

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CAMILA ÁVILA DE PAULA GOMES

INFLUÊNCIA DA ALTERAÇÃO DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM NA QUALIDADE
DO PASSE DE RAIZ

BELO HORIZONTE

2024

CAMILA ÁVILA DE PAULA GOMES

INFLUÊNCIA DA ALTERAÇÃO DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM NA QUALIDADE
DO PASSE DE RAIZ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal De Educação Tecnológica De Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Ivan José de Santana

BELO HORIZONTE

2024

CAMILA ÁVILA DE PAULA GOMES

INFLUÊNCIA DA ALTERAÇÃO DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM NA QUALIDADE
DO PASSE DE RAIZ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal De Educação Tecnológica De Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em / /

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ivan José de Santana – Orientador – CEFET-MG

Prof. Dra. Aline Silva Magalhães – CEFET-MG

Dr. Bruno Cordeiro Silva - CEFET-MG

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão, primeiramente, à minha mãe, Renata Ávila, cuja paixão pela engenharia me inspirou a seguir este caminho. Ao meu pai, Eduardo Gomes, agradeço pelo apoio incondicional e por sempre incentivar minha educação.

Aos meus tios, Amauri e Leandro, sou grato pelas conversas enriquecedoras e pelos momentos que compartilhamos.

Ao meu orientador, Professor Dr. Ivan José de Santana, registro meu profundo agradecimento pela atenção, pelos valiosos conselhos e pelas inúmeras tardes dedicadas à minha orientação, tanto no trabalho quanto em toda minha trajetória acadêmica e profissional.

Agradeço também aos professores Dr. Cláudio Turani Vaz e Dra. Aline Silva Magalhães pela essencial colaboração na execução deste trabalho, assim como aos professores Me. João Bosco dos Santos e Dr. Joel Lima pelos sábios conselhos e encorajamento.

Aos professores e técnicos do DEMAT, expresso minha sincera gratidão por sua contribuição para minha formação, com destaque especial para Dr. Bruno Cordeiro Silva e Gilberto Caldeira Faria, que tanto me ajudou na execução deste trabalho.

“A utopia está lá no horizonte. Me aproximo dois passos, ela se afasta dois passos. Caminho dez passos e o horizonte corre dez passos. Por mais que eu caminhe, jamais alcançarei. Para que serve a utopia? Serve para isso: para que eu não deixe de caminhar”

(FERNANDO BIRRI)

RESUMO

No contexto industrial, a soldagem se sobressai como um dos principais métodos de união entre metais. O processo *Gas Metal Arc Welding (GMAW)*, usualmente semiautomático, é sensível à variação dos parâmetros de soldagem influenciando diretamente na qualidade do cordão depositado. A partir de uma barra de aço AISI 1020 corpos de prova foram cortados e chanfrados em V, utilizando-se diferentes valores de nariz e ângulo de bisel, em seguida os corpos de prova foram ponteados a uma distância pré-definida. A soldagem mecanizada do passe de raiz foi realizada alterando-se a velocidade da alimentação e de deslocamento. Durante a soldagem foram coletados os dados elétricos do processo para construção de oscilogramas e observação da transferência metálica ocorrida. Para a identificação de alterações morfológicas e mensuração da zona fundida foi feita a análise macrográfica dos corpos de prova. Esperava-se correlacionar as alterações nos parâmetros de soldagem a seus efeitos no cordão. Realizando inspeção visual foi verificado que o posicionamento da tocha pode causar falta de fusão lateral, o que foi comprovado com a análise da macrografia dos corpos de prova. Foi observado, também, que a utilização de chanfros menores dificulta o acesso do bocal. Os resultados indicam que o aumento da velocidade de alimentação é diretamente proporcional ao aumento da frequência transferência metálica e que o aumento da velocidade de alimentação deve ser diretamente proporcional ao aumento da velocidade de deslocamento para que ocorra soldagens com menos respingos.

Palavras-chave: GMAW, Ângulo de bisel, nariz, parâmetros de soldagem.

ABSTRACT

In the industrial context, welding stands out as one of the main methods of joining metals. The Gas Metal Arc Welding (GMAW) process, normally semi-automatic, is sensitive to variations in welding parameters, directly influencing the quality of the deposited bead. From an AISI 1020 steel bar, the test specimens were cut and chamfered in V, using different values of nose test and bevel angle, then the test specimens were tacked at a pre-defined distance. The mechanized welding of the root pass was performed by changing the feed and travel speed. During the solution, the electrical data of the process were obtained to construct oscillograms and observe the metal transfer that occurred. To identify morphological changes and measure the fusion zone, macrographic analysis of the test specimens was performed. It was expected to correlate the changes in the modification parameters with their effects on the bead. Visual inspection revealed that the bad positioning of the torch can cause a lack of lateral fusion, which was confirmed by analyzing the macrograph of the test specimens. The results indicate that the increase in feed speed is directly proportional to the increase in metal transfer frequency and that the increase in feed speed must be directly proportional to the increase in travel speed so that welding occurs with less spatter.

Key words: GMAW; Bevel angle; nozzle; welding parameters

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 — Metal de base, de adição e poça de fusão	16
Figura 3.2 — Tipos de junta de acordo com o posicionamento	17
Figura 3.3 — Tipos de chanfro	17
Figura 3.4 — Tipos de chanfro	18
Figura 3.5 — Regiões de uma solda por fusão.	21
Figura 3.6 — Modos de transferência	26
Figura 3.7 — Relação tensão corrente para os modos de transferência.	26
Figura 3.8 — Transferência por curto circuito	27
Figura 3.9 — Equipamento básico para soldagem MIG/MAG, foco no bocal	28
Figura 5.1 — Fluxograma da metodologia	32
Figura 5.2 — Representação esquemática das dimensões dos corpos de prova	33
Figura 5.3 — Serra Fita Horizontal	33
Figura 5.4 — Detalhamento do corte	33
Figura 5.5 — Fresadora universal Clever FH-4	34
Figura 5.6 — Faceamento das laterais	34
Figura 5.7 — Corte de chanfro	35
Figura 5.9 — <i>Power Wave</i> ® S350 com alimentador de fios LF-45	36
Figura 5.10 — Sistema de deslocamento mecanizado do processo GMAW	36
Figura 6.1 — Corpo de Prova 01 – Bisel: 30° e Nariz: 2mm	39
Figura 6.2 — Oscilograma – Corpo de prova 01	39
Figura 6.3 — Corpo de Prova 01 – verso - Bisel: 30° e Nariz: 2mm	40
Figura 6.4 — Corpo de Prova 01 - corte - Bisel: 30° e Nariz: 2mm	40
Figura 6.5 — Corpo de Prova 02 - Bisel: 45° e Nariz: 2mm	41
Figura 6.6 — Oscilograma – Corpo de prova 02	41
Figura 6.7 — Corpo de Prova 2 - verso - Bisel: 45° e Nariz: 2mm	42
Figura 6.8 — Corpo de Prova 02 - corte - Bisel: 45° e Nariz: 2mm	42
Figura 6.9 — Corpo de Prova 03 - Bisel: 30° e Nariz: 2mm	43
Figura 6.10 — Oscilograma – Corpo de prova 03	43
Figura 6.11 — Corpo de Prova 03 – verso - Bisel: 30° e Nariz: 2mm	44
Figura 6.12 — Corpo de Prova 03 – corte - Bisel: 30° e Nariz: 2mm	44
Figura 6.13 — Corpo de Prova 04 - Bisel: 45° e Nariz: 2mm	45
Figura 6.14 — Oscilograma – Corpo de prova 04	46

Figura 6.15 — Corpo de Prova 4 - verso - Bisel: 45° e Nariz: 2 mm	46
Figura 6.16 — Corpo de Prova 04 - corte - Bisel: 45° e Nariz: 2mm	47
Figura 6.17 — Corpo de Prova 05 - Bisel: 45° e Nariz: 4 mm	48
Figura 6.18 — Oscilograma – Corpo de prova 05	48
Figura 6.19 — Corpo de Prova 05 - verso - Bisel: 45° e Nariz: 4 mm	49
Figura 6.20 — Corpo de Prova 05 - corte - Bisel: 45° e Nariz: 4 mm	49
Figura 6.21 — Corpo de Prova 06 - Bisel: 45° e Nariz: 2 mm	50
Figura 6.22 — Oscilograma – Corpo de prova 06	51
Figura 6.23 — Corpo de Prova 06 - verso - Bisel: 45° e Nariz: 2 mm	51
Figura 6.24 — Corpo de Prova – corte - Bisel: 45° e Nariz: 4 mm	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 — Parâmetros dos ensaios	37
Tabela 6.1 — Parâmetros de teste- Corpos de prova 01 e 03	38
Tabela 6.2 — Parâmetros de teste- Corpos de prova 02 e 03	40
Tabela 6.3 — Parâmetros de teste- Corpos de prova 02 e 04	45
Tabela 6.4 — Parâmetros de teste- Corpos de prova 04 e 05	47
Tabela 6.5 — Parâmetros de teste - Corpos de prova 04 e 06	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASME - American Society of Mechanical Engineers

AWS - American Welding Society.

CA - Corrente alternada

CC+ - Corrente contínua com eletrodo positivo

CC- - Corrente contínua com eletrodo negativo

FCAW - Flux-Cored Arc Welding

GMAW - Gas Metal Arc Welding.

GTAW - Gas Tungsten Arc Welding.

MAG - Metal Active Gas.

MB - Metal de base.

MIG - Metal Inerte Gas.

SAW- Submerged Arc Welding

SMAW - Shielded Metal Arc Welding

ZF - Zona Fundida.

ZTA - Zona termicamente afetada.

LISTA DE SÍMBOLOS

A- Ampere

a- ângulo do bisel

b- ângulo do chanfro

f- fresta

I - Corrente do arco em Amperes

in - Polegada

K – Kelvin

mm - Milímetros

mm² - Milímetros quadrados

° - Graus (ângulo)

°C - Graus Celsius

s- Tamanho do nariz

T - Temperatura

V - Tensão do arco em Volts

W/m² - Potência em Watts por metro quadrado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo Geral	15
2.2 Objetivos Específicos	15
3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA	16
3.1 DEFINIÇÃO DE SOLDAGEM	16
3.2 TERMINOLOGIA	16
3.3 SEGURANÇA	19
3.4 SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO	19
<i>3.4.1 O Arco elétrico</i>	<i>19</i>
<i>3.4.2 Regiões de solda por fusão</i>	<i>21</i>
3.5 GMAW	22
<i>3.5.1 Modos de transferência metálica</i>	<i>25</i>
<i>3.5.2 Equipamentos e consumíveis</i>	<i>28</i>
4 ESTADO DA ARTE	29
5 MATERIAIS E METODOS	32
5.1 Materiais	32
5.2 Métodos	32
<i>5.2.1 Preparação das amostras</i>	<i>33</i>
<i>5.2.2 Operação de soldagem e aquisição de dados</i>	<i>35</i>
<i>5.2.3 Análise macrográfica e cálculo área da Zona Fundida</i>	<i>37</i>
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
6.1 Corpo de prova 01	38
6.2 Corpos de prova 02 e 03	40
6.3 Corpos de prova 02 e 04	44
6.4 Corpos de prova 04 e 05	47
6.5 Corpos de prova 04 e 06	49
7 CONCLUSÕES	53
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

1 INTRODUÇÃO

A soldagem é um processo de união de metais baseado no estabelecimento de forças de ligação química semelhantes às que atuam no interior dos próprios materiais (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009, p. 21). Dentro dos métodos de soldagem por fusão, a soldagem a arco elétrico se destaca pela sua relevância na indústria moderna, com a soldagem a arco com proteção gasosa (Gas Metal Arc Welding - GMAW) sendo particularmente notável. Este método é valorizado por sua alta taxa de deposição, elevado fator de ocupação do soldador, versatilidade e potencial de mecanização. Contudo, o GMAW apresenta a limitação de ser sensível a variações nos parâmetros elétricos e à sua interdependência, o que afeta diretamente a qualidade do cordão de solda. Assim, a soldagem, e especificamente o GMAW, desempenha um papel crucial na fabricação e montagem de estruturas metálicas e componentes de equipamentos, destacando-se por sua eficiência e capacidade de produzir soldas de alta qualidade com um processo relativamente simples e automatizável.

Segundo o relatório da Fortune Business Insights (2024), o mercado de soldagem está previsto para crescer a uma taxa composta anual de crescimento de aproximadamente 5,8% entre 2024 e 2030. Esta expansão é impulsionada pela crescente demanda em setores como construção, automotivo e aeroespacial. Adicionalmente, a Introspective Market Research (2024) revela que o mercado de soldagem alcançará um valor estimado de 24,5 bilhões de dólares até 2028, refletindo um aumento substancial na adoção de tecnologias de soldagem, incluindo o GMAW.

A Grand View Research (2024) também destaca que o mercado global de equipamentos de soldagem, que inclui sistemas GMAW, está projetado para crescer a uma taxa anual de 6,4% até 2027. Este crescimento é apoiado pela crescente demanda por produtos de soldagem, com uma estimativa de que o mercado de produtos de soldagem atinja cerca de 16,2 bilhões de dólares nos próximos anos. A importância desse crescimento é corroborada pelos dados apresentados pelo Water Welders (2024), que enfatizam a soldagem como uma tecnologia crucial para o desenvolvimento de infraestrutura e componentes industriais, além de destacar a necessidade de inovações contínuas para atender às demandas do mercado.

Dentro desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo investigar a influência da alteração de parâmetros de soldagem na qualidade do passe de raiz em aços AISI 1020. Para isso, foram realizados testes com corpos de prova chanfrados em V, variando ângulos de bisel e nariz, bem como as velocidades de alimentação e deslocamento durante o processo de

soldagem GMAW. A coleta de dados elétricos durante a soldagem permitiu a análise dos oscilogramas, possibilitando a observação da transferência metálica. Os corpos de prova foram, posteriormente, cortados e analisados macrográfica e visualmente, buscando correlacionar as alterações dos parâmetros às características do cordão de solda, como a fusão e a presença de descontinuidades.

Dessa forma, espera-se que este estudo contribua para o entendimento do impacto das variações de parâmetros no desempenho do processo GMAW, oferecendo subsídios para a otimização de processos industriais que demandam altos níveis de qualidade e confiabilidade.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Observar a influência das medidas do chanfro em V no passe de raiz, utilizando a soldagem GMAW mecanizada.

2.2 Objetivos Específicos

- Soldar passes de raiz em corpos de prova por GMAW mecanizado.
- Coletar os sinais elétricos, construir oscilogramas para determinar o tipo de transferência metálica.
- Avaliar visualmente a confecção de passe de raiz com a GMAW mecanizado.
- Realizar a análise visual dos corpos de prova a fim de comparar os efeitos das alterações realizadas em cada ensaio.
- Avaliar, a partir de técnicas metalográficas, os cordões de solda produzidos experimentalmente a partir de GMAW mecanizado.
- Analisar a influência da velocidade de soldagem em passes de raiz.

3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

3.1 DEFINIÇÃO DE SOLDAGEM

Os métodos de união de metais podem ser divididos pelo tipo de interação que os materiais são unidos. Sejam eles unidos por formas macroscópicas, parafusados e rebitados ou por forças microscópicas advindas das ligações metálica, como a soldagem e a brasagem.

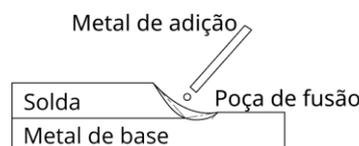
Segundo Jeffus (2016, p. 5) a soldagem ocorre quando peças separadas de um material são unidas para formar um componente único. Isso acontece através da aplicação de calor suficiente para elevar a temperatura dos materiais, causando seu amolecimento ou fusão, permitindo que as peças se integrem. O processo de soldagem também pode ser definido como o “estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais, na região de ligação entre os materiais que estão sendo unidos” (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009, pg. 21).

3.2 TERMINOLOGIA

A soldagem é uma das técnicas mais essenciais e amplamente utilizadas na união de metais, desempenhando um papel crucial na fabricação e manutenção de estruturas metálicas em diversos setores industriais. A soldagem por fusão destaca-se por sua importância industrial, permitindo a formação de uniões sólidas e duradouras entre metais por meio do aquecimento e fusão dos materiais.

O material da peça ou peças que está sendo soldada é chamado de metal de base. Na soldagem por fusão, frequentemente é utilizado um material adicional para formar a solda, conhecido como metal de adição. Durante a soldagem, o metal de adição é fundido pela fonte de calor e misturado com uma quantidade de metal de base também fundido, formando a poça de fusão (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009, pg. 30). A Figura 3.1 ilustra esses conceitos.

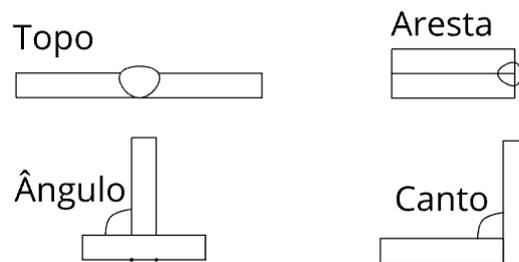
Figura 3.1 — Metal de base, de adição e poça de fusão



Fonte: Adaptado de MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009.

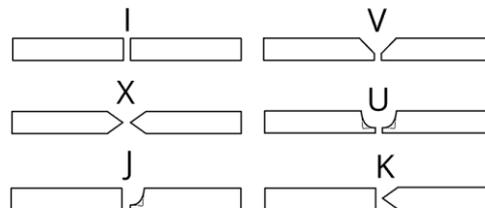
A região em que as peças serão unidas por soldagem é chamada de junta. A Figura 3.2 exibe os tipos básicos de junta mais usados. Chanfros, Figura 3.3, podem ser necessários para facilitar o acesso e garantir que a junta seja completamente soldada. O chanfro em V é usado com mais frequência devido à facilidade com que pode ser produzido (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009; JEFFUS, 2016).

Figura 3.2 — Tipos de junta de acordo com o posicionamento



Fonte: Adaptado de MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009.

Figura 3.3 — Tipos de chanfro



Fonte: Adaptado de JEFFUS, 2016.

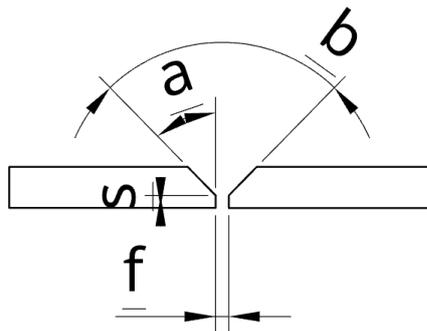
De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2009, p. 32) e Jeffus (2016, p. 477), a escolha do tipo de chanfro a ser utilizado em uma condição específica de soldagem depende de diversos fatores, como o processo de soldagem empregado, a espessura e as dimensões das peças, bem como a facilidade de manuseá-las. Além disso, outros fatores importantes incluem o acesso à região da junta e o tipo de junta, assim como o custo de preparação do chanfro e outros aspectos pertinentes. Chanfros em I, por exemplo, são indicados quando as condições permitem obter a penetração desejada sem a necessidade de outros tipos de chanfro. Esses chanfros são frequentemente usados na soldagem de peças com espessura entre 0,5 mm e 2,6 mm. No entanto, o processo de soldagem GMAW por curto-circuito, conforme observado por Jeffus (2016, p. 443), não gera calor suficiente para garantir uma solda de qualidade em materiais com mais de 6 mm de espessura. Dessa forma, quando o chanfro em I não oferece a penetração necessária, outras preparações, como os chanfros em V ou meio V, podem ser mais apropriadas,

apesar de terem um custo de preparação mais elevado devido à necessidade de usinagem ou corte mais elaborados.

Os elementos de um chanfro são definidos para atender aos requisitos do projeto e facilitar o acesso ao fundo da junta, minimizando a quantidade de metal de adição necessária para o enchimento da junta (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009, p. 32; JEFFUS, 2016, p. 478). Os principais elementos de um chanfro são:

- Face da raiz ou nariz (s): parte não chanfrada de um componente da junta.
- Abertura da raiz, folga ou fresta (f): menor distância entre as peças a soldar.
- Ângulo de abertura da junta ou ângulo de bisel (a): ângulo da parte chanfrada de um dos elementos da junta.
- Ângulo de chanfro (b): soma dos ângulos de bisel dos componentes da junta.

Figura 3.4 — Tipos de chanfro



a- ângulo do bisel; b- ângulo do chanfro; s- tamanho do nariz; f- fresta

Fonte: Adaptado de MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009.

De acordo com a forma de execução, a soldagem pode ser classificada em manual, semiautomática, mecanizada e automática. Na soldagem manual, toda a operação é realizada e controlada manualmente pelo soldador. A soldagem semiautomática, por sua vez, possui controle automático da alimentação do metal de adição, enquanto o soldador controla manualmente o posicionamento da tocha e seu deslocamento. Na soldagem mecanizada, tanto a alimentação do metal de adição quanto o deslocamento do cabeçote de soldagem são controlados automaticamente pelo equipamento. No entanto, o posicionamento, o acionamento do equipamento e a supervisão da operação são responsabilidades do operador de soldagem. A soldagem automática é caracterizada pelo controle automático de praticamente todas as operações necessárias (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009, p. 35).

3.3 SEGURANÇA

Os riscos da soldagem, segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2009, p. 43), incluem incêndios e explosões, choque elétrico, exposição à luz ultravioleta e inalação de fumos e gases prejudiciais à saúde. Para minimizar o risco de incêndios e explosões, é essencial retirar do ambiente qualquer material inflamável antes de iniciar a soldagem (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, p. 48). Na soldagem a arco, existe um risco significativo de choque elétrico, que pode causar lesões graves ou morte, com a gravidade do acidente variando de acordo com a corrente, o percurso no corpo e a duração da exposição (JEFFUS, 2016). Para minimizar esse risco, é crucial utilizar luvas e roupas de raspa de couro, trabalhar em ambientes secos e manter a manutenção adequada dos equipamentos.

De acordo com Jeffus (2016) e Marques, Modenesi e Bracarense (2009) a exposição à luz ultravioleta durante a soldagem pode causar queimaduras na pele, ofuscamento, fadiga visual, dor de cabeça e, em casos mais graves, queima da retina e catarata. É necessário proteger-se tanto da radiação direta quanto da indireta (refletida), utilizando roupas opacas e máscaras com filtros adequados para cada tipo de operação. Além disso, biombos e cortinas não refletores podem ser usados para proteger terceiros.

Vapores gerados durante a soldagem também representam riscos significativos à saúde. Vapores de zinco podem causar dor de cabeça e febre, enquanto vapores de cádmio podem ser fatais. Os gases de proteção utilizados no processo de soldagem são densos e podem deslocar o oxigênio, causando asfixia. Portanto, as operações de soldagem devem ser realizadas preferencialmente em locais bem ventilados, com o uso de ventiladores e exaustores. Caso isso não seja possível, devem ser utilizadas máscaras contra gases (JEFFUS, 2016, p. 29).

3.4 SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO

3.4.1 O Arco elétrico

O arco elétrico consiste na sustentação de uma descarga elétrica em um meio gasoso ionizado, conhecido como plasma, caracterizado pela sua alta temperatura, em torno de 6.500 K na soldagem com eletrodos revestidos de 10.000 a 30.000 K, na soldagem *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW), GMAW e plasma. O arco elétrico é estabelecido entre um eletrodo cilíndrico e a peça, conferindo-lhe uma característica forma tronco cônica (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009; Modenesi, 2012).

O arco elétrico, de acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2009, p. 51), representa a fonte de calor predominante na técnica de soldagem por fusão de materiais metálicos. Esta preferência se justifica em virtude da sua notável reunião de atributos benéficos. Em primeiro lugar, o arco elétrico é capaz de proporcionar uma concentração de energia adequada, tornando possível a fusão localizada do metal base. Além disso, sua operação é caracterizada pela facilidade de controle, o que contribui significativamente para a qualidade do processo e custo relativamente baixo do equipamento necessário, tornando-o acessível em diversos contextos industriais. Por fim, cabe mencionar que, os riscos à saúde dos operadores envolvidos nesse tipo de soldagem são mantidos em níveis aceitáveis, consolidando ainda mais a sua posição como a escolha preferida na soldagem de materiais metálicos.

Uma das principais vantagens do processo de soldagem a arco é a sua flexibilidade, permitindo a utilização de diversas variáveis, como nível e tipo de corrente (corrente contínua com o eletrodo positivo, CC+, ou negativo, CC-, e corrente alternada, CA), tensão de operação, comprimento do arco, velocidade de deslocamento, e velocidade de alimentação de metal de adição, composição, diâmetro, comprimento e ângulo do eletrodo em relação à peça e gás de proteção ou de fluxo. Essa diversidade possibilita a adaptação do processo a diferentes materiais e requisitos de soldagem, mas também torna a seleção das condições de soldagem uma tarefa complexa, devido às inter-relações entre essas variáveis (MODENESI, 2012, p. 30-31). A curvatura natural do arame eletrodo, conhecida como "*cast*", e a velocidade de alimentação são exemplos de fatores que influenciam diretamente a qualidade da solda. O "*cast*" garante um bom contato elétrico durante a soldagem GMAW, mas pode complicar a alimentação do arame, exigindo cuidados adicionais. A velocidade de alimentação, controlada em polegadas por minuto, é crucial para ajustar a corrente, controlar o tamanho do cordão e a taxa de deposição, impactando significativamente o desempenho do processo e a qualidade do cordão resultante (JEFFUS, 2016).

A soldagem a arco é uma técnica que requer equipamento especificamente projetado para esta aplicação, capaz de fornecer tensões e correntes situadas geralmente entre 10 e 40 V e entre 10 e 1200 A, respectivamente, como observado por Modenesi (2009, pg. 1). Além disso, para ser utilizada na soldagem por fusão, uma fonte de energia deve possuir uma potência específica dentro da faixa de aproximadamente 10^6 a 10^{13} W/m² (MODENESI, 2012, p. 2).

Existem três requisitos fundamentais que uma fonte de energia para soldagem a arco deve satisfazer, conforme descrito por Modenesi (2009, pg. 1): a capacidade de produzir saídas de corrente e tensão nos valores desejados e com características adequadas para o processo de soldagem, a flexibilidade para ajustar esses valores de corrente e/ou tensão para aplicações

específicas e a habilidade de variar a corrente e tensão durante a operação de acordo com as necessidades do processo de soldagem e da aplicação.

No que diz respeito à classificação das fontes de soldagem, Modenesi (2012, pg. 7) distinguem-se dois tipos principais: as de corrente constante e as de tensão constante. As fontes de corrente constante são comuns em processos como o *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) e GTAW, enquanto as de tensão constante são frequentemente utilizadas nos processos GMAW, *Flux-Cored Arc Welding* (FCAW) e *Submerged Arc Welding* (SAW) (MODENESI, 2012).

4.4.2 Regiões de solda por fusão

No cordão de solda, de acordo com Wainer, Brandi e de Mello (2004, p.371), três regiões distintas são identificadas conforme Figura 3.5, cada uma com suas características próprias:

Figura 3.5 — Regiões de uma solda por fusão.



Fonte: Marques,2009. (Adaptado)

Zona Fundida (ZF): Esta é a região onde o material foi submetido a altas temperaturas durante o processo de soldagem, superando o ponto de fusão (T_f) do metal de base. A ZF é geralmente marcada por uma estrutura de grãos colunares e grosseiros, com potencial para reduzir a tenacidade do material.

Zona Termicamente Afetada (ZTA): Na ZTA, localizada na parte não fundida do metal de base, ocorre uma alteração na microestrutura e/ou nas propriedades devido ao ciclo térmico da soldagem. As temperaturas atingidas na ZTA estão acima da temperatura crítica do material, mas abaixo de sua temperatura de fusão.

Metal de Base (MB): Essa é a região mais distante do cordão de solda e não sofreu influência direta do processo de soldagem. As temperaturas atingidas no MB permanecem abaixo da temperatura crítica do material.

3.5 GMAW

A soldagem a arco com proteção gasosa (GMAW) é um processo que envolve a união de peças metálicas por meio do aquecimento gerado por um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico consumível e a peça de trabalho. Para proteger o arco e a região da solda contra contaminação atmosférica, utiliza-se um gás ou uma mistura de gases, podendo ser inertes ou ativos. Quando o gás de proteção é inerte ou predominantemente composto por gases inertes, o processo é conhecido como *Metal Inert Gas* (MIG), enquanto no caso de gases ativos ou misturas ricas em gases ativos, é denominado *Metal Active Gas* (MAG). (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009, p.232)

De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2009, p.234) a soldagem MIG/MAG é geralmente um processo semiautomático, em que a alimentação do arame eletrodo é realizada de forma mecânica por um alimentador motorizado. O soldador é responsável pela inicialização e interrupção do processo de soldagem, além de movimentar a tocha ao longo da junta. A manutenção do arco é assegurada pela alimentação contínua do arame eletrodo, e o comprimento do arco é, em princípio, mantido relativamente constante pelo próprio sistema, independente dos movimentos do soldador, dentro de certos limites, nos sistemas mais comuns utilizados neste processo. O calor gerado pelo arco é empregado para fundir as peças a serem unidas, assim como o arame eletrodo, que é transferido para a junta e atua como metal de adição. A soldagem MIG/MAG apresenta, de maneira geral, uma série de vantagens em comparação com a soldagem por eletrodos revestidos. Essas vantagens incluem uma alta taxa de deposição e um alto fator de ocupação do soldador, tornando o processo altamente produtivo. Além disso, é altamente versátil em relação aos tipos de materiais e espessuras aplicáveis, elimina a necessidade de fluxos de soldagem e, portanto, evita operações de remoção de escória e limpeza. A exigência de habilidade do soldador é reduzida, o que facilita a sua aprendizagem e aplicação (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009; WAINER, BRANDI E DE MELLO, 2004).

Este processo semiautomático oferece diversas vantagens adicionais, de acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2009) e Wainer, Brandi e de Mello (2004), sendo facilmente adaptado para a soldagem automática. O eletrodo nu é alimentado de forma contínua, permitindo a execução da soldagem em todas as posições. A velocidade de soldagem é elevada, com uma taxa de deposição significativa devido à alta densidade de corrente na ponta do arame. Além disso, não há formação de escória, eliminando o tempo gasto em sua remoção e o risco de

inclusão de escória em soldagens em várias passagens. A penetração de raiz é mais uniforme do que no processo com eletrodos revestidos.

A soldagem MIG/MAG, apesar de suas vantagens, apresenta algumas limitações significativas que merecem atenção. Uma das principais limitações é a maior sensibilidade às variações dos parâmetros elétricos do arco de soldagem, que têm um impacto direto na qualidade do cordão de solda produzido. Isso exige um ajuste rigoroso dos parâmetros para obter as características desejadas no cordão de solda. Determinar esses parâmetros é desafiador devido à forte interdependência entre eles e à influência que exercem sobre o resultado final do processo. Além disso, a soldagem MIG/MAG envolve um equipamento mais caro e requer mais manutenção em comparação com a soldagem por eletrodos revestidos, e oferece uma variedade mais limitada de consumíveis (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009; WAINER, BRANDI E DE MELLO, 2004).

Outras limitações, de acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2009) e Wainer, Brandi e de Mello (2004) incluem uma maior velocidade de resfriamento devido à ausência de escória, o que pode aumentar a probabilidade de trincas, especialmente em aços temperáveis. A soldagem também requer proteção contra correntes de ar, tornando-se desafiadora em locais de difícil acesso devido à proximidade necessária do bocal da pistola com o metal-base. Durante a soldagem, há o risco de projeções de gotas de metal líquido, e o processo envolve uma grande emissão de raios ultravioleta. Além disso, o equipamento de soldagem MIG/MAG é mais caro e complexo em comparação com o processo de eletrodo revestido e é menos portátil.

No processo de soldagem MIG/MAG, diversas variáveis desempenham um papel fundamental na qualidade e no desempenho do processo. Essas variáveis incluem a tensão, a corrente e a polaridade do arco de soldagem, a velocidade de deslocamento, a vazão de gás protetor e o diâmetro e comprimento do eletrodo percorrido pela corrente elétrica, conhecido como "stick out" (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Além dessas variáveis, a norma *American Society of Mechanical Engineers* (ASME) (1983, apud. WAINER, BRANDI E DE MELLO, 2004) define outras variáveis importantes para o processo, que afetam a qualificação do procedimento de soldagem. Essas variáveis incluem o metal-base, o metal de adição, o tratamento térmico após a soldagem, o preaquecimento, o tipo de gás de proteção, o tipo de junta, a posição de soldagem, as características elétricas e a técnica de soldagem. O entendimento e controle dessas variáveis são essenciais para garantir a integridade das soldas produzidas pelo processo MIG/MAG (WAINER, BRANDI E DE MELLO, 2004).

O processo MIG/MAG opera normalmente com corrente contínua e polaridade inversa, ou seja, com o eletrodo no polo positivo, o que proporciona maior penetração e estabilidade de arco. Em situações onde uma penetração profunda não é necessária, a polaridade direta pode ser empregada para aumentar a velocidade de deposição, especialmente quando a penetração não é um fator crítico. Por outro lado, a corrente alternada raramente é utilizada neste processo.

A corrente de soldagem desempenha um papel fundamental ao influenciar diretamente a penetração, largura e reforço do cordão de solda, a taxa de deposição e a energia de soldagem, conforme discutido anteriormente. A seleção da corrente de soldagem depende de vários fatores, incluindo a espessura das peças a serem unidas, o diâmetro do eletrodo e a geometria desejada para o cordão de solda. Além disso, a tensão de soldagem desempenha um papel crucial ao afetar o comprimento do arco e o modo de transferência de metal (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

De acordo com Jeffus (2016, p. 280), os gases de proteção no processo GMAW têm como principal função evitar a oxidação e contaminação do metal fundido, mas também influenciam fatores como a penetração da solda e a transferência de metal. Gases inertes como argônio e hélio são usados por não reagirem com o metal, mas podem resultar em um arco instável e em subcortes. Pequenas quantidades de gases reativos, como oxigênio e dióxido de carbono, são adicionadas para estabilizar o arco e melhorar a transferência metálica. No entanto, o uso desses gases oxidantes pode causar perda de elementos de liga, como cromo, alumínio e manganês, que são consumidos ao reagirem com o oxigênio ou evaporarem durante o processo de soldagem, comprometendo as propriedades da solda. Para mitigar esse efeito, é necessário utilizar arames com desoxidantes. O dióxido de carbono puro é comum na soldagem de aços, proporcionando maior velocidade e penetração, embora resulte em mais respingos e menor estabilidade do arco.

No que diz respeito à vazão de gás protetor, é essencial que esta seja ajustada adequadamente para proporcionar uma proteção eficiente contra a contaminação do arco e da solda pela atmosfera. Geralmente, à medida que a corrente de soldagem aumenta, a poça de fusão e a área a ser protegida também crescem, exigindo, portanto, uma vazão maior de gás. Vazões insuficientes podem resultar em problemas como a formação de porosidades e a perda de elementos de liga, comprometendo as propriedades da solda. Por outro lado, vazões excessivamente altas podem causar depressões na poça de fusão, tornando o cordão de solda irregular e aumentando desnecessariamente os custos operacionais (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2009) a velocidade de soldagem é um parâmetro crucial que afeta a energia de soldagem e, conseqüentemente, a quantidade de calor transmitida à peça. Velocidades de soldagem muito baixas, embora elevem os custos operacionais, podem resultar em problemas metalúrgicos devido à alta energia de soldagem. Por outro lado, velocidades excessivamente altas levam a uma menor penetração, reforço e largura do cordão de solda, podendo causar problemas como mordeduras, falta de fusão e penetração insuficiente do cordão de solda.

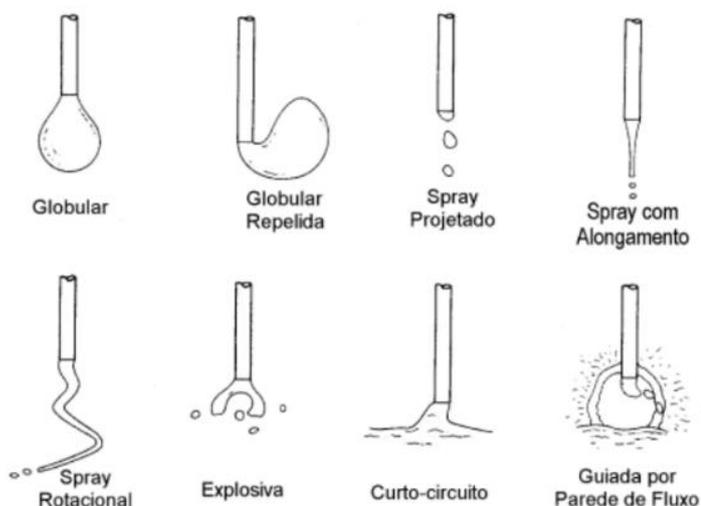
A composição química da atmosfera do arco exerce uma influência significativa nas características do processo de soldagem, afetando a facilidade de ionização e a transferência de calor do arco para o ambiente. Esses efeitos, por sua vez, impactam a condutividade elétrica do arco, modificando a forma da curva característica. Por exemplo, na soldagem GTAW, a introdução de diversos gases na atmosfera de argônio tende a aumentar a tensão de operação do arco, deslocando a curva característica para valores mais elevados (MODENESI, 2012).

3.5.1 Modos de transferência metálica

Na soldagem com eletrodos consumíveis, a transferência do metal fundido da ponta do eletrodo para a poça de fusão é um processo crucial. De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2009) e Modenesi (2012), no contexto da soldagem MIG/MAG, o modo como essa transferência ocorre desempenha um papel fundamental, influenciando diversas características do processo. Estas características incluem os parâmetros elétricos do arco, como o tipo e o valor da corrente, a tensão e a polaridade do arco elétrico, o tipo e a composição do meio de proteção, a quantidade de gases absorvidos pelo metal fundido (especialmente hidrogênio, nitrogênio e oxigênio), a viabilidade do processo em diferentes posições de soldagem e o nível de respingos gerados.

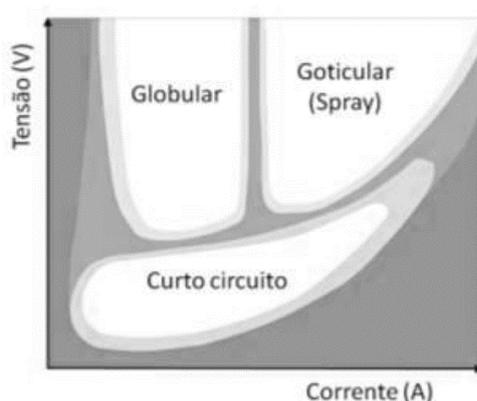
A transferência de metal no processo GMAW ocorre principalmente por curto circuito, transferência globular e transferência por "*spray*". Esses e outros modos de transferência metálica estão representados na Figura 3.6, enquanto na Figura 3.7 estão relacionados a tensão e a corrente características dessas três formas de transferência.

Figura 3.6 — Modos de transferência



Fonte: Modenesi,2012.

Figura 3.7 — Relação tensão corrente para os modos de transferência.

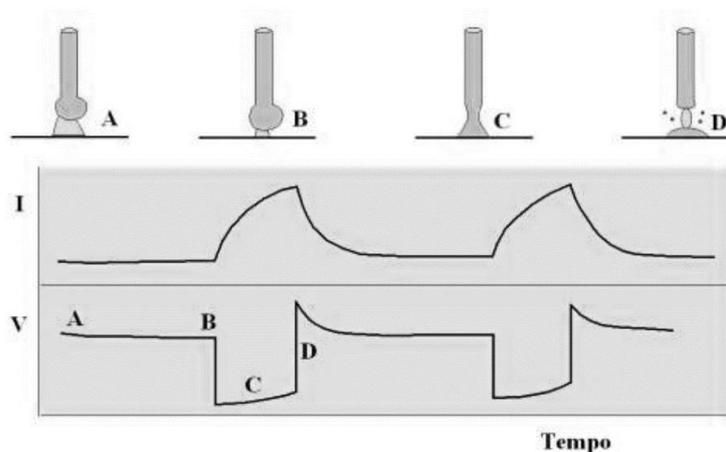


Fonte: Modenesi,2012.

A transferência por curto circuito é um fenômeno que ocorre durante a soldagem quando o arco elétrico possui um comprimento reduzido, geralmente associado a baixas tensões e, mais frequentemente, a baixas correntes. Nesse tipo de transferência, a extremidade do eletrodo entra periodicamente em contato com a poça de fusão, resultando em um curto circuito e na extinção temporária do arco, como pode ser visto na Figura 3.8. Durante esse curto circuito, a corrente aumenta rapidamente, aquecendo o eletrodo devido ao efeito Joule e promovendo sua fusão. Para controlar e otimizar a velocidade de variação da corrente durante a transferência por curto circuito, as máquinas de soldagem GMAW são equipadas com um dispositivo adicional chamado "indutância". O ajuste adequado desse controle possibilita alcançar uma corrente durante o curto circuito que seja suficientemente alta para romper o curto, evitando, no entanto, a formação excessiva de respingos. Esse modo de transferência é particularmente adequado

para a soldagem de peças com pequena espessura, ou seja, peças de até 6 mm (MODENESI, 2012; JEFFUS, 2016).

Figura 3.8 — Transferência por curto circuito



Fonte: Modenesi, 2012.

A transferência globular é um processo de soldagem que se caracteriza pela formação de grandes gotas de metal líquido na extremidade do eletrodo. Essas gotas têm um diâmetro maior do que o do próprio eletrodo e são transferidas para a poça de fusão em uma frequência relativamente baixa, geralmente variando de 10 a 100 gotas por segundo. Este modo de transferência é observado em condições de corrente elétrica baixa e tensão elevada, juntamente com um comprimento de arco, especialmente quando se utiliza um gás de proteção à base de argônio (MODENESI, 2012).

O processo de formação das gotas inicia-se com a acumulação de metal líquido na ponta do arame, mantido nessa posição devido à tensão superficial. À medida que as gotas crescem em tamanho, seu peso aumenta progressivamente, eventualmente resultando na separação delas do arame. A transferência dessas grandes gotas para a poça de fusão ocorre predominantemente devido à ação da gravidade, que as faz cair na direção da peça a ser soldada (MODENESI, 2012; MACHADO, 1996).

Quando se utiliza uma mistura de proteção rica em argônio e o eletrodo está conectado ao polo positivo, observa-se uma redução no diâmetro das gotas transferidas à medida que a corrente aumenta. Entretanto, acima de um determinado limiar de corrente, conhecido como corrente de transição (I_c), ocorre uma rápida diminuição no diâmetro das gotas. Nesse ponto, o arco elétrico, que antes cobria apenas a parte inferior da gota na ponta do eletrodo, passa a envolvê-la completamente. A transferência não é mais influenciada pela gravidade, mas sim pela força magnética, e as gotas são projetadas para a poça de fusão independentemente da posição de

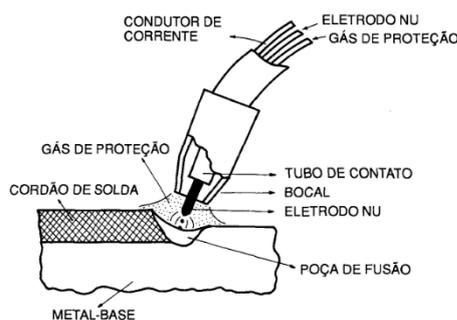
soldagem. Esse processo de transferência é altamente estável, com poucas perturbações no arco e quase nenhum respingo. No entanto, devido à necessidade de uma corrente relativamente alta, a soldagem com transferência spray pode ser inadequada para chapas finas, devido ao risco de perfuração, ou para soldagem fora da posição plana, devido à formação de uma grande poça de fusão de difícil controle. A corrente de transição varia conforme fatores como a composição do eletrodo, seu diâmetro e comprimento, bem como o tipo de gás de proteção utilizado. Esse modo de transferência é característico da soldagem GMAW com uma atmosfera rica em argônio e com o eletrodo no polo positivo (MODENESI, 2012; JEFFUS, 2016).

3.5.2 Equipamentos e consumíveis

O equipamento essencial para a soldagem MIG/MAG inclui uma fonte de energia, um alimentador de arame, uma tocha de soldagem e uma fonte de gás protetor, além de cabos e mangueiras, conforme ilustrado na Figura 3.9. Em aplicações de soldagem automatizada, podem ser empregados dispositivos auxiliares como posicionadores e sistemas de movimentação da tocha.

Os principais consumíveis utilizados nesse processo são o arame eletrodo, o gás de proteção e, frequentemente, um líquido para proteger a tocha e as áreas adjacentes à solda contra respingos.

Figura 3.9 — Equipamento básico para soldagem MIG/MAG, foco no bocal



Fonte: Wainer, Brandi e de Mello, 2004.

4 ESTADO DA ARTE

Chacón-Fernández, García e Labanda (2022) realizaram testes para analisar a influência dos parâmetros de soldagem, como corrente, tensão e velocidade de soldagem, na qualidade da junta soldada e as propriedades do material de aços inoxidáveis duplex durante o processo de soldagem GMAW. A partir de técnicas como microscopia óptica para analisar a microestrutura, modelos de elementos finitos para estudar os ciclos térmicos e ensaios de tração e medições de dureza para analisar as propriedades mecânicas, foi possível realizar uma análise abrangente dos efeitos dos parâmetros de soldagem. Os resultados obtidos destacaram o papel da escolha do ângulo de bisel na penetração da solda, facilitando sua entrada, na diluição do metal de adição no metal de base, que influencia na composição e propriedades da ZTA e na distribuição de calor durante a soldagem, afetando a formação da zona termicamente afetada e a microestrutura resultante. Paralelamente, relacionou o aumento da velocidade de soldagem com a menor penetração, diminuição da ZTA e da distorção, havendo também uma mudança na taxa de resfriamento, alterando a formação da microestrutura e das propriedades mecânicas da junta soldada. Portanto, a seleção apropriada do ângulo de bisel e o controle preciso da velocidade de soldagem são fundamentais para otimizar a qualidade e as propriedades das juntas soldadas.

Meseguer-Valdenebro, Martínez-Conesa e Portoles (2022) discutiram a influência dos parâmetros de soldagem no tamanho do grão, na Zona Termicamente Afetada (ZTA) e no grau de diluição do material 6063-T5. Utilizando o método de Taguchi, que permite a análise eficiente de múltiplos fatores com um número reduzido de experimentos, os autores realizaram nove experimentos para avaliar o impacto desses parâmetros. A análise incluiu o tamanho do grão, a ZTA e a diluição do material de adição, bem como os efeitos do tipo de gás de proteção. A medida da fresta afetou diretamente o grau de diluição do material de adição na solda, influenciando a composição química e as propriedades mecânicas da junta soldada. A S_p foi identificada como a variável com maior impacto no grau de diluição, contribuindo com aproximadamente 42%, seguida pela potência de soldagem (P) e pela velocidade de soldagem (V_s). A velocidade de soldagem foi responsável por cerca de 18% do tamanho da ZTA e 27% do grau de diluição. Essas descobertas destacam a importância de ajustar e otimizar a separação das bordas e a velocidade de soldagem para obter soldas de alta qualidade, controlando a diluição do material e a formação da ZTA, resultando em melhores propriedades mecânicas e desempenho da junta soldada.

O estudo realizado por Wang et al. (2021) examinou a influência de diversos parâmetros de soldagem nas juntas em T de ligas de alumínio de espessura média utilizando o método de

soldagem bilateral síncrona de duplo P-GMAW. Foram realizados testes para examinar como a velocidade de alimentação do arame impacta a microestrutura e as propriedades mecânicas das soldas empregando técnicas como microscopia óptica, microscopia polarizante e medição de micro dureza. Devido as diferentes condições de resfriamento notou-se que a dureza na ZTA da base era menor que na chapa vertical, paralelamente na microestrutura observou-se a formação de grãos equiaxiais por toda a ZTA e a formação de grãos colunares próximo a ZTA da chapa base. Observou-se que uma velocidade de alimentação do arame otimizada a 9,5 m/min resultou em soldas bem formadas, com fusão completa da raiz e alta qualidade, enquanto velocidades superiores a 10 m/min aumentavam significativamente a energia linear, levando a defeitos superficiais como queima excessiva. A velocidade de soldagem também teve um papel crucial na penetração da solda e na redução de defeitos, como porosidade. Esse estudo demonstrou que a velocidade de soldagem afeta diretamente a distribuição de calor, a formação de grãos e a dureza da Zona termicamente afetada (ZTA), sublinhando a importância de um controle preciso desse parâmetro para obter soldas de alta qualidade e desempenho consistente em juntas de alumínio.

Martinez-Conesa et al. (2017) investigaram a otimização dos parâmetros geométricos de juntas soldadas no processo de soldagem GMAW, com um foco detalhado na influência da velocidade do eletrodo sobre a penetração, largura e sobre espessura do cordão de solda. Utilizando uma máquina de soldagem de corrente contínua compacta GALAGAR Compact 387 com polaridade invertida e uma mistura de gás de proteção composta por 79% de Argônio e 21% de CO₂, os experimentos foram conduzidos em aço carbono tipo F-1110, com eletrodo ER-70S6 de 0,8 mm de diâmetro. As amostras foram preparadas em posição horizontal com uma separação de 2 mm entre as bordas, e um único passe de solda foi realizado com uma velocidade constante de 6,25 mm/s. A análise das seções transversais dos cordões de solda foi feita utilizando um projetor de perfis de alta resolução, permitindo medir com precisão a penetração, largura e sobre espessura do cordão. Os resultados mostraram que uma velocidade mais alta do eletrodo geralmente resultou em menor penetração devido ao tempo reduzido de fusão, enquanto uma velocidade mais baixa permitiu uma maior penetração. A largura do cordão também foi afetada, com velocidades mais altas produzindo cordões mais estreitos e velocidades mais baixas levando a cordões mais largos devido à maior deposição de metal. Além disso, a sobre espessura do cordão foi influenciada pela velocidade do eletrodo, com variações na velocidade afetando diretamente a quantidade de metal depositado e, conseqüentemente, a sobre espessura. Por meio da Metodologia de Superfície de Resposta (RSM), os pesquisadores modelaram as relações entre os parâmetros de soldagem e as características geométricas do cordão de solda. A

otimização “multiobjetivo” permitiu identificar as condições ideais de soldagem, resultando em um equilíbrio entre penetração adequada, largura controlada e sobre espessura mínima. Os resultados obtidos demonstraram a eficácia da RSM na otimização dos processos de soldagem, proporcionando “insights” valiosos para melhorar a qualidade das juntas soldadas e garantir as propriedades mecânicas desejadas.

Rezende et al. (2011) realizaram uma análise quantitativa da regularidade da transferência metálica com curto-circuito no processo de soldagem MIG/MAG usando o Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência por Curto-Circuito (IV_{cc}). Para isso, realizaram testes com arame-eletrodo AWS ER70S-6 e uma mistura de Argônio com 15% de Dióxido de Carbono como gás de proteção, variando a tensão entre 16 e 24 Volts para observar seu efeito na transferência metálica. Foram medidos os tempos de curto-circuito (t_{cc}) e de arco aberto (t_{ab}), que são fundamentais para o cálculo do IV_{cc}, refletindo a estabilidade do processo. Além disso, analisaram a geometria do cordão de solda, como altura e largura, para correlacionar com a regularidade da transferência. Os dados obtidos foram comparados com a eficiência de deposição e características do cordão de solda, e a análise foi realizada com o auxílio de um programa MATLAB. Os resultados confirmaram que o IV_{cc} é eficaz na avaliação da estabilidade do processo MIG/MAG, mostrando que a regularidade da transferência metálica reduz respingos e melhora a qualidade do cordão de solda. O estudo também ressaltou a importância de ajustar parâmetros como tensão, corrente e tipo de gás de proteção para otimizar o processo de soldagem.

Karadeniz, Ozsarac e Yildiz (2007) investigam a influência de diferentes parâmetros de soldagem, como corrente de soldagem, tensão de arco e velocidade de soldagem, qualidade da junta de solda, na penetração, a taxa de aquecimento e o perfil de soldagem do aço Erdemir 6842 (DIN EN 10120). Os testes realizados variaram esses parâmetros e mediram a profundidade de penetração das amostras soldadas. Os resultados mostraram que a corrente de soldagem teve o maior impacto na penetração, com um aumento na corrente resultando em maior profundidade de penetração. A velocidade de soldagem também afetou significativamente a penetração, sendo que uma velocidade de 60 cm/min proporcionou a maior penetração. A tensão de arco, embora tenha influenciado, teve um efeito menos pronunciado. As amostras, preparadas adequadamente e analisadas para composições químicas, demonstraram que o controle preciso da corrente e da velocidade de soldagem é crucial para alcançar soldas de alta qualidade.

5 MATERIAIS E METODOS

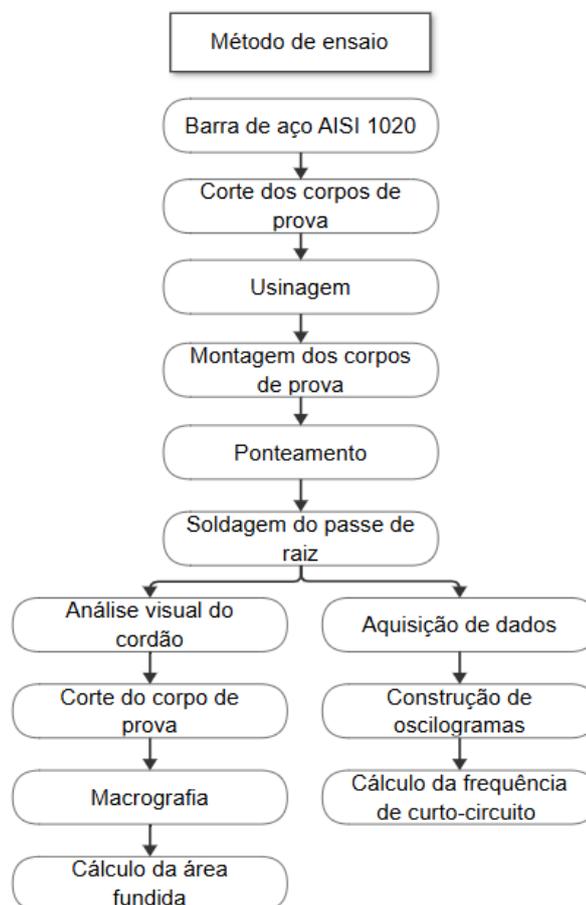
5.1 Materiais

Durante o preparo dos corpos de prova e execução dos testes foram utilizadas barras retangulares de aço AISI 1020 de 19,05 mm de altura, 80 mm de largura e 600 mm de comprimento. O Aço AISI 1020, de acordo com a NBR NM 87:2000, é composto por 0,18 a 0,23% de carbono, 0,3 a 0,6% de manganês e no máximo 0,04% de fósforo e 0,05% de enxofre. A temperatura de fusão do aço AISI 1020 é igual a 1460°C. Para realizar o passe de raiz foi utilizado arame ER 70S-2 de 1,2 mm de diâmetro.

5.2 Métodos

A Figura 5.1 contém o fluxograma dos procedimentos adotados.

Figura 5.1 — Fluxograma da metodologia

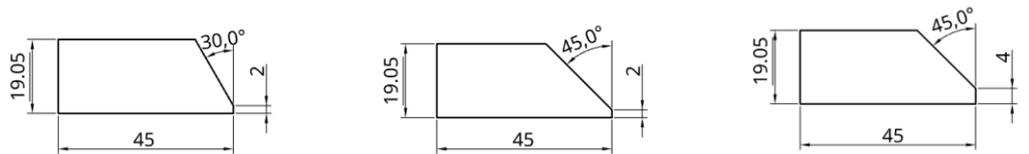


Fonte: Autor,2024.

5.2.1 Preparação das amostras

Foram feitos três tipos de corpos de prova, as medidas de nariz e ângulo de bisel estão ilustradas na Figura 5.2.

Figura 5.2 — Representação esquemática das dimensões dos corpos de prova



Fonte: Autor, 2024.

A produção dos corpos de prova se iniciou com o corte das barras de aço, utilizando a Serra Fita Horizontal Franho FM-1600, conforme ilustrado na Figura 5.3.

Figura 5.3 — Serra Fita Horizontal



Fonte: Autor, 2024.

As barras foram cortadas com a utilização de fluido de corte, Figura 5.4, resultando em corpos de prova de 19,05 mm de altura, 45 mm de largura 80 mm de comprimento.

Figura 5.4 — Detalhamento do corte



Fonte: Autor, 2024

Para o fresamentos dos corpos de prova foi utilizado uma Fresadora universal Clever FH-4, Figura 5.5, foi primeiramente utilizada para realizar o faceamento das laterais, conforme Figura 5.6, em seguida, com uma fresa de topo de aço rápido de 20 mm, foram feitos os cortes dos ângulos do bisel conforme Figura 5.7, nesta operação foi utilizado fluido de corte.

Figura 5.5 — Fresadora universal Clever FH-4



Fonte: Autor, 2024.

Figura 5.6 — Faceamento das laterais



Fonte: Autor, 2024.

Figura 5.7 — Corte de chanfro



Fonte: Autor,2024.

5.2.2 Operação de soldagem e aquisição de dados

Os corpos de prova foram, de par em par, colocados sobre uma superfície plana e fixadas a 2 mm de distância para serem manualmente ponteadas, operação utilizada para fixar os componentes para uma soldagem posterior.

As operações de soldagem foram realizadas com o equipamento *Power Wave*® S350 equipado com o alimentador de fios LF-45, ambos da Lincoln Electric, conforme Figura 5.9. A máquina foi configurada de forma que a indutância fosse a mesma em todos os testes. O equipamento foi conectado a um computador por meio do software *Power Wave Manager* ® para aquisição em tempo real dos parâmetros elétricos de soldagem a uma taxa de 1200 dados por segundo.

Foi utilizado gás de proteção 20% dióxido de carbono e 80% argônio, concentração próxima a utilizada por Martinez-Conesa et al. (2017). De acordo com Souza et al. (2011), a composição do gás de proteção é essencial para a regularidade da transferência metálica, influenciando tanto o comprimento do arco quanto a estabilidade do processo de soldagem, contribuindo para a redução de respingos. Misturas contendo entre 18% e 25% de CO₂, com argônio como principal componente são usadas para transferência metálica por curto-circuito.

Figura 5.9 — *Power Wave® S350* com alimentador de fios LF-45



Fonte: Autor, 2024.

Para garantir a uniformidade no processo de soldagem, foi utilizado um tartilope modelo MC-46 da White Martins, conforme mostrado na Figura 5.10, para manter constante a velocidade de deslocamento (VD) da tocha. Durante a soldagem, a tocha foi centralizada e posicionada perpendicularmente às amostras, o bocal da tocha posicionado 20 mm acima da borda da chapa. Em cada corpo de prova, foi realizado um único cordão de solda. Após soldadas as amostras foram identificadas. Os parâmetros utilizados em cada teste podem ser observados na Tabela 5.1.

Figura 5.10 — Sistema de deslocamento mecanizado do processo GMAW



Fonte: Autor, 2024.

Tabela 5.1 — Parâmetros dos ensaios

Parâmetros	CP 01	CP 02	CP 03	CP 04	CP 05	CP 06
Ângulo [°]	30	45	30	45	45	45
Nariz [mm]	2	2	2	2	4	2
VA [in/min]	99	99	99	151,18	151,18	151,18
VD [cm/mim]	13,68	13,68	13,68	13,68	13,68	16,39

Fonte: Autor, 2024.

Os dados obtidos na soldagem foram utilizados para montagem de oscilogramas, a fim de se descobrir a configuração da transferência metálica do processo. Foi realizada a contagem dos picos do oscilograma no período de um segundo para cálculo da frequência do processo em hertz [Hz].

5.2.3 Análise macrográfica e cálculo área da Zona Fundida

Os corpos de prova soldados foram cortados com a serra fita utilizando fluido de corte constante, assegurando um corte contínuo e sem superaquecimento. Os cortes foram feitos paralelamente a lateral da peça, onde observou-se que o processo estava estabilizado.

Em seguida, as amostras foram submetidas a um processo de lixamento, utilizando lixadeiras Lixadeira Arotec Modelo Aropol-VV. Posteriormente, foi realizado o ataque químico com o reativo Nital 5%, durante aproximadamente 30 segundos. Após a revelação das áreas de interesse as amostras foram fotografadas. As imagens foram importadas para o software CAD e escaladas adequadamente para corresponder às dimensões reais. A seguir, foi traçado um contorno preciso da área a ser medida, utilizando ferramentas de desenho como polilinhas. Com o contorno fechado, a função "Área" foi acionada, permitindo a seleção do perímetro desenhado para calcular a área e o resultado foi exibido em mm². O mesmo foi feito para o excesso de penetração. Procedimento semelhante ao realizado por Meseguer-Valdenebro, Martínez-Conesa e Portoles (2022).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram analisados de par em par a fim de comparar os resultados de cada alteração de parâmetro, com exceção do corpo de prova 1. As análises realizadas nos corpos de prova possibilitaram a avaliação da relação entre o ângulo de bisel, o tamanho de nariz, a velocidade de deslocamento e a velocidade de alimentação. As análises de tensão e corrente foram realizadas no período de 15 a 15,5 segundos, para que ocorressem após a estabilização do arco.

6.1 Corpo de prova 01

O corpo de prova 01 foi soldado seguindo os parâmetros da Tabela 6.1.

Tabela 6.1 — Parâmetros de teste- Corpos de prova 01

Parâmetro	CP 01
Ângulo [°]	30°
Nariz [mm]	2
VA [in/min]	99
VD [cm/mim]	13,68

Fonte: Autor,2024.

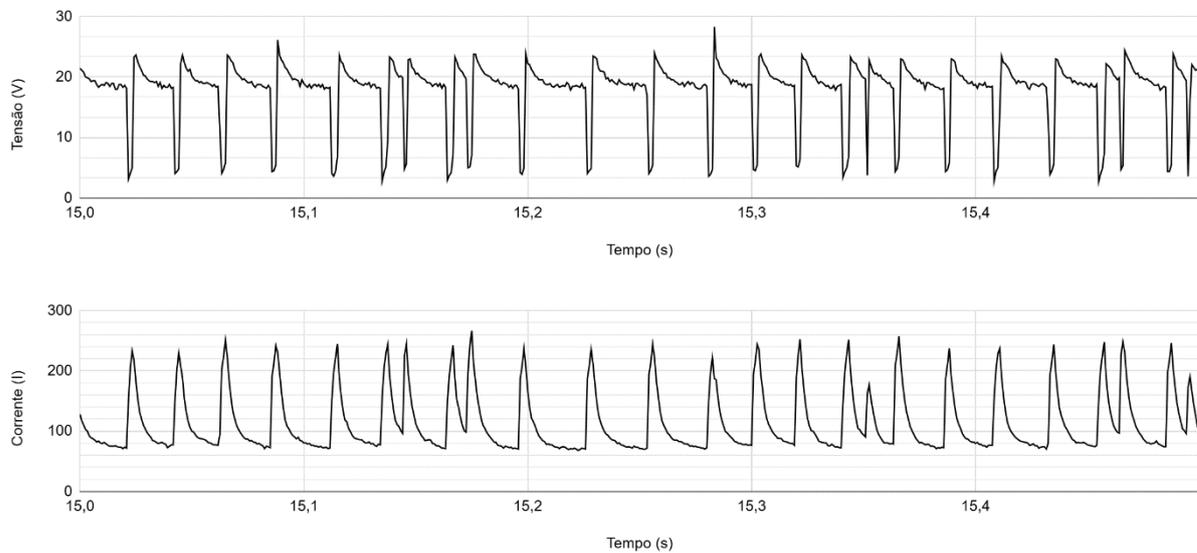
O resultado da soldagem do passe da raiz do corpo de prova 01 está ilustrado na Figura 6.1, observou-se que o cordão se encontra mais próximo a uma das faces, fato atribuído ao arco descentralizado. Essa descentralização foi causada pelo mau posicionamento da tocha no tartilope, devido à memória de forma do eletrodo, que o desviava para a lateral, resultando em respingos concentrados em uma das faces do chanfro. As amostras seguintes foram testadas após o reposicionamento da tocha, reposicionada para que o arame fosse direcionado perpendicularmente a peça, de maneira que não houvesse descentralização do arco. O oscilograma do processo de soldagem do corpo de prova 01, Figura 6.2, indica que a combinação de parâmetros resultou em uma transferência metálica do tipo curto-circuito de aproximadamente 48 Hz.

Figura 6.1 — Corpo de Prova 01 – Bisel: 30° e Nariz: 2mm



Fonte: Autor, 2024.

Figura 6.2 — Oscilograma – Corpo de prova 01



Fonte: Autor, 2024.

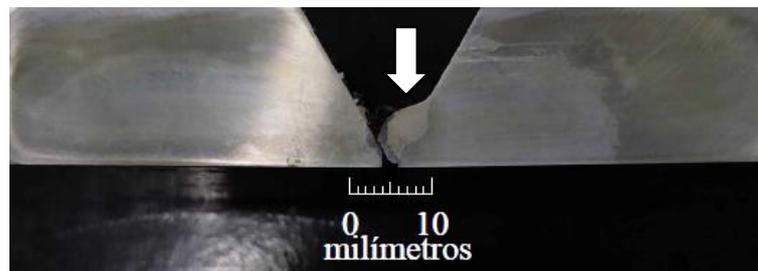
Ao analisar o corpo de prova 01, Figura 6.3, nota-se falta de penetração. A fotomicrografia do corpo de prova 01, Figura 6.4, permite a visualização da falta de fusão lateral. A área da zona fundida no corpo de prova 01 é de 26,87 mm².

Figura 6.3 — Corpo de Prova 01 – verso - Bisel: 30° e Nariz: 2mm



Fonte: Autor, 2024.

Figura 6.4 — Corpo de Prova 01 - corte - Bisel: 30° e Nariz: 2mm



Fonte: Autor, 2024.

6.2 Corpos de prova 02 e 03

Os corpos de prova 02 e 03 foram soldados seguindo os parâmetros da Tabela 6.2.

Tabela 6.2 — Parâmetros de teste- Corpos de prova 02 e 03

Parâmetro	CP 02	CP 03
Ângulo [°]	45	30
Nariz [mm]	2	2
VA [in/min]	99	99
VD [cm/mim]	13,68	13,68

Fonte: Autor, 2024.

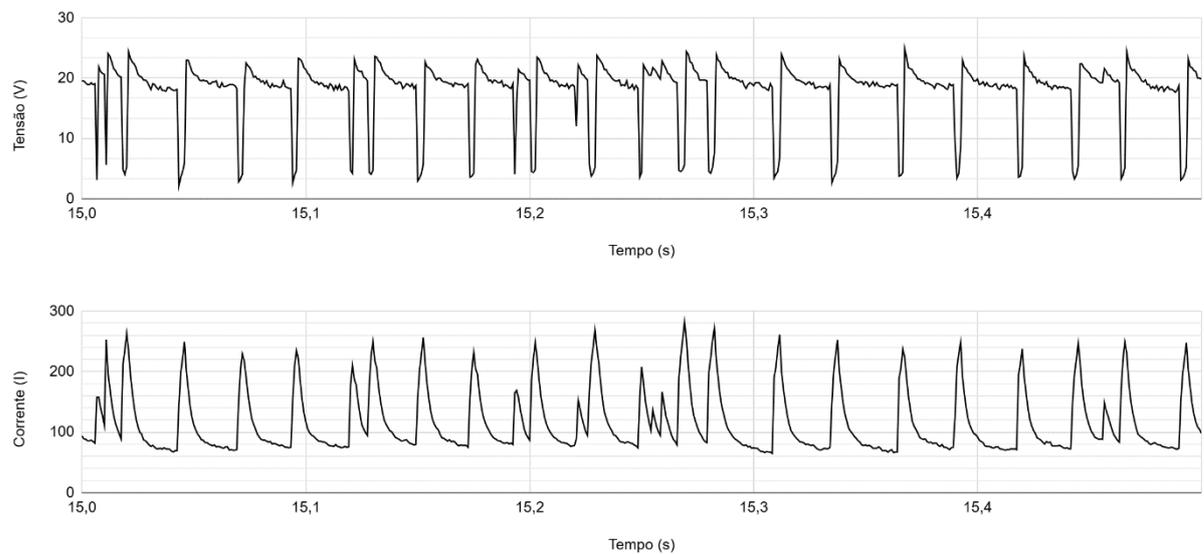
O corpo de prova 02, Figura 6.5, apresenta cordão centralizado e respingos nas faces do chanfro. O oscilograma, Figura 6.6, indica que o processo ocorreu em curto circuito, com frequência próxima a 50 Hz. Foram observados curtos pequenos, que indicam que não houve transferência metálica nesses pontos.

Figura 6.5 — Corpo de Prova 02 - Bisel: 45° e Nariz: 2mm



Fonte: Autor, 2024.

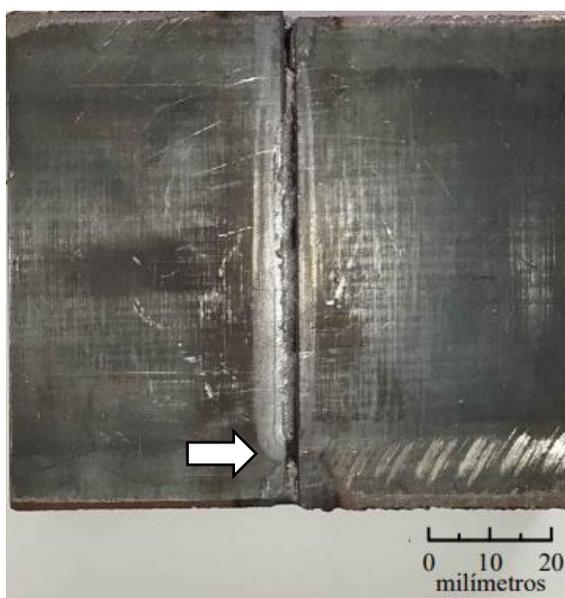
Figura 6.6 — Oscilograma – Corpo de prova 02



Fonte: Autor, 2024.

O corpo de prova 02, Figura 6.7, apresenta falta de penetração, sugerindo que o aumento do chanfro de 30° no corpo de prova 03, Figura 6.6, para 45° contribuiu para extinguir o excesso de penetração nessas condições de soldagem.

Figura 6.7 — Corpo de Prova 2 - verso - Bisel: 45° e Nariz: 2mm



Fonte: Autor, 2024.

Apesar da vista superior indicar que o cordão está centralizado, a fotomacrografia do corpo de prova 02, Figura 6.8, indica que houve falta de penetração lateral em uma das faces, o que pode ter ocorrido pela memória de forma do arame ou pelos parâmetros escolhidos para realizar a soldagem, a utilização de chanfro de maior abertura permite o deslocamento do arco, podendo causar esse tipo de descontinuidade. A área da zona fundida é de 30,55 mm², 18,3% maior que a zona fundida do corpo de prova 03, indicando que o aumento do ângulo de bisel está diretamente ligado ao aumento da zona fundida.

Figura 6.8 — Corpo de Prova 02 - corte - Bisel: 45° e Nariz: 2mm



Fonte: Autor, 2024.

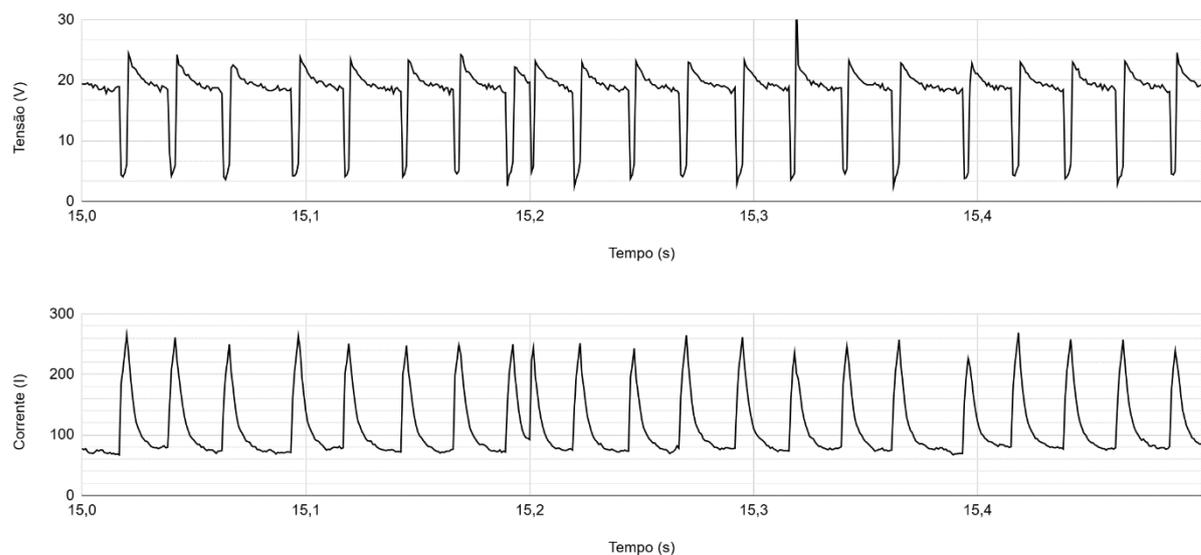
No corpo de prova 03, Figura 6.9, observa-se um cordão de raiz centralizado, sem respingos, indicando que a mudança do posicionamento da tocha, de forma que o arame ficasse perpendicular a direção de soldagem, melhora a qualidade do passe. No oscilograma, Figura 6.10, observa-se que a transferência metálica ocorreu por curto circuito, com frequência de aproximadamente 44 Hz.

Figura 6.9 — Corpo de Prova 03 - Bisel: 30° e Nariz: 2mm



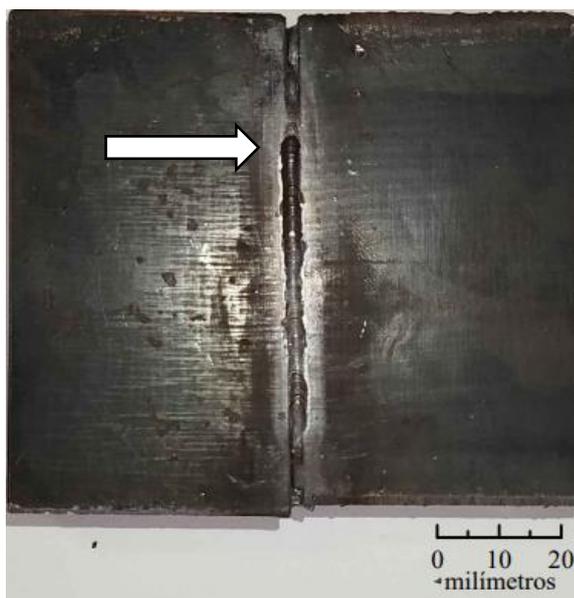
Fonte: Autor, 2024.

Figura 6.10 — Oscilograma – Corpo de prova 03



Fonte: Autor, 2024.

Figura 6.11 — Corpo de Prova 03 – verso - Bisel: 30° e Nariz: 2mm

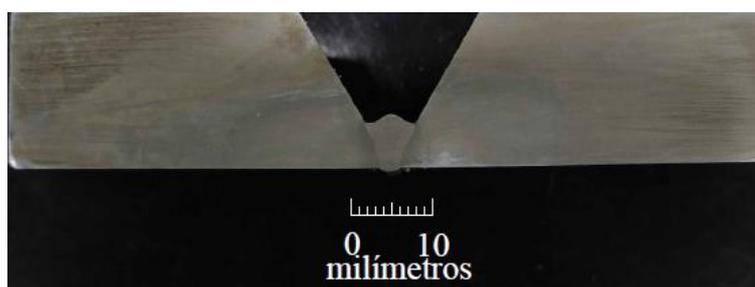


Fonte: Autor, 2024.

Na fotomacrografia do corpo de prova 03, Figura 6.12, observa-se um cordão centralizado, indicando que o reposicionamento da tocha e centralização do arco possibilita a realização de uma fusão centralizada. A área da zona fundida no corpo de prova 03 é de 25,83 mm².

Ao comparar o corpo de prova 3 ao corpo de prova 1 foi observado que o ângulo da tocha do eletrodo não exerce influência sobre o volume do cordão de solda, conforme discutido por Martinez-Conesa et al. (2017).

Figura 6.12 — Corpo de Prova 03 – corte - Bisel: 30° e Nariz: 2mm



Fonte: Autor, 2024.

6.3 Corpos de prova 02 e 04

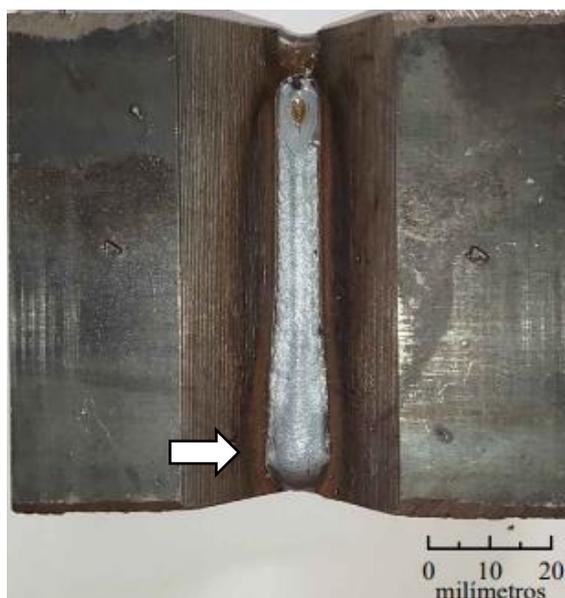
Os corpos de prova 02 e 04 foram soldados seguindo os parâmetros da Tabela 6.3.

Tabela 6.3 — Parâmetros de teste- Corpos de prova 02 e 04

Parâmetro	CP 02	CP 04
Ângulo [°]	45	45
Nariz [mm]	2	2
VA [in/min]	99	151,18
VD [cm/min]	13,68	13,68

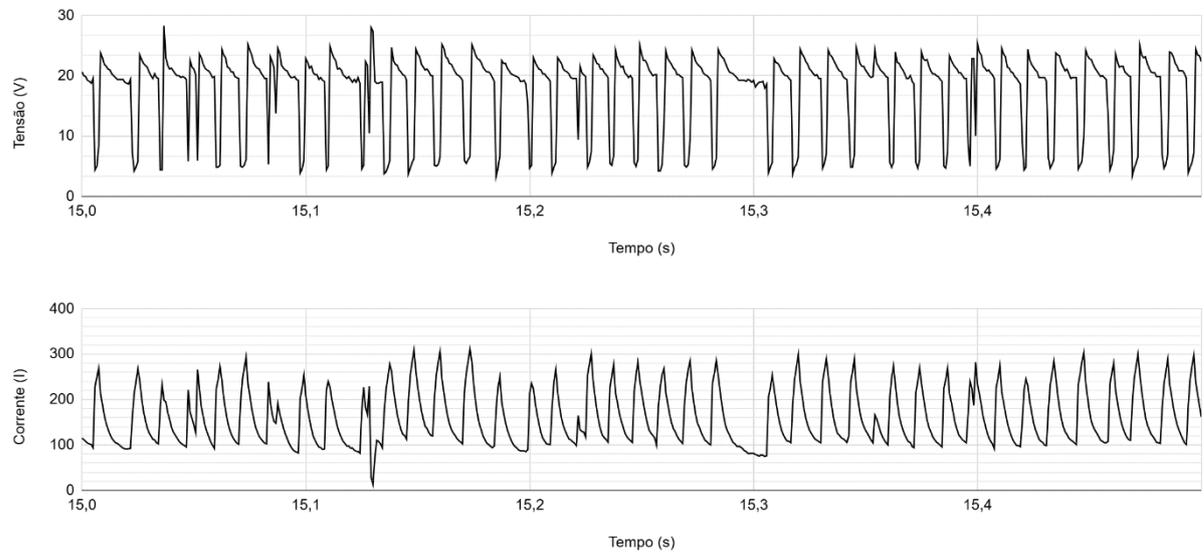
Fonte: Autor, 2024.

O corpo de prova 04, Figura 6.13, foi soldado com utilizando velocidade de alimentação de 151,18 in/min, velocidade 52,3% maior que no corpo de prova 02. Foi observado que o cordão está centralizado e mais largo que o cordão observado no corpo de prova 2.

Figura 6.13 — Corpo de Prova 04 - Bisel: 45° e Nariz: 2mm

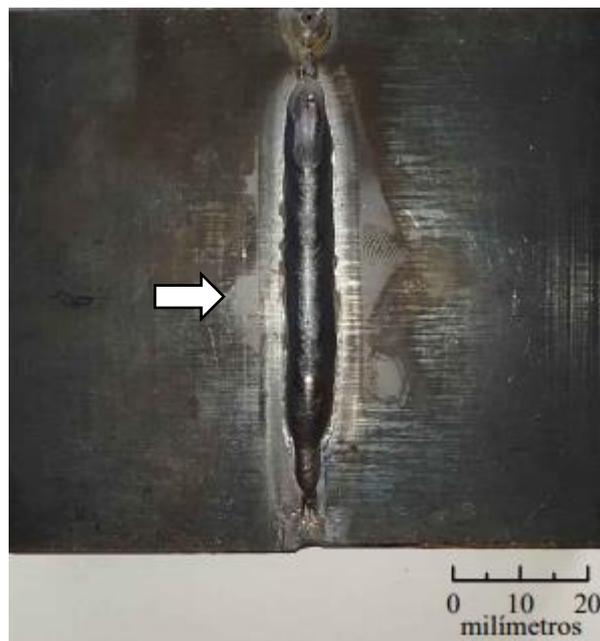
Fonte: Autor, 2024.

O oscilograma, Figura 6.14, correspondente ao corpo de prova 04, indica que a soldagem continuou sendo realizada em curto-circuito, porém com uma frequência maior, próxima aos 80 Hz. Conforme Jeffus (2016), o aumento da velocidade de alimentação no processo de soldagem por curto-circuito pode levar a uma maior frequência de curtos-circuitos, uma vez que o eletrodo entra em contato com a poça de fusão mais frequentemente devido à maior quantidade de material de adição sendo alimentado. Foram observados curtos pequenos, que indicam a ausência da transferência metálica em alguns pontos.

Figura 6.14 — Oscilograma – Corpo de prova 04

Fonte: Autor, 2024.

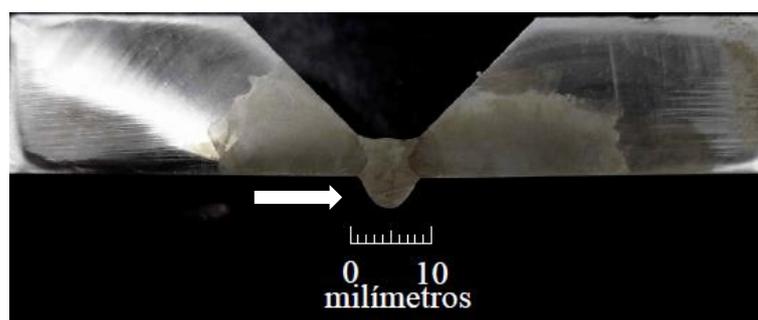
Analisando o corpo de prova 04, Figura 6.15, observa-se excesso de penetração, indicando a relação do aumento da velocidade de alimentação e da frequência de transferência metálica com o excesso de penetração.

Figura 6.15 — Corpo de Prova 4 - verso - Bisel: 45° e Nariz: 2 mm

Fonte: Autor, 2024.

A fotomacrografia do corpo de prova 04, Figura 6.16, permite a visualização do excesso de penetração. A área da zona fundida no corpo de prova 04 é de 47,58 mm², enquanto no corpo de prova 02 é de 30,55 mm², indicando que o aumento de 52,3% na velocidade de alimentação resultou em uma deposição 55,73% maior que no corpo de prova 02, tendência semelhante ao observado por Chacon-Fernández, Portolés García e Romani Labanda (2022) e Meseguer-Valdenebro, Martínez-Conesa e Portoles (2022).

Figura 6.16 — Corpo de Prova 04 - corte - Bisel: 45° e Nariz: 2mm



Fonte: Autor, 2024.

6.4 Corpos de prova 04 e 05

Os corpos de prova 04 e 05 foram soldados seguindo os parâmetros da Tabela 6.4.

Tabela 6.4 — Parâmetros de teste- Corpos de prova 04 e 05

Parâmetro	CP 04	CP 05
Ângulo [°]	45	45
Nariz [mm]	2	4
VA [in/min]	151,18	151,18
VD [cm/mim]	13,68	13,68

Fonte: Autor, 2024.

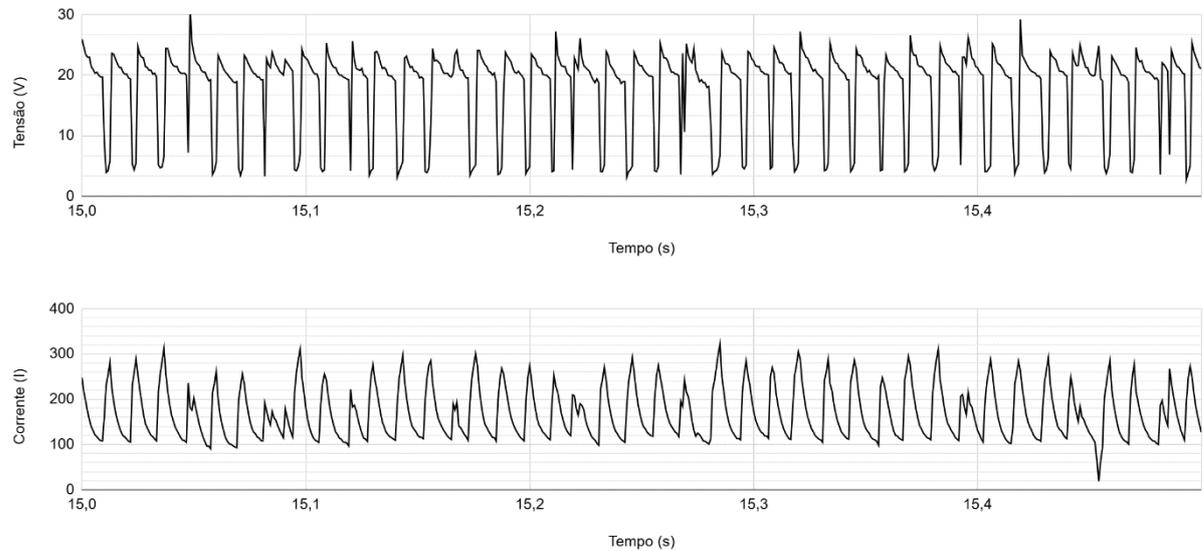
O corpo de prova 05, Figura 6.17, apresenta cordão centralizado e uniforme, sem respingos. O oscilograma correspondente ao corpo de prova 05, Figura 6.18, indica que houve transferência metálica no modo curto circuito, com frequência próxima a 84 Hz.

Figura 6.17 — Corpo de Prova 05 - Bisel: 45° e Nariz: 4 mm



Fonte: Autor, 2024.

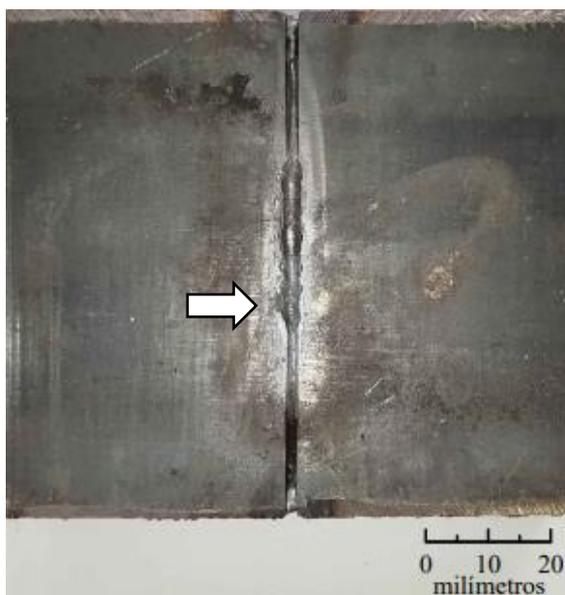
Figura 6.18 — Oscilograma – Corpo de prova 05



Fonte: Autor, 2024.

Ao analisar o corpo de prova 05, Figura 6.19, em que foi utilizado nariz de 4 mm, observou-se excesso de penetração menor que no corpo de prova 04 o que sugere que a alteração do nariz de 2 para 4 mm contribuiu para diminuir o excesso de penetração.

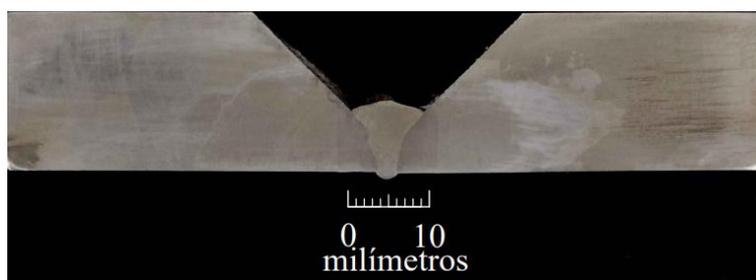
Figura 6.19 — Corpo de Prova 05 - verso - Bisel: 45° e Nariz: 4 mm



Fonte: Autor, 2024.

A fotomacrografia do corpo de prova 05, Figura 6.20, permite a visualização do excesso de penetração. A área da zona fundida no corpo de prova 04 é de 47,58 mm², enquanto no corpo de prova 05 é de 43,07 mm², sendo que a área do excesso de penetração no corpo de prova 04 é de 18,19 mm², 38% da área total, e no corpo de prova 05 é de 1,58 mm², 3,7% da área total da zona fundida. O aumento do nariz de 2 mm para 4 mm levou a uma diminuição de aproximadamente 34% do excesso de penetração.

Figura 6.20 — Corpo de Prova 05 - corte - Bisel: 45° e Nariz: 4 mm



Fonte: Autor, 2024.

6.5 Corpos de prova 04 e 06

Os corpos de prova 04 e 06 foram soldados seguindo os parâmetros da Tabela 6.5.

Tabela 6.5 — Parâmetros de teste - Corpos de prova 04 e 06

Parâmetro	CP 04	CP 06
Ângulo [°]	45	45
Nariz [mm]	2	2
VA [in/min]	151,18	151,18
VD [cm/min]	13,68	16,39

Fonte: Autor, 2024.

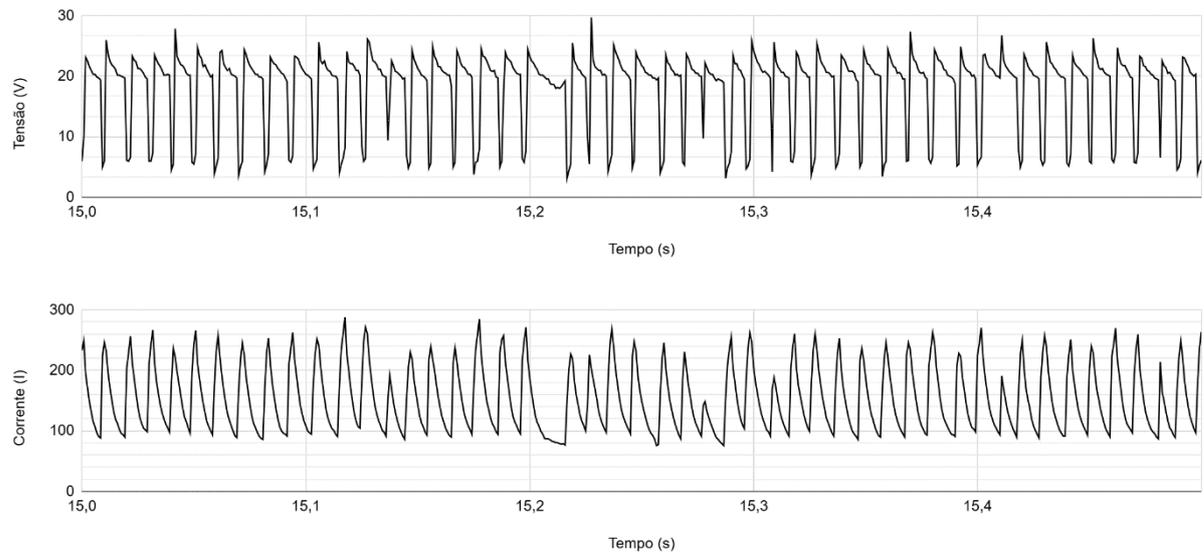
O corpo de prova 6, Figura 6.21, foi soldado utilizando velocidade de deslocamento de 16,39 cm/min, 19,7% maior que a velocidade utilizada no corpo de prova 04, resultando em um cordão centralizado, uniforme e com poucos respingos nas faces do chanfro.

Figura 6.21 — Corpo de Prova 06 - Bisel: 45° e Nariz: 2 mm

Fonte: Autor, 2024.

O oscilograma do corpo de prova 06, Figura 6.22, indica que a transferência metálica ocorreu no modo curto circuito, com frequência de aproximadamente 94Hz.

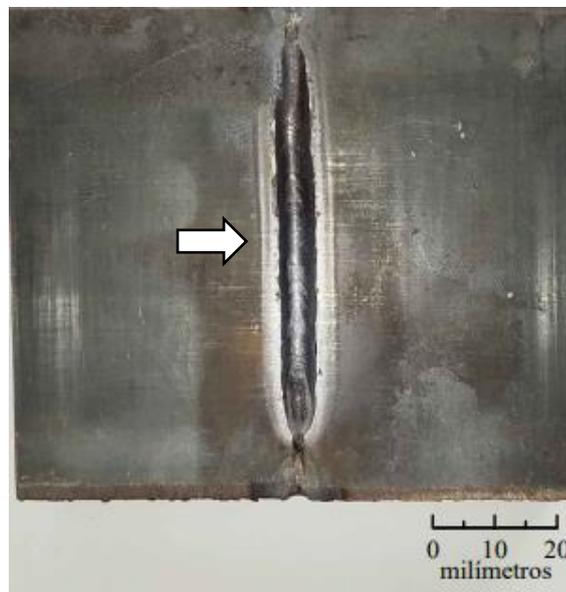
Figura 6.22 — Oscilograma – Corpo de prova 06



Fonte: Autor, 2024.

Foi observado na Figura 6.23 que o aumento da velocidade de deslocamento no corpo de prova 06 diminui o excesso de penetração observado no corpo de prova 04.

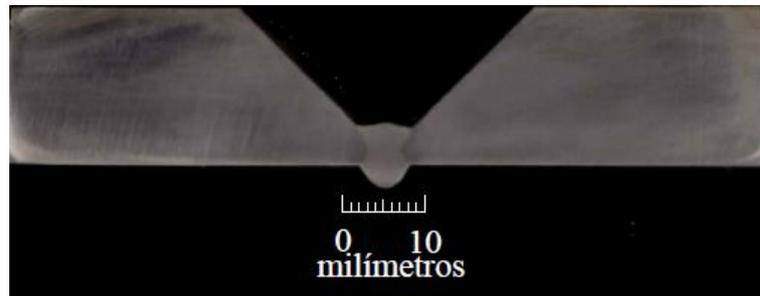
Figura 6.23 — Corpo de Prova 06 - verso - Bisel: 45° e Nariz: 2 mm



Fonte: Autor, 2024.

A fotomicrografia do corpo de prova 06, Figura 6.24, permite a visualização do excesso de penetração. A área da zona fundida no corpo de prova 04 é de 47,58 mm², enquanto no corpo de prova 06 é de 38,12 mm², indicando que o aumento da velocidade de deslocamento diminui a zona fundida em 24,82%, diminuindo o excesso de penetração.

Figura 6.24 — Corpo de Prova – corte - Bisel: 45° e Nariz: 4 mm



Fonte: Autor, 2024.

7 CONCLUSÕES

A mecanização do processo GMAW demonstrou ser eficaz para a obtenção de passes de raiz de qualidade satisfatória em aço AISI 1020. O uso do sistema Power Wave para a coleta de dados elétricos foi fundamental para confirmar a ocorrência de transferência metálica por curto-circuito. Observou-se que o aumento da velocidade de alimentação resultou em uma maior frequência de curtos-circuitos, o que elevou o volume de material depositado.

A análise combinada dos parâmetros de soldagem, monitoramento do processo e macrografia contribuiu para uma compreensão mais aprofundada do comportamento do GMAW, indicando que a frequência de transferência e o volume de deposição podem ser controlados por ajustes na velocidade de alimentação. Além disso, verificou-se que o excesso de penetração pode ser ajustado com o aumento da velocidade de deslocamento ou correções no parâmetro de nariz.

Por fim, concluiu-se que os parâmetros de maior impacto na qualidade do cordão de solda são a velocidade de alimentação e o nariz, destacando a importância de um ajuste preciso desses fatores para garantir resultados otimizados no processo de soldagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 87:2000**. Aço carbono e ligados para construção mecânica: Designação e composição química. Rio de Janeiro, 2000.

CHACÓN-FERNÁNDEZ, Sandra; GARCÍA, Antônio Portolés; LABANDA, Gerardo Romani. **Influence of parameters on the microstructure of a duplex stainless steel joint welded by a GMAW welding process**. Progress in Natural Science: Materials International, v. 32, n. 4, p. 415-423, 2022.

FORTUNE BUSINESS INSIGHTS. **Welding Market Size, Share & COVID-19 Impact Analysis**. Disponível em: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/welding-market-101657>. Acesso em: 15 de set. de 2024.

GRAND VIEW RESEARCH. **Global Welding Equipment Market**. Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com/press-release/global-welding-equipment-market>. Acesso em: 15 de set. de 2024.

GRAND VIEW RESEARCH. **Global Welding Products Market Analysis**. Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/global-welding-products-market>. Acesso em: 15 de set. de 2024.

INTROSPECTIVE MARKET RESEARCH. **Welding Market Analysis, Size, Share, Growth, Trends**. Disponível em: <https://introspectivemarketresearch.com/reports/welding-market/>. Acesso em: 15 de set. de 2024.

JEFFUS, Larry. **Welding principles and applications**. 8th ed. Clifton Park, NY: Cengage Learning, 2016.

KARADENIZ, Erdal; OZSARAC, Ugur; YILDIZ, Ceyhan. **The effect of process parameters on penetration in gas metal arc welding processes**. Materials & design, v. 28, n. 2, p. 649-656, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.07.014>

MACHADO, Ivan Guerra. **Soldagem & técnicas conexas: processos**. 1996.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

MARINEZ- CONESA, E. J., EGEA, J. A., MIGUEL, V., TOLEDO, C., & MESEGUER-VALDENEbro, J. L. (2017). **Optimization of geometric parameters in a welded joint through response surface methodology**. Construction and Building Materials, 154, 105–114. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.07

MESEGUER-VALDENEbro, José L.; MARTÍNEZ-CONESA, Eusebio; PORTOLES, Antonio. **Influence of welding parameters on grain size, HAZ and degree of dilution of 6063-T5 alloy: optimization through the Taguchi method of the GMAW process**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 120, n. 9, p. 6515-6529, 2022.

MODENESI, Paulo J. **Introdução à física do arco elétrico soldagem I**. Belo Horizonte: UFMG, 2012.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Fontes de energia para a soldagem a arco**. Departamento de engenharia, 2009.

REZENDE, Gabriel Maradei Carneiro de et al. **Um critério para determinar a regulação da tensão em soldagem MIG/MAG por curto-circuito**. Soldagem & Inspeção, v. 16, p. 98-103, 2011.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; DE MELLO, Fábio Décourt Homem. **Soldagem: processos e metalurgia**. 4.ed. Editora Blucher, 2004.

WANG, C.; ZHANG, H.; YAN, Z.; ZHAO, Y.; CHEN, S. **Study on medium-thick al-alloy t-joints by dual P-GMAW bilateral synchronous welding**. Metals, v. 11, p. 1794, 2021. <https://doi.org/10.3390/met11111794>.

WATER WELDERS. **Welding Industry Statistics & Market Size**. Disponível em: <https://waterwelders.com/welding-industry-statistics-market-size/>. Acesso em: 15 de set. de 2024.