

Avaliação da soldabilidade de aços ao carbono com o processo MAG

Gustavo Fonseca Coppla, 61423

Dissertação apresentada à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Este trabalho foi efetuado sob orientação de:
Prof. Dr. João Eduardo Pinto Castro Ribeiro

Coorientação de:
Prof. Dr. Thiago Antonini Alves
Prof. Dr. Roger Navarro Verástegui

Março de 2025

Avaliação da soldabilidade de aços ao carbono com o processo MAG

Gustavo Fonseca Coppla, 61423

Orientador do Instituto Politécnico de Bragança:

Prof. Dr. João Eduardo Pinto Castro Ribeiro

Orientadores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná:

Prof. Dr. Thiago Antonini Alves

Prof. Dr. Roger Navarro Verástegui

Mestrado em Engenharia Mecânica

2025

“Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso!
Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus,
estará com você por onde você andar.”
Josué 1:9

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha família.

À minha mãe, Patrícia. Minha melhor amiga e a pessoa em quem me espelho todos os dias. O meu maior apoio e alicerce, que me ensinou a ser quem eu sou hoje e continua a me ensinar tanto, mesmo sem perceber. Foi graças a você, que “segurou as pontas” em casa, que eu consegui me dedicar integralmente a este sonho que nós sonhamos juntos. Seu incentivo, encorajamento e orações foram essenciais para que eu pudesse concluir essa etapa. O orgulho que eu tenho de você é imenso. Obrigado por ter me escolhido, meu coração fora do peito.

Ao meu pai, Cláudio, que me motivou e me aconselhou em todos os momentos nos quais eu duvidei de mim mesmo, sempre fez tudo que era possível e impossível para eu me sentir bem e nunca me negou apoio em toda a minha jornada. Você me ensinou a ter sempre um olhar positivo das coisas e tirar o máximo de aprendizado possível delas. Nossa parceria não é de hoje e eu tenho certeza que será além da vida.

À minha querida avó, a “vó Marilde”. O maior exemplo de amor que eu tenho na vida. A pessoa mais bondosa, empática e altruísta que eu conheço, que faz questão de perguntar se está tudo bem, se eu não preciso de nada e que me inspira a cada dia a buscar a minha melhor versão. O seu apoio foi essencial e cada ligação de vídeo me motivou ainda mais nessa trajetória. Obrigado por aguentar firme e torcer tanto por mim.

Ao meu avô, o “vô José”. Meu herói, meu maior exemplo e quem eu mais admiro no mundo. Quantos aprendizados já pude tirar nas nossas conversas e ouvindo suas histórias de vida. Um grande homem que, do seu jeito particular, se tornou a minha grande referência. Espero estar te orgulhando e honrando tudo o que o senhor me ensinou com tanto amor e sabedoria. Como o senhor diz, “a saudade é grande”, mas o propósito é ainda maior, e logo poderemos comemorar com um churrasco do jeito que só o senhor sabe fazer.

A todos vocês, minha eterna gratidão por fazerem parte dessa conquista.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, expresso minha gratidão ao meu orientador do Instituto Politécnico de Bragança, Prof. Dr. João Ribeiro, pela confiança e oportunidade que me foram dadas, assim como todo o suporte e ajuda durante o desenvolvimento deste trabalho. Estendo os meus sinceros agradecimentos aos meus orientadores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Prof. Dr. Thiago Antonini Alves e Prof. Dr. Roger Navarro Verástegui por sua disponibilidade ao longo deste período, pelos valiosos direcionamentos e pelo vasto conhecimento compartilhado, que foram essenciais nesta jornada.

Ao Prof. Dr. João Rocha, pela confiança em ceder gentilmente o identador de diamante HRC, que teve essencial colaboração nos ensaios de dureza. Também agradeço à Prof^a. Dr^a. Luísa Barreira pelo auxílio na execução dos ensaios e por ter me recebido tão bem nas acomodações do LERM para a finalização da tese, e ao MEng. Jorge Paulo, técnico do Laboratório de Tecnologia Mecânica, pela disponibilidade e ajuda prestada durante o período que utilizei o laboratório.

Aos meus grandes amigos Nicollas Verbanek, Madu Holtz, Lucas Scriptori e Gabriel “Bob” Mello, que tornaram essa jornada mais leve com sua amizade e apoio, sendo para mim uma verdadeira segunda família, e me ensinaram que Bragança é mesmo “a terra dos amigos para sempre”.

Aos amigos Gustavo Trelha, Felipe Stein e Nickollas Giacomitti pelo compartilhamento de seus conhecimentos no âmbito da soldadura e análise de dados, que me permitiram compreender alguns aspectos antes desconhecidos e me auxiliaram em tudo o que foi necessário.

Aos meus familiares. Minha mãe Patrícia, meu pai Cláudio, vó Marilde, vô José e tia Telma, que se fizeram presentes mesmo a 8.700 km de distância durante este ano. Não houve um dia em que não acordei com uma mensagem de “bom dia” e não fui dormir sem um “boa noite”. Suas orações me mantiveram forte e perseverante, e foram a maior inspiração e motivação para a conclusão deste trabalho

A Deus, que me guia, me protege e me abençoa em todos os momentos da minha vida. Sua presença constante tornou tudo mais leve, e fortaleceu ainda mais a minha fé.

Resumo

A soldadura MAG é amplamente utilizada devido à sua versatilidade e eficiência na união de aços ao carbono. No entanto, a definição de parâmetros ótimos para o processo ainda é um desafio para garantir a qualidade e a confiabilidade das juntas soldadas. Este estudo teve como objetivo avaliar a soldabilidade do aço carbono no processo MAG, analisando a influência de diferentes parâmetros de soldadura. Para isso, foram realizados ensaios de flexão, tração, dureza Rockwell e análise macrográfica em corpos de prova soldados sob diferentes condições de tensão, velocidade e ângulo de soldadura. A metodologia envolveu um planejamento experimental baseado no método de Taguchi e na análise de variância dos resultados, para determinar a influência de cada parâmetro na qualidade da soldadura, buscando uma combinação ótima. Os resultados mostraram que a escolha adequada dos parâmetros pode otimizar as propriedades mecânicas das juntas soldadas, reduzindo defeitos e melhorando a resistência. Conclui-se que a seleção criteriosa das condições de soldadura é essencial para maximizar a soldabilidade do aço carbono no processo MAG, desempenhando um papel fundamental na obtenção de juntas de alta qualidade.

Palavras-chave: soldadura; aço-carbono; MAG; GMAW; soldabilidade; Taguchi; ANOVA.

Abstract

The MAG welding process is widely used because of its versatility and efficiency in joining carbon steels. However, defining the optimal parameters for the process is still a challenge to ensure the quality and reliability of the welded joints. The objective of this study was to evaluate the weldability of carbon steel in the MAG process, analyzing the influence of different welding parameters. Tests of bending, traction, Rockwell hardness and macrographic analysis were conducted on specimens welded under different conditions of welding voltage, speed and angle. The methodology involved experimental planning based on the Taguchi method and analysis of variance of the results, to determine the influence of each parameter on the quality of the weld, in order to find an optimal combination. The results showed that the appropriate selection of parameters can optimize the mechanical properties of welded joints, reducing defects and improving resistance. It is concluded that the careful selection of welding conditions is essential to maximize the weldability of carbon steel in the MAG process, which plays a fundamental role in obtaining high quality joints.

Keywords: welding; carbon steel; MAG; GMAW; weldability; Taguchi, ANOVA.

Índice

1	INTRODUÇÃO	2
1.1	Objetivo geral.....	3
1.2	Objetivos específicos	3
1.3	Cronograma.....	3
2	HISTÓRIA DA SOLDADURA	4
3	PRINCIPAIS TIPOS DE SOLDADURA	6
3.1	Soldadura a Arco Submerso.....	7
3.2	Soldadura a Eléctrodo Revestido.....	8
3.3	Soldaduras com Gás de protecção	9
3.3.1	Soldadura MIG/MAG - <i>Metal Inert/Active Gas</i>	10
3.3.2	Soldadura TIG - <i>Tungsten Inert Gas</i>	11
4	O PROCESSO MAG – <i>METAL ACTIVE GAS</i>.....	13
4.1	Realização da Soldadura MAG.....	14
4.2	Variáveis de Soldadura GMAW	15
4.2.1	Intensidade da corrente eléctrica.....	15
4.2.2	Tensão do arco	16
4.2.3	Velocidade de avanço.....	17
4.2.4	Ângulo de ataque.....	18
4.3	Modos de transferência de metal	19
4.4	A Soldadura MAG no IPB	20
5	DEFEITOS DE SOLDADURA	22
5.1	Descontinuidades	22
5.2	Porosidade.....	23
5.3	Fissuras	24
5.4	Inclusões	25
6	SOLDABILIDADE.....	26
6.1	Testes de soldabilidade convencionais	26

6.1.1	Ensaio de Dureza Rockwell	27
6.1.2	Ensaio de Flexão	29
6.1.3	Ensaio de Tração	32
6.1.4	Ensaio de impacto Charpy.....	34
6.1.5	Análise macrográfica.....	37
6.2	Testes de soldabilidade não convencionais.....	39
6.2.1	Teste Tekken	40
6.2.2	Teste de Implante	43
6.3	Testes de soldabilidade a serem realizados.....	47
7	METODOLOGIA.....	48
7.1	Materiais utilizados	48
7.1.1	Aço	48
7.1.2	Metal de adição	49
7.1.3	Gás de soldadura	50
7.2	Procedimento do planeamento estruturado de experiências	50
7.3	Procedimento de soldadura	53
7.4	Fabrico dos corpos de prova	54
7.4.1	Corpos de prova para ensaio de Flexão.....	55
7.4.2	Corpos de prova para ensaio de Tração	58
7.4.3	Corpos de prova para ensaios de Análise Macrográfica e Dureza.....	62
7.5	Identificação dos corpos de prova.....	66
7.6	Realização dos testes de soldabilidade	68
7.6.1	Ensaio de Flexão.....	68
7.6.2	Ensaio de Tração.....	70
7.6.3	Ensaio de Dureza Rockwell.....	73
7.6.4	Análise macrográfica.....	74
7.7	Tratamento dos dados	74
8	RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
8.1	Ensaio de Flexão	77
8.2	Ensaio de Tração	79
8.3	Ensaio de Dureza Rockwell	81
8.4	Análise macrográfica	83
8.4.1	Reforço	83
8.4.2	Largura	86
8.4.3	Penetração	88
9	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	91
9.1	Conclusões	91
9.2	Trabalhos futuros	93
	REFERÊNCIAS	95

Lista de Figuras

Figura 1 - Sistema para soldadura a arco de acordo com a patente de Bernados [2].	4
Figura 2 - Desenho representativo da soldadura por arco submerso (SAW) [10].	7
Figura 3 – Desenho representativo da soldadura por eletrodo revestido (SMAW) [13].	8
Figura 4 – Componentes da realização do processo GMAW MIG/MAG [20].	10
Figura 5 – Equipamento para soldadura GMAW [10].	11
Figura 6 – Desenho representativo da soldadura TIG (GTAW) [25].	12
Figura 7 – Processo básico de soldadura MIG/MAG [29].	14
Figura 8 - Influência da corrente de soldadura em um processo GMAW - aço carbono, curto-circuito, 75%Ar-25%CO ₂ [33].	16
Figura 9 – Efeito da corrente de soldadura na penetração da solda – aço carbono, curto-circuito, Ar-25%CO ₂ [29].	16
Figura 10 - Influência da tensão de soldadura em um processo GMAW com corrente de 850A [33].	17
Figura 11 - Efeito da tensão de soldadura na penetração da solda [29].	17
Figura 12 - Influência da velocidade de soldadura em um processo GMAW com corrente de 850A [33].	18
Figura 13 – Efeito da velocidade de soldadura na penetração da solda [29].	18
Figura 14 – Efeito da angulação e técnica na penetração da solda [29].	19
Figura 15 – Transferência de metal: (A) Curto-circuito, (B) Globular, (C) Aerossol [31].	19
Figura 16 – Aparato experimental de controle numérico computadorizado [31].	20
Figura 17 – Testes preliminares do maquinário com a caneta.	21
Figura 18 - Evolução na qualidade dos cordões com prática e desenvolvimento.	21
Figura 19 – Falta de fusão (FF) (adaptado) [40].	23
Figura 20 – Porosidade agrupada, alinhada e vermiforme (adaptado) [40].	24

Figura 21 – Inclusão de escória [46].	25
Figura 22 – Princípio de realização do ensaio de Dureza Rockwell (adaptado) [63].	28
Figura 23 - Penetrador HRC (cone com 120° de angulação) [64]......	29
Figura 24 – Esquemas referentes ao ensaio de dobramento de 1 apoio em U (à esquerda) e em V (à direita) (adaptado) [70]......	30
Figura 25 – Esquema referente ao ensaio de dobramento de 3 apoios [71]......	31
Figura 26 – Comparação de trincas pós ensaio de dobramento (adaptado) [70].	32
Figura 27 – Diagrama Tensão x Deformação convencional para aço dúctil [76]......	33
Figura 28 – Exemplo das dimensões dos provetes em [mm] para ensaio de tração em solda [31].	34
Figura 29 – Entalhe em forma de V.	35
Figura 30 – Entalhe em forma de U.	35
Figura 31 – Entalhe tipo buraco de fechadura.....	36
Figura 32 – Aparato de ensaio de impacto Charpy [83].	36
Figura 33 – Medições realizadas nas amostras de solda [31].	39
Figura 34 – Chanfro em forma de Y [38]......	41
Figura 35 – Cordão de solda do Teste Tekken [38].	42
Figura 36 – Dimensões para Teste Tekken [38].	42
Figura 37 – Seções transversais [38]......	43
Figura 38 – Teste de Implante (adaptado) [38].	44
Figura 39 – Entalhe helicoidal [38]......	46
Figura 40 – Chapa de suporte [38].	46
Figura 41 - Ângulos de tocha utilizados para o estudo [31]......	54
Figura 42 - Corpos de prova para ensaio de dobramento – 16 x 2 cm.....	55
Figura 43 - Exemplo de corpo de prova para ensaio de dobramento.	56

Figura 44 - Corpos de prova CP-D-1-N0 ao CP-D-9-N0.....	56
Figura 45 - Corpos de prova CP-D-1-N1 ao CP-D-9-N1.....	56
Figura 46 - Corpos de prova CP-D-1-N2 ao CP-D-9-N2.....	57
Figura 47 - Corpos de prova CP-D-1-N0 ao CP-D-9-N0 finalizados.....	57
Figura 48 - Corpos de prova CP-D-1-N1 ao CP-D-9-N1 finalizados.....	58
Figura 49 - Corpos de prova CP-D-1-N2 ao CP-D-9-N2 finalizados.....	58
Figura 50 - Corpos de prova antes de receberem seu formato na prensa hidráulica.....	58
Figura 51 - Prensa hidráulica Montech LP 3000, incluindo: (1) Botão de alimentação; (2) Botões de controle do movimento; (3) Botão de emergência; (4) Painel digital de controle; (5) Carro móvel; (6) Matriz de punção; (7) Mesa fixa; (8) Barreira de proteção.....	59
Figura 52 - Matriz de punção utilizada para obter o formato desejado dos corpos de prova. .	60
Figura 53 - Pressão durante o corte na prensa hidráulica.....	60
Figura 54 - Corpos de prova para ensaio de tração.....	61
Figura 55 - Dimensões dos corpos de prova.	61
Figura 56 - Exemplo de corpo de prova para ensaio de tração.	61
Figura 57 - Corpos de prova CP-T-1-N0 ao CP-T-9-N0.	62
Figura 58 - Divisão de uma chapa em 9 corpos de prova para soldadura.....	62
Figura 59 - Corpos de prova para ensaios não-destrutivos.	63
Figura 60 - Corpos de prova CP-DA-1-N0 ao CP-DA-9-N0.....	63
Figura 61 - Corpos de prova CP-DA-1-N1 ao CP-DA-9-N1.....	64
Figura 62 - Corpos de prova CP-DA-1-N2 ao CP-DA-9-N2.....	64
Figura 63 - Indicação do corte realizado nas amostras.	65
Figura 64 - Amostras do cordão de solda embutidas.	66

Figura 65 - Equipamento utilizado para o ensaio de flexão, incluindo: (1) Corpo de prova, colocado sobre os suportes de apoio; (2) Célula de carga, responsável pela medição da força aplicada; (3) Suportes de apoio, que sustentam o espécime durante o teste.	69
Figura 66 - Ensaio realizado até o limite máximo estipulado.	70
Figura 67 - Corpo de prova após o ensaio de flexão.	70
Figura 68 – Início do ensaio de tração, incluindo: (1) Corpo de prova; (2) Garras ou mordentes, que seguram as extremidades do espécime de teste; (3) Célula de carga, responsável pela medição da força aplicada; (4) Extensômetro, responsável por medir o alongamento do corpo de prova.	71
Figura 69 – Final do ensaio de tração em junta soldada, com destaque para a região onde ocorreu a ruptura.	72
Figura 70 - Corpos de prova após os ensaios de tração.	72
Figura 71 - Medição de dureza Rockwell no cordão de solda, incluindo: (1) Amostra a ter sua dureza medida; (2) Indentador de diamante; (3) Escala de leitura do resultado; (4) Regulador de carga, ajustado para 150 kgf.	73
Figura 72 - Medições realizadas nas amostras.	74
Figura 73 - Curva S/N médio de cada parâmetro para a resistência à flexão.	78
Figura 74 – Gráfico das medições para a resistência à tração obtidas nos ensaios.	80
Figura 75 - Curva S/N médio de cada parâmetro para a Dureza Rockwell C.	82
Figura 76 - Curva S/N médio de cada parâmetro para o reforço.	85
Figura 77 - Curva S/N médio de cada parâmetro para a largura.	87
Figura 78 - Curva S/N médio de cada parâmetro para a penetração.	89

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Processos de Soldadura usualmente aplicados à Indústria (adaptado) [7].	6
Tabela 2 - Classificação da Escala de Dureza Rockwell [61].	28
Tabela 3 - Dimensões do entalhe em forma de V.	35
Tabela 4 - Dimensões do entalhe em forma de U.	35
Tabela 5 - Dimensões do entalhe tipo buraco de fechadura.	36
Tabela 6 – Vantagens, aplicações e limitações da análise macrográfica.	39
Tabela 7 – Formas e dimensões [86].	42
Tabela 8 – Dimensões do implante (adaptado) [90].	45
Tabela 9 – Dimensões do entalhe [90].	45
Tabela 10 – Especificações da chapa de suporte (adaptado) [38].	46
Tabela 11 – Aplicação da carga (adaptado) [89], [92].	46
Tabela 12 – Composição química do aço DIN C20 / SAE 1020 [94].	48
Tabela 13 – Propriedades mecânicas do aço DIN C20 / SAE 1020 [94].	48
Tabela 14 – Composição química do arame elétrodo AWS A5.18 ER70S-6 [94].	49
Tabela 15 – Propriedades mecânicas do arame elétrodo AWS A5.18 ER70S-6 [99].	49
Tabela 16 - Composição química do gás Linde Corgon 18.	50
Tabela 17 – Matriz L_9 de Taguchi com os parâmetros de estudo.	51
Tabela 18 - Parâmetros fixos de soldadura utilizados no procedimento.	54
Tabela 19 - Maquinário utilizado para o embutimento.	65
Tabela 20 - Parâmetros e identificação dos corpos de prova soldados para ensaio de flexão.	67
Tabela 21 - Parâmetros e identificação dos corpos de prova soldados para ensaio de tração.	67

Tabela 22 - Parâmetros e identificação dos corpos de prova soldados para ensaios de dureza e análise macrográfica.....	68
Tabela 23 - Matriz ortogonal adaptada para fins de cálculo.	75
Tabela 24 - Medições, média e razão sinal-ruído para a Resistência à Flexão.....	77
Tabela 25 - Razão S/N média para os níveis dos parâmetros de soldadura para a resistência à flexão.....	78
Tabela 26 - Análise de variância para obter a influência dos parâmetros na resistência à flexão.....	79
Tabela 27 – Medições para a Resistência à Tração.....	79
Tabela 28 - Medições, média e razão sinal-ruído para a Dureza Rockwell C.	81
Tabela 29 - Razão S/N média para os níveis dos parâmetros de soldadura para a Dureza Rockwell C.....	82
Tabela 30 - Análise de variância para obter a influência dos parâmetros na Dureza Rockwell C.	83
Tabela 31 - Medições, média e razão sinal-ruído para o reforço.	84
Tabela 32 - Razão S/N média para os níveis dos parâmetros de soldadura para o reforço.....	84
Tabela 33 - Análise de variância para obter a influência dos parâmetros no reforço.	85
Tabela 34 - Medições, média e razão sinal-ruído para a largura.....	86
Tabela 35 - Razão S/N média para os níveis dos parâmetros de soldadura para a largura.	87
Tabela 36 - Análise de variância para obter a influência dos parâmetros na largura.....	88
Tabela 37 - Medições, média e razão sinal-ruído para a penetração.....	88
Tabela 38 - Razão S/N média para os níveis dos parâmetros de soldadura para a penetração.....	89
Tabela 39 - Análise de variância para obter a influência dos parâmetros na penetração.....	90

Lista de Nomenclaturas, Símbolos e Acrônimos

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
Ar	Argônio
ASM	<i>American Society for Metals</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
C	Carbono
CNC	Controle Numérico Computorizado
CO ₂	Dióxido de Carbono
DIN	Instituto Alemão de Normalização
ESTiG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão
FCAW	<i>Flux-Cored Arc Welding</i>
Fe	Ferro
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
He	Hélio
HIC	Trinca Induzida por Hidrogênio
IPB	Instituto Politécnico de Bragança
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LBW	<i>Laser Beam Welding</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MB	Metal Base
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
Mn	Manganês
NBR	Norma Brasileira
NF	Norma Francesa
NP	Norma Portuguesa
O	Oxigênio
OAW	<i>Oxy-Acetylene Welding</i>
P	Fósforo
PAW	<i>Plasma Arc Welding</i>
S	Enxofre
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SAW	<i>Submerged Arc Welding</i>
Si	Silício
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
ZF	Zona Fundida
ZTA	Zona Termicamente Afetada

1 INTRODUÇÃO

A soldadura é um dos processos de união mais utilizados na indústria metalúrgica, com aplicação em diversos segmentos, como a construção civil, setor automotivo, naval, entre outros. Dentre os diversos processos de soldadura, o MAG (*Metal Active Gas*) se destaca por sua versatilidade e capacidade de gerar juntas de alta qualidade em materiais como os aços ao carbono. No entanto, a determinação de parâmetros de soldadura ótimos para garantir a máxima soldabilidade de aços ao carbono continua a ser um desafio. O foco deste estudo é comparar diferentes combinações de parâmetros de soldadura no processo MAG, com o objetivo de identificar a combinação que maximize a soldabilidade deste tipo de aço.

A soldabilidade dos aços ao carbono é um fator crítico para garantir a resistência e a integridade das juntas soldadas, especialmente, em aplicações que exigem materiais de alto desempenho. A otimização dos parâmetros de soldadura pode melhorar as propriedades mecânicas das juntas, reduzir custos e aumentar a eficiência do processo.

A escolha deste tema justifica-se pela relevância que a soldadura automatizada vem ganhando nas aplicações industriais. O uso de máquinas de soldadura automatizada, como a disponível no Instituto Politécnico de Bragança, oferece uma alternativa mais precisa e controlada em comparação com a soldadura manual, permitindo uma melhor e mais confiável comparação.

A metodologia adotada neste estudo envolve a soldadura automatizada de corpos de prova de aço carbono, utilizando diferentes combinações de parâmetros, como velocidade de soldadura, tensão e ângulo da tocha. Os testes de soldabilidade serão realizados para avaliar o desempenho de cada combinação de parâmetros e sua influência na soldabilidade do aço. A análise dos dados coletados permitirá a identificação dos parâmetros ótimos que maximizam estas propriedades.

A estrutura deste trabalho está organizada da seguinte forma: os Capítulos 2, 3 e 4 apresentam informações a respeito da história da soldadura, os seus diferentes tipos, além de abordar o processo MAG com mais detalhes. O Capítulo 5 aborda os defeitos comuns em juntas soldadas. Já no Capítulo 6, o autor discorre sobre o conceito de soldabilidade e seus testes. No Capítulo 7, é detalhada a metodologia utilizada, incluindo a descrição dos corpos de prova, o processo de soldadura e os testes realizados. Em seguida, no Capítulo 8, os resultados dos testes são apresentados e discutidos, assim como a análise dos dados. Por fim, no Capítulo 9, são apresentadas as conclusões do estudo e sugestões para futuras pesquisas na área.

1.1 Objetivo geral

Realizar procedimentos de soldadura MAG utilizando o equipamento de controle numérico computadorizado do IPB em aço carbono AISI SAE 1020, também conhecido por DIN C20 ou EN C22, para, posteriormente, avaliar a soldabilidade do mesmo por meio de testes de soldabilidade, modificando parâmetros de soldadura e variáveis de controle, a fim de encontrar combinações ótimas para obtenção da melhor soldabilidade do material.

1.2 Objetivos específicos

- Realização de soldadura do tipo MAG em no aço AISI SAE 1020, também conhecido por DIN C20 ou EN C22 com a utilização da Máquina de Soldadura Automática disponível no Instituto Politécnico de Bragança, variando diferentes combinações de parâmetros.
- Estudar os principais tipos de testes de soldabilidade existentes, indicar suas vantagens e desvantagens;
- Selecionar os tipos de testes de soldabilidade mais adequado para a realização do trabalho, tendo em conta os materiais (base e de adição) existentes, equipamentos e condições operatórias;
- Realização dos testes de soldabilidade;
- Tratamento e análise de resultados, visando a obtenção de uma combinação ótima de parâmetros que maximizem a compatibilidade do aço tema do trabalho com o processo MAG;
- Escrita de um relatório que descreva o trabalho realizado e indique as principais conclusões face aos resultados obtidos.

1.3 Cronograma

- Fase 1: Pesquisa bibliográfica e escrita do Estado da Arte;
- Fase 2: Preparação do set-up experimental e ensaios preliminares;
- Fase 3: Fabricação dos provetes e realização dos testes de soldabilidade;
- Fase 4: Tratamento estatístico dos resultados experimentais;
- Fase 5: Escrita do relatório da dissertação.

2 HISTÓRIA DA SOLDADURA

O ato de unir materiais está presente na humanidade desde os primórdios, mais precisamente quando surgiu nos anos 4000 a.C; onde o povo Sumério começou a unir metais por meio do seu derretimento e união. Desde então, o processo se desenvolveu constantemente. Existem também evidências da construção de fios de cobre pelos Egípcios ao redor dos anos de 2700 a.C; utilizando o derretimento, moldagem e união de seções metálicas por este método rudimentar [1]. Tais evidências nos permitem concluir que essas práticas já eram comuns entre os povos antes mesmo da técnica ser nomeada por um substantivo.

Este processo, com o passar dos anos, seguiu sendo utilizado com cada vez mais frequência. Hoje, é chamado de “Soldadura” em português, ou “*Welding*” em inglês. É o mais importante processo industrial de união de componentes metálicos, seja na recuperação de peças desgastadas, união de fragmentos, revestimentos, etc. Por possuir relativa simplicidade operacional e fundamental, faz parte do dia-a-dia da humanidade, estando presente desde em pequenos componentes tecnológicos, até em grandes montagens e construções [2].

Ainda que a descoberta do arco elétrico tenha ocorrido nos anos 1800 pelo físico inglês Humphry Davy [3], o primeiro grande avanço da soldadura só teve início por volta de oitenta anos depois, em 1880. Neste período, o engenheiro-inventor russo Nikolai N. Bernados desenvolveu o processo de soldadura por arco elétrico [1], representado na Figura 1, iniciando a revolução no processo de união de metais. Tal base deste procedimento é utilizada até à atualidade, com suas respectivas adaptações e evoluções.

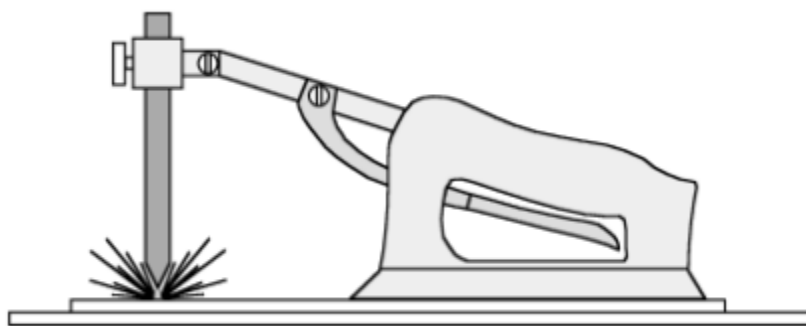


Figura 1 - Sistema para soldadura a arco de acordo com a patente de Bernados [2].

Com o passar dos anos, o procedimento de Nikolai Bernados (pilar de todo o processo) tem sido aprimorado significativamente, aproximando-se cada vez mais dos métodos modernos de soldadura que são utilizados hoje em dia. Um exemplo, é a soldadura por eletrodo revestido,

a qual surgiu há cerca de 150 anos, foi utilizada na 1ª Grande Guerra [4], e sofreu pequenas adaptações até hoje, como a alteração do material do eletrodo – que foi do grafite ao arame metálico – e a maneira de transmissão de energia utilizada.

A partir dos anos 1910, soldadura teve outra rápida evolução. Os processos empregados até então foram melhorados, novas técnicas foram desenvolvidas, equipamentos inovadores surgiram e tecnologias foram introduzidas à prática da soldadura, como o uso de gases de proteção. Os avanços em outros âmbitos fabris também colaboraram, como o desenvolvimento da eletrônica, da metalurgia e da engenharia em geral.

Em 1919 foi criada a AWS – *American Welding Society* [5], a qual desencadeou o avanço dos processos e segue contribuindo mundialmente com a ciência da solda. A AWS é uma organização sem fins lucrativos dedicada ao avanço da ciência e tecnologia, da aplicação da soldadura e de processos de união e corte em todo o mundo [6]. O fato de existir uma organização destinada exclusivamente ao processo, permitiu a normatização, fiscalização e apoio ao desenvolvimento da soldadura.

O surgimento de métodos modernos, como a soldadura a plasma, a laser, e o uso de outros gases e consumíveis ocorreu no último século. Como citado anteriormente, o fundamento teórico da união de componentes segue o mesmo, no entanto, diferentes métodos facilitadores são desenvolvidos para redução de tempo e custos, aumento da qualidade, além de aumentarem a gama de aplicações do processo [2].

3 PRINCIPAIS TIPOS DE SOLDADURA

Atualmente, mais de 50 diferentes processos de soldadura possuem aplicação industrial e cotidiana, tornando a soldadura o método mais comum para a união permanente de metais. Abaixo, na Tabela 1, são retratados os principais e mais utilizados tipos de soldadura na atualidade. Além disso, também estão descritas, de forma sucinta, as principais características e aplicações de cada um deles.

Tabela 1 - Processos de Soldadura usualmente aplicados à Indústria (adaptado) [7].

Processo	Características	Aplicações
Soldadura a Arco Submerso (SAW)	Automática/mecanizada ou semi. O arco arde sob uma camada de fluxo granular.	Soldadura de aços carbono, baixa e alta liga. Espessura ≥ 10 mm. Posição plana ou horizontal de peças estruturais, tanques, vasos de pressão, etc.
Soldadura com Eléctrodo Revestido (SMAW)	Manual. Vareta metálica recoberta por camada de fluxo.	Soldadura de quase todos os metais, exceto cobre puro, metais preciosos, reativos e de baixo ponto de fusão. Usado na soldadura em geral.
Soldadura com Arame Tubular (FCAW)	Automático ou semi. O fluxo é contido dentro de um arame tubular.	Soldadura de aços carbono, baixa e alta liga com espessura ≥ 1 mm. Soldadura de chapas, tubos, etc.
Soldadura MIG/MAG (GMAW)	Automática/mecanizada ou semi. O arame é sólido.	Soldadura de aço carbono, baixa e alta liga, não ferrosos, com espessura ≥ 1 mm. Soldadura de tubos, chapas, etc. Qualquer posição.
Soldadura a Plasma (PAW)	Manual ou automática. O arame é adicionado separadamente. Eléctrodo não consumível de tungstênio.	Todos os metais importantes em engenharia, exceto Zn, Be e suas ligas, com espessura de até 1.5 mm. Passes de raiz.
Soldadura TIG (GTAW)	Manual ou automática. Eléctrodo não consumível de tungstênio. Arame adicionado separadamente.	Soldadura de todos os metais, exceto Zn, Be e suas ligas, espessura entre 1 e 6 mm. Soldadura de não ferrosos e aços inox. Passe de raiz de soldas em tubulações.
Soldadura a Gás (OAW)	Manual. Arame adicionado separadamente.	Soldadura manual de aço carbono, Cu, Al, Zn, Pb e bronze. Soldadura de chapas finas e tubos de pequenos diâmetros.
Soldadura a Laser (LBW)	Automática. Não usa, em geral, metal de adição. Elevada concentração de energia.	Soldadura de todos os metais, exceto nos casos de evolução de gases ou vaporização excessiva. Indústria automobilística, nuclear e aeroespacial.

De acordo com Vural [1], os processos de soldadura mais comuns são: soldadura a arco submerso, eletrodo revestido e soldaduras a arco metálico com proteção de gás (MIG/MAG e TIG), que são os mais difundidos há anos e utilizados em diferentes aplicações majoritariamente. A minoria da utilização é composta pela soldadura a arco de plasma, feixe de elétrons e a Laser, e se dá por diversos motivos, entre eles o alto custo, complexidade de seus parâmetros e acesso restrito [8]. Ainda que possuam potencial e estejam em crescimento de utilização, possuem limitações que serão minimizadas com o constante avanço e estudos do assunto.

Podemos nos aprofundar nos procedimentos mais difundidos mundialmente, explicitando seu método de funcionamento e exemplos de utilização, que serão discorridos nos subcapítulos abaixo.

3.1 Soldadura a Arco Submerso

A Soldadura por Arco Submerso (SAW – do inglês *Submerged Arc Welding*) é um método no qual o calor necessário para fundir os materiais é gerado por um arco elétrico, formado entre um eletrodo de arame sólido ou tubular e a peça base. O arco é protegido por uma camada de fluxo granular fundido, cujo principal propósito é estabilizar a descarga elétrica e proteger a poça de fusão contra a oxidação atmosférica. O metal de adição é continuamente fornecido à peça de trabalho por meio de uma unidade de alimentação de eletrodo, com a corrente sendo transferida para a peça através de um bico de contato [9], conforme representado na Figura 2.

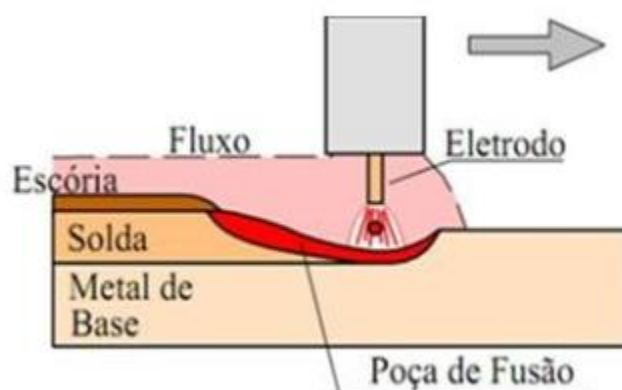


Figura 2 - Desenho representativo da soldadura por arco submerso (SAW) [10].

Nesse processo de soldadura, a transferência de calor para o metal base é influenciada pelo aporte térmico, um parâmetro que depende da tensão, corrente e velocidade aplicadas durante a soldadura. Nela, são utilizadas correntes de soldadura elevadas, que podem ser superiores a 1000A, e taxas de deposição de até 45 kg/h [10].

A “Zona termicamente afetada” (ZTA), ocorre onde as propriedades mecânicas do metal soldado são frequentemente críticas, e é o termo utilizado para caracterizar o volume de material próximo à poça de fusão que sofre um aumento significativo de temperatura [11].

Entre as vantagens do processo, podem ser citadas a ausência de respingos e fumos, a elevada produtividade, o bom acabamento superficial da solda e a alta velocidade de soldadura. Por outro lado, é limitada à posição plana, além da ocorrência do acúmulo de escória (que deve ser retirada a cada passe), e do risco de modificação das propriedades da junta [10], [11].

3.2 Soldadura a Eléctrodo Revestido

O processo de soldadura com eléctrodo revestido é, entre todos os processos de soldadura a arco, o mais simples em termos de equipamentos, ajustes e aplicação [12]. É amplamente utilizado na manutenção, construção e outras atividades que demandam soldadura. Além disso, é o método mais comum na soldadura subaquática.

Tal método é composto por poucos itens, baseando-se geralmente na utilização de uma fonte de energia, alicates (porta-eléctrodos), garras ou grampos, cabos de solda e o principal componente: o eléctrodo. Este item indispensável para a soldadura – que dá nome ao método – é composto por um fio metálico com revestimento ao redor, projetado para cumprimento de diversas funções, entre elas a proteção do arco, adição de metal de liga, estabilização do arco e formação de escória. A Figura 3 representa a soldadura por eléctrodo revestido, seus componentes e partes do processo.

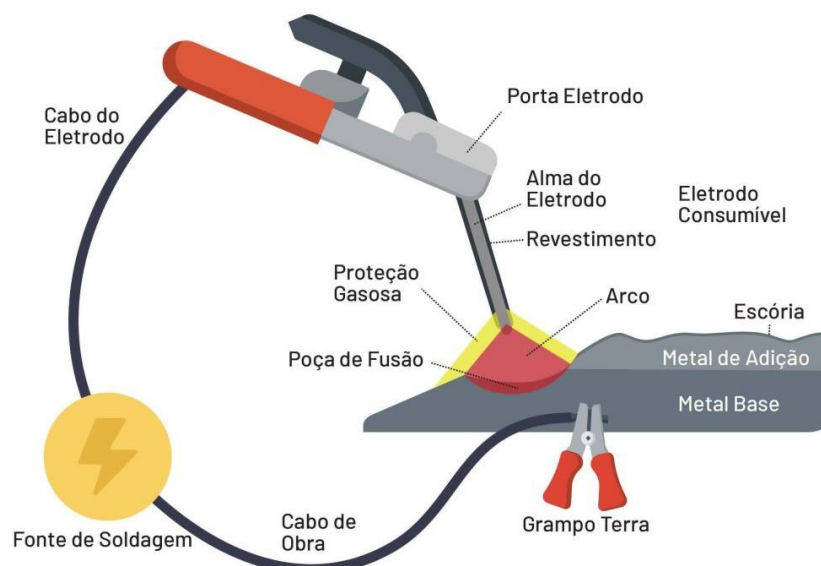


Figura 3 – Desenho representativo da soldadura por eléctrodo revestido (SMAW) [13].

Em inglês *Shielded Metal Arc Welding* – SMAW, o método de soldadura com eletrodo revestido é proveniente da descoberta de Bernados [2]. É um processo quase 100% manual, cujo principal benefício é a facilidade de controlar a microestrutura e a composição química do cordão de solda devido à capacidade de variar a formulação do revestimento [14].

Este método oferece vantagens sobre outros processos de soldadura por arco elétrico, uma vez que é pouco sensível a correntes de ar e é mais adequado para a maioria dos metais e ligas comumente utilizados. No entanto, um dos problemas enfrentados pelo SMAW é a qualidade inconsistente do cordão de solda em termos de homogeneidade, causado pela execução manual do processo, que pode variar de acordo com o soldador e parâmetros utilizados no mesmo [15]. Além disso, a produtividade relativamente baixa e a necessidade de limpeza a cada passe também colaboram para o método não ser utilizado em grandes aplicações.

3.3 Soldaduras com Gás de proteção

A soldadura com proteção gasosa é amplamente empregada em aplicações industriais atualmente. A principal finalidade do uso do gás de proteção na soldadura a arco é proteger a poça de fusão contra os efeitos prejudiciais do oxigênio presente no ar atmosférico. A combinação do gás de proteção com as características da fonte de energia e metais de adição contribui significativamente para aprimorar a qualidade, o desempenho e a eficiência na soldadura de aços, aços inoxidáveis, ligas de alumínio, entre outros materiais [16].

Os gases de proteção podem ser inertes, ativos, ou uma mistura dos dois. Eles desempenham um papel fundamental nas características do arco, no tipo de deposição metálica, na velocidade de soldadura, na redução de respingos, na penetração e no formato do cordão de solda, além de influenciarem o custo final da operação de soldadura [17].

Nos últimos anos, os gases de proteção mais amplamente utilizados na soldadura de aço carbono são o argônio (Ar), o dióxido de carbono (CO₂) e o hélio (He), que podem ser empregados puros ou em combinação entre si [18]. Conforme descritos na Tabela 1, os mais utilizados meios de soldadura com gases de proteção são o MIG/MAG (GMAW) e o TIG (GTAW), os quais serão brevemente detalhados abaixo.

3.3.1 Soldadura MIG/MAG - *Metal Inert/Active Gas*

Desenvolvida na década de 1940, durante a Segunda Guerra Mundial, foi utilizada, inicialmente, para soldar alumínio e outros metais não ferrosos em ambientes industriais. A soldadura a arco gás-metal (GMAW – *Gas Metal Arc Welding*) é um método de união baseado no aquecimento dos metais com um arco elétrico formado entre um eletrodo metálico contínuo e a peça a ser soldada [10].

O gás utilizado pode ser inerte ou ativo. No primeiro caso, a nomenclatura utilizada é chamada MIG, referindo-se a *Metal Inert Gas*, onde são, normalmente, utilizados o argônio e o hélio como gases de proteção. Já na soldadura com gases ativos, chamada de MAG – *Metal Active Gas*, os mais utilizados são o CO_2 ou misturas de $\text{Ar} + \text{O}_2 + \text{CO}_2$ [19].

Entre as principais vantagens da utilização deste processo, a principal é a possibilidade da soldadura em qualquer posição. Além disso, a elevada taxa de deposição e penetração, aliada à pouca ou nenhuma formação de escória, juntamente com a aplicação em diferentes ligas metálicas [9], caracterizam a soldadura GMAW como uma das mais utilizadas mundialmente.

Abaixo, na Figura 4, está representada a vista do arco elétrico no processo MIG/MAG.

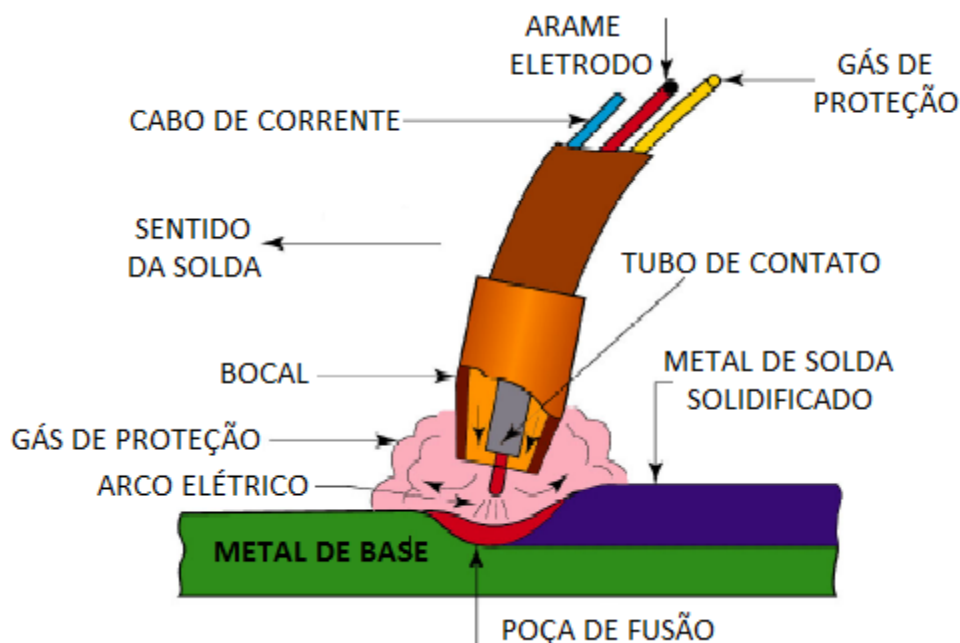


Figura 4 – Componentes da realização do processo GMAW MIG/MAG [20].

As limitações do método são poucas. O principal contraponto é o custo alto do equipamento, aliado à sua operação relativamente complexa. Algumas bibliografias ainda citam

a possível dificuldade para soldas de juntas com acesso restrito, alta quantidade de respingos e a necessidade de cuidado com vento e correntes de ar [21]. Na Figura 5 está retratado um desenho esquemático do equipamento necessário para a soldadura GMAW.

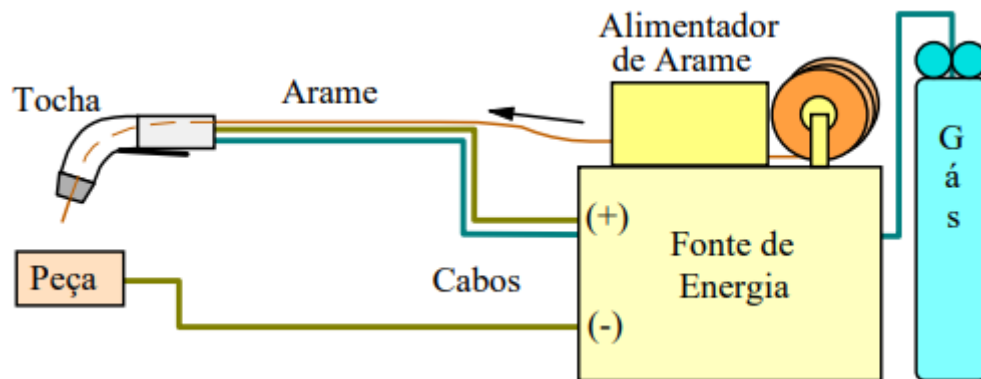


Figura 5 – Equipamento para soldadura GMAW [10].

3.3.2 Soldadura TIG - *Tungsten Inert Gas*

Ainda que patenteado por Robert Worth, Reis Norman e August Manz em 1957 [22], os estudos da soldadura TIG foram desenvolvidos logo após o surgimento do método GMAW, nos anos 40 [23]. O processo anterior foi refinado para atender às necessidades da indústria aeroespacial e automotiva, proporcionando uma solda de alta qualidade em metais como aço inoxidável, titânio e ligas de níquel.

Conhecida internacionalmente como GTAW – *Gas Tungsten Arc Welding* ou simplesmente TIG – *Tungsten Inert Gas*, é um processo teoricamente semelhante ao GMAW. A diferença se dá pelo tipo de eletrodo, neste caso, de tungstênio, onde ocorre a união dos componentes obtida pelo aquecimento dos metais por um arco estabelecido entre o eletrodo e a peça [10]. Neste caso, os gases de proteção utilizados são em geral inertes, sendo normalmente compostos pelo argônio ou uma mistura do mesmo com o hélio [24].

Este tipo de soldadura permite o uso ou não do metal de adição. Caso seja utilizado, as duas mãos do soldador são exigidas no processo, ao contrário da soldadura MIG/MAG, onde a alimentação do arame é feita pela própria tocha. A Figura 6 representa esquematicamente o processo e seus componentes.

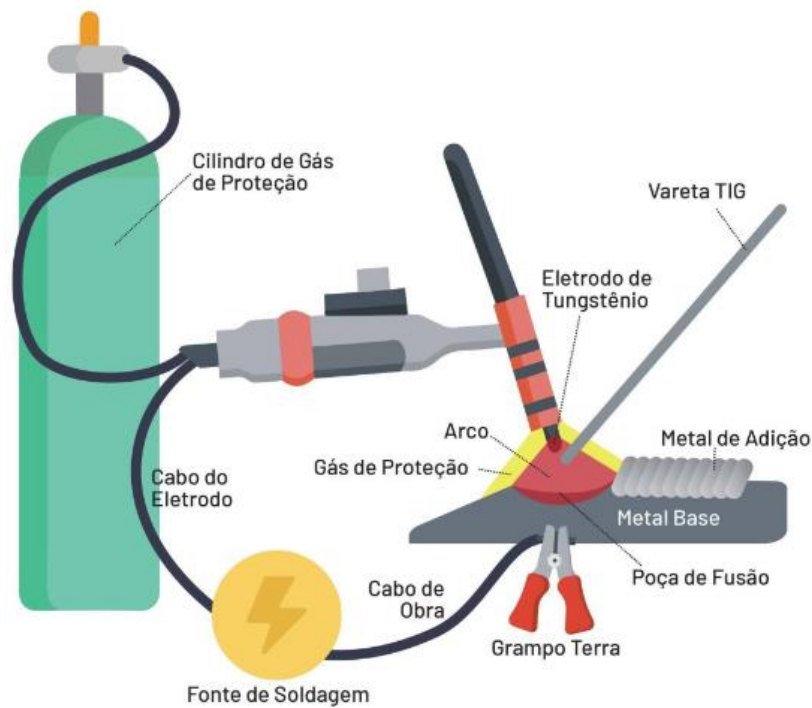


Figura 6 – Desenho representativo da soldadura TIG (GTAW) [25].

O excelente controle da poça de fusão, a alta qualidade e o excelente acabamento estão entre as principais vantagens do processo, juntamente com a geração de pouco ou nenhum respingo. Além disso, a possibilidade de solda sem o uso de metal de adição e a disponibilidade para soldadura em qualquer posição [26] também colaboram para o crescimento e amplo uso da soldadura TIG nos dias hodiernos. As deficiências do processo são principalmente a baixa produtividade, além do custo elevado dos consumíveis e do equipamento [10].

4 O PROCESSO MAG – *METAL ACTIVE GAS*

Conforme descrito anteriormente, o processo de soldadura MAG é caracterizado pela utilização de um gás ativo de proteção. Este, possui a função de estabilizar o processo de soldadura, melhorar as características das juntas soldadas e proteger o cordão de solda contra a oxidação, interferindo para a melhoria da qualidade final das juntas soldadas [27]. O gás ativo mais comumente utilizado na soldadura MAG é o dióxido de carbono, ou CO₂ [7].

Wainer, Brandi e Mello [28], ao discorrerem sobre o processo, resumiram suas principais qualidades como “um processo versátil, facilmente adaptado para a soldadura automática, com possibilidade de execução em várias posições, alta produtividade devido à alta velocidade de soldadura, elevada taxa de deposição devido à alta densidade de corrente na ponta do arame, pouca ou nenhuma formação de escória, deposição do metal de solda com baixo teor de hidrogênio, penetração uniforme de raiz e elétrodo alimentado de forma contínua”.

Da tabela de Modenesi e Marques [10], podemos elencar as principais características do processo. Neste método de soldadura, a fonte de calor é o arco elétrico; a corrente é do tipo contínua e o elétrodo positivo; o agente protetor é selecionado entre os gases Ar, He, O₂, CO₂ ou uma mistura entre eles; além de possuir um arame sólido e poder ser mecanizada ou semi-automática.

Entre as principais aplicações da soldadura MAG estão as soldas de aços carbono, aços de baixa liga, alta liga e aços não ferrosos, com espessura maior ou igual a 1 milímetro [29]. As formas mais comuns das peças a serem soldadas são tubos, chapas ou perfis metálicos, devido à facilidade de realizar a soldadura em qualquer posição [7].

Abaixo, na Figura 7, é retratado um desenho presente na Apostila de Soldadura da ESAB (*Elektriska Svetsnings-Aktiebolaget*), uma empresa industrial sueca-americana, que permite entender, simplificada, como ocorre o processo de soldadura com gás de proteção, e seus principais componentes.

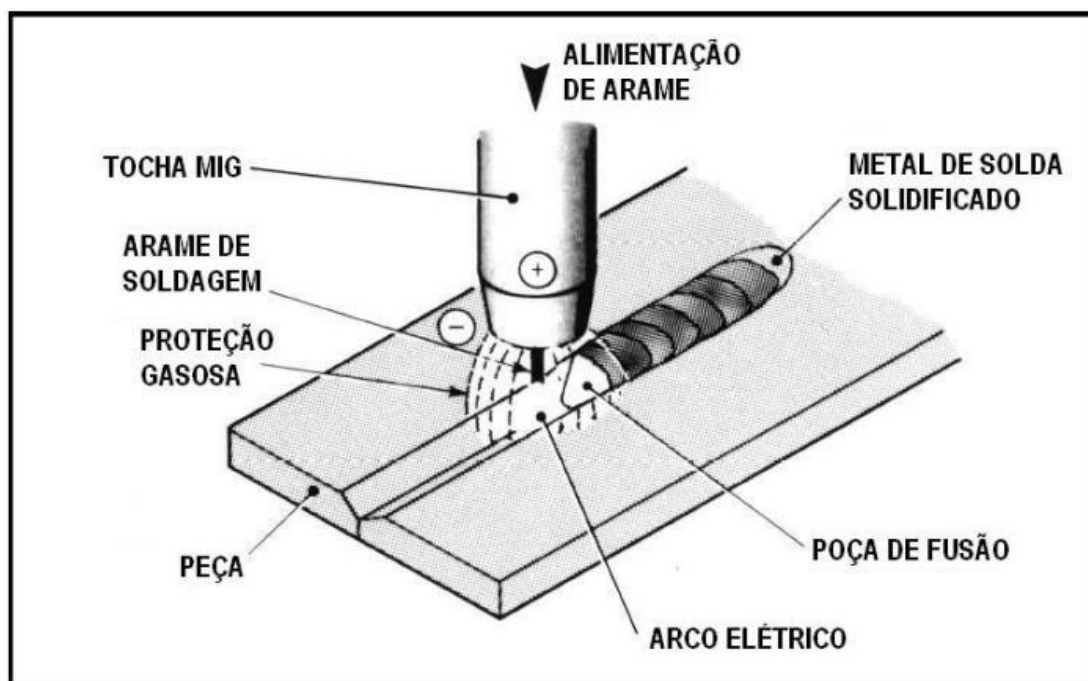


Figura 7 – Processo básico de soldadura MIG/MAG [29].

4.1 Realização da Soldadura MAG

Como qualquer procedimento de soldadura, existem pontos importantes e diretrizes a serem seguidas para que o mesmo seja realizado da melhor e mais correta maneira possível. A norma internacional que regulamenta os tipos de soldadura é a ISO 4063 [30], que atribui um número de referência a cada um dos procedimentos e os agrupa por categorias.

A soldadura MAG está classificada com o número de referência 135, composto por 3 diferentes indicadores que compõem o seu código, descritos abaixo, pela legenda XYZ:

- X = 1 – Soldadura a arco;
- Y = 3 – Soldadura por arco metálico com gás de proteção;
- Z = 5 – Soldadura com gás ativo de metal (*Metal Active Gas Welding – MAG*).

Outros tipos de soldadura que valem ter seus números de referência citados são a Soldadura MIG (131), Soldadura TIG (141), Arco submerso (121 e 125), Plasma (15), entre outros.

Para a realização da Soldadura MAG, são necessários alguns componentes, sendo eles: fonte de solda (também chamada de máquina de solda em outros idiomas), arame consumível a ser escolhido pelo soldador, alimentador de arame, tocha de soldadura e cilindro de gás [31]. A fonte normalmente possui tensão constante regulada entre 15 e 50V, utilizada em conjunto com o alimentador de arame que ditará a velocidade em que a tocha será nutrida (entre 1 e 18 m/min). A corrente é contínua e o eletrodo ligado ao polo positivo (CC+) [10].

4.2 Variáveis de Soldadura GMAW

A seleção dos parâmetros é um ponto crucial na realização da soldadura e influencia diretamente no seu resultado. Um exemplo são as escolhas da tensão, corrente, velocidade ou ângulo de solda, que ao serem variados, proporcionam tipos completamente diferentes de cordão. Segundo Corrêa [32] e Modenesi e Bracarense [33], as variáveis envolvidas na soldadura por arco elétrico podem ser classificadas em quatro categorias distintas:

- Variáveis pré-definidas: englobam o tipo e a espessura do metal base, juntamente com as características desejadas do metal de solda e da zona afetada pelo calor;
- Variáveis fundamentais: incluem informações sobre o processo de soldadura, equipamentos utilizados, técnicas de soldadura empregadas, tipo da junta a ser soldada, tipo de eletrodo, gás ou fluxo de proteção utilizado, e o diâmetro do eletrodo;
- Variáveis principais: englobam a velocidade de soldadura, o tipo e magnitude da corrente elétrica, e em seguida a tensão;
- Variáveis secundárias: abrangem o posicionamento, movimento e ângulo de inclinação da tocha de soldadura, bem como o comprimento do eletrodo exposto (*stick-out*).

Cada uma delas deve ser ajustada de forma a alcançar o resultado desejado na soldadura, levando em consideração os fatores envolvidos. Entre as variáveis que possuem maior influência destacam-se a intensidade da corrente elétrica, a tensão do arco, a velocidade de avanço e o ângulo de ataque [34], que serão abordadas a seguir.

4.2.1 Intensidade da corrente elétrica

A corrente é associada à penetração do cordão de solda. Ou seja, é uma variável diretamente proporcional à quantidade de metal que será fundido perante a corrente elétrica selecionada [29]. Assim, quanto maior a corrente utilizada (em Ampere), maior a penetração da solda no cordão.

Na Figura 8, estão esboçados desenhos que exemplificam as formas hipotéticas que um cordão de solda pode ter de acordo com a corrente utilizada. Já a Figura 9 nos permite analisar as diferenças de penetração em três valores de corrente diferentes: 100, 150 e 200A.

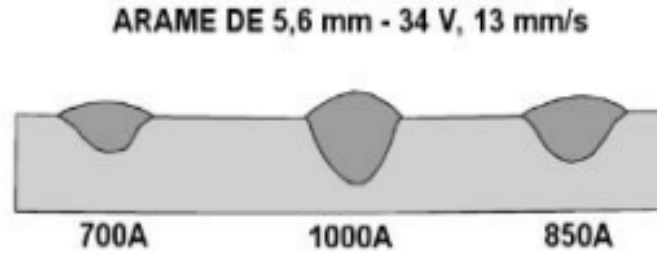


Figura 8 - Influência da corrente de soldadura em um processo GMAW - aço carbono, curto-circuito, 75% Ar-25%CO₂ [33].

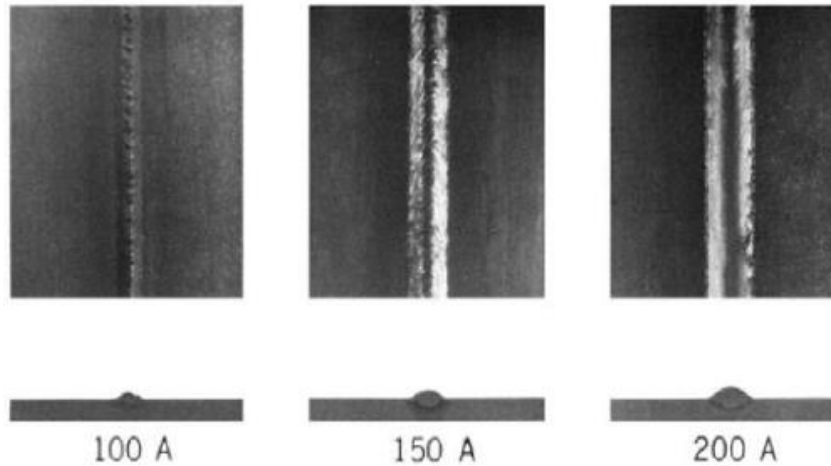


Figura 9 – Efeito da corrente de soldadura na penetração da solda – aço carbono, curto-circuito, Ar-25%CO₂ [29].

4.2.2 Tensão do arco

O comprimento do arco elétrico é controlado pela tensão de soldadura. Quanto maior a tensão utilizada (em Volt) na fonte, maior será o diâmetro e a altura do cone do arco. Assim, a área de metal de solda aquecida respectivamente aumenta, o que resulta em um cordão mais largo e baixo, causado pelo aumento da poça de fusão [35].

Ainda assim, segundo Wainer, Brandi e Mello [28], “em cada situação, é possível encontrar um valor ótimo de tensão que proporcione uma penetração maior, associada a um cordão relativamente mais largo.” Portanto, de acordo com a geometria, material e tipo da junta, a tensão a ser utilizada poderá variar.

As Figuras 10 e 11 exemplificam a interferência da tensão na geometria do cordão de solda e nos permitem comparar as profundidades e larguras dele, de acordo com a tensão elétrica utilizada.

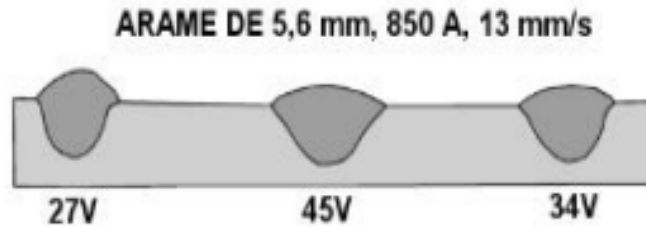


Figura 10 - Influência da tensão de soldadura em um processo GMAW com corrente de 850A [33].

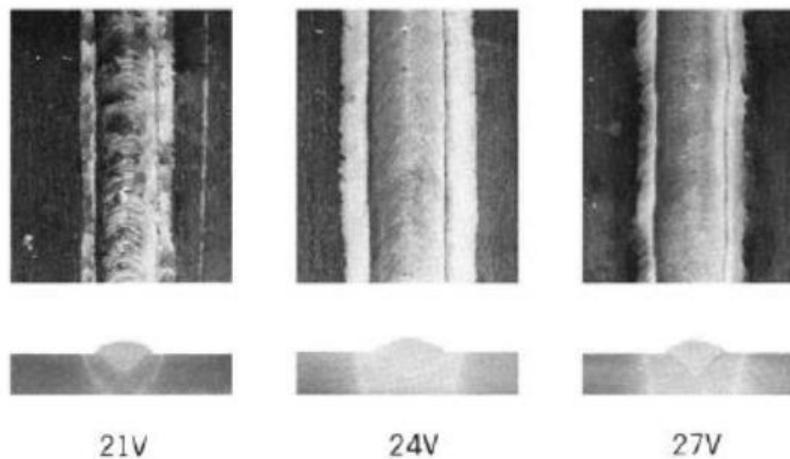


Figura 11 - Efeito da tensão de soldadura na penetração da solda [29].

4.2.3 Velocidade de avanço

Também chamada de velocidade de soldadura, a velocidade de avanço condiz à movimentação da tocha de solda. Caso o processo seja feito muito lentamente, a aparência do cordão será completamente diferente de uma soldadura rápida, podendo, em ambos os casos, apresentar defeitos e inconsistências do cordão.

Baixas velocidades geram alta deposição de metal de solda e maior transferência de calor para a peça, gerando um cordão maior com pouca penetração e, em alguns casos, grosseiro. No caso de elevadas velocidades, o processo de fusão não ocorre corretamente, a ponto de gerar baixa penetração no metal base e menor transferência de calor para a peça, podendo apresentar falhas [31].

Por isso, é importante a utilização de uma velocidade média (ótima) de soldadura, para que a fusão do arame ocorra da maneira correta, e a transferência para a solda aconteça, normalmente, gerando um cordão fluido e interino. As Figuras 12 e 13 representam a influência da velocidade de soldadura no formato de diferentes cordões de solda.

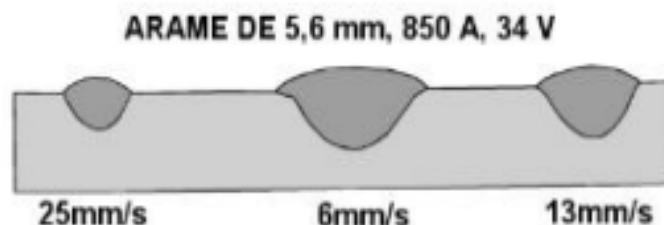


Figura 12 - Influência da velocidade de soldadura em um processo GMAW com corrente de 850A [33].

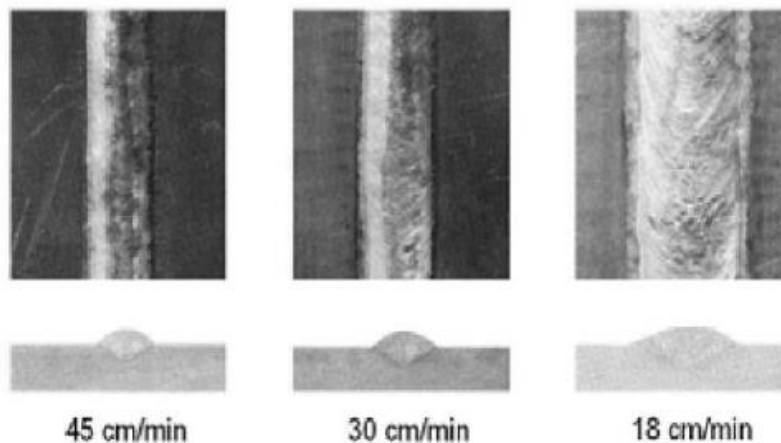


Figura 13 – Efeito da velocidade de soldadura na penetração da solda [29].

4.2.4 Ângulo de ataque

Outra variável importante no processo é o ângulo de ataque, podendo ter inclinação positiva (também conhecida como soldadura “puxando” a tocha), negativa (“empurrando” a tocha), ou perpendicular ao cordão [35]. Assim como na variável de velocidade, existe um valor ótimo para o ângulo de ataque, sendo este, 25° positivos [29], o que proporciona um cordão mais estável e com maior penetração.

No primeiro caso, com inclinação positiva de 25°, o resultado será maior penetração, menos respingos, cordão mais estreito e convexo, e arco mais estável. Já caso de inclinação negativa, teremos menor penetração, menos respingos e um cordão de solda mais plano e largo [31]. Soldaduras com ângulo perpendicular (0°) não são recomendadas na literatura, pois tornam mais suscetível a reação de gases da atmosfera com a soldadura, podendo gerar porosidades, trincas, instabilidade do arco, etc.

Na Figura 14 estão representados três tipos de angulações e sentidos de soldadura, e que permitem distinguir os cordões de acordo com a técnica e ângulo utilizadas.

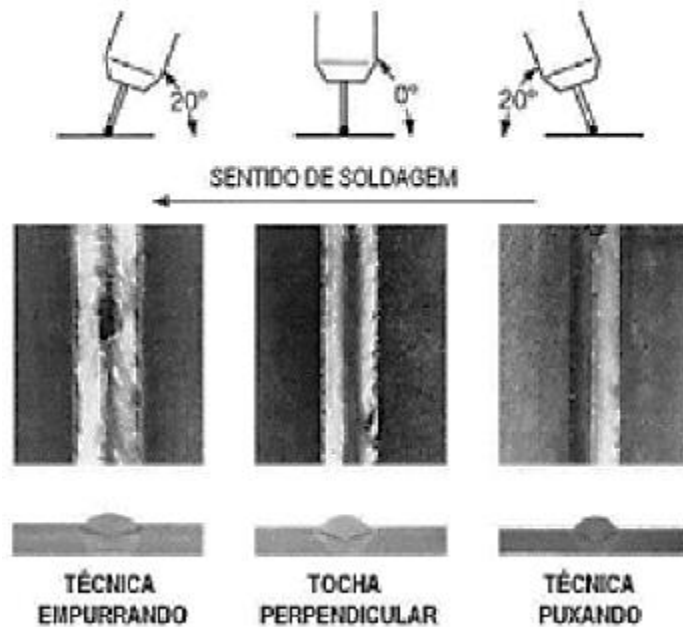


Figura 14 – Efeito da angulação e técnica na penetração da solda [29].

4.3 Modos de transferência de metal

De acordo com os parâmetros utilizados para a realização da soldadura GMAW (MIG/MAG), a forma com que o metal será transferido do eletrodo à peça também irá variar. Conforme a escolha de componentes como o arame, tensão, fonte e gás utilizados, a transferência metálica pode ser por curto circuito (*short arc*), globular, ou por *spray* (aerossol) [7], conforme retratados na Figura 15 abaixo.

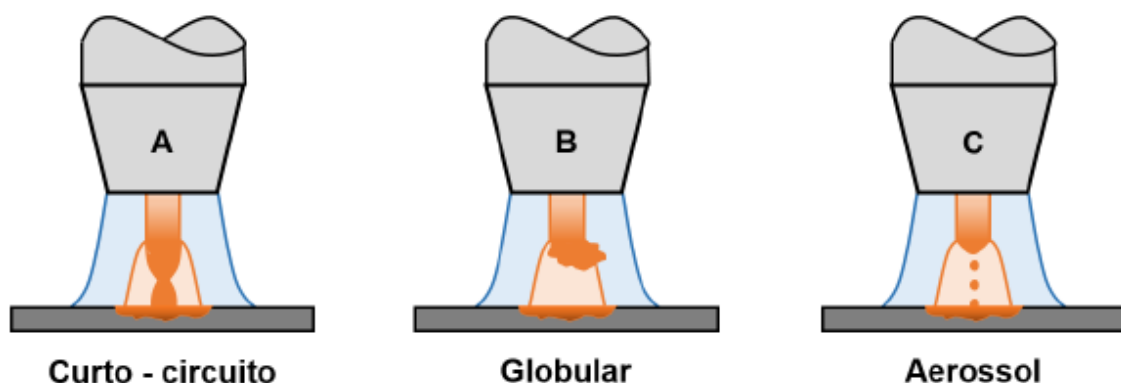


Figura 15 – Transferência de metal: (A) Curto-circuito, (B) Globular, (C) Aerossol [31].

A transferência por curto-circuito (também chamada de *short arc*, *dip transfer* e *microwire*) ocorre quando um curto-circuito elétrico é estabelecido, onde o metal fundido da ponta do arame toca a poça de fusão. Na transferência globular, as gotas de metal fundido são muito grandes e descem sob influência da gravidade, devido ao uso de uma tensão elevada, causando

respingos. Por fim, no caso do *spray*, causado pelo aumento associado de corrente e tensão, a transferência torna-se um verdadeiro arco em aerossol, onde pequenas gotas de metal são desprendidas do arame e projetadas eletromagneticamente em direção à poça [10], [36].

4.4 A Soldadura MAG no IPB

Em 2017, João Carlos Veiga, um aluno do Instituto Politécnico de Bragança, com a finalidade de obter o grau de licenciatura, projetou e construiu um equipamento didático de controle numérico computadorizado [37] que possibilita o acoplamento da tocha e realização de soldadura MIG/MAG semi-automaticamente.

Tal equipamento (retratado na Figura 16), permite ao usuário elaborar uma rotina em linguagem CNC para o caminho a ser feito pela tocha, e repassar esse código para a máquina onde, com parâmetros escolhidos previamente e uma preparação normal do procedimento, permite que a soldadura ocorra quase que roboticamente, sem o manuseio da tocha pelo operador, assim, minimizando desvios manuais. Além disso, permite um controle de parâmetros que não são possíveis manualmente, como a velocidade de soldadura.

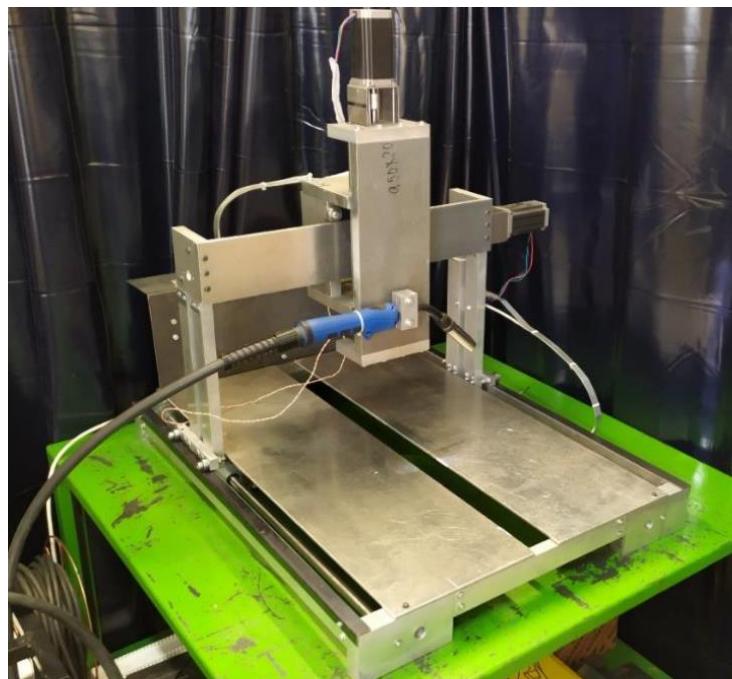


Figura 16 – Aparato experimental de controle numérico computadorizado [31].

O equipamento encontra-se no Laboratório de Tecnologia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTiG), do Instituto Politécnico de Bragança. Esse aparato já foi utilizado como auxílio no trabalho de Casarini [31], onde o autor afirma que “esta máquina realizou um

pequeno número de trabalhos de soldadura, e é necessário verificar se a mesma se encontra em bom estado de funcionamento, efetuar testes preliminares para determinar possíveis falhas que necessitem de alguma intervenção, bem como, verificar a repetibilidade dos movimentos efetuados pelo equipamento.”

Para isso, durante o mês de setembro de 2024, foram realizadas práticas regulares pelo autor deste trabalho, com o propósito de familiarização, adaptação aos seus comandos e movimentos, e verificação de seu pleno funcionamento. Esse processo foi fundamental para garantir a confiança necessária na operação do equipamento. Em seguida, foram conduzidos pequenos testes de soldadura utilizando a primeiro momento uma caneta (Figura 17) e, posteriormente, soldando corpos de prova preliminares (Figura 18), a fim de validar os parâmetros de operação antes de avançar para a etapa prática vinculada diretamente à dissertação.



Figura 17 – Testes preliminares do maquinário com a caneta.



Figura 18 - Evolução na qualidade dos cordões com prática e desenvolvimento.

5 DEFEITOS DE SOLDADURA

É de senso comum que a realização da soldadura deve ter seus parâmetros cuidadosamente selecionados. Caso esta seleção seja feita de maneira incorreta, podem ocorrer defeitos no processo, os quais são o tema principal deste capítulo.

Descontinuidades, porosidades, fissuras e inclusões são os defeitos mais comuns na soldadura [35]. São causados por condições de processos desfavoráveis, desvios na habilidade dos operadores, uso de técnica imprópria, seleção incorreta de consumíveis, entre outros [12]. Tais defeitos podem ser percebidos em testes de soldabilidade, que permitem avaliar os efeitos da soldadura na penetração do metal, forma da poça de fusão, trincas e propriedades mecânicas [38]. Estes testes serão abordados no Capítulo 5.

5.1 Descontinuidades

Uma descontinuidade na soldadura pode ser caracterizada como a interrupção das estruturas características de uma junta soldada, ou seja, na não-homogeneidade de características físicas, químicas, mecânicas ou metalúrgicas [12]. A avaliação de uma descontinuidade como um defeito está diretamente vinculada às exigências de qualidade estabelecidas para a junta soldada em questão, demandando, assim, a implementação de ações corretivas para garantir a conformidade com os padrões de qualidade estipulados.

É válido destacar a importância da detecção e correção de descontinuidades no processo de soldadura, para assegurar a integridade estrutural e o desempenho desejado da junta soldada de diferentes maneiras, sendo a avaliação do modo de execução correto e estudo de sua microestrutura dois dos principais modos de análise.

Defeitos de descontinuidade podem ser caracterizados como alterações no interior do cordão de solda. Nessa categoria, os que ocorrem com mais frequência são os descritos abaixo por Ribeiro, Borsatti e Felisberto [35], [39], [40]:

- Ângulo excessivo de reforço: causado pelo excesso de material de solda no acabamento. Devido ao maior ângulo gerado, é depositado material em excesso acima do metal-base, assim dificultando a obtenção de um cordão uniforme e homogêneo.

- Cavidade alongada: ocorre devido ao uso de uma velocidade excessiva de soldadura. O resultado é um vazio não arredondado no cordão de solda ou em sua raiz.
- Concavidade: também chamada de reentrância, pode ser central ou lateral. É resultado de uma movimentação muito rápida do eletrodo, e gera imperfeições na sustentação do cordão de solda.
- Concavidade/Convexidade excessiva: ocorrem por soldadura inconsistente em ângulos com a face excessivamente côncava ou convexa, gerando falta ou excesso de material de reforço, respectivamente.
- Falta de fusão (FF): caracterizada pela fusão incompleta entre a zona fundida e o metal-base, ou entre os passes de solda. Este defeito pode ocorrer em qualquer parte do cordão, e pode se manifestar de diferentes maneiras, como mostra a Figura 19.



Figura 19 – Falta de fusão (FF) (adaptado) [40].

- Falta de penetração (FP): insuficiência de metal na raiz de solda e deficiência na integridade da junta soldada. Causada por diversos motivos, entre eles: manipulação incorreta do equipamento, junta mal preparada, velocidade de soldadura muito alta e valores de corrente elétrica demasiadamente baixos.

5.2 Porosidade

A presença de impurezas na área da junta (como sujidade, óleo, umidade, etc.) e a exposição a correntes de ar durante o processo de soldadura são alguns dos fatores que podem levar à formação de bolhas de gases pelo metal fundido durante a solidificação [41]. Como consequência, surgem as discontinuidades conhecidas como porosidades, que podem se manifestar de forma agrupada, alinhada ou vermiforme [35]. Este defeito de solda está ilustrado abaixo, na Figura 20.

É válido comentar que a menos que se manifeste na superfície ou em mais de 3% da peça [42], a porosidade não representa um defeito excessivamente prejudicial para as propriedades mecânicas [43], e pode ser evitada com relativa facilidade principalmente com a limpeza prévia e demais cuidados.

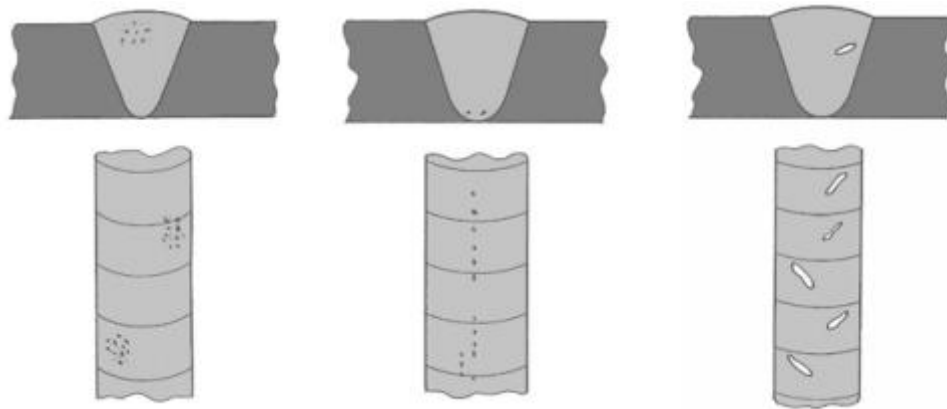


Figura 20 – Porosidade agrupada, alinhada e vermiforme (adaptado) [40].

5.3 Fissuras

Também chamadas de trincas, são descontinuidades bidimensionais graves no processo de soldadura, atuam como concentradores de tensões e favorecem o início de fraturas frágeis na estrutura [35]. Os principais causadores desses defeitos são elevados valores de tensão residual; baixa temperatura da peça a ser soldada; geometrias de cordão não apropriadas; teor elevado de carbono no metal-base; metal de adição não compatível com o metal-base; entre outros.

Existem diversos tipos de fissuras, e os mais comuns são as fissuras a quente e a frio, explicitadas abaixo [44]. Outros exemplos a serem salientados são fissuras de cratera (decorrentes da remoção repentina da fonte de calor) [35], interlamelares, irradiantes, longitudinais e transversais.

- Fissuras de solidificação ou fissuras a quente: causadas em geral pelo uso de um metal de adição diferente do metal base, além da contrária direção da solidificação da solda. Tal defeito pode ser evitado mediante a escolha de consumíveis especiais que reduzam a faixa de temperatura de solidificação.
- Fissuras por hidrogênio ou fissuras a frio: acontecem a temperaturas quase-ambiente, principalmente na ZTA do cordão. O hidrogênio penetra na poça e se difunde do cordão de solda para as áreas ao redor da zona termicamente afetada, que foram suficientemente reaquecidas para formar austenite. À medida que a solda esfria, a austenite passa por uma transformação, dificultando a difusão do hidrogênio, e a trinca ocorre “de dentro para fora”.

5.4 Inclusões

As inclusões são decorrentes de processos que utilizam fluxo, como a soldadura. É possível que algumas partículas sejam deixadas para trás, entre passes subsequentes ou entre o metal de solda e o chanfro do metal base. Podem ocorrer pela utilização de técnicas inadequadas de soldadura, limpeza incorreta entre passes ou metais de adição incorretos [35].

Tais defeitos não modificam notavelmente as propriedades mecânicas, no entanto, podem desencadear futuras trincas ou fraturas críticas. Os tipos de inclusão mais comuns ocorrem em soldaduras que utilizam gases de proteção, seja pela escolha incorreta do mesmo, ou pela seleção de correntes muito altas para a realização do processo. Além disso, também pode ser citado o defeito de inclusão por escória, retratado na Figura 21 abaixo, caracterizado pela limpeza inadequada da peça em alguns casos [45].

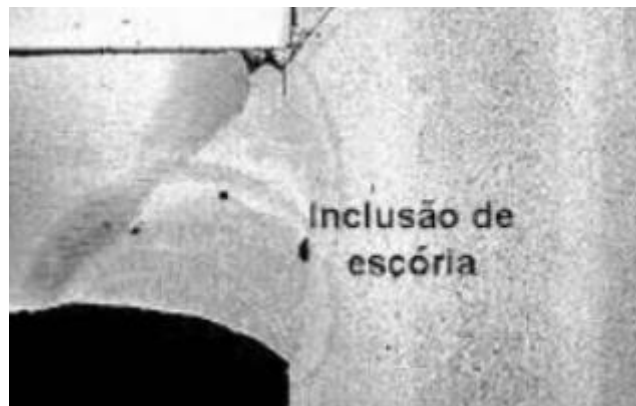


Figura 21 – Inclusão de escória [46].

6 SOLDABILIDADE

No Manual de Soldadura da *American Welding Society* (AWS) [12], pode ser encontrada uma definição para soldabilidade. Esta, é descrita como “a capacidade que um material apresenta de ser soldado sob as condições impostas pelos códigos e normas de fabricação para uma estrutura específica e de forma aceitável e com desempenho satisfatório nos serviços pretendidos”.

Este conceito pode ser resumido à capacidade que o material tem de ser soldado sem que ocorra a formação de microestruturas que prejudiquem suas características e propriedades mecânicas. Segundo Ribeiro [35], o perfil de um material com boa soldabilidade é notado quando, após a soldadura, o mesmo se apresenta com boas propriedades de tenacidade e ductilidade, além de não possuir concentrações excessivas de tensões internas.

É válido citar que o teor de carbono nos aços possui interferência na soldabilidade dos mesmos. Quanto maior o teor do carbono, menos “soldável” é o aço, visto que a capacidade de alongamento é diminuída e a sua capacidade de têmpera é aumentada. Por isso, aços com menores teores de carbono são chamados de “coringas”, já que podem ser soldados pela grande maioria dos processos, além de apresentarem boa soldabilidade [38], [47].

Para avaliar a soldabilidade de um material, além de entender e caracterizar as diferentes formas de falha que podem ocorrer na soldadura, existem os testes de soldabilidade. Estes, são vários, e podem possuir diversas maneiras de realização, sendo destrutivos ou não, com ou sem a utilização de uma restrição externa, e também utilizando análises com diferentes critérios de avaliação e comparação. É válido citar que segundo Lippold [48], ensaios mecânicos também podem ser classificados como testes de soldabilidade, visto que “avaliam uma ampla variedade de características do material quando o mesmo é submetido à soldadura, incluindo as propriedades físicas e mecânicas do material, a facilidade com que a solda pode ser realizada ou a capacidade do material de evitar degradação metalúrgica, como trincas ou rachaduras durante ou após a soldadura”.

6.1 Testes de soldabilidade convencionais

Aravinda *et al.* [49] chamaram de “convencionais” os testes de soldabilidade que utilizavam como mecanismo de estudo os ensaios mecânicos. Ensaios de dureza, flexão e tração foram realizados em uma liga de aço 9Cr-1Mo “modificado”, onde o resultado para uma

soldadura GTAW foi “um cordão de alta qualidade, excelente perfil de solda e alta produtividade”. Segundo os autores, não houve diferença significativa nas propriedades de dureza, flexão e tração do aço antes e após a realização da soldadura.

Além dos testes convencionais citados, é válido lembrar do ensaio de impacto “Charpy” utilizado por diversos autores, entre eles Bokuchava e Petrov [50] e também no estudo de Waqas *et al.* [51]. Este ensaio de impacto, ao avaliar a tenacidade da solda, é importante para verificar a resistência à fratura em baixas temperaturas, determinando a capacidade do material de absorver energia sem fraturar em certas condições.

A análise metalográfica é mais um relevante aliado na avaliação da qualidade interna da solda. Ao avaliar a microestrutura da junta soldada e suas zonas termicamente afetadas, podem ser identificados defeitos como trincas, porosidade, inclusões e descontinuidades, conforme publicado por Guzanová *et al.* [52] e Kolubaev *et al.* [53] na *Metals* e no *Journal of Friction and Wear*, respectivamente.

6.1.1 Ensaio de Dureza Rockwell

A Dureza Rockwell é um indicador utilizado para avaliar a resistência de materiais metálicos à deformação permanente sob uma carga F . Este ensaio consiste em medir a profundidade de penetração de um indentador em resposta à aplicação de força.

Normas internacionais estabelecem os procedimentos e requisitos para a realização desse ensaio, sendo regulamentado principalmente pela ASTM E18 "Métodos normatizados para a dureza Rockwell e a dureza superficial Rockwell de materiais metálicos" [61] e a ISO 6508-1:2023 "Materiais metálicos - Ensaio de dureza Rockwell - Parte 1: Método de ensaio (escalas A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)" [62].

A medição da dureza por este método é direta, isto é, o resultado é determinado diretamente pela diferença da profundidade da impressão deixada no material após a aplicação de força utilizando um penetrador. Esta característica torna este ensaio diferente da dureza Vickers, que exige medições indiretas da área ou do diâmetro da penetração. Na dureza Rockwell, um indicador no próprio equipamento de ensaio mostra o valor obtido.

O ensaio se baseia na aplicação de duas forças, chamadas de F_0 e F_1 . Segundo as diretrizes regulamentadoras, F_0 deve ser aplicada como carga inicial, seguida por uma carga F_1 de 50, 90 ou 140 kgf, as quais somadas correspondem à carga final $F_0 + F_1$ [61], [62]. Cada penetrador possui um símbolo e uma carga determinada, conforme retrata a Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 - Classificação da Escala de Dureza Rockwell [61].

Símbolo	Penetrador	Carga final (F0+F1) (kgf)
A	Cone de Diamante	60
B	Esfera de 1/16"	100
C	Cone de Diamante	150
D	Cone de Diamante	100
E	Esfera de 1/8"	100
F	Esfera de 1/16"	600
G	Esfera de 1/16"	150
H	Esfera de 1/8"	60
K	Esfera de 1/8"	150

No Instituto Politécnico de Bragança, está disponível uma máquina de medição de dureza com indentador HRC, isto é, *Hardness Rockwell C*. Isto nos permite entender que a nomenclatura do ensaio terá sua última letra modificada de acordo com o tipo de penetrador utilizado, neste caso, sendo um Cone de Diamante com carga final de 150 kgf.

O ensaio é simples e em equipamentos modernos a medição requer apenas alguns segundos. O princípio da prática está representado na Figura 22 abaixo, e se baseia em um primeiro momento na aplicação da pré carga (F_0) de 10 kgf para criar uma referência e compensar eventuais irregularidades superficiais do material. Após isso, a carga principal adicional é aplicada, totalizando a carga final, que é mantida por um tempo específico, permitindo que o penetrador atinja sua profundidade máxima. Por fim, esta carga F_1 é removida, restando apenas F_0 .

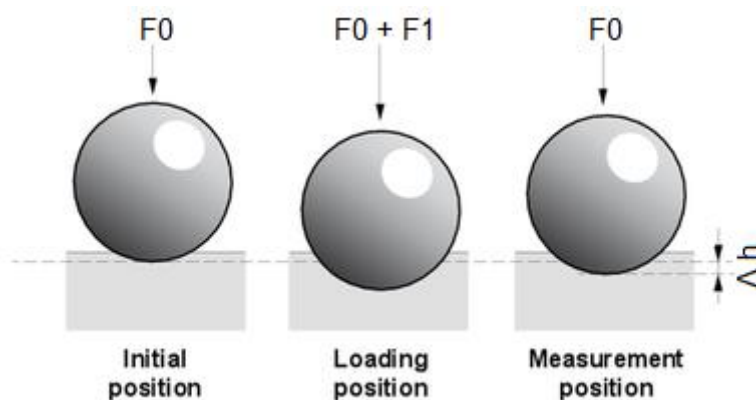


Figura 22 – Princípio de realização do ensaio de Dureza Rockwell (adaptado) [63].

A diferença entre a profundidade inicial (com a pré carga) e a profundidade final (F_0+F_1) é convertida pelo maquinário em um valor numérico, que representa a Dureza

Rockwell diretamente na escala correspondente, por exemplo, 80 HRC. Um exemplo de penetrador HRC está retratado abaixo na Figura 23.

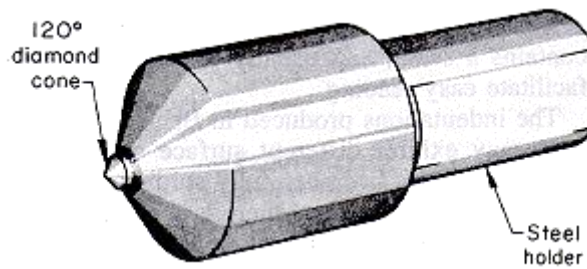


Figura 23 - Penetrador HRC (cone com 120° de angulação) [64].

Ainda que este ensaio tenha muitos pontos vantajosos, também é necessário citar suas limitações. Entre elas: limitação em aplicações em materiais muito finos, extremamente duros ou moles, além da dependência de uma superfície devidamente preparada para garantir a precisão dos resultados. O método também deixa uma impressão permanente no material, podendo inutilizar corpos de prova, e apresenta restrições ao teste de peças pequenas ou com geometrias complexas.

6.1.2 Ensaio de Flexão

O ensaio de flexão ou dobramento é amplamente utilizado na soldadura para avaliar a ductilidade, a elasticidade e a qualidade das juntas soldadas. É indicado principalmente para estudar a resistência a trincas e a integridade geral da junta [65]. Regulamentado mundialmente pelas normas ISO 7438:2020, ISO 5173:2023 [66] e pela ASTM E290 [67], também é utilizado para identificar a influência do Módulo de Young (E), tensão e deformação de flexão em diferentes materiais.

Desenvolvido ao longo do século XX para avaliar a integridade de juntas soldadas e de chapas, pode ser classificado como um teste ou ensaio destrutivo, visto que os corpos de prova frequentemente sofrem deformações permanentes ou fraturas durante o processo. Como a prática inviabiliza a amostra e a mesma não pode ser reutilizada nas mesmas condições, os ensaios são normalmente realizados em exemplares previamente designados para este fim. Mitalova *et al.*, além de classificarem o ensaio dessa maneira, ainda citaram a importância de associá-lo juntamente com outros testes destrutivos, como ensaios de tração, para melhor avaliar e entender mais detalhes a respeito do comportamento do material em condições críticas [68].

Em 2022, Wang e Sun [69] aprofundaram seus estudos no ensaio de dobramento como auxílio para o cálculo do módulo de elasticidade, e concluíram que existem alguns principais fatores que devem ser cuidadosamente analisados na realização do ensaio, entre eles: alinhamento correto entre a viga de carga (ou roletes) e a superfície da amostra, fundamentação do método de análise de dados, não-presença de rebarbas na amostra e, principalmente, a atenção na deformação do instrumento sob força.

O ensaio de flexão é utilizado na avaliação de juntas soldadas devido ao seu potencial de identificar possíveis discontinuidades, como trincas e porosidades no cordão e na ZTA. O ensaio é baseado no princípio de dobrar controladamente sob uma força F uma chapa, onde esta é submetida a tensões de flexão. Dessa forma, defeitos internos, que poderiam passar despercebidos em outros ensaios, podem ser revelados à medida que o material se deforma plasticamente [67]. Segundo descrito na norma internacional ASTM E290, podem ser realizados ensaios de dobramento com 1, 3 ou 4 pontos de suporte, de variadas geometrias de matrizes [70], como retratam as Figuras 24 e 25.

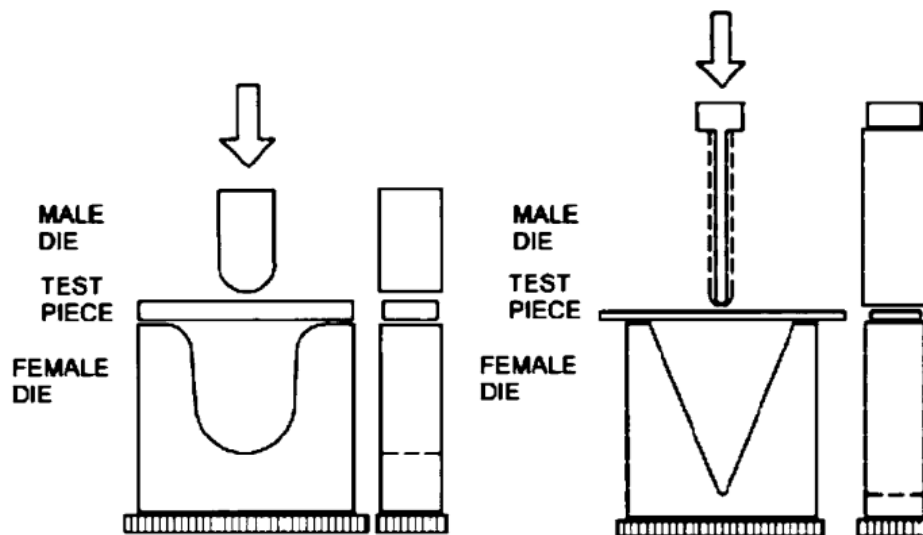


Figura 24 – Esquemas referentes ao ensaio de dobramento de 1 apoio em U (à esquerda) e em V (à direita) (adaptado) [70].

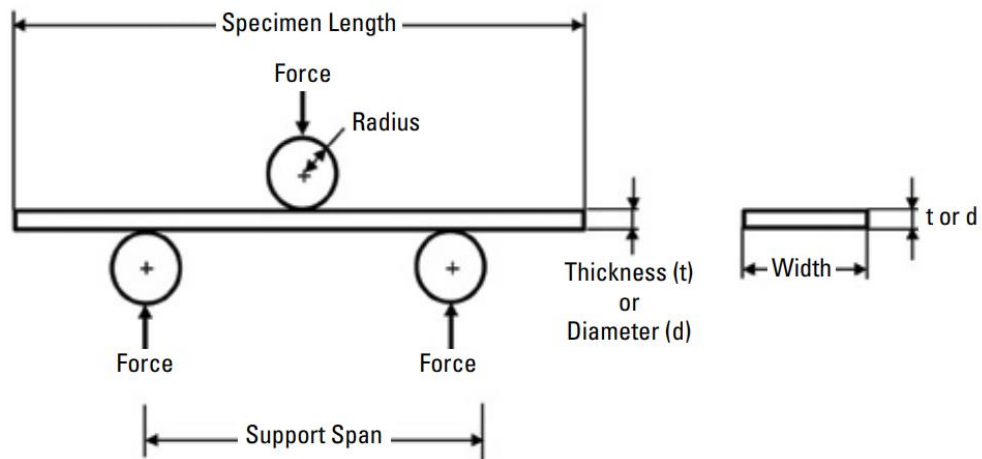


Figura 25 – Esquema referente ao ensaio de dobramento de 3 apoios [71].

A norma internacional regulamentadora tolera razoáveis limites dimensionais nos corpos de prova, desde que os espécimes se enquadrem nas dimensões da máquina de dobramento utilizada e sejam retangulares ou redondos. Como descrito na diretriz ASTM E290: “...a espessura do corpo de prova deve ser da mesma espessura do material base utilizado. Já a proporção entre largura e espessura deve ser de no mínimo 2:1, com uma largura mínima de pelo menos 18 mm, ou pelo menos 8:1 ou mais para chapas finas de materiais. O comprimento do corpo de prova deve ser o suficiente para permitir a flexão no ângulo necessário desejado.” [70].

Logo, podemos concluir que, para um corpo de prova utilizado no estudo de juntas soldadas, é necessário de que este seja devidamente longo e possua uma largura de, no mínimo, um oitavo de seu comprimento, além de possuir a mesma espessura da chapa-base estudada (geralmente 3 ou 4 mm).

Como o foco deste ensaio está na capacidade de deformação da amostra e na detecção de potenciais falhas, os resultados do ensaio de dobramento são obtidos principalmente pela comparação dos valores obtidos para a resistência à flexão e também a inspeção visual após a sua realização. A ausência de defeitos visíveis na área dobrada indica uma boa resistência à deformação e, por consequência, uma boa tolerância do material à soldadura. Ainda, existem bibliografias que citam que as amostras não podem sofrer fratura ou ter trincas que excedam 3,2 mm na superfície convexa.

A Figura 26 abaixo demonstra duas ilustrações de resultados de um ensaio de flexão, onde é fácil notar que a amostra do lado esquerdo se manteve íntegra e a da direita colapsou (como cita a norma), com a presença de trincas visíveis de superfície.

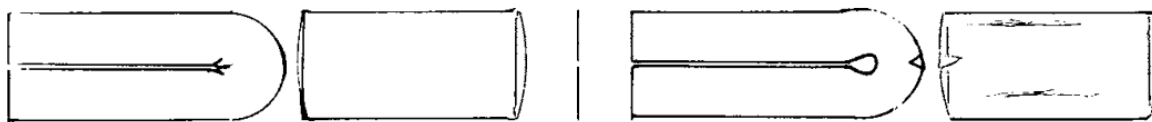


Figura 26 – Comparação de trincas pós ensaio de dobramento (adaptado) [70].

É importante citar que a norma ISO 5173:2023 recomenda que para corpos soldados, “as superfícies do metal devem ser usinadas de forma que, a menos que especificado de outra forma na norma de aplicação pertinente e/ou por acordo entre as partes contratantes, todo o excesso de metal de solda seja removido”. Logo, no caso de ensaios com três apoios, onde o apoio central localiza-se perpendicular ao cordão de solda, a superfície deve ser desbastada para garantir o não-deslizamento do apoio central.

6.1.3 Ensaio de Tração

Conforme Casarini cita em seu estudo, “o ensaio de tração transversal em cordão de solda é basicamente composto por um ensaio de tração comum, porém, este é voltado para o teste em juntas soldadas” [31]. O ensaio, assim como os outros citados neste trabalho, possui uma norma regulamentadora que permite que haja uma concordância entre os resultados dos experimentos independentemente do local em que eles sejam realizados.

A norma que regulamenta os ensaios de tração comuns é a ISO 6892-1: “Materiais Metálicos – Teste de Tração – Parte 1: Método de Teste à Temperatura Ambiente”. Esta, especifica a maneira correta de confecção e dimensionamento dos provetes de teste, retirada de dados experimentais e propriedades mecânicas [72]. No entanto, existe uma norma ISO específica para este ensaio em juntas soldadas, a ISO 4136 que diz respeito a “Testes Destrutivos de Soldas em Materiais Metálicos – Teste de Tração Transversal” [73].

As diretrizes anteriormente mencionadas se complementam de maneira significativa. A norma ISO 4136 estabelece procedimentos adequados para a concepção e a obtenção de provetes que contêm amostras do cordão de solda, os quais são submetidos ao ensaio de tração. De maneira ampla, a norma ISO 6892-1, por sua característica mais abrangente, pode ser utilizada como referência adicional nos casos em que a norma específica apresente divergências. Essa relação entre as normas é fundamental para garantir a conformidade e a integridade dos ensaios e resultados, assegurando a validade dos dados.

O ensaio de tração é um método experimental que consiste na aplicação de uma carga crescente na direção axial do corpo de prova até alcançar o ponto de ruptura do material. Este

procedimento é realizado utilizando uma máquina projetada para diversos tipos de ensaios, incluindo tração e compressão [74]. A partir desse ensaio, obtém-se uma curva de tensão (em MPa) em função da deformação (mm), que é fundamental para a caracterização do material analisado. Esta curva permite não apenas identificar se o material apresenta comportamento dúctil ou frágil, mas também determinar propriedades mecânicas relevantes, como o módulo de elasticidade, o limite de escoamento, o limite de resistência à tração e o limite de ruptura [75].

A Figura 27 exemplifica um gráfico típico de Tensão x Deformação de um material que demonstra características dúcteis, o que é essencial para a compreensão do desempenho do material sob carga.

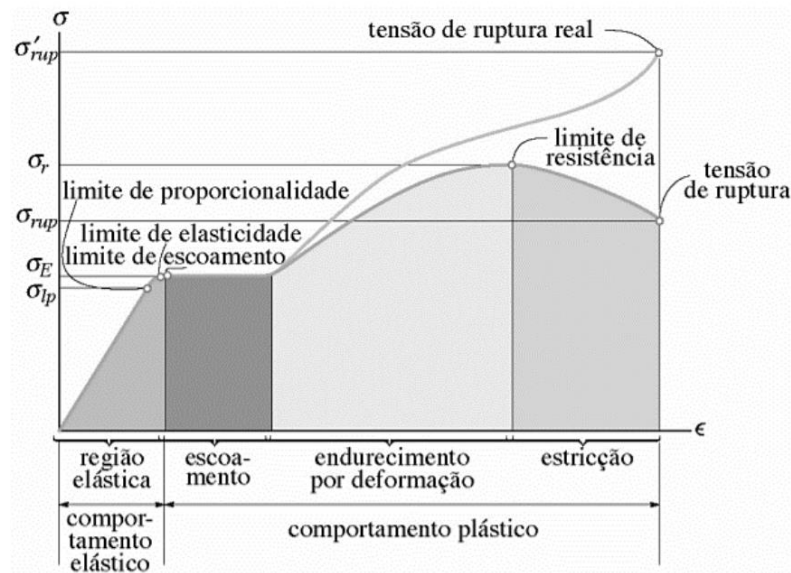


Figura 27 – Diagrama Tensão x Deformação convencional para aço dúctil [76].

O dimensionamento, incluindo as medidas e a geometria dos provetes destinados à realização de ensaios de tração transversal nos cordões de solda, deve ser realizado em conformidade com as normas ISO 4136 e ISO 6892-1, que estabelecem diretrizes para ensaios de tração em materiais metálicos. Essas normas asseguram a padronização dos resultados obtidos durante os ensaios. Um exemplo das proporções das dimensões e o formato normatizado do corpo de prova estão ilustradas em milímetros na Figura 28. O respeito a essas indicações normativas é crucial para garantir a integridade e a validade dos dados experimentais, conforme discutido em literatura especializada, incluindo as diretrizes de ensaios de materiais [72], [73].

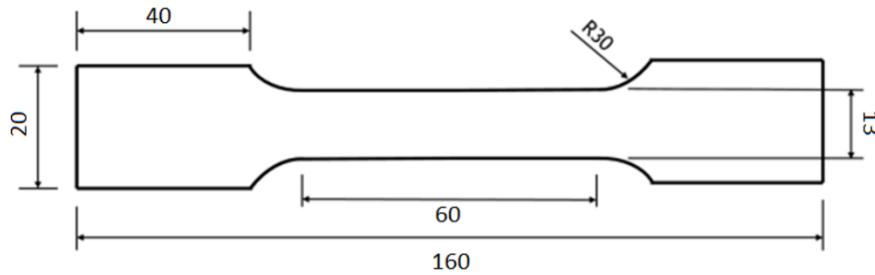


Figura 28 – Exemplo das dimensões dos provetes em [mm] para ensaio de tração em solda [31].

Ainda que amplamente utilizado com diversos objetivos, o ensaio de tração na soldadura possui vantagens e limitações que devem ser consideradas. Entre os pontos positivos, destaca-se a capacidade de fornecer dados quantitativos precisos sobre propriedades mecânicas, como o limite de escoamento e resistência à tração, permitindo uma avaliação numérica da qualidade da solda. Além disso, esse ensaio é relativamente simples de executar e pode ser realizado em amostras padronizadas, facilitando a comparação entre diferentes materiais e processos de soldadura [77].

As limitações deste ensaio incluem a possibilidade dos resultados do ensaio não representarem o desempenho real da solda em condições de serviço, além de, em alguns casos, não detectar falhas em regiões específicas da solda - como descontinuidades internas ou trincas - o que pode comprometer a avaliação da integridade estrutural. Por fim, Ferrari *et al.* comentam a respeito do ensaio não fornecer informações completas sobre algumas propriedades importantes, como dureza e tenacidade ao impacto, necessitando de ensaios adicionais para uma avaliação completa [78].

6.1.4 Ensaio de impacto Charpy

Descrito e definido mundialmente na norma ASTM E23 [79] e especificamente na Europa pela norma EN ISO 148-1, o ensaio Charpy é um teste de impacto utilizado para medir a tenacidade de um material, isto é, sua capacidade de absorver energia antes de se romper. Este ensaio avalia a resistência ao impacto e é especialmente útil para verificar a fragilidade de um material específico [80].

Conhecido por ensaio ou teste de impacto, foi desenvolvido entre o final do século XIX e o início do século XX, com contribuições do norte-americano S.B. Russell e do francês Augustin Georges Charpy – que deu o nome à prática. Ao passar dos anos, tornou-se amplamente conhecido como Ensaio Charpy, em função das importantes contribuições técnicas

e dos esforços de padronização realizados pelo cientista. Este teste desempenhou um papel crucial na compreensão dos problemas de fratura estrutural em navios durante a Segunda Guerra Mundial [81].

O ensaio é realizado por meio de um dispositivo que consiste em um pêndulo, cuja massa e comprimento são previamente determinados. Este pêndulo é solto de uma altura específica, permitindo que impacte o material a ser avaliado. A energia transferida ao material durante o impacto é quantificada baseada na comparação da altura do martelo antes e após a fratura, indicando a energia absorvida durante o ensaio [82]. As fissuras resultantes do impacto na amostra são utilizadas para aferir os resultados do teste de impacto. Portanto, é necessário que o entalhe na amostra possua dimensões e geometria regulares, conforme estabelecido pelas normas técnicas pertinentes abaixo:

- Entalhe em forma de V (Charpy) conforme ASTM E23



Figura 29 – Entalhe em forma de V.

Tabela 3 - Dimensões do entalhe em forma de V.

Comprimento	55 mm
Largura	10 mm
Largura da amostra com entalhamento	8 mm
Espessura	10 mm
O entalhe em forma de V se encontra no centro da amostra e possui ângulo de abertura de 45°.	

- Entalhe em forma de U (Charpy) conforme ASTM E23



Figura 30 – Entalhe em forma de U.

Tabela 4 - Dimensões do entalhe em forma de U.

Comprimento	55 mm
Largura	10 mm
Largura da amostra com entalhamento	5 mm
Espessura	10 mm
O entalhe em forma de U se encontra no centro da amostra e possui raio de 1 mm.	

- Entalhe tipo buraco de fechadura (Charpy) conforme ASTM E23: são menos comuns e se assemelham aos entalhes em forma de U. A diferença é a largura do entalhe, que deve ser igual ou inferior a 1,6 mm [79].



Figura 31 – Entalhe tipo buraco de fechadura.

Tabela 5 - Dimensões do entalhe tipo buraco de fechadura.

Comprimento	55 mm
Largura	10 mm
Largura da amostra com entalhamento	5 mm
Espessura	10 mm
O entalhe se encontra no centro da amostra e possui raio de 1 mm.	

Um desenho ilustrativo de um pêndulo para Ensaios Charpy está retratado abaixo, na Figura 32. É interessante citar que a maioria dos equipamentos já possui uma escala embutida para a verificação dos valores de energia absorvida durante o ensaio, para posteriormente obtenção de seus resultados finais. O martelo de impacto tem seu peso balanceado por uma bigorna, e o corpo de prova com entalhe fica situado em um local pré-determinado para a realização correta do ensaio.

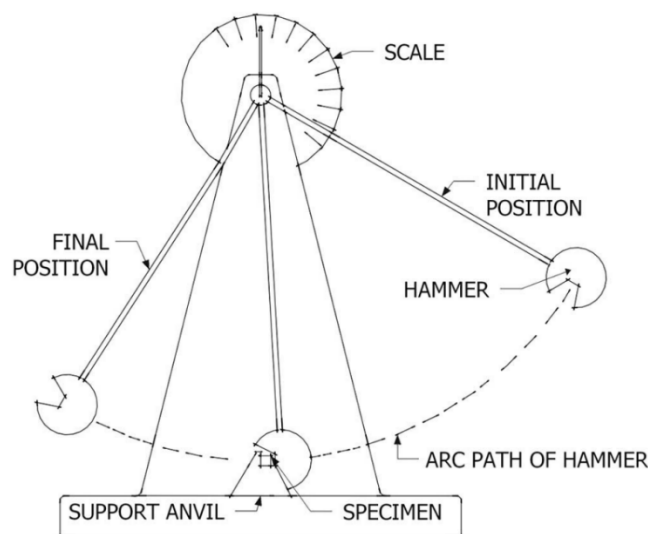


Figura 32 – Aparato de ensaio de impacto Charpy [83].

Thomas e Sorensen [83] revisaram e avaliaram diferentes configurações de ensaios Charpy em metais e compósitos, e elencaram vantagens e desvantagens do método, as quais foram descritas pelos autores da seguinte maneira:

- i. Vantagens:
 - a. Método padronizado que permite a comparação de diferentes materiais e tipos de soldadura;
 - b. Resultados rápidos e simples de serem obtidos;
 - c. Permite avaliar a tenacidade de materiais em diferentes condições.
- ii. Desvantagens:
 - a. Os resultados podem não representar o desempenho dos materiais em situações práticas;
 - b. Necessidade e dependência da rigorosidade no respeito da geometria do entalhe e da amostra normatizadas;
 - c. Sensibilidade a variáveis externas na maioria dos equipamentos que não possuem uma cúpula isolante como os mais modernos.

Podemos relacionar este ensaio de impacto com sua aplicação na soldadura, pois este fornece informações cruciais sobre como os materiais se comportam sob condições de impacto. É de senso comum no ambiente mecânico em que estamos inseridos que, ao soldar diferentes tipos de aços, é fundamental garantir que a junta soldada tenha resistência suficiente para suportar cargas dinâmicas e choques, especialmente em estruturas críticas da engenharia, como motores, pontes e prédios.

O ensaio Charpy, por sua vez, ajuda a identificar se a junta soldada possui características dúcteis ou frágeis, permitindo estudos para otimizar os parâmetros de segurança e confiabilidade do projeto. Além disso, o ensaio pode ser utilizado para avaliar o efeito de tratamentos térmicos e outras variáveis, garantindo que o cordão de solda mantenha propriedades adequadas mesmo em condições adversas.

6.1.5 Análise macrográfica

Ao olharmos de um ponto de vista de engenharia metalúrgica, podemos concluir que a soldadura participa diretamente de modificações estruturais nos metais, ocorrendo durante as etapas de aquecimento e resfriamento do cordão. O ciclo térmico associado à soldadura difere significativamente dos tratamentos térmicos convencionais, caracterizando-se por uma rápida taxa de aquecimento em um curto intervalo de tempo de exposição [84]. Esta característica eleva a temperatura na região da solda, resultando em um alto gradiente térmico, o que impacta

e/ou modifica diretamente as propriedades mecânicas e estruturais do material na zona afetada pelo calor, as quais podem ser observadas e analisadas por um tipo de ensaio, tratado nessa secção.

A análise macrográfica, também conhecida como Macrografia, é o estudo da superfície e da estrutura dos metais. Refere-se um conjunto de ensaios majoritariamente visuais utilizados para analisar fraturas, falhas, grãos ou descontinuidades, normalmente em um aparelho de ampliação de até 50x.

Freitas, em 2018, referiu-se à análise superficial da soldadura ao discorrer que o objetivo deste ensaio visual é proceder com a verificação e avaliação das propriedades estruturais ou de composição dos elementos de um metal e de suas ligas, com o intuito de as correlacionar com suas características: mecânicas, físicas e químicas [85]. Esta abordagem coincide com o foco do presente trabalho, já que um dos objetivos específicos diz respeito à realização de um teste de soldabilidade que possibilite identificar possíveis defeitos de solda em cordões realizados no aço carbono.

Casarini [31], em 2020, realizou a análise macrográfica em chapas soldadas de aço DIN C20, respeitando as etapas descritas a seguir:

- i. Corte das amostras soldadas utilizando uma máquina de corte Struers Labotom presente no Laboratório de Materiais de Construção Mecânica (LMCM) do Instituto Politécnico de Bragança;
- ii. Embutimento das amostras com o auxílio da máquina de embutimento Struers LaboPress-1;
- iii. Polimento superficial na máquina de polimento Struers LaboPol-25;
- iv. Ataque químico nas amostras para evidenciar o cordão de soldadura;
- v. Análise e medição do perfil do cordão de soldadura.

O ensaio macrográfico realizado pelo autor nas amostras soldadas permitiu que fossem obtidas medições de penetração, largura e reforço do cordão de solda conforme registradas abaixo, na Figura 33, além de uma análise minuciosa da presença – ou não – de trincas e demais defeitos de soldadura.

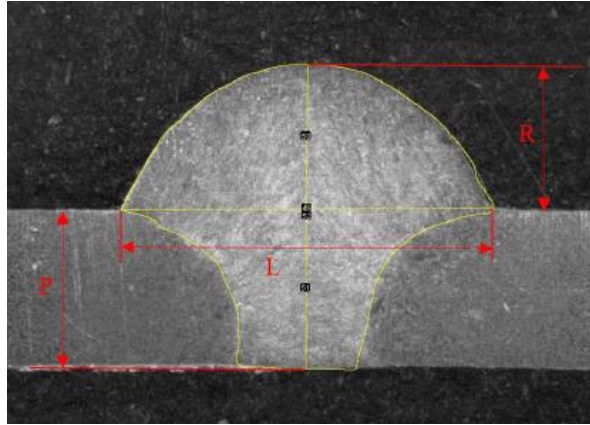


Figura 33 – Medições realizadas nas amostras de solda [31].

Com base na revisão da literatura existente, é possível desenvolver uma tabela que representa de maneira clara as principais vantagens, aplicações e limitações da análise de macrografia na soldadura. A Tabela 6, apresentada a seguir, serve como um recurso para facilitar a compreensão dos aspectos relevantes dessa técnica no contexto do trabalho.

Tabela 6 – Vantagens, aplicações e limitações da análise macrográfica.

Vantagens / Aplicações	Limitações
Revela o perfil do cordão de solda, destacando a ZF, ZTA e MB.	Exige a confecção de um corpo de prova para o ensaio.
Identificação rápida de defeitos macroscópicos: trincas, porosidades, inclusões, etc.	Por ser uma análise superficial e com pouco aumento, não revela a microestrutura do metal.
Método simples e de baixo custo.	
Controle de qualidade.	

6.2 Testes de soldabilidade não convencionais

Também referenciados como testes de soldabilidade e de falha para avaliação de trincas a frio [35], são chamados de não convencionais pois foram desenvolvidos para serem aplicados somente e diretamente na soldadura, não possuindo uma abordagem geral e em materiais não soldados, como os testes convencionais.

Os testes de soldabilidade não convencionais podem ter diversas aplicações na soldadura. Entre as principais, estão o auxílio na seleção do método adequado de solda, avaliação da necessidade ou não do uso de pré aquecimento, aporte de calor e desenho da junta soldada [38]. Além disso, são utilizados para avaliar os efeitos da soldadura nas propriedades abaixo, gerando resultados qualitativos [42]:

- Trincas (fissuras) no metal de base e no metal de solda;
- Ductilidade do metal de base e do metal de solda;
- Penetração da solda;
- Forma da poça de fusão.

Estes ensaios podem ser divididos em dois grupos, separados pelo grau de tensão envolvida. São eles, testes autorrestringidos ou testes com restrição externa, diferenciados basicamente pela aplicação ou não de cargas externas na avaliação.

Testes autorrestringidos são ensaios que empregam uma junta específica especializada em induzir tensões transientes e residuais na solda, que podem resultar na ocorrência de fissuras. Não se aplica nenhuma carga externa à solda. Assim, já que as tensões são geradas internamente durante a montagem, esse tipo de ensaio é denominado de auto-restringido [2].

Entre os principais testes autorrestringidos estão os seguintes:

- Teste Tekken;
- Teste Lehigh;
- Teste CTS (*Controlled Thermal Severity Test*);
- Teste Houldcroft.

Já os testes com restrição interna são assim chamados pois as tensões são induzidas por um dispositivo externo. Este, aplica uma carga ou deformação controlada ao material, sendo durante ou após o processo de soldadura. Essa carga externa pode ser ajustada para alterar o estado ou a magnitude das tensões e influenciar a formação de fissuras [2], [35], [38].

Os três principais testes com a presença de restrição interna são os seguintes:

- Teste de Implante;
- Teste RRC (*Rigid Restraint Cracking Test*);
- Teste TRC (*Tension Restraint Cracking Test*).

Serão abordados neste capítulo dois testes que, após análise, são indicados para a soldadura de aços-carbono com o processo MAG. Esses testes são os mais utilizados devido à sua ampla aceitação e eficiência. Seus principais prós e contras serão discutidos a seguir.

6.2.1 Teste Tekken

Também chamado de Teste *Y-Groove*, o teste Tekken foi desenvolvido no Instituto Ferroviário de Pesquisas Tecnológicas do Japão. É um dos métodos mais empregados para avaliar problemas de fissuração causada pelo hidrogênio em aços estruturais e de alta

resistência, tanto no cordão de soldadura, quanto na zona termicamente afetada. Este teste, descrito na norma japonesa JSA JIS Z 3158:1993 [86], é amplamente utilizado devido à sua simplicidade de execução e alta sensibilidade na detecção de trincas a frio [87].

O princípio de sua realização é baseado em soldar uma amostra de material em condições específicas e, em seguida, submetê-la a um ensaio de tração sob aplicação de hidrogênio. Esse hidrogênio pode ser introduzido na amostra por meio de um banho eletrolítico ou através de um ambiente enriquecido com o elemento. Durante o teste, observa-se a formação de trincas ou fissuras na região da solda.

Segundo a ASM [12], na área de utilização do teste estão as trincas no metal de solda e de raiz, bem como trincas por hidrogênio na zona termicamente afetada. As variáveis de controle são cinco: a geometria da junta, o processo de soldadura utilizado, o metal de adição utilizado, aporte de calor e pré aquecimento. Estas, podem ser variadas para alterar o estado de tensão, sem modificar a geometria da amostra [12].

O único dado tabelado a ser utilizado é a temperatura de pré aquecimento crítico do material, e entre as principais vantagens do teste estão o baixo custo e a não-necessidade de equipamentos especializados.

Conforme comentado anteriormente, a soldadura a ser realizada para o teste Tekken possui regras pré definidas pela norma regulamentadora. Entre elas, a principal está na maneira que o cordão de solda será realizado: um único passe na parte central de duas juntas em formato de Y (representado na Figura 34), pois é a forma que oferece maior restrição. Este chanfro deve ser feito com uma máquina de corte [87], [88].

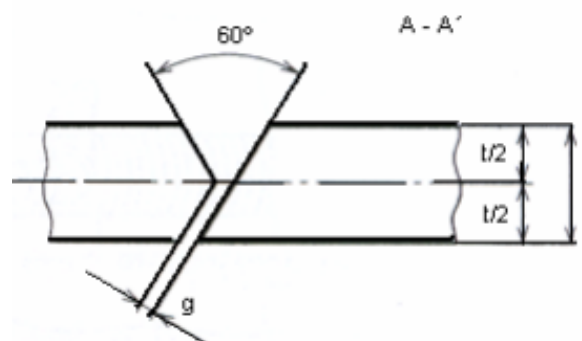


Figura 34 – Chanfro em forma de Y [38].

O cordão de solda a ser testado deve ser depositado conforme determinado pela norma na Figura 35, entre os dois passes normais de solda de ancoragem nas extremidades, que são responsáveis por manter as peças unidas.

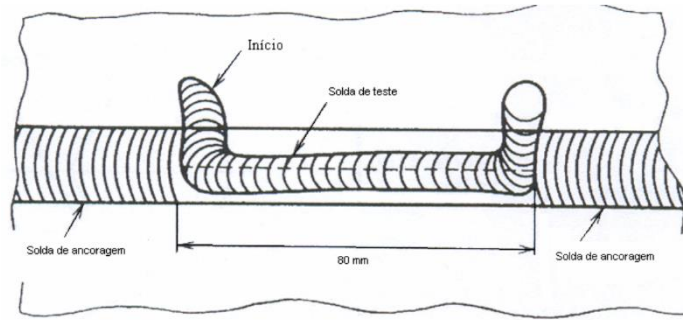


Figura 35 – Cordão de solda do Teste Tekken [38].

A restrição, chamada de R_y , é função da espessura “ t ” da chapa e medida em Kg/mm^2 . Esta, pode ser calculada de duas maneiras: o primeiro caso, para espessuras maiores que 40mm ($R_y = 2800 Kg/mm^2$); e o segundo, para espessuras iguais ou menores a 40mm ($R_y = 70t$) [87].

A norma JSA JIS Z 3158:1993 dita a forma e as dimensões do chanfro, da chapa de teste e da solda, que devem ser as indicadas na Tabela 7 e na Figura 36:

Tabela 7 – Formas e dimensões [86].

Chanfro	Ângulo	60°
	Largura da raiz (mm)	2 ± 0,2
Chapa	Comprimento (mm)	200
	Largura (mm)	150
Solda	Comprimento da solda de ancoragem (mm)	60
	Comprimento da solda de teste (mm)	80

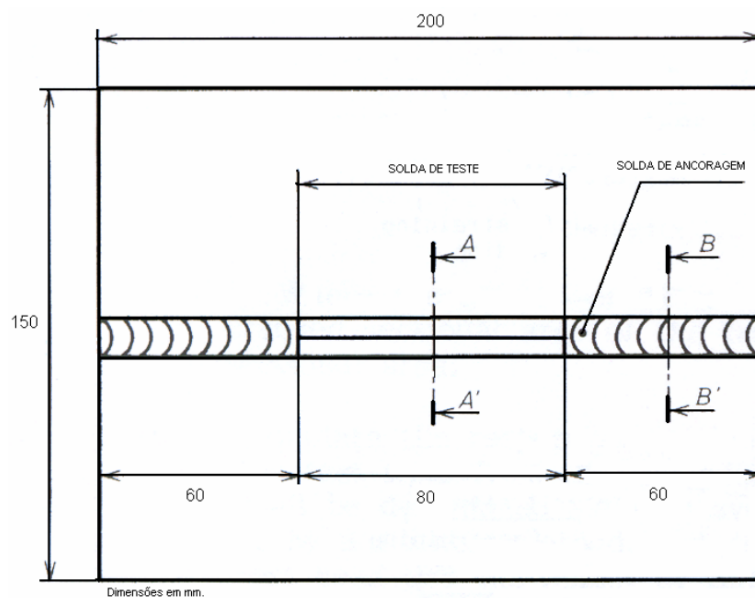


Figura 36 – Dimensões para Teste Tekken [38].

A análise das trincas pode ser realizada no microscópio óptico ou no microscópio eletrônico de varredura (MEV). Segundo Modenesi e a norma JIZ Z 3158 [2], [86], são coletadas quatro amostras metalográficas da área transversal da solda de teste para observar a presença de trincas. Essas quatro seções devem ser retiradas perpendicularmente ao chanfro em forma de Y e devem ter um quarto do tamanho do cordão de solda, como ilustrado na Figura 37.

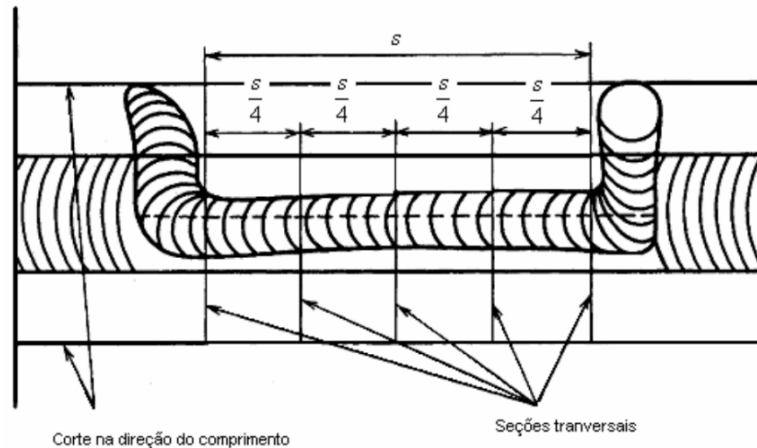


Figura 37 – Seções transversais [38].

Como comentado anteriormente, os testes de soldabilidade normalmente fornecem resultados qualitativos, ou seja, o veredito final se dá por duas possíveis respostas: presença ou não presença de trincas/fissuras [35]. O ponto negativo que envolve este teste é a necessidade de uma chapa com dimensões entre $20 \text{ mm} \leq t \leq 50 \text{ mm}$ de espessura para que seja garantida a sua correta realização, o que foi um fator limitante para o presente trabalho, visto que elevaria substancialmente o custo dos materiais envolvidos, além de tornar o processo mais dificultoso devido a fatores como o peso do material, minimização da quantidade de possíveis testes, funcionamento da máquina guilhotina, além do encaixe na máquina de soldadura automática.

6.2.2 Teste de Implante

Coberto pela norma francesa AFNOR NF A89-100, de 1991 [89], o teste de Implante foi desenvolvido no *Institut de Soudure* no final do século 20. Entre as principais indicações para a área de utilização do mesmo, estão a análise de trincas induzidas por hidrogênio na zona termicamente afetada, além de trincas de alívio de tensão e avaliação de processos de soldadura [88]. Além disso, o teste também está coberto por uma recomendação do Instituto Internacional de Soldadura, codificada como IIS/IIW-447-73 [90].

Segundo a ASM [12], as variáveis de controle que podem ser modificadas para a realização do ensaio e análise de diferentes situações são: o processo de soldadura utilizado, o metal de solda escolhido, o uso ou não de pré aquecimento, além da escolha da realização de tratamento térmico pós soldadura.

Os dados necessários para os cálculos normativos são os valores das propriedades de tensão de fratura crítica e da temperatura de pré aquecimento crítico do material. O maquinário necessário para o teste é um equipamento para aplicação de carga e o custo relativo do experimento é médio (diferentemente do Tekken, com custo relativo baixo).

Como comentado anteriormente, o teste de Implante na soldadura é mais um ensaio baseado na análise da formação ou não de HIC (trincas induzidas por hidrogênio) [88]. Neste teste, o hidrogênio é introduzido na região da solda por meio de um implante, que geralmente consiste em um metal absorvente de hidrogênio, como titânio ou zircônio. Durante o processo de soldadura, o metal de base é fundido e o hidrogênio é liberado do implante e incorporado na zona da solda. Após a soldadura, a amostra é inspecionada quanto à presença de trincas ou fissuras induzidas pelo hidrogênio [91].

O implante utilizado deve ser do material que se deseja analisar, e este corpo de prova deve ser cilíndrico com 6 ou 8 mm de diâmetro. Nele, é feito um entalhe que pode ser circular ou helicoidal em forma de V, que será inserido dentro de um orifício perfurado na chapa auxiliar de mesmo aço. É válido destacar que os implantes e a chapa de suporte devem possuir uma condutividade térmica similar [90].

Assim como no teste Tekken, um único passe de solda deve ser depositado. Neste caso, deve ter de 100 a 150 mm de comprimento segundo a norma, sob condições controladas e utilizando o método e consumíveis desejados [89]. O implante deve ficar situado dentro da região onde existe a presença de grãos grosseiros (abaixo do cordão), conforme demonstra a Figura 38 abaixo.

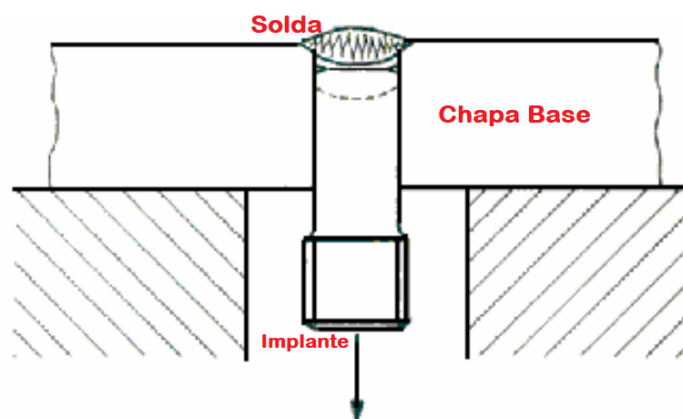


Figura 38 – Teste de Implante (adaptado) [38].

Após a soldadura e antes que a solda esfrie completamente, uma carga de tração é aplicada ao implante por um período de tempo, visando causar deformação no cordão. Este, não possui consenso na literatura: a norma NF A89-100 [89] recomenda pelo menos 16 horas, já Bouverot [92] cita que a carga deve ser mantida por mais de 70 horas, enquanto outros autores consideram que 2 horas são necessárias para notar ou não o rompimento. Se ocorrer fratura, o tempo até a fratura do implante é registrado. Após o período pré-determinado de aplicação da carga, se o implante não se romper, o conjunto é desmontado e as trincas são examinadas.

As dimensões indicadas pela norma e cobertas pela recomendação [89], [90] são as seguintes, indicadas nas Tabelas 8, 9, 10 e 11 abaixo:

Tabela 8 – Dimensões do implante (adaptado) [90].

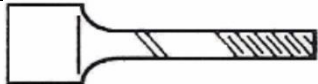
Implante	
Direção de remoção do implante	Paralela à direção de laminação
Posição de remoção na espessura da chapa	½ da espessura, caso chapa ≤ 20 mm
	¼ da espessura, caso chapa > 25 mm
Espessura mínima da chapa matriz para o implante	10 mm
Diâmetro do implante	6 ou 8 mm
Comprimento do implante	> 20 mm
Formato do implante	
Nº mínimo de implantes para validar o experimento	3 implantes

Tabela 9 – Dimensões do entalhe [90].

Entalhe	
Forma	Em “V”
Profundidade	0,5 mm ± 0,05 mm
Ângulo do entalhe	40° ou 45°
Raio da ponta do entalhe	0,1 mm ± 0,01 mm

Como citado anteriormente, o entalhe pode ser circular ou helicoidal [89], sendo o segundo mais fácil de ser utilizado, já que este garante a penetração até uma zona sensível do cordão, tornando-se mais invasivo e garantindo resultados. O entalhe helicoidal possui a forma retratada na Figura 39 abaixo.

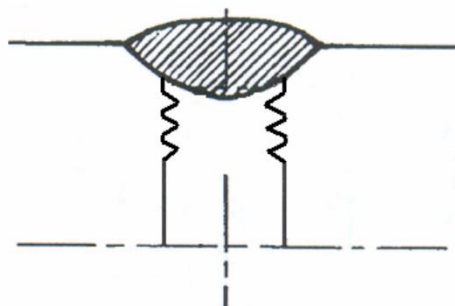
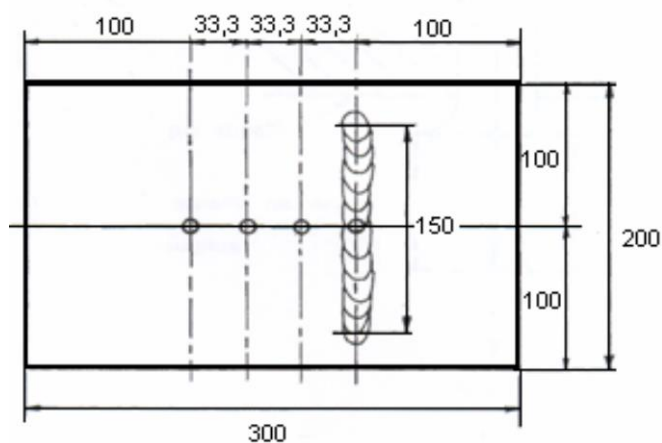


Figura 39 – Entalhe helicoidal [38].

Tabela 10 – Especificações da chapa de suporte (adaptado) [38].

Chapa de suporte	
Composição	Similar à do implante ou aço C-Mn
Nº de implantes por chapa	4
Comprimento	300 mm
Largura	200 mm
Espessura	Mín. 20 mm
Usinagem dos furos	Entre 0,05 e 0,15 mm



Dimensões em mm.

Figura 40 – Chapa de suporte [38].

Tabela 11 – Aplicação da carga (adaptado) [89], [92]

Aplicação da carga	
Temperatura aguardada para início da aplicação	Entre 100 e 150 °C
Tempo de aplicação da carga	Divergência: 2, 16 ou 70h
Tensão recomendada	Tensão de escoamento ou ½ do valor

Assim como no Teste Tekken, o critério avaliativo recomendado é o “trinca/não trinca”, referente à presença ou não de fissuras após a realização do teste. Este, se dará pela maioria dos

resultados entre os 3 implantes utilizados, ou seja, se no mínimo duas das três amostras produzirem o mesmo resultado, a conclusão aceitável será aquela refletida por esta maioria [90].

O ponto negativo do teste de implante é que este caracteriza-se como um teste muito específico para determinados materiais e processos, tornando-o não representativo para todas as situações de soldadura, junta e materiais. Além disso, a necessidade da confecção de implantes, entalhes e a divergência a respeito do tempo de aplicação de carga, fez com que o teste de implante não fosse escolhido para o presente trabalho, ainda que fosse um bom candidato – motivo que justifica a presença e descrição específica do mesmo.

6.3 Testes de soldabilidade a serem realizados

Após estudos e análise de viabilidade, os testes de soldabilidade que foram escolhidos para serem realizados neste trabalho são os ensaios de flexão, tração, dureza Rockwell e a análise macrográfica. Estes, foram selecionados por sua abrangência técnica e pela possibilidade de execução no Instituto Politécnico de Bragança (IPB), que dispõe da infraestrutura e maquinário necessário para sua realização.

Esses ensaios permitirão avaliar diversas propriedades do material e da soldadura, incluindo a integridade do cordão, a soldabilidade do aço utilizado e demais características fundamentais. Com os dados e análises provenientes desses testes, será possível obter um entendimento do comportamento do material em relação à soldadura MAG em diferentes combinações de parâmetros de soldadura, possibilitando o estudo, análise e seleção de valores ótimos para as variáveis.

Os demais ensaios previamente citados na revisão de literatura não foram selecionados para realização neste trabalho devido a uma série de limitações, especialmente relacionadas às dimensões normatizadas dos corpos de prova, que não poderiam ser atingidas com o metal base disponível. Além disso, a execução desses ensaios requer maquinário específico e processos de preparação mais complexos, que ultrapassam o escopo e os recursos deste estudo. No entanto, sua viabilidade e realização devem ser consideradas em trabalhos futuros, visando expandir e aprofundar os conhecimentos gerados nesta dissertação.

7 METODOLOGIA

7.1 Materiais utilizados

7.1.1 Aço

O aço escolhido a ser utilizado no presente trabalho foi o AISI SAE 1020, também conhecido na Europa como DIN C20. É um aço carbono de baixo teor, amplamente utilizado em diversas aplicações industriais devido às suas propriedades mecânicas equilibradas [93], além de boa soldabilidade. A sua composição química encontra-se na Tabela 12 abaixo.

Tabela 12 – Composição química do aço DIN C20 / SAE 1020 [94].

C (%)	Fe (%)	Mn (%)	P máx. (%)	S máx. (%)
0,17 – 0,23	99,08 – 99,53	0,30 – 0,60	0,04	0,05

O baixo teor de carbono (aproximadamente 0,20%) reduz o risco de formação de martensite dura e quebradiça na zona termicamente afetada, facilitando a soldadura e minimizando defeitos como trincas. Além disso, a baixa quantidade de elementos de liga favorece a formação de bainite e ferrite, microestruturas mais dúcteis e menos suscetíveis a falhas [93], [95].

Também chamado de “aço-coringa”, o aço DIN C20 possui boas propriedades de resistência à tração, ductilidade e tenacidade [96], os quais, aliados à fácil maquinabilidade do material, o tornam adequado para diversas aplicações estruturais e mecânicas. A Tabela 13 elenca as principais propriedades do aço e está indicada abaixo.

Tabela 13 – Propriedades mecânicas do aço DIN C20 / SAE 1020 [94].

Dureza Vickers	Módulo de Elasticidade	Módulo de Cisalhamento	Resistência à Tração
149	186 GPa	72 GPa	330 – 450 MPa

Outros pontos positivos que podem ser citados são a sua disponibilidade e custo. Sendo um aço fácil de ser encontrado no mercado e com custo mais econômico do que a grande

maioria dos aços-carbono, gera uma boa relação custo-benefício para projetos que envolvem soldadura. Por fim, responde bem à soldadura MAG utilizando gases de proteção comuns [96], como o CO₂, argônio ou misturas dos mesmos, garantindo boa penetração e qualidade do cordão.

7.1.2 Metal de adição

O arame AWS A5.18 ER70S-6 foi escolhido pois é amplamente utilizado em processos de soldadura, especialmente na soldadura MAG. É conhecido por suas propriedades que permitem a obtenção de cordões de alta qualidade em diversos tipos de aço carbono [97].

Entre as principais vantagens de se utilizar este arame, pode ser citado o teor de manganês e silício em sua composição. Estes, promovem uma excelente desoxidação, resultando em menos porosidade e melhor qualidade do cordão de soldadura [98]. Além disso, o acabamento torna-se liso e uniforme, com menos respingos e boa fusão. A composição química do metal de adição encontra-se na Tabela 14 abaixo.

Tabela 14 – Composição química do arame eletrodo AWS A5.18 ER70S-6 [94].

C (%)	Fe (%)	Mn (%)	P (%)	Si (%)	S (%)
0,09	97,3	1,6	0,015	0,95	0,02

A utilização do ER70S-6 complementa bem o aço AISI 1020 / DIN C20, visto que as propriedades mecânicas do arame (descritas na Tabela 15 abaixo) são adequadas para a grande maioria das aplicações que envolvem aços baixo-carbono, especialmente em processos MAG [95].

Tabela 15 – Propriedades mecânicas do arame eletrodo AWS A5.18 ER70S-6 [99].

Limite Elástico	Dureza Vickers	Módulo de Elasticidade	Módulo de Cisalhamento	Resistência à Tração
420 MPa	≈ 170 – 200	≈ 210 GPa	≈ 80 GPa	500 MPa

Este arame também pode ser utilizado com uma variedade de gases de proteção, entre elas a mistura de argônio e CO₂ escolhida. Outro fator relevante é que o teor de carbono do ER70S-6 é significativamente inferior ao do aço base, o que ajuda a reduzir a formação de martensite na zona fundida, evitando a fragilização da soldadura e garantindo maior tenacidade à junta soldada.

7.1.3 Gás de soldadura

O gás utilizado nos procedimentos de soldadura do presente trabalho foi o Linde Corgon 18, uma mistura de 82% de Argônio e 18% de CO₂. Segundo o fabricante, “o Corgon 18 é indicado para ser utilizado como gás de proteção em soldadura MAG para aços ao carbono, aços de construção, aços baixa liga, aços de grão fino, entre outros.” Além disso, conforme citado na ficha técnica do gás, não é inflamável nem tóxico e, mesmo a baixas temperaturas ambientes, não ocorre a separação dos seus componentes [100].

Tabela 16 - Composição química do gás Linde Corgon 18.

Argônio	CO ₂
82%	18%

O gás 82%Ar / 18%CO₂ proporciona boa estabilidade do arco elétrico durante o processo de soldadura, reduzindo a formação de respingos e permitindo maior controle sobre a formação do cordão. A presença do dióxido de carbono ajuda a favorecer a fusão do metal base e uma boa penetração, o que é um fator importante para a integridade da estrutura do cordão de solda.

A mistura dos dois gases é uma melhor escolha em comparação ao uso de gases puros, pois mesmo estes formando arcos estáveis, não fornecem a mesma penetração. Essa característica é objetivada na soldadura MAG e no tema deste trabalho, onde a penetração consistente e a integridade do cordão são fatores determinantes para a resistência mecânica da junta que será objeto de testes de soldabilidade.

7.2 Procedimento do planeamento estruturado de experiências

Para a implementação de um planeamento estruturado de experiências, será utilizado o método Taguchi, e que tem por base uma abordagem estatística amplamente aplicada no planeamento de experiências, principalmente, em contextos industriais. Desenvolvido por Genichi Taguchi, esse método tem como objetivo otimizar a qualidade de produtos e processos, ao mesmo tempo em que minimiza custos e variabilidade [101]. Um dos principais benefícios do método é a redução significativa do número de experimentos necessários para determinar as melhores condições de operação, graças ao uso de matrizes ortogonais, como, neste caso, a matriz L₉. Além disso, o método é conhecido pela sua robustez, permitindo que os processos sejam otimizados de forma eficiente mesmo em ambientes sujeitos a variabilidade [102].

Para a análise do processo de soldadura, serão considerados três fatores principais: tensão de soldadura, velocidade de soldadura e ângulo da tocha. Cada um desses fatores terá três níveis distintos, resultando em uma combinação total de 27 experimentos se fosse utilizada a abordagem convencional de experimentos completos. No entanto, utilizando a matriz ortogonal L₉ do método Taguchi, é possível reduzir esse número para apenas 9 experimentos, sem comprometer a precisão e a confiabilidade dos resultados.

Os níveis dos fatores considerados são:

- Tensão de Soldadura (V): 22,4 / 23,3 / 24,1.
- Velocidade de Soldadura (mm/min): 200 / 300 / 400.
- Ângulo da Tocha (graus): 0 / 15 / 30.

A matriz ortogonal L₉, que corresponde a uma matriz de 3 fatores em 3 níveis, é mostrada na Tabela 17. Os valores foram escolhidos com base na literatura, que apresenta um consenso sobre a eficiência e utilização destes, para garantir uma junta soldada de boa qualidade.

Tabela 17 – Matriz L₉ de Taguchi com os parâmetros de estudo.

Nº do Ensaio	Tensão [V]	Vel. de Soldadura [mm/min]	Ângulo da tocha [°]
1	22,4	200	0
2	22,4	300	15
3	22,4	400	30
4	23,3	200	15
5	23,3	300	30
6	23,3	400	0
7	24,1	200	30
8	24,1	300	0
9	24,1	400	15

A matriz L₉ permite que todas as combinações possíveis de níveis de fatores sejam representadas de forma balanceada. Isso significa que a interação entre os fatores pode ser analisada de maneira eficiente, mesmo com um número reduzido de experimentos.

A principal vantagem do método Taguchi é a sua capacidade de fornecer informações detalhadas sobre o efeito dos fatores e suas interações com um número reduzido de experimentos. No contexto da soldadura, isso significa que é possível identificar a combinação ideal de tensão, velocidade e ângulo da tocha para otimizar a qualidade da solda, como a resistência mecânica e a minimização de defeitos de soldadura.

Outro benefício é a robustez do método em relação às variações no processo. Taguchi propôs que, ao invés de focar exclusivamente na média dos resultados, é importante minimizar a variabilidade em torno dessa média, resultando em processos mais consistentes e produtos de maior qualidade. Isso é particularmente importante em processos de soldadura, onde pequenas variações nas condições operacionais podem resultar em grandes diferenças na qualidade final.

Para assegurar a confiabilidade dos resultados e minimizar a influência de possíveis variabilidades inerentes ao processo, as combinações possíveis foram repetidas três vezes. Essa abordagem permite reduzir o impacto de eventuais irregularidades, como a ocorrência de fatores aleatórios. Assim, os dados obtidos refletem de forma mais consistente o comportamento do processo, garantindo maior robustez às análises realizadas.

A razão sinal-ruído é uma importante componente deste método, e foi criada por Taguchi para transformar os dados de cada teste (e suas repetições) em um valor que representa a variação entre cada uma delas em relação aos fatores que possam influenciar os resultados [102].

Os objetivos estabelecidos para o controle da qualidade dos resultados podem ser classificados em três grupos, sendo eles: “maior é melhor” por exemplo em ensaios de tração, “menor é melhor” em eventuais ensaios de rugosidade, e “nominal é melhor” onde um valor específico é objetivado [103].

Para a razão sinal-ruído onde o critério é “maior é melhor”, utiliza-se a equação abaixo, onde “n” representa o número de medições realizadas e Y_i os dados observados.

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

Para a razão sinal-ruído onde o critério é “menor é melhor”, utiliza-se a equação abaixo, onde “n” representa o número de medições realizadas e Y_i os dados observados.

$$\frac{S}{N_S} = -10 * \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right)$$

Para a razão sinal-ruído onde o critério é “nominal é melhor”, utiliza-se a equação abaixo.

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

Um importante aliado deste método é a análise de variância (ANOVA), que permite identificar quais parâmetros possuem maior influência nos resultados dos ensaios. Ao decompor a variabilidade observada nos dados, a ANOVA avalia a significância estatística dos

fatores estudados, indicando quais deles contribuem de forma mais relevante para o desempenho do processo [104].

Essa ferramenta foi desenvolvida por Ronald A. Fisher, e complementa o método de Taguchi ao fornecer uma base quantitativa para a priorização de ajustes nos parâmetros, tornando o processo de otimização mais preciso e confiável.

7.3 Procedimento de soldadura

Ao realizar a soldadura utilizando a Máquina de Soldadura Electrex MIG 453, foi respeitada a seguinte ordem e *checklist* para prática no Laboratório de Tecnologia Mecânica, para que o funcionamento ocorra corretamente e dentro da normalidade:

1. Ligar o exaustor do laboratório no botão ao lado da cortina de isolamento da área de soldadura;
2. Abrir a válvula de liberação de gás de soldadura (cerca de duas voltas completas);
3. Definir a tensão utilizada diretamente na máquina de soldadura MAG, de acordo com o escolhido e recomendado para a prática;
4. Trocar a tocha de soldadura para a tocha acoplada na máquina automática, cortar o excesso de arame da ponta e instalar na nova tocha;
5. Ajustar o ângulo desejado para a realização da soldadura (0°, 15° ou 30°), conforme retratado na Figura 41 a seguir;
6. Ligar a máquina de soldadura MAG;
7. Ligar a “massa” em um condutor metálico, isto é, fechar o circuito de soldadura;
8. Realizar a regulagem do parâmetro de velocidade com o comando “\$\$” no programa UGS Platform, no computador;
9. Seguir os procedimentos descritos no manual do utilizador da máquina automática, digitando os comandos “m3s1” para início e “m5” para fim do procedimento.
10. Realizar o procedimento de soldadura controlando a movimentação da máquina manualmente (botões de movimentação) ou por meio da leitura e transmissão de um programa em código de comando numérico.

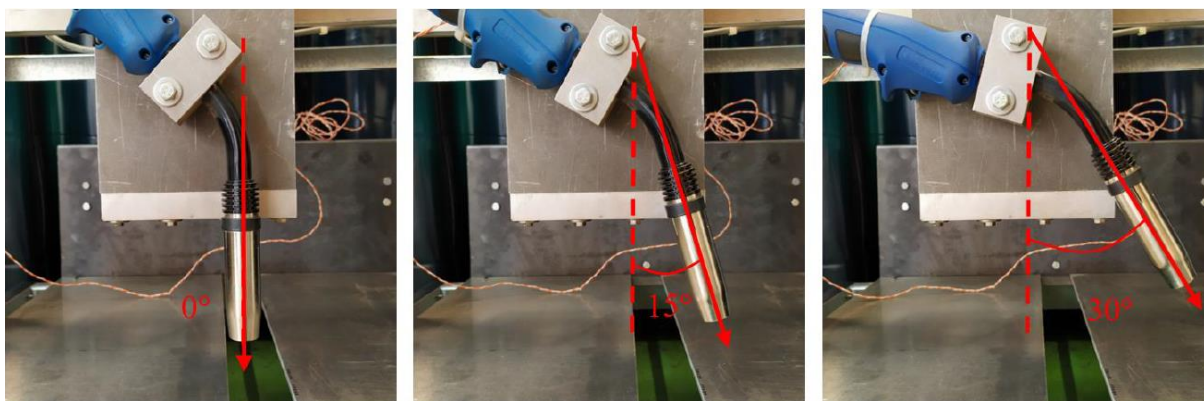


Figura 41 - Ângulos de tocha utilizados para o estudo [31].

Nos experimentos de soldadura realizados no presente trabalho, a velocidade do fio foi ajustada entre 3 e 3,5 metros por minuto, sendo regulada diretamente no alimentador de arame Electrex AF 43.2, conforme recomendado no manual do utilizador da máquina de soldadura automática [105]. A pressão do gás de soldadura foi fixada em 200 bar, com um caudal aproximado de 18 litros por minuto. Estes parâmetros foram mantidos constantes ao longo de toda a soldadura dos corpos de prova. A Tabela 18 apresenta um resumo dos parâmetros regulados.

Tabela 18 - Parâmetros fixos de soldadura utilizados no procedimento.

Parâmetro	Valor	Unidade	Equipamento
Velocidade do fio	3,0 – 3,5	m/min	Alimentador de arame Electrex AF 43.2
Pressão do gás	200	bar	Cilindro de gás Linde Corgon 18
Caudal do gás	18	L/min	Cilindro de gás Linde Corgon 18

7.4 Fabrico dos corpos de prova

O formato dos corpos de prova foi determinado seguindo as diretrizes dos testes de soldabilidade a serem realizados. A chapa-base do aço possuía dimensões 1400 mm x 1000 mm x 3 mm. No entanto, a parte disponível para o trabalho foi a metade da chapa original, ou seja, um retângulo medindo 1400 mm x 500 mm x 3 mm, que foi cortado na guilhotina hidráulica Guifil Mini 320, localizada no Laboratório de Tecnologia Mecânica da ESTiG.

Conforme citado no Capítulo 6, os testes de soldabilidade que foram realizados neste trabalho corresponderam aos ensaios destrutivos de tração, de flexão e de análise macrográfica, assim como, aos não destrutivos de dureza.

A nomenclatura escolhida para os corpos de prova respeitou o padrão CP-X-n-Na, onde as variáveis são os caracteres “X”, que pode ser D (para ensaios de dobramento), T (para ensaios

de tração) ou DA (ensaios de dureza e análise macrográfica). O valor “n” corresponde às combinações de parâmetros 1 a 9, estabelecidas na matriz L9 de Taguchi. Por fim, o valor “a” pode ser 0, 1 ou 2, e corresponde à qual repetição da combinação ele corresponde, sendo 0 o espécime original, 1 à sua repetição e 2 à segunda.

Por exemplo, um corpo de prova de nomenclatura “CP-D-3-N1” corresponde a um espécime que será destinado ao ensaio de dobramento, o qual foi soldado com a terceira combinação de parâmetros, na segunda repetição – representada por N1.

Seguindo as determinações das normas específicas para cada um dos ensaios, os corpos de prova foram fabricados da seguinte maneira:

7.4.1 Corpos de prova para ensaio de Flexão

Para o ensaio de flexão, respeitando as proporções de 8:1 descritas na norma ASTM E290, a dimensão definida para os corpos de prova foi de 16 cm de comprimento e 2 cm de largura. Para isso, a foi utilizada guilhotina hidráulica. Foram fabricados 27 corpos de prova para serem utilizados no ensaio de flexão, dos quais, nove estão representados na Figura 42 abaixo.

Para a realização dos cordões de solda, os corpos de prova foram divididos ao meio na guilhotina (Figura 43) e unidos novamente pela soldadura, para posterior realização dos ensaios.

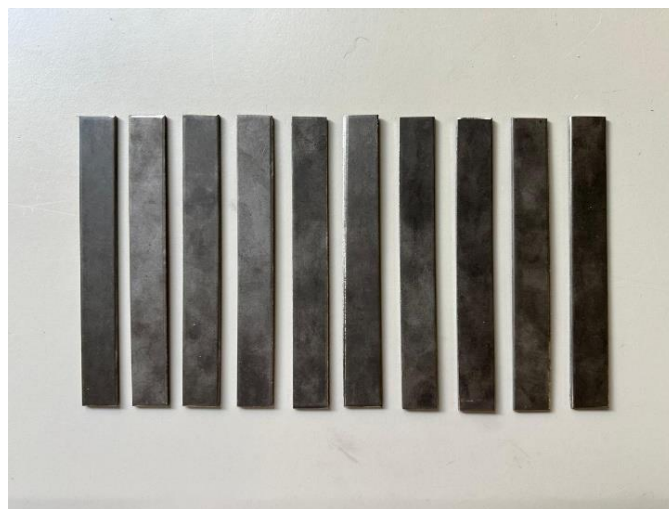


Figura 42 - Corpos de prova para ensaio de dobramento – 16 x 2 cm.



Figura 43 - Exemplo de corpo de prova para ensaio de dobramento.

Como foram utilizadas nove combinações de parâmetros de soldadura, com uma repetição de três vezes cada (chamadas de N0, N1 e N2), para aumentar o rigor estatístico do estudo, foram obtidas 27 amostras deste modelo, sendo representadas nas Figuras 44, 45 e 46.



Figura 44 - Corpos de prova CP-D-1-N0 ao CP-D-9-N0.

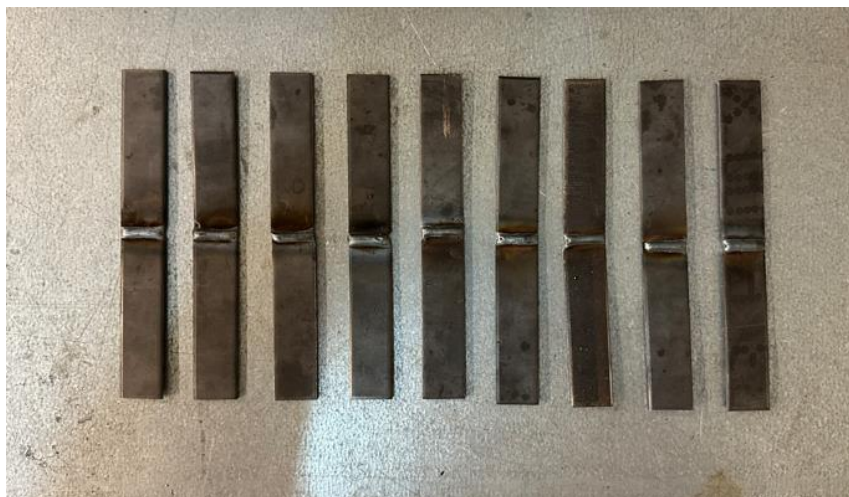


Figura 45 - Corpos de prova CP-D-1-N1 ao CP-D-9-N1.



Figura 46 - Corpos de prova CP-D-1-N2 ao CP-D-9-N2.

Como citado na Secção 6.1.3 do presente trabalho, a norma ISO 5173:2023 recomenda que, neste caso, o excesso de material do cordão de soldadura seja removido, de modo que o apoio central do ensaio de flexão (ou dobramento) mantenha sua posição sem deslizar para outra localização na amostra, comprometendo os resultados. Para isso, foi utilizado o Esmerilador de Bancada localizado no Laboratório de Tecnologia Mecânica do IPB.

Os corpos de prova finalizados com o cordão desbastado e remoção de excessos, que, posteriormente, foram submetidos ao ensaio de flexão, estão representados nas Figuras 47, 48 e 49.



Figura 47 - Corpos de prova CP-D-1-N0 ao CP-D-9-N0 finalizados.



Figura 48 - Corpos de prova CP-D-1-N1 ao CP-D-9-N1 finalizados.



Figura 49 - Corpos de prova CP-D-1-N2 ao CP-D-9-N2 finalizados.

7.4.2 Corpos de prova para ensaio de Tração

Os corpos de prova destinados ao ensaio de tração foram fabricados seguindo algumas etapas, sendo a primeira delas, o corte de uma chapa de dimensões 20 x 30 cm utilizando a mesma guilhotina hidráulica dos provetes anteriores. Desta chapa, foi possível obter 10 chapas retangulares de dimensões 20 x 3 cm conforme Figura 50 abaixo.

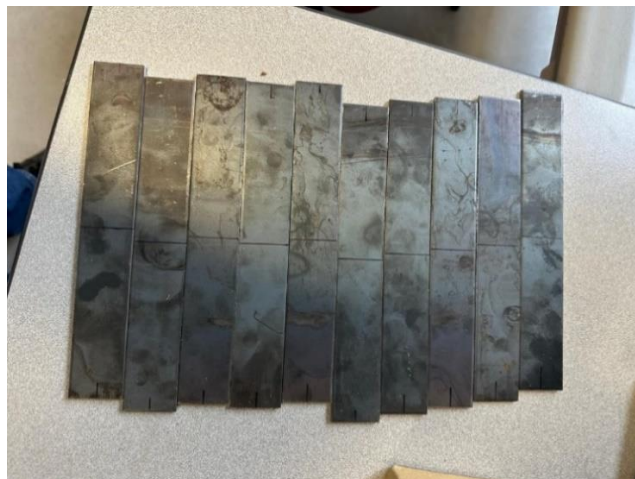


Figura 50 - Corpos de prova antes de receberem seu formato na prensa hidráulica.

O formato "dogbone" dos corpos de prova foi obtido por meio do corte realizado com a prensa hidráulica Montech LP 3000 Laboratory Press, localizada no Laboratório de Estruturas e Resistência de Materiais (LERM) da ESTiG.

A prensa hidráulica é, geralmente, utilizada para prensagem de materiais com controle de temperatura e menor carga, em processos que exigem longos períodos de compressão, como a fabricação de materiais isolantes a partir de madeira e cortiça, além da secagem de misturas de resinas. No entanto, para este trabalho, a máquina foi utilizada de forma distinta, aplicando uma carga maior por um curto intervalo de tempo.

Com o auxílio de uma matriz de punção, a prensa pôde funcionar como uma máquina de corte a frio, garantindo o formato necessário para os corpos de prova. Essa adaptação permitiu a obtenção de cortes precisos e padronizados, garantindo a uniformidade nas amostras. A prensa hidráulica Montech LP 3000 está retratada na Figura 51, assim como os principais elementos presentes na fabricação dos corpos de prova.



Figura 51 - Prensa hidráulica Montech LP 3000, incluindo: (1) Botão de alimentação; (2) Botões de controle do movimento; (3) Botão de emergência; (4) Painel digital de controle; (5) Carro móvel; (6) Matriz de punção; (7) Mesa fixa; (8) Barreira de proteção.

A matriz de punção utilizada está retratada abaixo, na Figura 52. Esta, é um molde construído especificamente para corte e fabricação de corpos de prova com espessura de 3 mm que serão destinados a ensaios de tração. As dimensões obtidas respeitam as normas que regulamentam estes ensaios.

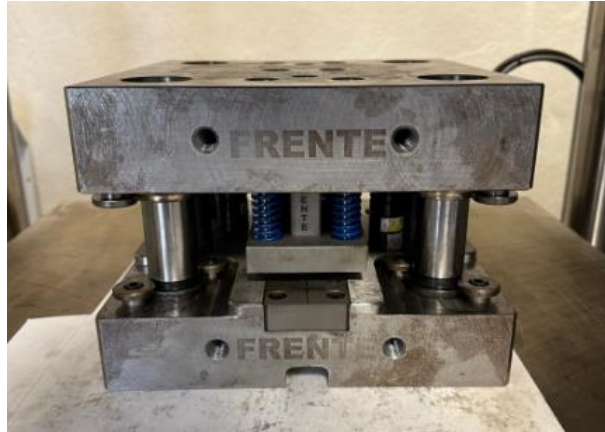


Figura 52 - Matriz de punção utilizada para obter o formato desejado dos corpos de prova.

O processo seguiu as seguintes etapas principais: posicionamento das chapas de aço no centro da matriz de punção; aplicação da força na prensa para realizar o corte conforme o formato desejado; remoção dos corpos de prova cortados; verificação das dimensões e acabamento superficial quando necessário.

A força regulada na máquina neste caso foi de 350 kN, respeitando as características e a espessura do material e da força nominal da prensa. Esta força é aplicada pela máquina e transferida através da matriz de punção, até a realização do corte da chapa no formato desejado.

O gráfico da Figura 53, foi gerado pelo software integrado à máquina, é possível notar que a carga máxima utilizada ao atingir o corte foi em média 340 kN, o que nos permite concluir que a seleção de carga para esta aplicação foi a correta, visto que não foi necessária uma sobrecarga do equipamento, assim como, a não ocorrência de nenhuma danificação do material.

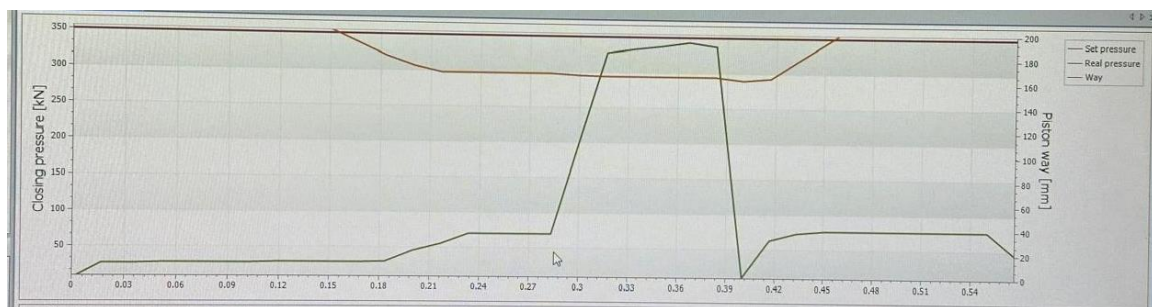


Figura 53 - Pressão durante o corte na prensa hidráulica.

Os 10 corpos de prova no formato “dogbone” fabricados estão representados na Figura 54. Assim como os espécimes destinados ao ensaio de flexão, para a realização dos cordões de solda, estes corpos de prova foram divididos ao meio com o uso da guilhotina e, posteriormente, unidos novamente pelas nove combinações de parâmetros de soldadura, para realização dos ensaios.

No caso deste formato e tipo de ensaio, a repetição tripla de medições não pôde ser realizada devido à fragilidade do molde de corte, que não suportaria o processo repetitivo sem

risco de ruptura, comprometendo a integridade das amostras e a segurança durante a preparação dos corpos de prova.



Figura 54 - Corpos de prova para ensaio de tração.

As dimensões dos corpos de prova confeccionados são as seguintes, indicadas na Figura 55:

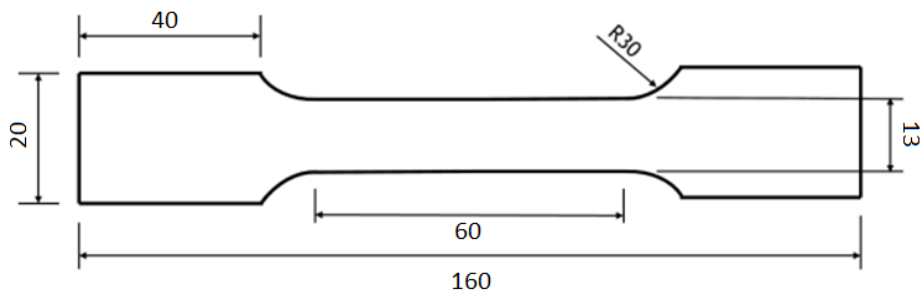


Figura 55 - Dimensões dos corpos de prova.



Figura 56 - Exemplo de corpo de prova para ensaio de tração.

Os corpos de prova do tipo CP-T finalizados após a soldadura encontram-se na Figura 57 a seguir.



Figura 57 - Corpos de prova CP-T-1-N0 ao CP-T-9-N0.

Ainda que a norma também recomende o desbaste do excesso do cordão de solda destes corpos de prova, neste caso o mesmo não foi realizado devido à não-necessidade e à pouca ou quase nenhuma interferência no resultado final do ensaio de tração.

7.4.3 Corpos de prova para ensaios de Análise Macrográfica e Dureza

Para os ensaios de análise macrográfica e de dureza Rockwell, serão utilizados corpos de prova de mesma origem. Estes, foram realizados conforme sequência a seguir.

Utilizando a guilhotina hidráulica, três chapas de 18 x 18 cm foram cortadas, visando obter 9 corpos de prova de dimensões 6 x 6 cm em cada uma delas, conforme divisão projetada a seguir, na Figura 58:

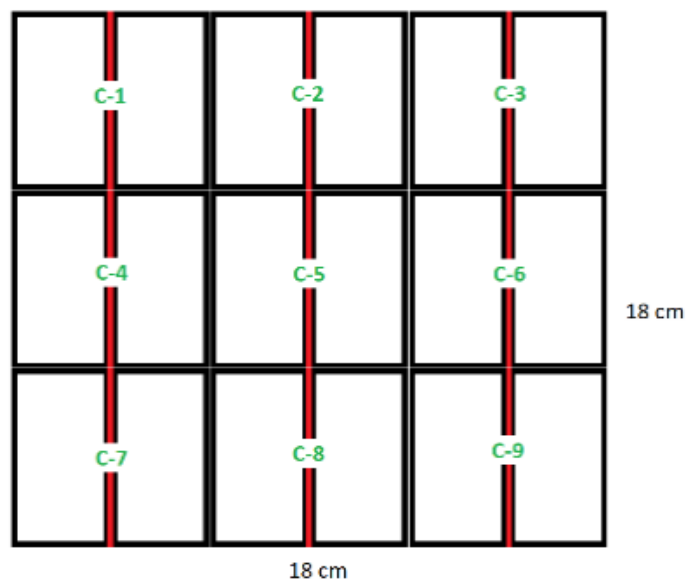


Figura 58 - Divisão de uma chapa em 9 corpos de prova para soldadura.

A guilhotina hidráulica foi utilizada em um segundo momento para dividir estas chapas em três retângulos menores de 18 x 6 cm e, posteriormente, em nove quadrados de dimensões 6 x 6 cm, os quais foram novamente cortados ao meio, de maneira retratada na Figura 59. Foram fabricados um total de 27 corpos de prova neste padrão.



Figura 59 - Corpos de prova para ensaios não-destrutivos.

Estes espécimes foram unidos novamente por meio de soldadura, com as 9 combinações diferentes de parâmetros descritas na Secção 7.2, com repetições de três vezes para cada combinação, para análise e comparação, conforme retratados nas Figuras 60, 61 e 62.

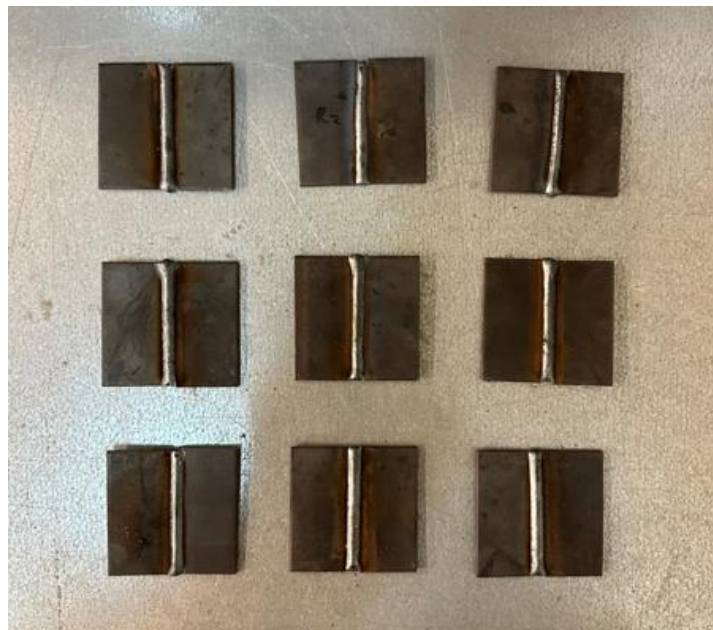


Figura 60 - Corpos de prova CP-DA-1-N0 ao CP-DA-9-N0.

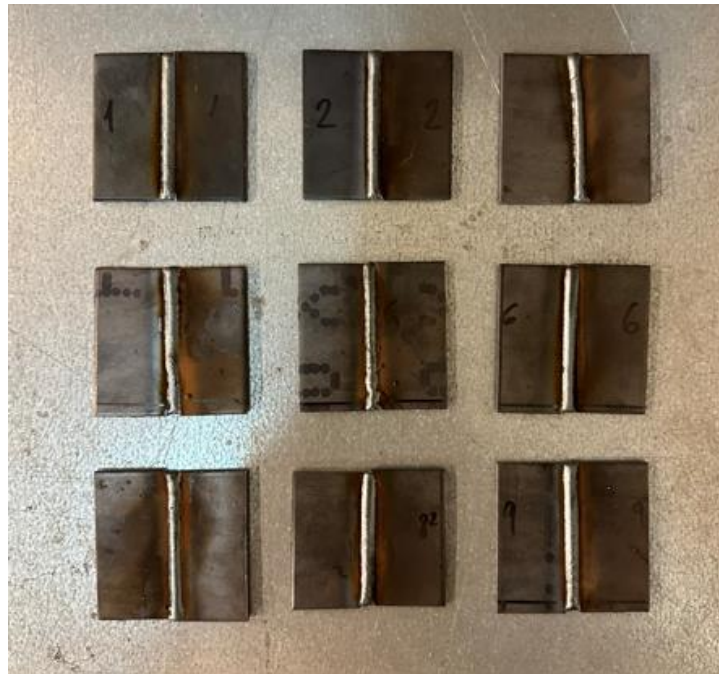


Figura 61 - Corpos de prova CP-DA-1-N1 ao CP-DA-9-N1.



Figura 62 - Corpos de prova CP-DA-1-N2 ao CP-DA-9-N2.

Estes corpos de prova foram utilizados para a medição da dureza HRC mas, além disso, foram reaproveitados para terem pequenas amostras retiradas de seus cordões de solda para embutimento e, posterior, realização da análise macrográfica.

A preparação para embutimento foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção Mecânica do IPB (LMCM), onde está disponível o maquinário para tal, sendo este, em ordem de processo, descrito na Tabela 19 abaixo.

Tabela 19 - Maquinário utilizado para o embutimento.

Processo	Máquina
Corte resfriado por água	Máquina de corte Struers Labotom
Embutimento	Máquina de embutimento Struers LaboPress-1
Lixamento	Máquina de polimento Struers LaboPol-25

A máquina de corte de mesa com disco abrasivo foi utilizada para realização dos cortes perpendiculares, da maneira representada na Figura 63 e estes, posteriormente, foram embutidos em baquelite. A principal vantagem associada à utilização deste tipo de maquinário é o fato de que o processo de corte é refrigerado por meio de um jato de água, o que elimina a geração de calor e, conseqüentemente, evita alterações na microestrutura do material.

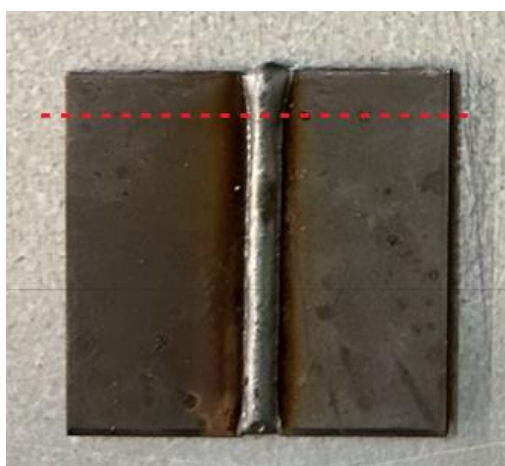


Figura 63 - Indicação do corte realizado nas amostras.

Após a realização do corte, as amostras foram submetidas ao processo de embutimento. Foram colocadas 3 amostras do cordão de solda no pistão da máquina de embutimento e recobertas de pó de baquelite. As amostras permaneceram a 180 °C sob uma força de 35 kN por cerca de 10 minutos. Este processo foi repetido por nove vezes, totalizando os 27 corpos de prova. As amostras embutidas foram resfriadas com água corrente por, aproximadamente, 3 minutos cada.

A seguir, após este processo, as amostras foram submetidas ao processo de lixamento, para garantir a uniformidade e exibição completa da vista transversal dos cordões de soldadura. As lixas utilizadas foram de granulometria 180, 320, 600, 800 e 1200, da menor para a maior, respeitando a ordem e, em alguns casos, com o auxílio de pequenas gotas de água.

Por fim, no processo de finalização, as amostras foram resfriadas novamente em água corrente, lavadas e secas. O espectro final dos corpos de prova para análise macrográfica encontra-se na Figura 64 a seguir.

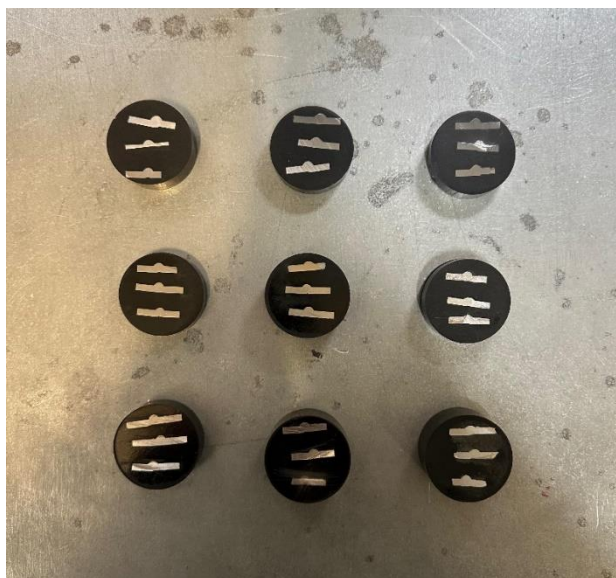


Figura 64 - Amostras do cordão de solda embutidas.

7.5 Identificação dos corpos de prova

Os corpos de prova fabricados foram todos identificados com as devidas nomenclaturas, numeração de 1 a 9, e identificação da repetibilidade N0, N1 ou N2, para que seja facilitada a separação e organização dos mesmos na realização dos ensaios.

Os experimentos de soldadura foram realizados respeitando a seguinte ordem, com suas nomenclaturas representadas por: CP-D (destinados a ensaios de flexão), CP-T (destinados a ensaios de tração), e CP-DA (destinados a ensaios de dureza e análise macrográfica).

A seguir, na Tabela 20, estão descritos e identificados os parâmetros de soldadura a serem utilizados nos corpos de prova destinados ao ensaio de flexão, assim como as nomenclaturas utilizadas. Em seguida, a Tabela 21 segue o mesmo padrão, identificando os corpos de prova submetidos ao ensaio de tração e as configurações. Por fim, a Tabela 22 referencia os espécimes destinados aos ensaios de dureza Rockwell e análise macrográfica, assim como, os parâmetros de soldadura utilizados no procedimento.

Tabela 20 - Parâmetros e identificação dos corpos de prova soldados para ensaio de flexão.

Corpos de Prova para Ensaio de Flexão						
Nº	Parâmetros utilizados			Nomenclatura		
	Tensão [V]	Vel. de Soldadura [mm/min]	Ângulo da tocha [°]			
1	22,4	200	0	CP-D-1-N0	CP-D-1-N1	CP-D-1-N2
2	22,4	300	15	CP-D-2-N0	CP-D-2-N1	CP-D-2-N2
3	22,4	400	30	CP-D-3-N0	CP-D-3-N1	CP-D-3-N2
4	23,3	200	15	CP-D-4-N0	CP-D-4-N1	CP-D-4-N2
5	23,3	300	30	CP-D-5-N0	CP-D-5-N1	CP-D-5-N2
6	23,3	400	0	CP-D-6-N0	CP-D-6-N1	CP-D-6-N2
7	24,1	200	30	CP-D-7-N0	CP-D-7-N1	CP-D-7-N2
8	24,1	300	0	CP-D-8-N0	CP-D-8-N1	CP-D-8-N2
9	24,1	400	15	CP-D-9-N0	CP-D-9-N1	CP-D-9-N2

Tabela 21 - Parâmetros e identificação dos corpos de prova soldados para ensaio de tração.

Corpos de Prova para Ensaio de Tração				
Nº	Parâmetros utilizados			Nomenclatura
	Tensão [V]	Vel. de Soldadura [mm/min]	Ângulo da tocha [°]	
1	22,4	200	0	CP-T-1-N0
2	22,4	300	15	CP-T-2-N0
3	22,4	400	30	CP-T-3-N0
4	23,3	200	15	CP-T-4-N0
5	23,3	300	30	CP-T-5-N0
6	23,3	400	0	CP-T-6-N0
7	24,1	200	30	CP-T-7-N0
8	24,1	300	0	CP-T-8-N0
9	24,1	400	15	CP-T-9-N0

Tabela 22 - Parâmetros e identificação dos corpos de prova soldados para ensaios de dureza e análise macrográfica.

Corpos de Prova para Ensaios de Dureza e Análise Macrográfica						
Nº	Parâmetros utilizados			Nomenclatura		
	Tensão [V]	Vel. de Soldadura [mm/min]	Ângulo da tocha [°]			
1	22,4	200	0	CP-DA-1-N0	CP-DA-1-N1	CP-DA-1-N2
2	22,4	300	15	CP-DA-2-N0	CP-DA-2-N1	CP-DA-2-N2
3	22,4	400	30	CP-DA-3-N0	CP-DA-3-N1	CP-DA-3-N2
4	23,3	200	15	CP-DA-4-N0	CP-DA-4-N1	CP-DA-4-N2
5	23,3	300	30	CP-DA-5-N0	CP-DA-5-N1	CP-DA-5-N2
6	23,3	400	0	CP-DA-6-N0	CP-DA-6-N1	CP-DA-6-N2
7	24,1	200	30	CP-DA-7-N0	CP-DA-7-N1	CP-DA-7-N2
8	24,1	300	0	CP-DA-8-N0	CP-DA-8-N1	CP-DA-8-N2
9	24,1	400	15	CP-DA-9-N0	CP-DA-9-N1	CP-DA-9-N2

7.6 Realização dos testes de soldabilidade

7.6.1 Ensaios de Flexão

Os ensaios de flexão foram realizados no Laboratório de Estruturas e Resistência de Materiais (LERM) da ESTiG, de acordo com as normas ISO 5173:2023 “Testes destrutivos em soldas de materiais metálicos - Testes de flexão” e ASTM E290-22 “Métodos de teste padrão para teste de flexão de materiais”.

A realização dos ensaios ocorreu através do uso da máquina universal de ensaios Shimadzu AGS-X 10 kN, retratada na Figura 65 abaixo, com capacidade de exercer até 10 kN de força. A máquina foi configurada de maneira própria para este tipo de ensaio, com três apoios, visando o dobramento máximo dos corpos de prova que permitiu avaliar os valores máximos de Resistência à Flexão (N/mm², ou MPa).

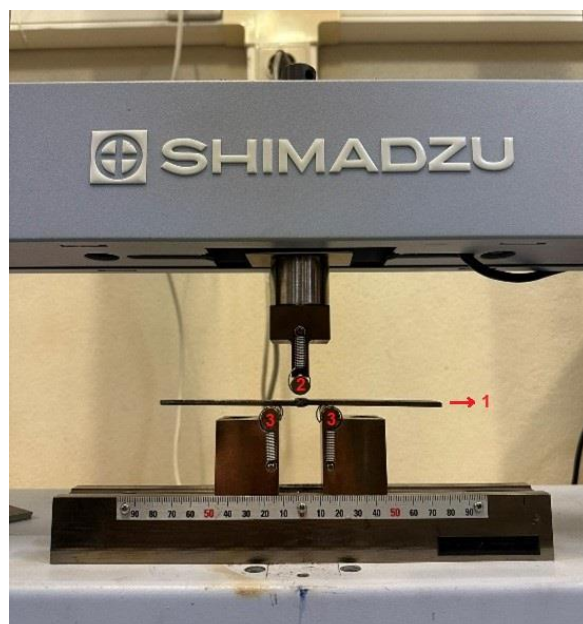


Figura 65 - Equipamento utilizado para o ensaio de flexão, incluindo: (1) Corpo de prova, colocado sobre os suportes de apoio; (2) Célula de carga, responsável pela medição da força aplicada; (3) Suportes de apoio, que sustentam o espécime durante o teste.

A velocidade utilizada para realização do teste foi de 10 mm/min, visto que as norma ISO 5173 e ASTM E290 não determinam um valor específico, apenas citam que “a velocidade do teste deve ser constante e registrada quando conhecida” [66].

No ensaio, foram utilizados três apoios circulares com raio de 5 mm cada, e a distância “C” entre os dois apoios inferiores foi de 30,5 mm, calculada com base na equação a seguir descrita na norma ASTM E290, sendo “r” o raio dos apoios e “t” a espessura da chapa utilizada:

$$C = (2r + 3t) \pm \frac{t}{2}$$

Uma pré carga de 1 N foi utilizada para garantir que o ensaio fosse iniciado no momento em que houvesse contato entre o apoio central (aplicador) e o corpo de prova. O limite de deslocamento para realização do ensaios foi estipulado como 14,6 mm para que não houvesse choque entre o corpo de prova deformado com o apoio central, desregulando os parâmetros de ensaio.

Os 27 provetes foram ensaiados na máquina de ensaios até o limite de deslocamento descrito anteriormente. Na Figuras 66 e 67 é possível visualizar o resultado de um dos ensaios onde o resultado foi satisfatório e permitiu avaliar a resistência de um cordão de soldadura feito corretamente, em que não houve a ruptura nem a formação de trincas.

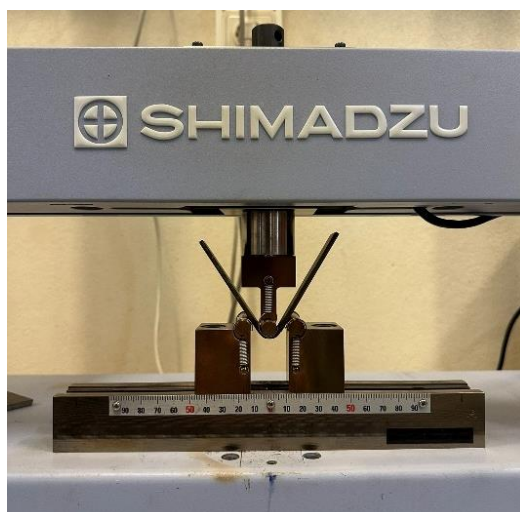


Figura 66 - Ensaio realizado até o limite máximo estipulado.



Figura 67 - Corpo de prova após o ensaio de flexão.

Após cada ensaio, os dados foram registrados pelo sistema de aquisição da máquina e, posteriormente, exportados como relatório gráfico de Força (N) x Deslocamento (mm) via “.pdf” e também via “.xls”, onde puderam ser tratados no Microsoft Excel e, por fim, ensaminhados ao software Minitab 21 onde foi determinada a análise de variância.

7.6.2 Ensaios de Tração

Os ensaios de tração também foram realizados no Laboratório de Estruturas e Resistência de Materiais (LERM) da ESTiG, seguido as diretrizes das normas EN ISO 4163:2012 de “Ensaio de tração transversal para solda em materiais metálicos” e EN ISO 6892-1:2009 que diz respeito à “Configuração e realização de ensaios de tração em materiais metálicos à temperatura ambiente”.

Neste tipo de ensaio em provetes de juntas soldadas, o resultado fornecido contém o limite de resistência da junta e o local onde ocorreu a fratura do corpo de prova. Logo, não foram realizadas marcações visando obter o percentual de alongamento após a ruptura.

O maquinário utilizado foi a máquina universal de ensaios Shimadzu AGS-X 100 kN, com capacidade de exercer até 100 kN de força.

A velocidade de ensaio utilizada na realização destes testes foi de 2,54 mm/min. Neste ensaio, não foi utilizada pré-carga. É válido citar que, essa escolha se deu devido a já existir uma pré-carga de cerca de 60 N, chamada de carga de aperto, correspondente ao peso dos provetes, que foram presos nas garras fixadoras.

Os provetes preparados previamente foram ensaiados na máquina até a sua ruptura. Na Figura 68 está representado o corpo de prova instalado na máquina, antes da realização do ensaio, bem como, os principais componentes envolvidos.

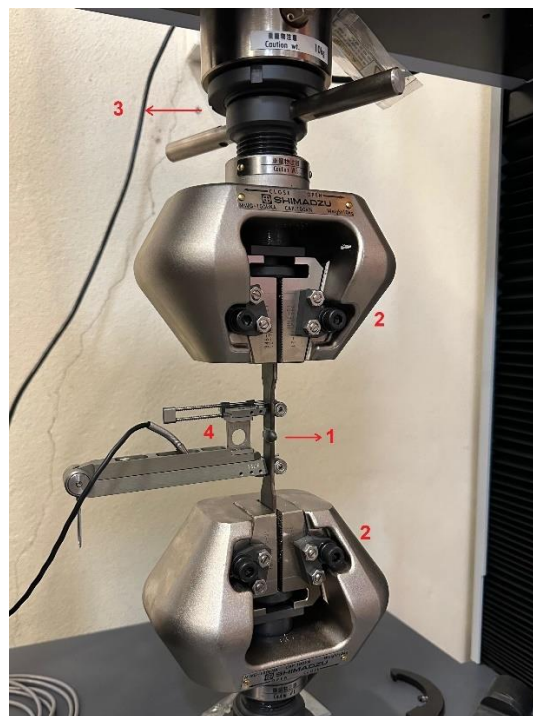


Figura 68 – Início do ensaio de tração, incluindo: (1) Corpo de prova; (2) Garras ou mordentes, que seguram as extremidades do espécime de teste; (3) Célula de carga, responsável pela medição da força aplicada; (4) Extensômetro, responsável por medir o alongamento do corpo de prova.

A seguir, na Figura 69, é possível visualizar o resultado de um dos ensaios onde a ruptura ocorreu fora do cordão de solda, um fator que atesta a integridade desta junta soldada.



Figura 69 – Final do ensaio de tração em junta soldada, com destaque para a região onde ocorreu a ruptura.

Após os ensaios, os dados foram recolhidos pelo sistema de aquisição da máquina e exportados em formatos gráficos de Força (N) x Deslocamento (mm) nos formatos “.pdf” e “.xls”. Posteriormente, foram tratados e organizados no Microsoft Excel e, na sequência, submetidos ao software Minitab 21 para a determinação da análise de variância.

Na Figura 70, estão registrados os corpos de prova após a realização dos ensaios, o que nos permite analisar os locais onde ocorreu a ruptura e uma sinalização do desempenho das juntas soldadas.



Figura 70 - Corpos de prova após os ensaios de tração.

7.6.3 Ensaio de Dureza Rockwell

Seguindo a regulamentação das normas ASTM E18 "Métodos normatizados para a dureza Rockwell e a dureza superficial Rockwell de materiais metálicos" e ISO 6508-1:2023 "Materiais metálicos - Ensaio de dureza Rockwell - Parte 1: Método de ensaio", os ensaios de Dureza Rockwell foram realizados.

A máquina utilizada para as medições foi a Brevetti Affri 206 RT. O equipamento está localizado no Laboratório de Metrologia, situado dentro do Laboratório de Tecnologia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTiG). O indentador utilizado foi um cone de diamante com ângulo de 120°, apropriado para medições de dureza Rockwell HRC.

Seguindo as diretrizes normativas, a máquina foi regulada para aplicar uma carga principal de 150 quilograma-força nas medições, além da pré-carga. Em cada um dos 27 corpos de prova preparados para este ensaio, foram realizadas 3 medições em diferentes partes do cordão, sendo assim, possível o cálculo da média entre as três medições para gerar o dado da dureza HRC da soldadura da amostra. Na Figura 71, está registrado o procedimento de medição de dureza.

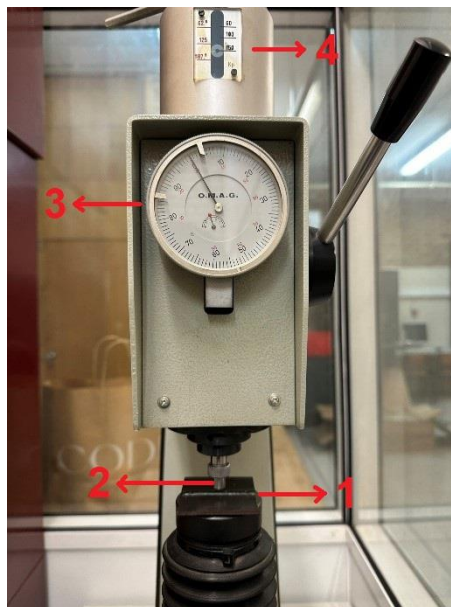


Figura 71 - Medição de dureza Rockwell no cordão de solda, incluindo: (1) Amostra a ter sua dureza medida; (2) Indentador de diamante; (3) Escala de leitura do resultado; (4) Regulador de carga, ajustado para 150 kgf.

Os resultados foram registrados, tratados e organizados em uma planilha no Microsoft Excel e, posteriormente, inseridos no software Minitab 21 para a realização da análise de variância.

7.6.4 Análise macrográfica

A medição do perfil do cordão de solda dos corpos de prova embutidos foi realizada no FabLab do Instituto Politécnico de Bragança, com o auxílio do microscópio Veho VMS-005-LCD. A aquisição dos dados foi realizada pelo software PortableCapture Pro, instalado em um dos computadores do laboratório.

A quantidade de corpos de prova embutidos destinados à análise macrográfica foi de 9 peças contendo 3 amostras em cada um, totalizando 27 corpos de prova analisados. As medições realizadas em cada um deles foram dos parâmetros de reforço (R), largura (L) e penetração (P), da maneira indicada na Figura 72 abaixo.

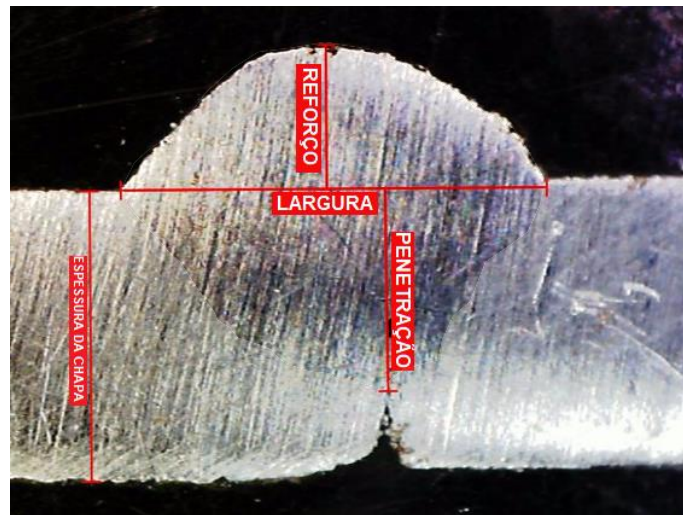


Figura 72 - Medições realizadas nas amostras.

Cada perfil teve uma imagem obtida por vez, visto que cada amostra embutida contém três amostras de cordão de solda. Os corpos de prova foram posicionados no suporte do microscópio e o foco da lente ajustado até que a resolução ficasse nítida, assim, possibilitando a obtenção da imagem. Depois, o software foi calibrado com o auxílio de um paquímetro graduado, que possibilitou criar valores de referência e de comprimento para as medições na ampliação utilizada.

Os dados foram registrados em uma planilha no Microsoft Excel e, em seguida, transferidos para o software Minitab 21, onde foi realizada a análise de variância.

7.7 Tratamento dos dados

Os dados obtidos nos processos citados anteriormente foram tratados da maneira a serem utilizados e analisados pelo método de Taguchi. Para cada combinação de parâmetros nos

experimentos, deve ser calculada a sua respectiva razão sinal-ruído, descrita na Secção 7.7. Esta, leva em conta o objetivo pelo qual a otimização será feita.

Para a propriedade de resistência à flexão obtida nos ensaios de flexão, o objetivo é avaliar o desempenho do cordão pela combinação que possui o maior valor para esta propriedade mecânica. Assim, a expressão “maior é melhor” será aplicada neste caso. O mesmo pode ser aplicado nos ensaios de tração, em que a propriedade avaliada é o limite de resistência à tração.

A expressão “nominal é melhor” é utilizada nas medições de dureza Rockwell, onde o objetivo é encontrar combinações com valores próximos a 25 HRC, equilibrando resistência mecânica e tenacidade, evitando tanto a fragilização da solda quanto a falta de resistência.

No caso das medidas de análise macrográfica, a abordagem é diferente. Para o reforço, espera-se que a sua altura seja a mínima possível, visando que o mesmo esteja no nível da superfície da chapa. Logo, a expressão “menor é melhor” será utilizada para o cálculo destes valores de sinal-ruído.

Para as medições de largura e penetração, a expressão “nominal é melhor” deve ser aplicada, pois ambos possuem uma resposta alvo de 3 mm, que é a mesma dimensão da espessura da chapa que foi soldada.

Como citado anteriormente, haviam nove combinações de três parâmetros diferentes a serem avaliados (tensão, velocidade e ângulo de soldadura) em três níveis cada um. Estes, foram substituídos pelas siglas A (tensão), B (velocidade) e C (ângulo de soldadura) e níveis 1, 2 e 3, respectivamente. A matriz ortogonal adaptada para fins de cálculo está retratada abaixo na Tabela 23.

Tabela 23 - Matriz ortogonal adaptada para fins de cálculo.

Nº do Ensaio	Matriz 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

Em conjunto com o método de Taguchi, foi utilizado o modelo linear geral de análise de variância (ANOVA). Este modelo foi executado recorrendo ao software Minitab 21, que,

através da análise, permitiu que fosse determinada a influência de cada parâmetro no resultado final da soldadura para cada propriedade estudada, bem como, estabelecer a combinação ótima destes parâmetros para se obter os melhores valores de resistência à flexão, resistência à tração, dureza Rockwell C, reforço, largura e penetração.

8 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo do trabalho tem como objetivo apresentar os resultados obtidos através da metodologia desenvolvida na secção anterior. Os resultados serão apresentados em forma de tabelas e gráficos, que serão complementares aos fatos e análises discutidas no decorrer do estudo. Nos ensaios em que houve repetibilidade de medições para diferentes amostras da mesma combinação de parâmetros, estes serão indicados nas tabelas como N0, N1 e N2.

A presente secção será apresentada na ordem de acordo com a apresentação dos ensaios realizados anteriormente: ensaios de flexão, tração, dureza e análise macrográfica (reforço, largura e penetração).

8.1 Ensaios de Flexão

Os valores obtidos para a propriedade de resistência à flexão dos corpos de prova ensaiados encontram-se na Tabela 24 abaixo, onde são apresentados os resultados das medições realizadas para cada uma das três amostras de cada uma das nove combinações de parâmetros.

Tabela 24 - Medições, média e razão sinal-ruído para a Resistência à Flexão.

Combinação	Resistência à Flexão [N/mm ²]			Média	S/N
	N0	N1	N2	[N/mm ²]	[dB]
1	1088,910	912,421	947,222	982,851	59,776
2	1098,700	997,159	834,564	976,808	59,626
3	955,569	521,688	378,354	618,537	54,069
4	1133,240	83,285	898,474	705,000	43,122
5	794,018	169,780	447,745	470,514	48,615
6	881,937	973,902	818,125	891,321	58,935
7	1054,610	519,897	49,722	541,410	38,653
8	911,527	932,590	966,114	936,744	59,425
9	900,540	949,351	972,308	940,733	59,456

Em relação à resistência à flexão, a equação “maior é melhor” foi utilizada. Entre as combinações testadas, a de número 1 foi a que apresentou a maior média para a propriedade e, conseqüentemente, o maior valor de S/N. A partir dos valores, esta abordagem permitiu que fossem realizados gráficos dos valores médios de sinal-ruído para cada nível e parâmetro, visando obter uma combinação ótima.

Tabela 25 - Razão S/N média para os níveis dos parâmetros de soldadura para a resistência à flexão.

Fator	S/N Média [dB]
A1	57,823
A2	50,224
A3	52,511
B1	47,184
B2	55,889
B3	57,487
C1	59,378
C2	54,068
C3	47,112

A seguir, na Figura 73 está representada a curva S/N médio de cada parâmetro para a resistência à flexão.

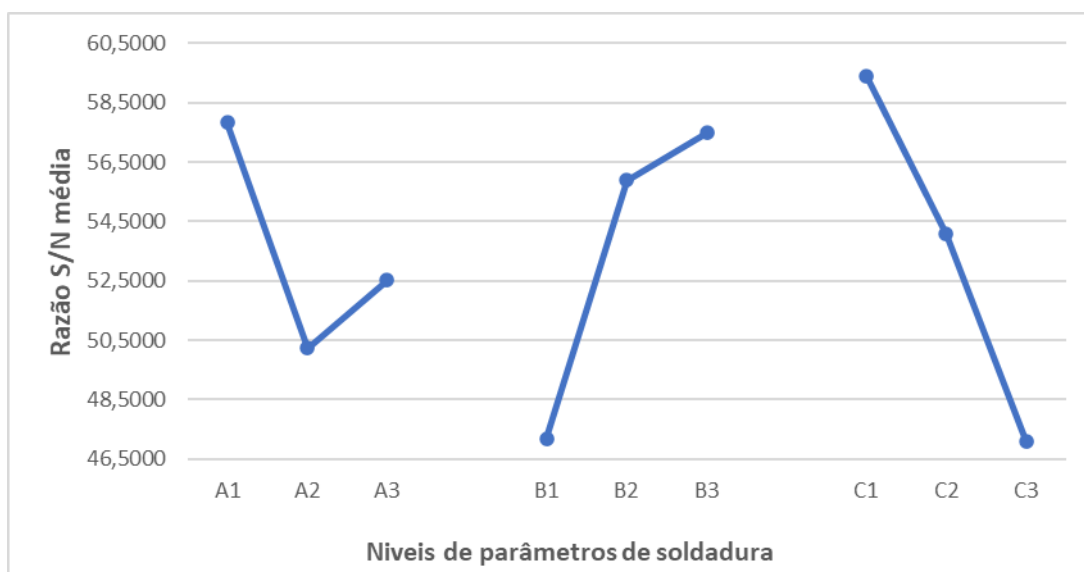


Figura 73 - Curva S/N médio de cada parâmetro para a resistência à flexão.

Razões sinal-ruído mais elevadas indicam os parâmetros e níveis com melhor desempenho. Assim, a seleção dos maiores valores de S/N no gráfico revela a potencial combinação ótima. No caso da resistência à flexão, a combinação ideal é A1B3C1, o que significa que maiores valores tendem a ser alcançados utilizando uma tensão de 22,4 V, velocidade de 400 mm/min e ângulo de 0° no processo de soldadura.

A influência dos parâmetros pôde ser obtida por meio da análise de variância ANOVA, realizada no software Minitab 21. Na Tabela 26, é possível verificar a contribuição da tensão, da velocidade de soldadura e do ângulo de ataque da tocha, obtida pelo modelo linear geral de análise de variância.

Tabela 26 - Análise de variância para obter a influência dos parâmetros na resistência à flexão.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	Contribuição
Tensão (A)	2	136.936	68.468	0,870	0,434	13,96%
Velocidade (B)	2	25.793	12.896	0,160	0,850	2,63%
Ângulo (C)	2	804.394	402.197	5,120	0,016	82,03%
Erro	2	13.475	6.737	0,080	0,925	1,37%
Total	8	980.598				100,00%

De acordo com a tabela de análise de variância, o parâmetro de entrada que mais influenciou na resistência à flexão dos corpos de prova foi o ângulo da tocha [°] contribuindo com 82,03%, seguido pela tensão [V] com 13,96% e a velocidade de soldadura [mm/min] com 2,63%.

8.2 Ensaios de Tração

Os valores obtidos para a propriedade de limite de resistência à tração dos corpos de prova ensaiados encontram-se na Tabela 27 abaixo, onde são apresentados os resultados das medições realizadas para cada uma das nove combinações de parâmetros estudadas.

Tabela 27 – Medições para a Resistência à Tração.

Combinação	Limite de Resistência à Tração [N/mm ²]
	N0
1	386,123
2	327,762
3	245,191
4	128,378
5	383,855
6	382,827
7	382,492
8	381,921
9	383,885

Neste caso, a repetibilidade dos ensaios de tração foi limitada devido às restrições do molde utilizado no fabrico dos corpos de prova. A matriz de punção, desenvolvida internamente no IPB, não pertence a nenhuma marca específica e foi projetada para atender às dimensões das chapas de 3 mm. No entanto, o seu uso repetitivo gera um risco de comprometimento estrutural, podendo resultar em danos que inviabilizariam a continuidade dos ensaios. Diante dessa

limitação, optou-se por realizar um único ensaio para cada uma das nove combinações testadas, garantindo a integridade do equipamento e a execução dos experimentos.

Sob esta circunstância, a ausência de repetibilidade nos ensaios inviabiliza a aplicação da razão sinal-ruído na análise dos dados. Este método estatístico requer repetições para que a variabilidade dos resultados possa ser analisada de forma confiável. Como cada condição experimental foi avaliada apenas uma vez, as medições para a propriedade de limite de resistência à tração são apenas indicativos, sem valor estatístico.

A Figura 74 apresenta o gráfico comparativo dos resultados obtidos para a propriedade de resistência à tração.

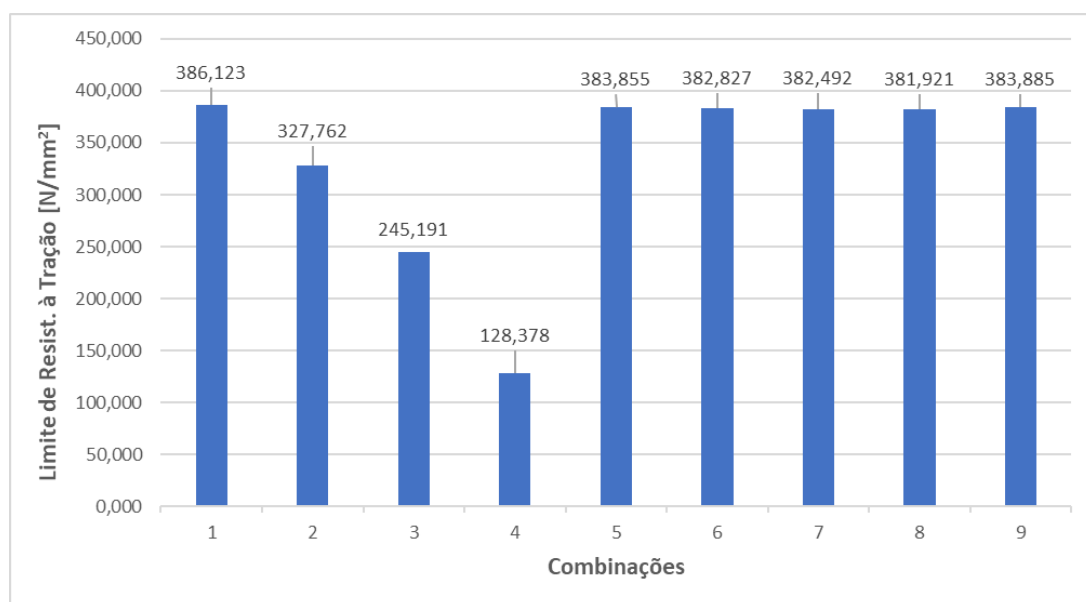


Figura 74 – Gráfico das medições para a resistência à tração obtidas nos ensaios.

A análise dos dados obtidos nestes ensaios revela uma variação significativa nos resultados de resistência à tração. A média geral foi de 333,603 N/mm², com um desvio padrão de 90,089 N/mm², indicando uma considerável dispersão nos valores. A combinação que apresentou maior valor para a propriedade foi a de número 1 (A1B1C1), que corresponde à tensão de 22,4 V, velocidade de 200 mm/min e ângulo de 0°, com um valor de 386,123 N/mm².

Outras combinações que também se destacaram são a 9 (A3B3C2), com tensão de 24,1 V, velocidade de 400 mm/min e ângulo de 15° (383,885 N/mm²) e a número 5 (A2B2C3) correspondente a 23,3 V de tensão, velocidade de soldadura de 300 mm/min e ângulo de 30° (383,855 N/mm²).

Esta análise sugere que a resistência à tração não apresenta uma tendência linear clara em relação aos parâmetros de tensão, velocidade de soldadura e ângulo de ataque. Embora a tensão

mais baixa (22,4 V) tenha gerado a maior resistência em uma combinação específica, a diferença entre os valores é muito baixa. Logo, não há uma consistência nos resultados em relação ao aumento de tensão, velocidade ou ângulo para esta quantidade de experimentos.

É possível observar que, em algumas condições, a velocidade de 200 mm/min e ângulos de 0° ou 30° favorecem os melhores desempenhos, indicando a complexidade da interação entre esses fatores e sua influência na resistência do material. Esses resultados apontam para a necessidade de uma análise mais aprofundada, com mais repetições para uma maior confiabilidade nas conclusões. Além disso, em estudos futuros seria importante avaliar a influência da intensidade de corrente de soldadura.

8.3 Ensaios de Dureza Rockwell

Os valores obtidos nos ensaios de dureza Rockwell para os corpos de prova soldados encontram-se na Tabela 28 abaixo, na qual são apresentados os resultados das medições realizadas para as três amostras correspondentes a cada uma das nove combinações de parâmetros.

Tabela 28 - Medições, média e razão sinal-ruído para a Dureza Rockwell C.

Combinação	Dureza Rockwell [HRC]			Média [HRC]	S/N
	N0	N1	N2		
1	27	23	25	24,94	22,561
2	29	29	20	26,00	15,747
3	28	25	26	26,44	27,361
4	22	21	23	21,83	30,884
5	21	16	21	19,44	18,030
6	36	22	22	26,50	11,917
7	25	18	23	21,89	17,760
8	22	22	25	23,00	24,224
9	28	18	16	20,67	11,903

Em relação à dureza Rockwell C, foi adotado o critério "nominal é melhor", uma vez que o objetivo é encontrar valores balanceados que minimizem a formação de martensite, garantindo ao mesmo tempo uma boa resistência mecânica. Entre as combinações avaliadas, a de número 1 teve a média mais próxima da resposta alvo (25 HRC). No entanto, a sua razão sinal-ruído não foi a melhor, devido à variação existente entre as medições. Com base nesses

resultados, podem ser elaborados gráficos que representem os valores médios de S/N para cada nível e parâmetro, auxiliando na identificação de uma combinação ideal.

Tabela 29 - Razão S/N média para os níveis dos parâmetros de soldadura para a Dureza Rockwell C.

Fator	S/N Média [dB]
A1	21,889
A2	20,277
A3	17,963
B1	23,735
B2	19,334
B3	17,060
C1	19,567
C2	19,511
C3	21,051

A Figura 75 abaixo apresenta a curva do S/N médio de cada parâmetro relacionado à Dureza Rockwell C.

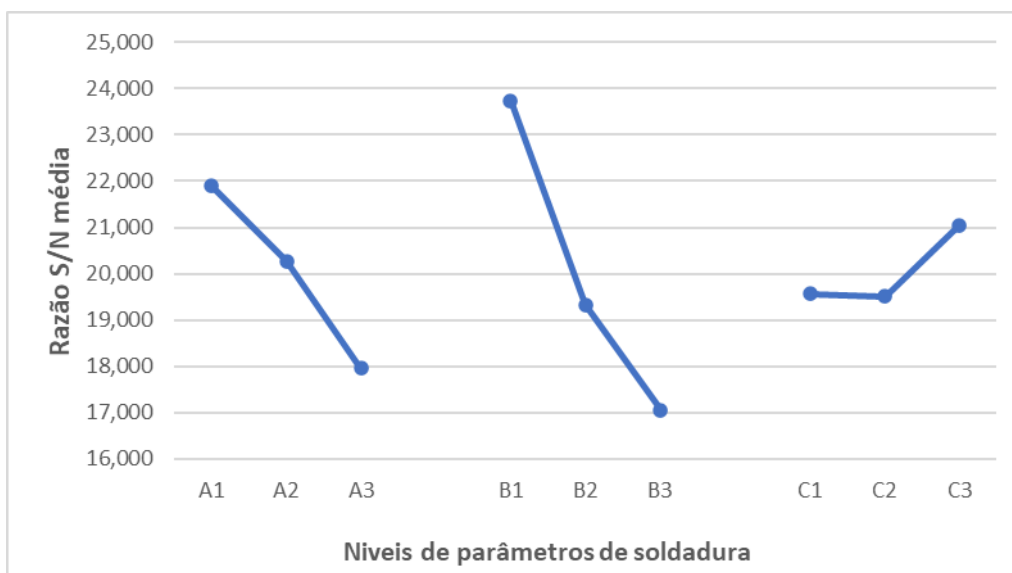


Figura 75 - Curva S/N médio de cada parâmetro para a Dureza Rockwell C.

Valores elevados de razão sinal-ruído indicam os parâmetros e níveis com melhor desempenho. Assim, a escolha dos maiores valores de S/N no gráfico revela a combinação mais eficaz. Para a Dureza Rockwell C, a potencial combinação ótima é A1B1C3, o que implica que os valores ótimos podem ser obtidos com uma tensão de 22,4 V, velocidade de 200 mm/min e ângulo de 30° no processo de soldadura.

A Tabela 30, gerada pelo software Minitab 21, apresenta a análise de variância (ANOVA) para esta propriedade. Nela, é possível observar a contribuição da tensão, da velocidade de soldadura e do ângulo de ataque da tocha na Dureza Rockwell C da soldadura.

Tabela 30 - Análise de variância para obter a influência dos parâmetros na Dureza Rockwell C.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	Contribuição
Tensão (A)	2	126,360	63,180	4,460	0,025	55,84%
Velocidade (B)	2	79,113	9,557	2,800	0,085	34,96%
Ângulo (C)	2	15,088	7,544	0,530	0,595	6,67%
Erro	2	5,718	2,859	0,190	0,832	2,53%
Total	8	226,279				100,00%

Conforme a tabela de análise de variância ANOVA, o parâmetro de entrada com maior influência na Dureza Rockwell C dos corpos de prova foi a tensão [V], responsável por 55,84% da contribuição, seguido pela velocidade de soldadura [mm/min], com 34,96%, e pelo ângulo de ataque [°], que contribuiu com 6,67%.

8.4 Análise macrográfica

8.4.1 Reforço

Os valores obtidos para as medidas do reforço dos cordões de soldadura encontram-se na Tabela 31 abaixo, onde são apresentados os resultados das medições realizadas para cada uma das três amostras de cada uma das nove combinações de parâmetros.

Tabela 31 - Medições, média e razão sinal-ruído para o reforço.

Combinação	Reforço [mm]			Média [mm]	S/N
	N0	N1	N2		
1	1,718	1,681	1,636	1,678	-4,499
2	1,784	1,658	1,466	1,636	-4,303
3	1,797	1,343	1,399	1,513	-3,674
4	1,910	1,342	1,534	1,595	-4,151
5	1,933	1,511	1,421	1,622	-4,281
6	1,839	1,872	1,196	1,636	-4,428
7	1,985	1,241	1,268	1,498	-3,734
8	1,890	1,053	1,328	1,424	-3,321
9	2,019	1,294	1,843	1,719	-4,842

Neste caso, a equação utilizada para o sinal-ruído foi “menor é melhor”, onde o objetivo é que o reforço possua a altura mais próxima de zero. Entre as combinações testadas, a que apresentou a menor média de valores foi a de número 8 e, conseqüentemente, o valor de S/N mais próximo de zero. A partir desta análise, foi possível confeccionar gráficos dos valores médios de sinal-ruído para cada nível e parâmetro, visando obter uma combinação ótima.

Tabela 32 - Razão S/N média para os níveis dos parâmetros de soldadura para o reforço.

Fator	S/N Média [dB]
A1	-4,159
A2	-4,287
A3	-3,966
B1	-4,128
B2	-3,968
B3	-4,315
C1	-4,083
C2	-4,432
C3	-3,896

A Figura 76 a seguir apresenta a curva do S/N médio de cada parâmetro relacionado ao reforço.



Figura 76 - Curva S/N médio de cada parâmetro para o reforço.

Para minimizar o reforço, a potencial combinação ótima é A3B2C3, o que implica que os menores valores podem ser obtidos com uma tensão de 24,1 V, velocidade de 300 mm/min e ângulo de 30° no processo de soldadura.

A seguir está retratada a Tabela 33, gerada pelo software Minitab 21. Nela, está presente a análise ANOVA para os valores de reforço. Na tabela, é possível observar a contribuição da tensão, da velocidade de soldadura e do ângulo de ataque da tocha nos valores de reforço do cordão de soldadura.

Tabela 33 - Análise de variância para obter a influência dos parâmetros no reforço.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	Contribuição
Tensão (A)	2	0,027	0,013	0,140	0,869	12,52%
Velocidade (B)	2	0,017	0,009	0,090	0,914	8,05%
Ângulo (C)	2	0,052	0,026	0,270	0,763	24,32%
Erro	2	0,118	0,059	0,600	0,562	55,11%
Total	8	0,215				100,00%

Ao analisarmos a tabela, pode-se concluir que o parâmetro de entrada que mais influenciou no reforço do cordão foi o ângulo da tocha [°] contribuindo com 24,32%, seguido pela tensão [V] com 12,52% e a velocidade de soldadura [mm/min] com 8,05%. Neste ensaio, a contribuição do “erro” foi elevada, com 55,11%, devido a uma limitação da máquina de soldadura automática que será abordada no Capítulo 9, no que se refere ao alinhamento dos corpos de prova no procedimento. No entanto, a estrutura da máquina pode ser otimizada

futuramente em outros trabalhos, os quais podem possibilitar a obtenção menores valores de erro nestas medições.

8.4.2 Largura

Os valores obtidos para as medidas de largura dos cordões de soldadura encontram-se na Tabela 34 abaixo, onde são apresentados os resultados das medições realizadas para cada uma das três amostras de cada uma das nove combinações de parâmetros.

Tabela 34 - Medições, média e razão sinal-ruído para a largura.

Combinação	Largura [mm]			Média [mm]	S/N [dB]
	N0	N1	N2		
1	5,749	4,749	4,805	5,101	20,921
2	5,657	4,827	4,421	4,968	19,698
3	5,022	4,139	5,436	4,866	19,080
4	5,944	5,222	4,974	5,380	22,329
5	6,111	4,455	4,906	5,157	17,359
6	5,885	5,042	4,512	5,146	19,183
7	5,572	4,783	5,552	5,302	23,189
8	5,109	5,493	4,992	5,198	27,709
9	5,673	4,621	5,231	5,175	21,583

Para a largura do cordão, a equação utilizada para o sinal-ruído foi “nominal é melhor”, onde o objetivo é que a medida possua o valor mais próximo de 3 mm, espessura da chapa soldada. Neste caso, o ensaio que gerou o maior valor de sinal-ruído foi o ensaio de número 8, porém, a combinação que chegou mais próxima da resposta alvo para este estudo foi a de número 3. No entanto, o seu valor de razão sinal-ruído não foi o o melhor, e isso se deve ao fato da variação existente entre os resultados das aferições nas amostras N0, N1 e N2.

A partir dos valores de razão sinal-ruído foram calculadas as médias do sinal-ruído para os parâmetros de entrada e níveis atribuídos. Os resultados estão apresentados na Tabela 35 e podem ser melhor visualizados pelo gráfico da Figura 77.

Tabela 35 - Razão S/N média para os níveis dos parâmetros de soldadura para a largura.

Fator	S/N Média [dB]
A1	19,900
A2	19,624
A3	24,160
B1	22,146
B2	21,589
B3	19,949
C1	22,604
C2	21,203
C3	19,876

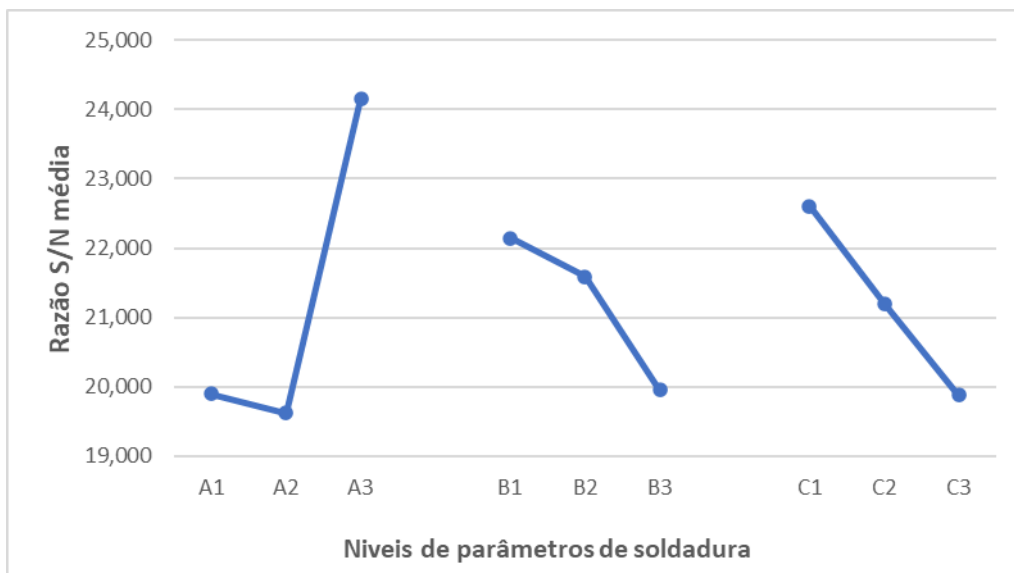


Figura 77 - Curva S/N médio de cada parâmetro para a largura.

O gráfico da curva S/N médio para esta propriedade indica que uma potencial combinação ótima é A3B1C1, o que corresponde a uma tensão de 24,1 V, velocidade de soldadura 200 mm/min e ângulo de 0° no processo.

A Tabela 36, apresentada a seguir e gerada pelo software Minitab 21, exibe a análise ANOVA referente aos valores de largura do cordão de soldadura. Nela, é possível identificar a contribuição da tensão, da velocidade de soldadura e do ângulo de ataque da tocha nos valores de reforço do cordão de solda.

Tabela 36 - Análise de variância para obter a influência dos parâmetros na largura.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	Contribuição
Tensão (A)	2	0,370	0,185	0,580	0,567	63,17%
Velocidade (B)	2	0,195	0,098	0,310	0,738	33,37%
Ângulo (C)	2	0,020	0,010	0,030	0,969	3,40%
Erro	2	0,00036	0,000	-	0,999	0,06%
Total	8	0,585				100,00%

De acordo com a tabela de análise de variância, o parâmetro de entrada que mais influenciou na largura do cordão de soldadura foi a tensão [V] contribuindo com 63,17%, seguido pela velocidade de soldadura [mm/min] com 33,37% e o ângulo de ataque [°] com 3,40%.

8.4.3 Penetração

Os valores obtidos referentes às medidas de penetração da soldadura estão dispostos na Tabela 37 abaixo, apresentando os resultados das medições realizadas para as três amostras correspondentes a cada uma das nove combinações de parâmetros.

Tabela 37 - Medições, média e razão sinal-ruído para a penetração.

Combinação	Penetração [mm]			Média	S/N
	N0	N1	N2	[mm]	[dB]
1	2,088	1,275	2,876	2,080	10,053
2	1,295	1,500	2,260	1,685	12,169
3	2,736	2,267	1,376	2,126	11,526
4	2,539	0,756	2,797	2,031	6,996
5	1,123	2,121	2,278	1,841	11,123
6	2,356	1,466	2,177	2,000	14,324
7	2,921	2,876	2,601	2,799	25,930
8	1,985	2,952	2,748	2,562	15,785
9	2,493	2,419	2,986	2,633	20,391

No caso da penetração da soldadura, a equação utilizada para o sinal-ruído foi a mesma da largura, “nominal é melhor”, visando que a medida tenha um valor mais próximo de 3 mm, correspondente à espessura da chapa soldada. Neste caso, o ensaio que gerou o maior valor de sinal-ruído foi o ensaio de número 7, o que foi confirmado pela média das medições, chegando mais próxima da resposta alvo para esta categoria.

Com base nos valores de razão sinal-ruído, foram calculadas as médias correspondentes para os parâmetros de entrada e seus níveis atribuídos. Os resultados estão listados na Tabela 38 e podem ser visualizados de forma mais clara no gráfico apresentado na Figura 78.

Tabela 38 - Razão S/N média para os níveis dos parâmetros de soldadura para a penetração.

Fator	S/N Média [dB]
A1	11,249
A2	10,814
A3	20,702
B1	14,326
B2	13,025
B3	15,414
C1	13,387
C2	13,185
C3	16,193

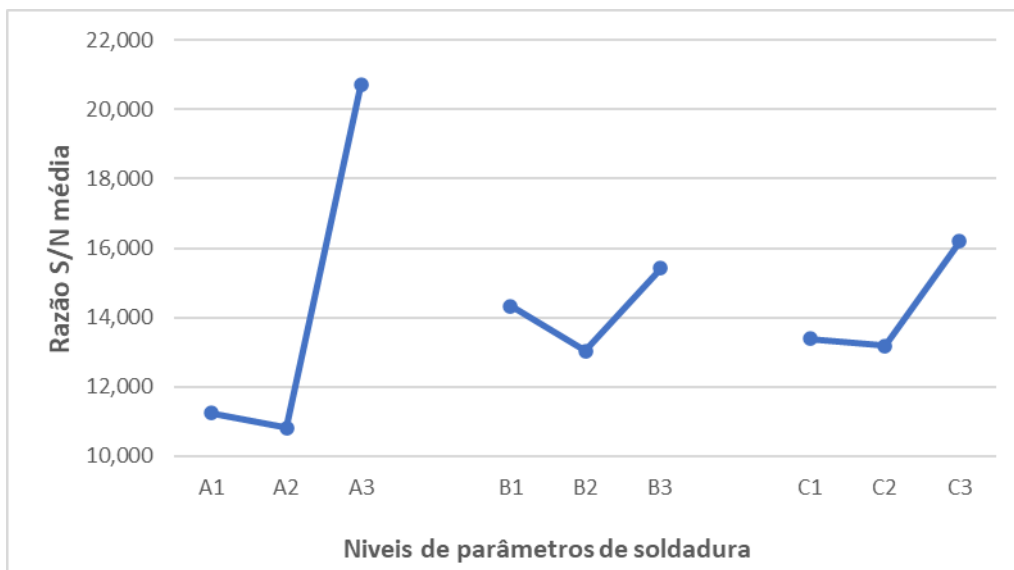


Figura 78 - Curva S/N médio de cada parâmetro para a penetração.

O gráfico da média da razão S/N para esta propriedade sugere que a combinação ideal é A3B3C3, correspondente a uma tensão de 24,1 V, velocidade de soldadura de 400 mm/min e ângulo de 30°.

A porcentagem de contribuição dos parâmetros foi obtida por meio da análise de variância ANOVA, realizada no software Minitab 21. Na Tabela 39, é possível verificar a influência da tensão, da velocidade de soldadura e do ângulo de ataque.

Tabela 39 - Análise de variância para obter a influência dos parâmetros na penetração.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	Contribuição
Tensão (A)	2	2,976	1,488	4,100	0,032	85,51%
Velocidade (B)	2	0,383	0,192	0,530	0,597	11,01%
Ângulo (C)	2	0,092	0,046	0,130	0,882	2,64%
Erro	2	0,029	0,015	0,040	0,964	0,84%
Total	8	3,480				100,00%

Conforme a tabela de análise de variância, o parâmetro com maior influência na penetração da soldadura foi a tensão [V], responsável por 85,51% da contribuição, seguido pela velocidade de soldadura [mm/min], com 11,01%, e pelo ângulo de ataque [°], que contribuiu com 2,64%.

9 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

9.1 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo realizar testes de soldabilidade em diversas combinações de parâmetros de soldadura do tipo MAG para o aço carbono estudado. O principal objetivo foi a otimização destes parâmetros e verificar quais são os mais influentes nas propriedades mecânicas de resistência à flexão e à tração transversal, e nas propriedades geométricas de reforço, largura e penetração do cordão de solda.

Neste estudo foi possível identificar que a combinação ideal de parâmetros de soldadura varia conforme a propriedade que se deseja otimizar no material. Dependendo do objetivo específico, seja melhorar a resistência mecânica, a penetração ou a dureza por exemplo, a combinação mais adequada pode apresentar variações significativas. Além disso, o parâmetro que exerce maior influência sobre o resultado final também muda de acordo com a propriedade desejada, evidenciando a importância de se ajustar às condições do processo para atender às especificações do projeto.

O método de Taguchi foi utilizado para o tratamento e análise dos dados obtidos nos ensaios, assim como, na otimização dos parâmetros através do cálculo das razões sinal-ruído e, em conjunto com a Análise de Variância (ANOVA), possibilitou avaliar a influência dos parâmetros de entrada sobre os parâmetros de resposta.

A união das duas ferramentas provou ser uma boa abordagem para análise e otimização. O planejamento experimental do método Taguchi possibilitou variar diferentes níveis acerca dos parâmetros utilizados, com um arranjo ortogonal L_9 , que permitiu a realização de 9 experimentos de combinações, enquanto analisava simultaneamente as combinações de 27 condições, otimizando o processo e reduzindo significativamente o esforço experimental necessário.

A combinação ótima encontrada para maximizar a propriedade de resistência à flexão da junta soldada foi a A1B3C1, correspondente a uma tensão de 22,4 V, velocidade de 400 mm/min e ângulo de 0° no processo de soldadura. Neste caso, o parâmetro de entrada que mais influenciou na resistência à flexão dos corpos de prova foi o ângulo da tocha [$^\circ$], com 82,03%, seguido pela tensão [V] com 13,96% e a velocidade de soldadura [mm/min] com 2,63%.

A análise dos resultados obtidos revelou que a maior resistência à tração foi encontrada na combinação A1B1C1, com parâmetros de tensão de 22,4 V, velocidade de 200 mm/min e ângulo de 0°, resultando em um valor de 386,123 N/mm². Outras combinações que se destacaram foram A3B3C2 (24,1 V; 400 mm/min; 15°) e A2B2C3 (23,3 V; 300 mm/min; 30°), com resistências de 383,885 N/mm² e 383,855 N/mm², respectivamente. A média dos valores de resistência foi de 333,603 N/mm², com um desvio padrão de 90,089 N/mm², evidenciando uma significativa variação nos resultados. No entanto, devido à limitação na repetibilidade dos ensaios, causadas pelas restrições do molde utilizado no fabrico dos corpos de prova, esta análise é meramente indicativa e carece de confiabilidade estatística.

No caso dos ensaios de tração, a falta de repetições impediu a aplicação de métodos estatísticos robustos, como a razão sinal-ruído, e os resultados devem ser considerados preliminares. Para que uma análise mais confiável seja possível, é necessário realizar novos ensaios com mais repetições, possibilitando a identificação de uma combinação ótima de parâmetros e permitindo uma análise estatística mais precisa, como a aplicação de fatores adicionais, como a intensidade da corrente de soldadura.

Para a Dureza Rockwell C, a combinação ótima encontrada foi A1B3C1, o que implica que os valores mais altos podem ser obtidos com uma tensão de 22,4 V, velocidade de 400 mm/min e ângulo de 0° no processo de soldadura. A influência dos parâmetros de soldadura para esta propriedade se dá majoritariamente pela tensão [V], responsável por 55,84% da contribuição, seguido pela velocidade de soldadura [mm/min], com 34,96%, e pelo ângulo de ataque [°], que contribuiu com 6,67%.

Dando início às propriedades geométricas, no reforço do cordão, a melhor combinação encontrada foi A3B2C3, correspondente à tensão de 24,1 V, velocidade de 300 mm/min e ângulo de 30° no processo. O parâmetro de entrada de maior influência é o ângulo da tocha [°] contribuindo com 24,32%, seguido pela tensão [V] com 12,52% e a velocidade de soldadura [mm/min] com 8,05%. Neste ensaio, a contribuição do “erro” foi de 55,11%, devido a limitações da máquina de soldadura automática relacionadas à fixação inadequada dos corpos de prova e à restrição do curso do eixo Z. Essas questões, que impactam diretamente o alinhamento durante o procedimento, serão discutidas detalhadamente na Seção 9.2.

Com relação à largura do cordão, o a curva S/N médio para esta propriedade indica que a melhor combinação é A3B1C1, com tensão de 24,1 V, velocidade de soldadura 200 mm/min e ângulo de 0° no processo. A ANOVA permitiu analisar que o parâmetro de entrada que mais influencia na largura do cordão de soldadura é a tensão [V] contribuindo com 63,17%, seguido pela velocidade de soldadura [mm/min] com 33,37% e o ângulo de ataque [°] com 3,40%.

Por fim, no que respeita à penetração da soldadura, a combinação ideal sugerida é A3B3C3, indicada pelos três valores máximos utilizados: tensão de 24,1 V, velocidade de soldadura de 400 mm/min e ângulo de 30°. Neste caso, o parâmetro com maior influência na penetração da soldadura é a tensão [V], responsável por 85,51% da contribuição, seguido pela velocidade de soldadura [mm/min], com 11,01%, e pelo ângulo de ataque [°], com 2,64%. Este resultado confirma o que é descrito na literatura, no que diz respeito à proporcionalidade entre a tensão e a penetração da soldadura.

9.2 Trabalhos futuros

Com base nas limitações e oportunidades identificadas durante a realização deste trabalho, diversas propostas para estudos futuros podem ser consideradas, tanto no aprimoramento do maquinário quanto na ampliação dos experimentos realizados.

Uma das principais melhorias envolve a calibração dos componentes que realizam os movimentos da máquina de soldadura automática. Garantir que não haja perdas de deslocamento durante os procedimentos pode aumentar a precisão e a confiabilidade dos ensaios. Além disso, a lubrificação e a regulagem dos eixos X e Y são essenciais para evitar falhas nos rolamentos, que ocasionalmente travaram e comprometeram a movimentação esperada.

Outro aspecto relevante é a necessidade de um sistema de fixação para suportar as chapas durante o processo de soldadura, prevenindo deslocamentos indesejados que poderiam afetar a qualidade do cordão de solda. Seria interessante implementar um mecanismo que permita o alinhamento dos corpos de prova, reduzindo o risco de erros manuais que podem resultar em cordões desalinhados ou amostras desperdiçadas.

Adaptações na máquina para permitir outros processos de soldadura, como o método TIG, também são viáveis e possuem potencial. Testes em novos processos de soldadura podem expandir a de aplicação do equipamento e sua versatilidade. Além disso, a realização de soldas em outras orientações, como verticais, multipasses, juntas em T ou em revestimentos, é uma proposta interessante para estudar a capacidade da máquina.

Em estudos futuros que necessitem do fabrico de corpos de prova “dogbone”, existe a necessidade de aumentar a resistência do molde da prensa utilizada para conformar os espécimes. Melhorar a durabilidade dessa ferramenta permitiria a confecção de um maior número de amostras sem comprometer sua integridade, garantindo maior eficiência nos ensaios.

No que diz respeito a materiais, trabalhos futuros podem incluir outros metais além do aço (como ligas de alumínio) e investigar o comportamento de diferentes tipos de metal de adição. Diversificar os tipos de ensaios realizados, como testes de impacto Charpy, análises micrográficas e os testes de soldabilidade não convencionais citados na Secção 6.2, também possuem potencial para avaliações mais específicas.

Além disso, recomenda-se a realização de ensaios de confirmação para verificar se as combinações consideradas ótimas realmente resultam nos melhores desempenhos. Ainda, o uso do método Grey-Taguchi para estudar correlações entre variáveis, como a influência da tensão x velocidade, poderia trazer novas perspectivas para a análise dos parâmetros de soldadura. O estudo comparativo entre sentidos de soldadura também é válido, analisando a influência da realização do procedimento “puxando” ou “empurrando” a tocha.

Em trabalhos futuros, a utilização de uma amostragem maior, como cinco amostras por condição, pode aumentar a validade estatística dos resultados. Além disso, a ampliação do arranjo experimental Taguchi de L_9 para configurações com mais combinações permitiria uma análise ainda mais detalhada e precisa das variáveis envolvidas.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Vural, “6.02 - Welding Processes and Technologies”, em *Comprehensive Materials Processing*, S. Hashmi, G. F. Batalha, C. J. Van Tyne, e B. Yilbas, Orgs., Oxford: Elsevier, 2014, p. 3–48. doi: 10.1016/B978-0-08-096532-1.00603-8.
- [2] P. J. Modenesi, P. V. Marques, e D. B. Santos, “Introdução à Metalurgia da Soldagem”.
- [3] K. Yvinec, “Uma investigação sobre a prioridade da invenção do processo de soldagem a arco elétrico”, *An investigation of the priority of the invention of electric arc welding*, jun. 2021, Acesso em: 28 de março de 2024. [Online]. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/32360>
- [4] H. Hornor, “Spot and Arc Welding”, *Nature*, vol. 109, p. 171–171, 2012, doi: 10.1038/109171b0.
- [5] R. A. Huber, “The American Welding Society”, *JOM*, vol. 42, 1990, doi: 10.1007/BF03221019.
- [6] “About AWS | American Welding Society - Welding Standards and Education”. Acesso em: 28 de março de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.aws.org/About/#community>
- [7] P. V. Marques, P. J. Modenesi, e A. Q. Bracarense, *Soldagem - fundamentos e tecnologia*. Editora UFMG, 2005.
- [8] C. Guo-yu, “High efficient plasma welding technology and its application”, *Electr. Weld. Mach.*, 2007, Acesso em: 3 de abril de 2024. [Online]. Disponível em: <https://consensus.app/papers/efficient-plasma-welding-technology-application-guoyu/81cd5804b249569f8fb409d2d58b7b2e/>
- [9] A. Silva e A. Q. Bracarense, “Soldagem com Arco Submerso Utilizando Fluxo Aglomerado com Polímero (Submerged Arc Welding Using Flux with Polymer Binder)”, 2015, Acesso em: 3 de abril de 2024. [Online]. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/303836534_Soldagem_com_Arco_Submerso_Utilizando_Fluxo_Aglomerado_com_Polimero_Submerged_Arc_Welding_Using_Flux_with_Polymer_Binder
- [10] P. J. Modenesi e P. V. Marques, *Introdução aos Processos de Soldagem*.
- [11] R. S. Polido, D. A. Júnior, L. V. Júnior, M. R. Araújo, e J. Gallego, “Caracterização da zona termicamente afetada em aço estrutural submetido à soldagem por arco submerso”, 2005, [Online]. Disponível em: https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/creem_2005e.pdf
- [12] Glen R. Edwards, Stephen Liu, Thomas A. Siewert, e David LeRoy Olson, *Welding, Brazing, and Soldering*. ASM International, 1993. doi: 10.31399/asm.hb.v06.9781627081733.
- [13] E. E. Codinter, “Soldagem com Eletrodo Revestido ‘STICK’: Um guia completo”, Codinter Brasil. Acesso em: 3 de abril de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.codinter.com/br/soldagem-com-eletrodo-revestido-stick-um-guia-completo/>
- [14] E. J. Lima e A. Q. Bracarense, “Covered electrode robotic welding with arc length control using compensation of drop voltage along the electrode as a function of temperature”, *TMM*, vol. 4, n° 2, p. 33–38, 2007, doi: 10.4322/tmm.00402007.
- [15] D. Kang, “Development of an arc voltage control mechanism for underwater wet smaw process”, The Ohio State University, 1996. Acesso em: 3 de abril de 2024. [Online]. Disponível em: https://etd.ohiolink.edu/acprod/odb_etd/etd/t/1501/10?clear=10&p10_accession_num=osu1298565838
- [16] L. C. S. Tatagiba, R. B. Gonçalves, e R. Paranhos, “Tendências no desenvolvimento de gases de proteção utilizados na soldagem MIG/MAG”, *Soldag. Insp.*, vol. 17, p. 218–228, set. 2012, doi: 10.1590/S0104-92242012000300006.
- [17] Xiaoyu Cai, Chenglei Fan, Sanbao Lin, Chunli Yang, Xiangru Ji, e Li Hu, “Effects of shielding gas composition on arc characteristics and droplet transfer in tandem narrow gap GMA welding”, 2017, Acesso em: 3 de abril de 2024. [Online]. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/epub/10.1080/13621718.2016.1253535>
- [18] B. Mvola e P. Kah, “Effects of shielding gas control: welded joint properties in GMAW process optimization”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 88, n° 9, p. 2369–2387, fev. 2017, doi: 10.1007/s00170-016-8936-2.
- [19] T. Sato, “Influence of shielding gases on quality and efficiency in gas shielded arc welding”, *Weld. Int.*, vol. 15, n° 8, p. 616–619, jan. 2001, doi: 10.1080/09507110109549413.
- [20] S.- www.sumig.com, “Tudo o que você precisa saber sobre o processo de soldagem MIG/MAG”, Tudo o que você precisa saber sobre o processo de soldagem MIG/MAG. Acesso em: 4 de abril de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.sumig.com/pt/blog/post/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-processo-de-soldagem-mig-mag/>
- [21] A. R. D. Alcântara, “Aplicação do processo de soldagem GMAW utilizando modo transferência metálica”, 2018.
- [22] R. M. Gage, “Arc torch and process”, US2806124A, 10 de setembro de 1957 Acesso em: 4 de abril de 2024. [Online]. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US2806124A/en>

- [23] A. Pocica, “The Development of TIG Welding”, *Biul. Inst. Spaw.*, vol. 2019, nº 3, p. 61–68, 2019, doi: 10.17729/ebis.2019.3/7.
- [24] L. M. L. Costa, “Influência da concentração gasosa da mistura hélio e argônio nos processos de soldagem de cobre”, mar. 2021, Acesso em: 4 de abril de 2024. [Online]. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/235370>
- [25] E. E. Codinter, “Soldagem TIG: Um guia completo”, Codinter Brasil. Acesso em: 4 de abril de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.codinter.com/br/soldagem-tig-um-guia-completo/>
- [26] J. da Silva, “Avaliação da resistência flexural entre diferentes métodos de soldagem: chama direta - TIG - Laser”, text, Universidade de São Paulo, 2007. doi: 10.11606/D.58.2007.tde-13122007-140808.
- [27] T. Sibillano, A. Ancona, V. Berardi, E. Schingaro, G. Basile, e P. Mario Lugarà, “A study of the shielding gas influence on the laser beam welding of AA5083 aluminium alloys by in-process spectroscopic investigation”, *Opt. Lasers Eng.*, vol. 44, nº 10, p. 1039–1051, out. 2006, doi: 10.1016/j.optlaseng.2005.09.002.
- [28] Emílio Wainer, Fábio Décourt Homem de Mello, e Sérgio Duarte Brandi, *Soldagem: Processos e Metalurgia*, 1º ed. São Paulo: Blucher, 1992.
- [29] Cláudio Turani Vaz, *Apostila Soldagem MIG-MAG*, vol. 1. ESAB, 2005. Acesso em: 7 de abril de 2024. [Online]. Disponível em: https://esab.com/sam_pt/esab-university/handbooks/apostila-soldagem-mig-mag/
- [30] International Organization for Standardization, *ISO 4063:2023 - Welding, brazing, soldering and cutting*. Acesso em: 7 de abril de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:4063:ed-5:v1:en>
- [31] A. Casarini, “Estudo dos parâmetros de soldadura MIG/MAG para otimização das propriedades mecânicas e geométricas do cordão de solda”, masterThesis, 2020. Acesso em: 7 de abril de 2024. [Online]. Disponível em: <https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/22882>
- [32] J. B. C. Corrêa, “Modelação numérica de processos de soldadura MIG em ligas de alumínio Al 6082-T6”, masterThesis, 2019. Acesso em: 7 de abril de 2024. [Online]. Disponível em: <https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/19241>
- [33] P. J. Modenesi e A. Bracarense, *Introdução à Física do Arco Elétrico E sua Aplicação na Soldagem dos Metais*. Belo Horizonte, 2012.
- [34] D. M. Arya, V. Chaturvedi, e J. Vimal, “Parametric optimization of MIG process parameters using Taguchi and Grey Taguchi analysis”, *Appl. Sci.*, vol. 3, nº 6, 2013.
- [35] J. Ribeiro, *Processos de Ligação e Revestimentos*. ESTIG-IPB, 2010. [Online]. Disponível em: https://virtual.ipb.pt/access/content/group/4c6d1cf0-cd49-11ee-8eba-421e367e2b5a/Te%C3%B3rica/PLR_APONTAMENTOS.pdf
- [36] D. E. da Cruz e S. de B. Camargo, “Soldagem de módulo para ancoragem de elevador cremalheira no processo MIG/MAG”, *Welding module for lift rack anchorage in the process MIG/MIG*, 2016, Acesso em: 7 de abril de 2024. [Online]. Disponível em: <http://repositorio.unitau.br:8080/jspui/handle/20.500.11874/342>
- [37] J. C. Veiga, *Desenvolvimento de uma máquina de controlo numérico para soldadura automática*. Bragança: IPB-ESTG, 2017.
- [38] G. Caloi, “Análise da soldabilidade do aço API 5L X-80 por meio dos testes Tekken e de Implante”, Mestrado em Ciências da Engenharia Metalúrgica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, 2008. doi: 10.17771/PUCRio.acad.12414.
- [39] V. Borsatti, *Defeitos em operações de soldagem*. 2013.
- [40] M. K. Felisberto, “Técnicas automáticas para detecção de cordões de solda e defeitos de soldagem em imagens radiográficas industriais”, doctoralThesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2007. Acesso em: 8 de abril de 2024. [Online]. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br:8080/jspui/handle/1/95>
- [41] P. V. Marques, *Tecnologia da Soldagem*. Belo Horizonte: O Lutador, 1991.
- [42] AWS Welding Handbook, *Welding Process*, 8º ed, vol. 2. American Welding Society, 1991.
- [43] L. Favaretto, “Análise das propriedades mecânicas de uma solda MAG aplicada a aço de alta resistência e baixa liga”, Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES, 2020.
- [44] Sérgio Rodrigues Barra e Aldo Santos Pereira, “Descontinuidades em Soldagem”, Florianópolis, 1999.
- [45] R. W. M. Jr, *Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*, First Edition. New York: Wiley-VCH, 1999.
- [46] P. J. Modenesi, “Descontinuidades e Inspeção em Juntas Soldas”, 2001.
- [47] M. da S. Mezzalira, “Análise da soldabilidade dos aços com baixo teor de carbono e de alta resistência e baixa liga aplicados à fabricação de poltronas de ônibus”, 2016, Acesso em: 17 de abril de 2024. [Online]. Disponível em: <https://repositorio.uces.br/xmlui/handle/11338/3641>

- [48] J. C. Lippold, “Recent Developments in Weldability Testing”, em *Hot Cracking Phenomena in Welds*, T. Böllinghaus e H. Herold, Orgs., Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005, p. 271–290. doi: 10.1007/3-540-27460-X_14.
- [49] A. Pai, I. Sogalad, S. Basavarajappa, e P. Kumar, “Results of tensile, hardness and bend tests of modified 9Cr 1Mo steel welds: Comparison between cold wire and hot wire gas tungsten arc welding (GTAW) processes”, *Int. J. Press. Vessels Pip.*, vol. 169, p. 125–141, jan. 2019, doi: 10.1016/j.ijpvp.2018.12.002.
- [50] G. Bokuchava e P. Petrov, “Study of Residual Stresses and Microstructural Changes in Charpy Test Specimens Reconstituted by Various Welding Techniques”, *Metals*, vol. 10, n° 5, Art. n° 5, maio 2020, doi: 10.3390/met10050632.
- [51] A. Waqas, X. Qin, J. Xiong, C. Zheng, e H. Wang, “Analysis of Ductile Fracture Obtained by Charpy Impact Test of a Steel Structure Created by Robot-Assisted GMAW-Based Additive Manufacturing”, *Metals*, vol. 9, n° 11, Art. n° 11, nov. 2019, doi: 10.3390/met9111208.
- [52] A. Guzanová *et al.*, “Metallographic Study of Overlapped Laser Welds of Dissimilar Materials”, *Metals*, 2022, doi: 10.3390/met12101682.
- [53] A. Kolubaev *et al.*, “General regularities of the microstructure formation during friction stir welding and sliding friction”, *J. Frict. Wear*, vol. 36, p. 127–131, 2015, doi: 10.3103/S1068366615020087.
- [54] PORTUGAL. Instituto Português da Qualidade, Org., *Norma Portuguesa NP EN ISO 6507-1 2011: materiais metálicos ensaio de dureza Vickers parte 1 método de ensaio (ISO 6507-1:2005)*. Caparica: IPQ, 2011.
- [55] A. M. da S. Dias, “Análise numérica do processo de fratura no ensaio de indentação vickers em uma liga de carboneto de tungstênio com cobalto”, mar. 2004, Acesso em: 1° de outubro de 2024. [Online]. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-8DWDRQ>
- [56] T. de L. Gontarski, R. M. Casali, e A. Mikowski, “Dureza vickers – definição, normatização e perspectivas de pesquisa: uma revisão / Vickers hardness – definition, standardization and research perspectives: a review”, *Braz. J. Dev.*, vol. 7, n° 2, p. 15736–15754, fev. 2021, doi: 10.34117/bjdv7n2-274.
- [57] S. A. de Souza, *Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos Teóricos e Práticos*, 5ª edição. Blucher, 1982.
- [58] E. Macherauch e H.-W. Zoch, *Praktikum in Werkstoffkunde: 100 ausführliche Versuche aus wichtigen Gebieten der Werkstofftechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2019. doi: 10.1007/978-3-658-25374-5.
- [59] D. Silva, P. Modenesi, e G. de, “Computer simulation of stress distribution during Vickers hardness testing of WC-6Co”, *Mater. Res.*, vol. 9, mar. 2006, doi: 10.1590/S1516-14392006000100014.
- [60] A. Khalfallah, M. Moradi, e R. Beygi, “Welding and Joining of Metallic Materials: Microstructure and Mechanical Properties”, *Crystals*, vol. 14, n° 10, Art. n° 10, out. 2024, doi: 10.3390/cryst14100839.
- [61] *ASTM E18-24: Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*. ASTM International. [Online]. Disponível em: <https://www.astm.org/e0018-24.html>
- [62] International Organization for Standardization, *ISO 6508-1:2023 - Metallic materials - Rockwell hardness test - Part 1: Test method*. Acesso em: 7 de abril de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/84343.html>
- [63] “Ensaio de dureza Rockwell: ISO 6508, ASTM E18”, Ensaio de dureza Rockwell: ISO 6508, ASTM E18. Acesso em: 19 de dezembro de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.zwickroell.com/pt/branchen/metall/normen-metall/rockwell-ensaio-iso-6508/>
- [64] “Escalas de Dureza”, DUREZA. Acesso em: 19 de dezembro de 2024. [Online]. Disponível em: <http://dureza.weebly.com/escalas-de-dureza.html>
- [65] V. Petley, S. Verma, K. M. Ashique, D. M. Purushothama, e R. Rajendran, “Weld Ductility Evaluation of Aeroengine Materials by Performing Bend Tests”, apresentado em ASME 2013 Gas Turbine India Conference, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, fev. 2014. doi: 10.1115/GTINDIA2013-3640.
- [66] International Organization for Standardization, *ISO 5173:2023 - Destructive tests on welds in metallic materials — Bend tests*. Acesso em: 13 de janeiro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/81724.html>
- [67] D. Żuk e G. Hajdukiewicz, “Modeling of a three-point bend test of a beam made of AW 5083 alloy”, *Sci. J. Gdyn. Marit. Univ.*, n° 116, p. 100–111, dez. 2020, doi: 10.26408/116.06.
- [68] Z. Mitalova *et al.*, “Destructive Testing of Wood Plastic Composite”, *Mater. Plast.*, vol. 57, n° 2, p. 208–214, jul. 2019, doi: 10.37358/MP.20.2.5367.
- [69] C. Wang e C. C. Sun, “A critical examination of three-point bending for determining Young’s modulus”, *Int. J. Pharm.*, vol. 629, p. 122409, dez. 2022, doi: 10.1016/j.ijpharm.2022.122409.
- [70] *ASTM E290: Standard Test Method for Bend Testing of Material for Ductility*. ASTM International.
- [71] “MTS ASTM E290 Bend Testing of Material for Ductility”, MTS. Acesso em: 8 de outubro de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.mts.com/en/applications/materials/test-standard/astm/www.mts.com>

- [72] European Committee for Standardization, “ISO 6892-1:2019. Metallic materials — Tensile testing. Part 1: Method of test at room temperature”, ISO. Acesso em: 8 de outubro de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/78322.html>
- [73] European Committee for Standardization, “ISO 4136:2022. Destructive tests on welds in metallic materials — Transverse tensile test”, ISO. Acesso em: 8 de outubro de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/81123.html>
- [74] C. Chen, X.-Z. Zhang, M.-S. Zhao, C. Lee, T. Fung, e S. Chiew, “Effects of Welding on the Tensile Performance of High Strength Steel T-stub Joints”, *Structures*, vol. 9, p. 70–78, 2017, doi: 10.1016/J.ISTRUC.2016.09.008.
- [75] A. Heidarzadeh, “Tensile behavior, microstructure, and substructure of the friction stir welded 70/30 brass joints: RSM, EBSD, and TEM study”, *Arch. Civ. Mech. Eng.*, 2019, doi: 10.1016/J.ACME.2018.09.009.
- [76] R. C. Hibbeler e S. Nascimento, *Resistência dos Materiais*, 10ª edição. Pearson Universidades, 2019.
- [77] P. C. D. R. Fernandes, “Comparação entre soldagem ascendente e descendente no processo MAG para obtenção de melhores propriedades na junta soldada”, *Rev. Eletrônica Eng. Elétrica E Eng. Mec.*, vol. 4, n° 1, p. 111–121, jun. 2022, doi: 10.21708/issn27635325.v4n1.a1186.2022.
- [78] M. Ferrari, M. D. M. D. Neves, e J. N. Panão, “Análise das Propriedades Mecânicas de Juntas de Aço Carbono Estrutural Soldadas pelo Processo Arco Submerso com os Arcos Simples e Duplo (Tandem-Arc)”, *Soldag. Insp.*, vol. 24, p. e2402, 2019, doi: 10.1590/0104-9224/si2304.07.
- [79] *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*. doi: 10.1520/E0023-24.
- [80] M. A. Meyers e K. K. Chawla, *Mechanical Behavior of Materials*. Prentice Hall, 1999.
- [81] “Investigation of Fractured Steel Plates Removed from Welded Ships”. Acesso em: 2 de outubro de 2024. [Online]. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/AD0636304>
- [82] H. Kurishita, H. Kayano, M. Narui, M. Yamazaki, Y. Kano, e I. Shibahara, “Effects of V-Notch Dimensions on Charpy Impact Test Results for Differently Sized Miniature Specimens of Ferritic Steel”, *Mater. Trans. JIM*, vol. 34, n° 11, p. 1042–1052, 1993, doi: 10.2320/matertrans1989.34.1042.
- [83] R. J. Thomas e A. D. Sorensen, “Charpy Impact Test Methods for Cementitious Composites: Review and Commentary”, *J. Test. Eval.*, vol. 46, n° 6, p. 2422–2430, nov. 2018, doi: 10.1520/JTE20170057.
- [84] R. dos S. Bueno, “Análise microestrutural de junta soldada de aço baixa”, nov. 2010, Acesso em: 2 de outubro de 2024. [Online]. Disponível em: <http://pantheon.ufrj.br/handle/11422/8051>
- [85] R. C. de Freitas, “Análise Metalográfica De Um Perfil Soldado Por Eletrodo Revestido”, 8 de novembro de 2018. Acesso em: 2 de outubro de 2024. [Online]. Disponível em: <https://semanaacademica.org.br/artigo/analise-metalografica-de-um-perfil-soldado-por-eletrodo-revestido>
- [86] Japanese Industrial Standard (JIS) e Japanese Standards Association (JSA), *JIS Z 3158:2016 - Method of y-groove weld cracking test*. Acesso em: 17 de abril de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.normadoc.com/english/jis-z-3158-2016.html>
- [87] J. F. Lancaster, *Metallurgy of Welding*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1980. doi: 10.1007/978-94-010-9506-8.
- [88] H. Granjon, Org., *Fundamentals of Welding Metallurgy*. em Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies. Woodhead Publishing, 1991. doi: 10.1016/B978-1-85573-019-9.50002-6.
- [89] *NF A89-100 - Soudage et techniques connexes - Fissuration à froid sur implants - Méthode d'essais*. Acesso em: 18 de abril de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-a89100/soudage-et-techniques-connexes-fissuration-a-froid-sur-implants-methode-des/fa022908/3585>
- [90] X. Yue, “Investigation on heat-affected zone hydrogen-induced cracking of high-strength naval steels using the Granjon implant test: Henry Granjon Prize 2014 Winner Category B: Materials Behaviour and Weldability”, *Weld. World*, vol. 59, n° 1, p. 77–89, 2015, doi: 10.1007/s40194-014-0181-4.
- [91] D. M. de Almeida, “Estudo do ZTA de aços API X80 para tubulações através de ensaio de emissão acústica e teste de implante.”, dez. 2005, Acesso em: 18 de abril de 2024. [Online]. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/1750>
- [92] R. Bouverot, *Essais de soudabilité par implants effectués au Laboratoire de la Société Babcock*. Laboratoire de la Société Babcock: Atlantique, 1971.
- [93] L. M. Rodrigues, C. H. R. dos Santos, R. R. Veloso, M. V. Lemos, C. dos Santos, e R. de F. Cabral, “Estudo da microestrutura e da microdureza dos aços 1020 e 1060”, *Cad. UniFOA*, vol. 1, n° 2, Art. n° 2, dez. 2014, doi: 10.47385/cadunifoa.v1.n2.263.
- [94] M. Baucio, Org., *ASM Engineering Materials Reference Book, Second Edition*, 1st edition. Materials Park, OH: ASM International, 1994.
- [95] J. H. D. Beltran, “Influência do metal de adição e do gás de proteção na soldagem MAG de chapas de aço SAE 1020”, 2019, Acesso em: 17 de junho de 2024. [Online]. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/211333>
- [96] A. Azevedo *et al.*, “Análise das propriedades mecânicas de chapas de Aço SAE 1020 soldadas por eletrodo revestido em diferentes correntes”, jun. 2022, p. 3270–3279. doi: 10.5151/2594-5327-34047.

- [97] W. Zhai, Y. Guo, Aishwarya, C. Canturri, R. Shandro, e W. Zhou, “Wire arc additive manufacturing of ER70S-6/S355 bimetal component”, *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 900, p. 146498, maio 2024, doi: 10.1016/j.msea.2024.146498.
- [98] H. A. Holzmann, J. V. B. Razente, e R. V. B. Biscaia, “Avaliação da solda MAG utilizando arame AWS A5.18 ER70S-6 em manutenção de peças de aço AISI 4140”, *J. Eng. Exact Sci.*, vol. 6, nº 3, Art. nº 3, set. 2020, doi: 10.18540/jcecv16iss3pp0358-0364.
- [99] Wurth, “Catálogo Wurth - ER70S-6 ARAME MIG”. Acesso em: 4 de outubro de 2024. [Online]. Disponível em: <https://s3.sa-east-1.amazonaws.com/bd-sp.canaldapeca.com.br/Wurth/CATALOGO/10-09-2024/01.14.0010/01.14.0010.pdf#detalhes>
- [100] “CORGON® 18 | Linde Portugal”. Acesso em: 18 de dezembro de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.linde-gas.pt/shop/pt/pt-ig/corgon%C2%AE-18-p-corgon-18>
- [101] G. Taguchi, S. Chowdhury, e S. Taguchi, *Robust Engineering: Learn How to Boost Quality While Reducing Costs & Time to Market*, 1st edition. New York: McGraw Hill, 1999.
- [102] P. J. Ross, *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, 2nd edition. New York: McGraw-Hill Professional, 1995.
- [103] D. A. B. Pereira, “Estudo comparativo da vida útil das ferramentas e acabamento superficial para diferentes ferramentas de fresagem”, masterThesis, 2017. Acesso em: 13 de janeiro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/14931>
- [104] R. A. Fisher, “Statistical Methods for Research Workers”, em *Breakthroughs in Statistics: Methodology and Distribution*, S. Kotz e N. L. Johnson, Orgs., New York, NY: Springer, 1992, p. 66–70. doi: 10.1007/978-1-4612-4380-9_6.
- [105] D. N. do Nascimento, “Melhoria e otimização de um sistema automático de soldadura”, masterThesis, 2023. Acesso em: 18 de dezembro de 2024. [Online]. Disponível em: <https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/29013>