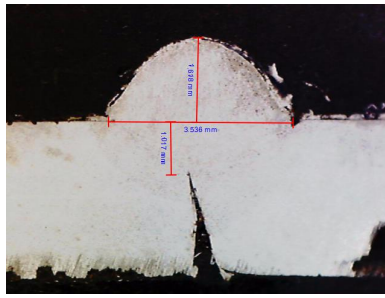


c: Amostra 3

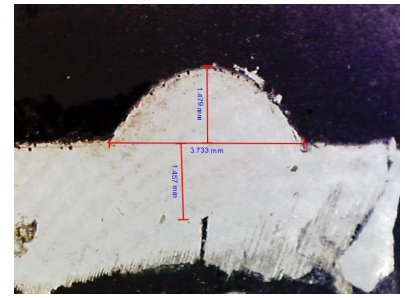
Figura B.2: Macrografias do Ensaio 2 (sem recozimento)



a: Amostra 1

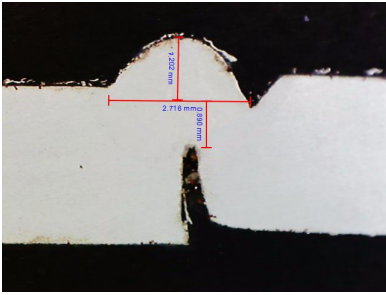


b: Amostra 2

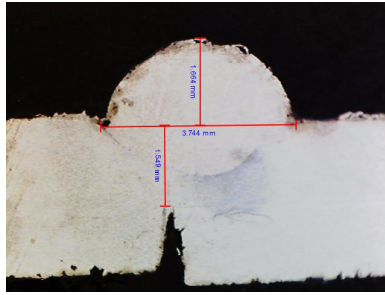


c: Amostra 3

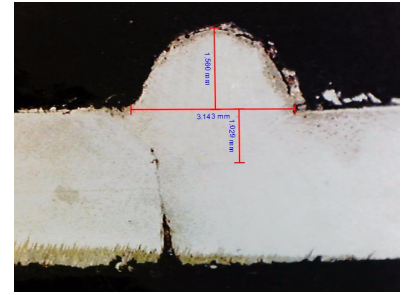
Figura B.3: Macrografias do Ensaio 3 (sem recozimento)



a: Amostra 1

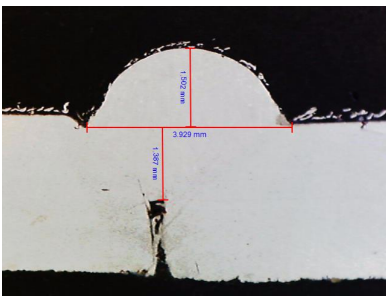


b: Amostra 2

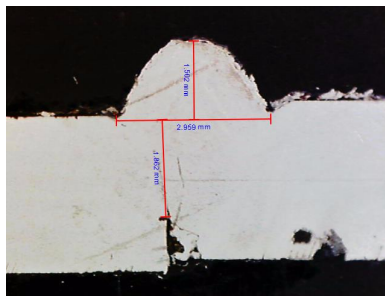


c: Amostra 3

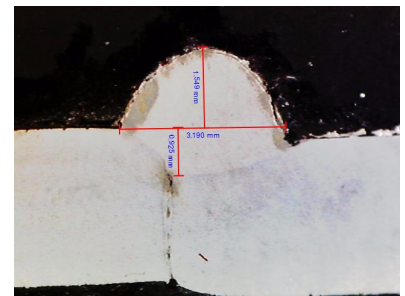
Figura B.4: Macrografias do Ensaio 4 (sem recozimento)



a: Amostra 1

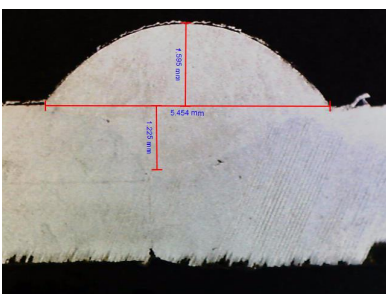


b: Amostra 2

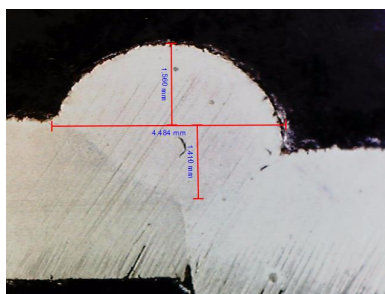


c: Amostra 3

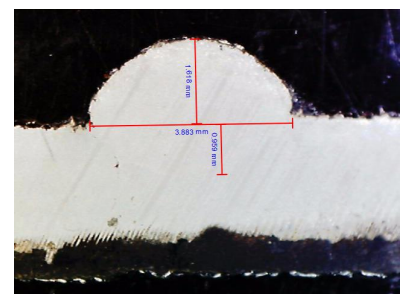
Figura B.5: Macrografias do Ensaio 5 (sem recozimento)



a: Amostra 1

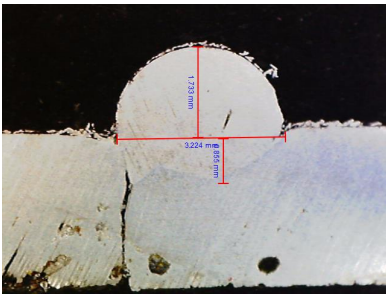


b: Amostra 2

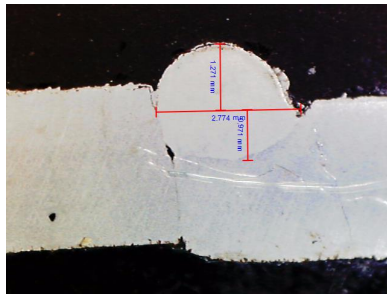


c: Amostra 3

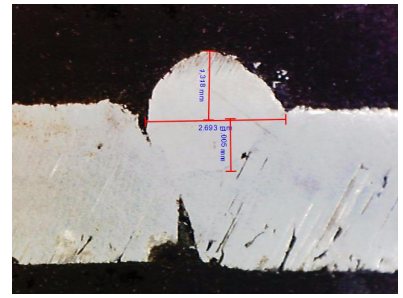
Figura B.6: Macrografias do Ensaio 6 (sem recozimento)



a: Amostra 1

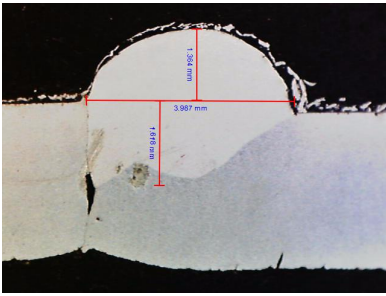


b: Amostra 2

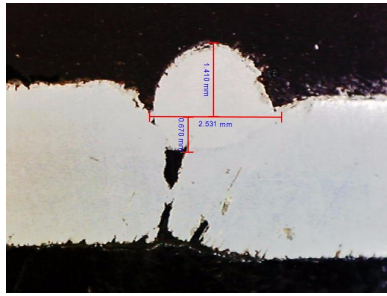


c: Amostra 3

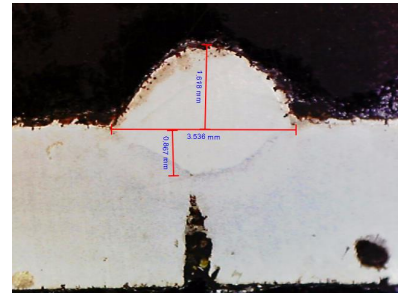
Figura B.7: Macrografias do Ensaio 7 (sem recozimento)



a: Amostra 1

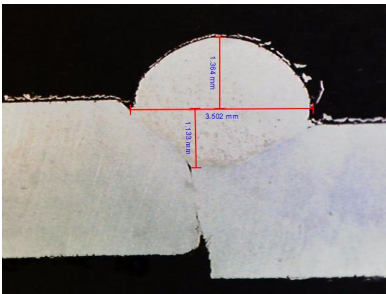


b: Amostra 2

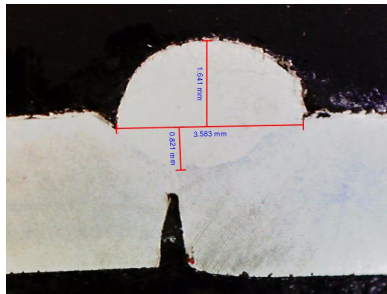


c: Amostra 3

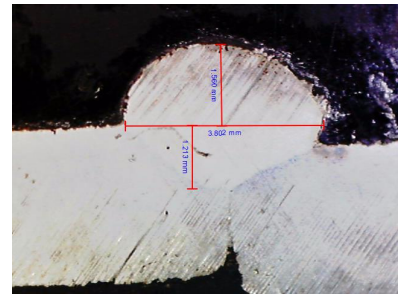
Figura B.8: Macrografias do Ensaio 8 (sem recozimento)



a: Amostra 1



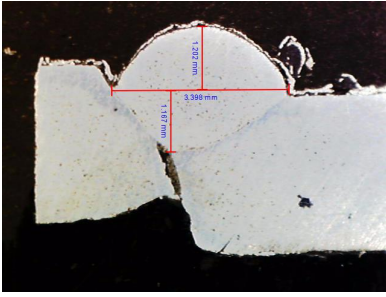
b: Amostra 2



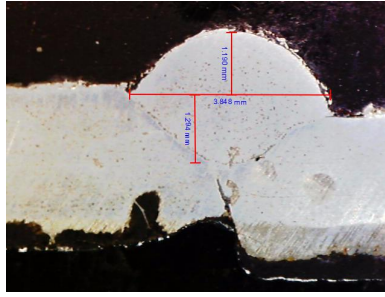
c: Amostra 3

Figura B.9: Macrografias do Ensaio 9 (sem recozimento)

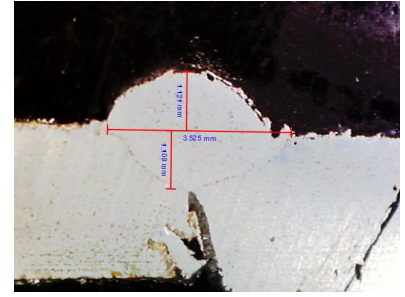
B.2 Amostras Com Rezoimento



a: Amostra 1

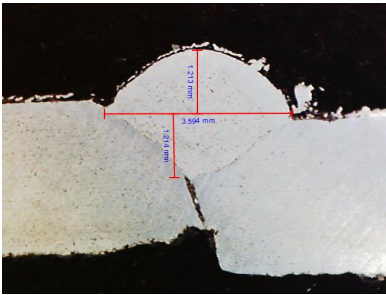


b: Amostra 2

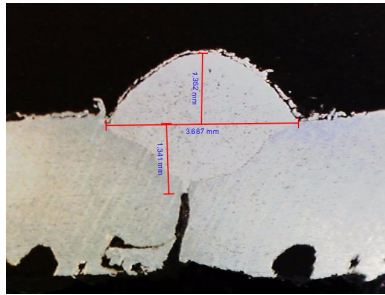


c: Amostra 3

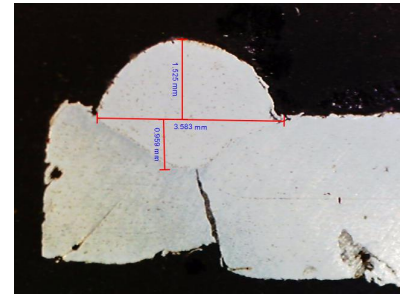
Figura B.10: Macrografias do Ensaio 1 (com rezoimento)



a: Amostra 1

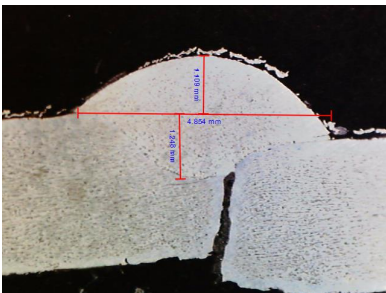


b: Amostra 2

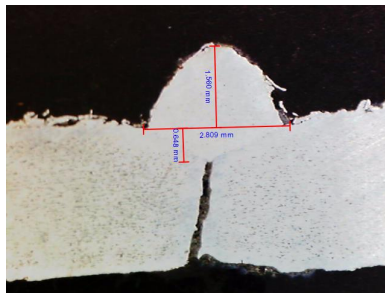


c: Amostra 3

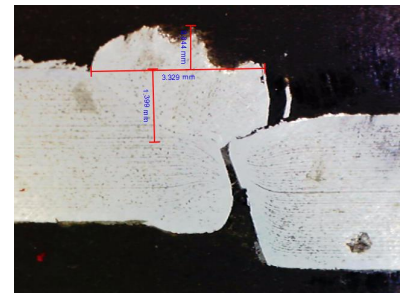
Figura B.11: Macrografias do Ensaio 2 (com rezoimento)



a: Amostra 1

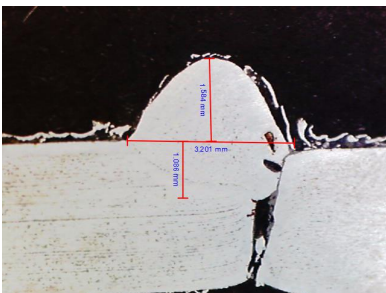


b: Amostra 2

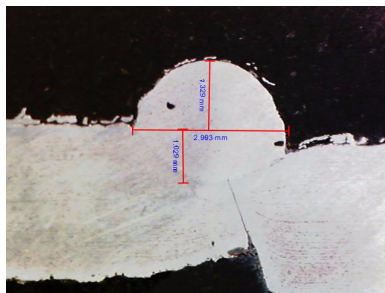


c: Amostra 3

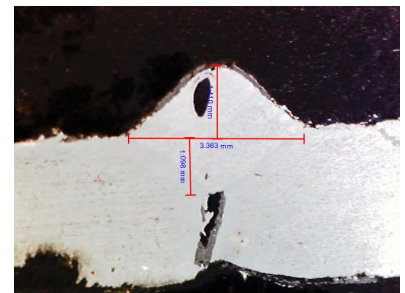
Figura B.12: Macrografias do Ensaio 3 (com rezoimento)



a: Amostra 1

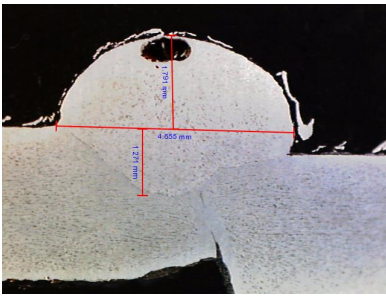


b: Amostra 2

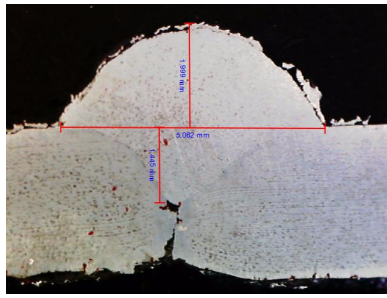


c: Amostra 3

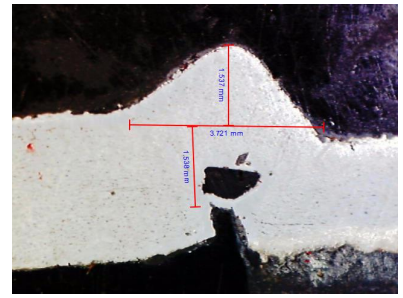
Figura B.13: Macrografias do Ensaio 4 (com rezoimento)



a: Amostra 1

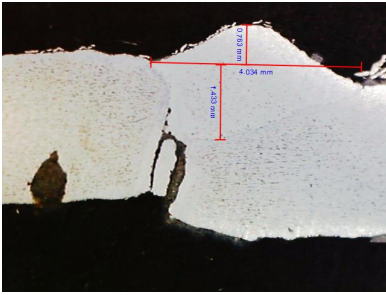


b: Amostra 2

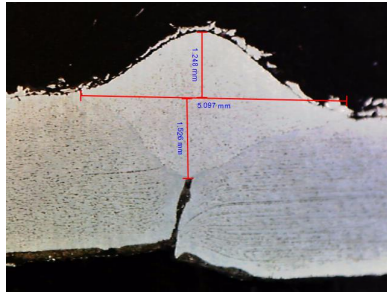


c: Amostra 3

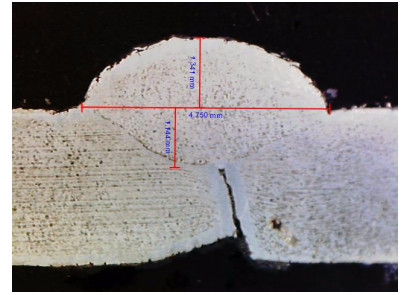
Figura B.14: Macrografias do Ensaio 5 (com recozimento)



a: Amostra 1

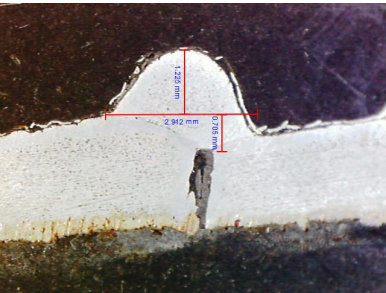


b: Amostra 2

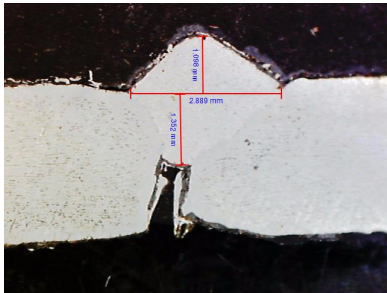


c: Amostra 3

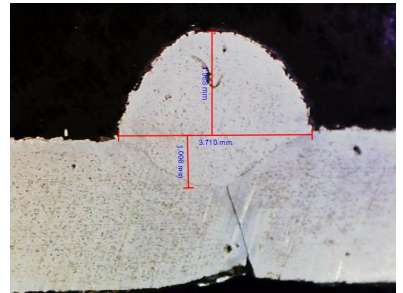
Figura B.15: Macrografias do Ensaio 6 (com recozimento)



a: Amostra 1

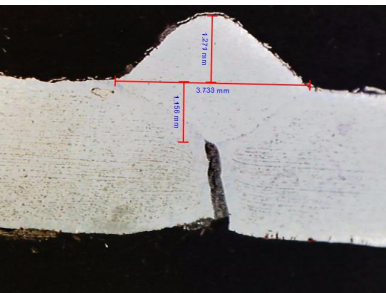


b: Amostra 2

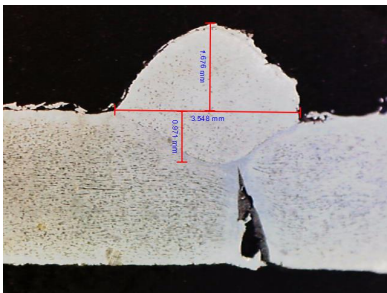


c: Amostra 3

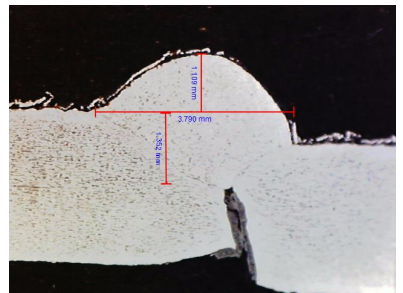
Figura 16: Macrografias do Ensaio 7 (com recozimento)



a: Amostra 1

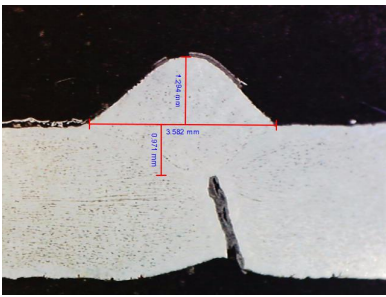


b: Amostra 2

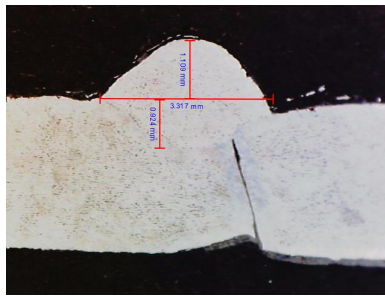


c: Amostra 3

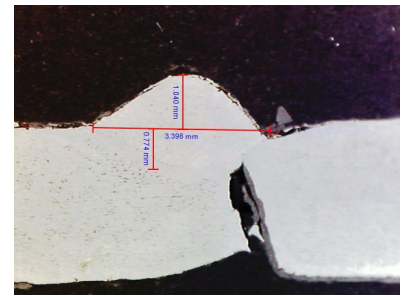
Figura 17: Macrografias do Ensaio 8 (com recozimento)



a: Amostra 1



b: Amostra 2



c: Amostra 3

Figura 18: Macrografias do Ensaio 9 (com recozimento)