



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE DA VISUALIZAÇÃO DE TRANSFERÊNCIA
METÁLICA DE SOLDA MIG/MAG POR CURTO-CIRCUITO E SPRAY
COM A UTILIZAÇÃO DE UMA CÂMERA PHOTRON**

RENAN BARBOSA FIGUEIROA

Recife / PE - Brasil

2024

RENAN BARBOSA FIGUEIROA

**ANÁLISE DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA DE SOLDA
MIG/MAG POR CURTO-CIRCUITO E SPRAY COM A UTILIZAÇÃO
DE UMA CÂMERA PHOTRON**

Trabalho apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Maxime Montoya

Recife / PE - Brasil

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Figueiroa, Renan Barbosa .

Análise da visualização de transferência metálica de Solda mig/mag por curto-circuito e spray com a utilização de uma câmera photron / Renan Barbosa Figueiroa. - Recife, 2024.

59P

Orientador(a): Máxime Montoya

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2024.

1. Transferência. 2. câmera PFV. 3. GMAW. 4. parâmetros. I. Montoya, Máxime . (Orientação). II. Título.

670 CDD (22.ed.)

Ao 24º dia do mês de julho do ano de dois mil e vinte e quatro, às 14:00 horas, reuniu-se a banca examinadora para a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, intitulado Análise da visualização de transferência metálica de solda MIG/MAG por curto-circuito e spray com a utilização de uma câmera photron, elaborado pelo aluno Renan Barbosa Figueiroa, matrícula 20150003266, sob a orientação do Prof. Maxime Montoya. A banca foi composta pelos avaliadores: Prof. Maxime Montoya (orientador), Prof. Edval Araujo (avaliador), e MSc. Ivan Bezerra de Mello Picchi (avaliador). Após a exposição oral do trabalho, o candidato foi arguido pelos componentes da banca que em seguida reuniram-se e deliberaram pela sua APROVAÇÃO, atribuindo-lhe a média 7,0, julgando-o apto(x) à conclusão do curso de Engenharia Mecânica. Para constar, redigi a presente ata aprovada por todos os presentes, que vai assinada pelos membros da banca.

Orientador: Prof. Maxime Montoya

Assinatura

Avaliador
Interno: Prof. Edval Araujo

Assinatura

Avaliador
Enterno: MSc. Ivan Bezerra de Mello Picchi

Assinatura

 Documento assinado digitalmente
IVAN BEZERRA DE MELLO PICCHI
Data: 03/09/2024 11:20:57-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me ajudar nas minhas escolhas e conquistas, aos meus pais José Carlos batista Figueiroa e Maria Rutilene Barbosa Figueiroa, que sempre acreditaram em mim e me deram amor, educação e vontade para buscar os meus objetivos, tanto profissionais como pessoais.

Aos colegas de faculdade pelo auxílio no desenvolvimento do trabalho dentro da universidade, em especial a Mathews e Ivan, dois doutorandos que foram essenciais para que o trabalho fosse desempenhado de uma maneira clara e competente.

À Universidade Federal de Pernambuco pela oportunidade de desenvolver o trabalho de conclusão de curso dentro das suas dependências e assim elaborar uma nova tecnologia para os seus produtos, com base nos conhecimentos adquiridos durante o curso de engenharia.

Aos professores do curso de engenharia mecânica, pelo incentivo e auxílio nas horas de dificuldade.

RESUMO

Nos processos de soldagem GMAW, diversos fatores definem a maneira como o volume, forma e frequência o arco será formado. Estes fatores influenciam na caracterização da microestrutura e a geometria da junta de solda. Diante dessa análise, esse trabalho mostrará o método de transferência goticular com o auxílio de processamentos de imagens e vídeos digitais com o suporte da câmera PFV, com o intuito de mostrar a viabilidade e eficácia do equipamento, com foco na captação de fenômenos que ocorrem durante o processo. Inicialmente foi realizado um estudo bibliográfico, abrangendo os princípios básicos da soldagem MIG/MAG e os métodos mais comuns utilizados na deposição metálica. Em seguida foram descritas as principais características e especificações da câmera Photron que foi estudada nesse caso. Para a realização dos experimentos, foram utilizados materiais mais comuns em soldas, tais como gases de proteção, fonte, robô, arco elétrico entre outros. Após a coleta de dados, foram feitas análises dos vídeos captados, modificando certos parâmetros para a transferência. Aspectos como a formação das gotas e análise do cordão de solda foram os principais meios para conclusão da análise. Para o início do experimento, foi desenvolvido e implementado um protótipo para proteger a câmera contra os respingos gerados no processo. Os resultados obtidos mostram que foi necessário a testagem de alguns filtros de solda para não danificar o sensor do equipamento e que a visualização ficasse com toda a luz que é emitida no processo. Outro fator importante foi a utilização das lentes que possibilitam aproximar e verificar a deposição de mais perto, fazendo a detecção do comportamento metálico mais claro. Porém, percebeu-se que é necessário um estudo mais elaborado para aprimoramento da prática, discussões foram geradas sobre como o software poderia ser mais objetivo para dar informações precisas, mas que com o avanço tecnológico, em breve esses detalhes serão atualizados. Com os resultados obtidos, ficou perceptível que a utilização da câmera é uma ferramenta essencial nas deposições de soldas, é um estudo bastante promissor nesse ramo, sendo capaz de identificar possíveis melhorias nos parâmetros de solda e controle na execução, visando maior eficiência e qualidade, diminuindo possíveis problemas na composição e reduzindo custos.

Palavras-chave: Transferência, câmera PFV, GMAW, parâmetros.

ABSTRACT

In GMAW welding processes, several factors define how the volume, shape and frequency of the arc will be formed. These factors influence the characterization of the microstructure and the geometry of the weld joint. In view of this analysis, this work will show the method of gotticular transfer with the aid of digital image and video processing with the support of PFV camera, in order to show the viability and effectiveness of the equipment, with a focus on the capture of phenomena that occur during the process. Initially, a bibliographical study was carried out, covering the basic principles of MIG/MAG welding and the most common methods used in metal deposition. The main characteristics and specifications of the Photron camera that was studied in this case were described. For the experiments, common materials in solders were used, such as shielding gases, source, robot, electric arc among others. After data collection, analysis of the captured videos was made, modifying certain parameters for transfer. Aspects such as the formation of drops and analysis of the weld cord were the main means to complete the analysis. For the beginning of the experiment, a prototype was developed and implemented to protect the camera against spatter generated in the process. The results show that it was necessary to test some welding filters in order not to damage the sensor of the equipment and that the visualization stay with all the light that is emitted in the process. Another important factor was the use of lenses that allow to approach and check the deposition closer, making the detection of metallic behavior clearer. However, it was realized that a more elaborate study is needed to improve the practice, discussions were generated on how the software could be more objective to give accurate information, but with the technological advance, these details will soon be updated. With the results obtained, it was perceived that the use of the camera is an essential tool in the deposition of welds, is a very promising study in this branch, being able to identify possible improvements in the parameters of solder and control in execution, aiming for greater efficiency and quality, reducing possible problems in the composition and reducing costs.

Keywords: Transfer, PFV camera, GMAW, parameters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Curva característica estática do arco.....	17
Figura 2: Soldagem com arame sólido sob proteção gasosa.....	18
Figura 3: Robô Yaskawa para ignição.....	20
Figura 4: Propriedades de variedades de gases de proteção.....	21
Figura 5: Condutividade térmica de alguns gases em função da temperatura.....	21
Figura 6: Oscilogramas de tensão e corrente durante curto-circuito.....	25
Figura 7: Variação de tensão e corrente em modo globular.....	26
Figura 8: Corrente e tensão no modo spray.....	27
Figura 9: Modelo câmera Photron FASTCAM Mini UX100.....	27
Figura 10: Tripé de apoio.....	28
Figura 11: Lente adequada para instalação na câmera.....	29
Figura 12: Layout do software PFV.....	30
Figura 13: Configurações adotadas no software.....	31
Figura 14: Filtros 10.....	32
Figura 15: Filtro 12.....	32
Figura 16: Filtro 14.....	32
Figura 17: Modelo da fonte.....	33
Figura 18: Máquina configurada com parâmetros selecionados.....	34
Figura 19: Robô da soldagem.....	35
Figura 20: Chapa após alguns testes.....	36
Figura 21: Arame utilizado nos testes.....	37
Figura 22: Tocha utilizada nos testes.....	37
Figura 23: Bancada Experimental.....	38
Figura 24: Vista isométrica e inferior da proteção.....	39
Figura 25: Câmera com protótipo de proteção projetadas.....	40
Figura 26: Captura sem o uso do filtro.....	45
Figura 27: Captação do teste 1 no software por solda curto-circuito com filtro 10.....	46
Figura 28: Captação do teste 1 no software por solda curto-circuito com filtro 12.....	46
Figura 29: Captação do teste 1 no software por solda curto-circuito com filtro 14.....	47

Figura 30: Captação do teste 2 no software por solda curto-circuito com filtro 10.....	48
Figura 31: Captação do teste 2 no software por solda curto-circuito com filtro 12.....	48
Figura 32: Captação do teste 2 no software por solda curto-circuito com filtro 14.....	49
Figura 33: Comparação entre testes em curto-circuito.....	50
Figura 34: Captação do teste 1 no software por solda spray com filtro 10.....	51
Figura 35: Captação do teste 1 no software por solda spray com filtro 12.....	51
Figura 36: Captação do teste 1 no software por solda spray com filtro 14.....	52
Figura 37: Captação do teste 2 no software por solda curto-circuito com filtro 10.....	53
Figura 38: Captação do teste 2 no software por solda spray com filtro 12.....	53
Figura 39: Captação do teste 2 no software por solda spray com filtro 14.....	54
Figura 40: Comparação entre testes em spray.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de transferência metálica.....	23
Tabela 2: Parâmetros utilizados no processo curto-circuito.....	43
Tabela 3 Parâmetros utilizados no processo spray.....	43
Tabela 4: Parâmetros de solda curto-circuito realizados no teste 1.....	44
Tabela 5: Parâmetros de solda curto-circuito realizados no teste 2.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PFV	Photron Fastcan Viewer
GMAW	Gás Metal Arc Welding
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gás
INTM	Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimentos de Materiais
SAP	Sistema de Aquisição portátil
ESAB	Elektriska Svetsnings Aktie Bolaget
CNC	Controle Numérico Computadorizado
FPS	Frames por Segundo
JPG	Joint Photographic Experts Group
TIFF	Tagged Image File Format
IMC	Internal Model Control
CC-DIN	Corrente contínua
M	Metro
Min	Minuto
A	Ampere
V	Volts
HZ	Hertz
MM	Milímetro
MA	Atmosfera modificada
Nm	Nanômetro
F	Força (N)
Ip	Corrente elétrica (A)
R	Constante dos gases (8,31 J/K mol)
t	Tempo (s)
U	Tensão elétrica
v	Velocidade (m/s)
VI	Potencial de ionização (V)
Va	Velocidade de alimentação do arame (m/min)
Vs	Velocidade de soldagem (m/min)

Sumário

1. INTRODUÇÃO	14
2. JUSTIFICATIVA.....	15
3. OBJETIVO GERAL	16
3.1 Objetivo Específico	16
4. fundamentação TEÓRICO	16
4.1 Arco Elétrico.....	16
4.4 Gases de proteção e suas propriedades.....	20
4.5 Modos de transferência metálica	23
4.5.1 Transferência do metal por curto-circuito	24
4.5.2. Transferência do metal por modo globular.....	25
4.5.3 Transferência do metal por modo spray	26
5. MATERIAIS.....	27
5.1 Câmera Photron Fastcam Mini UX100	27
5.2 Tripé	28
5.3 Lente.....	28
5.4 Software PFV	29
5.5 Filtros	31
5.6 Fonte.....	33
5.7 ROBÔ.....	34
5.8 Chapa de testes	35
5. 11 Arame	36
5. 12 Tocha	37
5. 13 Bancada Experimental.....	38
6. MÉTODOLOGIA	39
6.1 Setup experimental.....	39
6.2 Procedimento de aquisição.....	41
6.2 Otimização da visualização de transferência.....	44
7. RESULTADOS.....	45

7.1 Resultados da aplicação das variáveis no teste 1 em curto circuito.....	45
7.2 Resultados da aplicação das variáveis no teste 2 em curto circuito.....	47
7.3 Comparação entre os testes 1 e 2 em curto-circuito	50
7.4 Resultados da aplicação das variáveis no teste 1 em spray	50
7.5 Resultados da aplicação das variáveis no teste 2 em spray	52
7.6 Comparação entre os testes 1 e 2 em spray	54
8. CONCLUSÃO.....	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, com o aumento da produtividade em um mercado de trabalho cada vez mais exigente e competitivo, muitas empresas têm buscado maneiras de aprimorar seus processos de fabricação. A soldagem desempenha um papel fundamental na fabricação e construção de estruturas metálicas em todo o mundo. Durante a Revolução Industrial, a soldagem era um processo predominantemente manual, tornando-se caro. Para contornar essa limitação, as indústrias investiram significativamente em sistemas de soldas robotizadas, automatizando o manejo para atender às exigências de qualidade, custo, segurança e produção. Esses sistemas são comumente utilizados na soldagem de grandes estruturas, como navios, trens e automóveis, valorizando o mercado global da engenharia mecânica, onde muitos componentes metálicos dependem da soldagem para funcionar adequadamente.

Com o avanço da automação, a tendência é a diminuição do número de soldadores no mercado e o aumento do uso de equipamentos de alta tecnologia. Para garantir a qualidade da soldagem, é essencial o conhecimento técnico, como a identificação de defeitos que as transferências metálicas podem causar e a escolha dos parâmetros adequados para segurança e redução de custos. Equipamentos elétricos, como condutores, fontes e sensores, tornaram-se mais frequentes para facilitar o processo. Na década de 1990, estudos sobre o uso de sistemas de visão computacional para a inspeção do cordão de solda iniciaram-se. (Andersen, K.; 1992 Joel, R).

Atualmente, o uso de robôs e a captação de etapas de procedimentos por meio de câmeras apropriadas estão mais presentes. A utilização desses sistemas demonstra o aprimoramento do monitoramento dos parâmetros que definem como a soldagem será realizada, permitindo um registro contínuo e ininterrupto, o que representa uma excelente melhoria para o processo.

Para iniciar o estudo, (Holliday; Panaronev; 2014) realizou a análise do modo de transferência metálica, estabelecendo que o procedimento se inicia com um arco elétrico entre uma peça e um eletrodo metálico, que é consumido e depositado no local de união. A partir desse princípio, diversas técnicas de união de componentes surgiram no mercado, sendo a soldagem e a brasagem as mais empregadas (Conn, W.M.:1959). Destacam-se a soldagem com gás de proteção sob metal fundido, que se tornou um dos processos de união de metais mais importantes devido à sua versatilidade e eficácia.

Hoje em dia, é comum encontrar a soldagem GMAW totalmente automatizada, com robôs programados para executar o processo de forma precisa em todas as posições (horizontal, vertical e sobre cabeça). Além disso, o processo exige menos tempo e esforço para a preparação da superfície, sendo adequado para metais comerciais e ligas, como alumínio, aço carbono, cobre, titânio e níquel. A escolha adequada da velocidade de soldagem, corrente e tensão são essenciais para definir o modo de deposição.

No entanto, a alta taxa de deposição de material pode gerar defeitos concentrados, como poros no cordão de solda devido à contaminação do metal de base ou do arco de soldagem. Outro problema possível são as trincas a frio, que se formam no cordão após a solidificação, devido à contração térmica e tensões internas.

Os modos de transferência naturais do processo GMAW são parâmetros essenciais para a definição de como a deposição será feita. Cada modo de transferência possui uma faixa de aplicação e características específicas que devem ser consideradas para garantir uma soldagem de qualidade, minimizando custos com manutenção e gerando maior confiabilidade estrutural.

Este trabalho foi desenvolvido no Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimentos de Materiais (INTM). A utilização dos equipamentos e materiais disponíveis para a realização desta pesquisa foram essenciais para o desenvolvimento do trabalho.

2. JUSTIFICATIVA

A análise do modo de transferência metálica é essencial para a verificação e o controle da qualidade do produto final. Com a correlação dos parâmetros envolvidos, torna-se fundamental entender os benefícios que essa pesquisa pode proporcionar. É possível que surjam diversos defeitos, como trincas, laminações, poros e falta de fusão.

O principal objetivo era comprovar o modo de transferência e o comportamento metálico do processo, que sofriam alterações devido às modificações das variáveis. O acompanhamento da deposição se tornava inviável, dificultando as análises. Além disso, o laboratório carecia de proteção adequada para evitar que os respingos danificassem a câmera.

Portanto, o objetivo para a execução deste trabalho foi desenvolver um protótipo que protegesse a câmera, permitindo uma compreensão mais precisa dos modos de transferência através do uso de uma câmera.

3. OBJETIVO GERAL

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo geral identificar as condições dos modos de visualização das transferências metálicas, considerando a influência dos parâmetros operacionais e a disponibilidade dos materiais no INTM.

3.1 Objetivo Específico

Esses procedimentos incluíram:

- Levantamento bibliográfico sobre a soldagem GMAW, incluindo os modos de transferência e suas respectivas técnicas de visualização;
- Desenvolvimento de um setup experimental para a observação dos modos de deposição;
- Estabelecer os parâmetros da câmera e do sistema de captura de imagens sem perda de informação;
- Estudo da viabilidade dos equipamentos disponíveis no instituto;

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO

De acordo com Américo Scotti, Vladimir Ponomarev e William Lucas, as técnicas elaboradas em laboratório definiram os melhores métodos para classificar esse procedimento, incluindo a análise de tensão de arco e a composição do gás. Um dos métodos adotados na pesquisa foi a utilização de lasers e filmagens de alta velocidade para captar a sincronização entre o arco elétrico e o metal de base. Esse método permitiu detectar variações no comportamento metálico, conforme os parâmetros avaliados eram alterados.

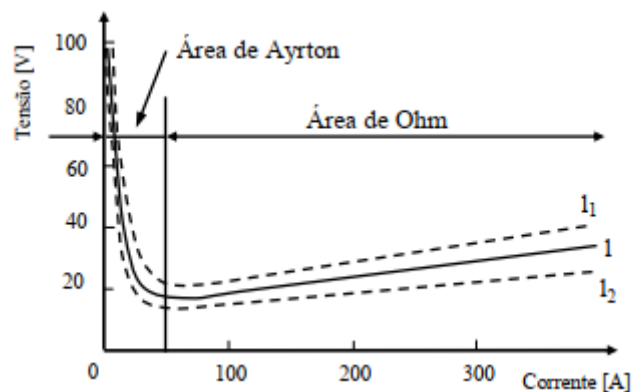
4.1 Arco Elétrico

O químico inglês Humphrey Davy foi pioneiro no desenvolvimento de fontes elétricas com arco elétrico controlado, inicialmente utilizadas como fonte de luz. Um dos primeiros registros de aplicação prática foi documentado em 1885 por Bernardo e Alexander.

Atualmente, o arco elétrico é a fonte de calor mais utilizada nos processos de soldagem de metais, pois apresenta características ideais que permitem uma maior concentração de energia de fusão nos metais base. No processo GMAW, a corrente contínua é a mais empregada, utilizando eletrodos consumíveis conectados ao polo positivo (ânodo) da máquina e à peça de trabalho no polo negativo (cátodo). Nessa configuração, a área do cátodo é significativamente maior do que a do ânodo, resultando em um arco típico com formato cônico ou em forma de sino.

A transmissão de eletricidade em um gás ionizado ocorre apenas quando há um número suficiente de cargas (elétrons e íons), sendo que os elétrons, devido à sua maior mobilidade, são responsáveis pela maior parte do transporte de corrente. A emissão de elétrons acontece no cátodo e pode ser distribuída por diversos mecanismos. Esses elétrons são acelerados pela diferença de potencial até o ânodo. Quando o comprimento do arco é constante, a relação entre tensão e corrente é conhecida como característica estática. A curva característica do processo GMAW depende do comprimento do arco, da composição do gás de proteção e do material do eletrodo, conforme ilustrado na Figura 1 (Conn, W.M.: Die technische Physik; 1959).

Figura 1- Curva característica estática do arco.



Fonte: Killing, R (1984).

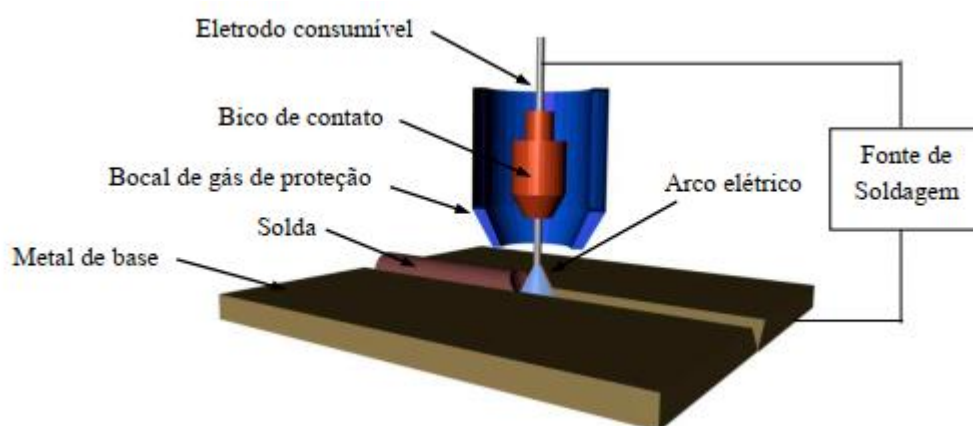
4.2 Processo GMAW

A soldagem usando fio sólido sob proteção de gás (GMAW), é um processo de soldagem a arco que utiliza um eletrodo consumível na forma de arame e um gás de proteção. O eletrodo é continuamente alimentado através de uma tocha, fundindo-se para formar a solda. O gás protege contra a ionização e é estabelecido entre os eletrodos consumíveis (metal de adição) e a peça (material base).

Para Bracarense, A.; Marques (2007). No processo de soldagem, o arco elétrico é utilizado como fonte de calor para fundir uma pequena porção do metal base. A poça de fusão, o metal de adição e o eletrodo consumível estão diretamente interligados pelo arco, que é protegido contra a oxidação por um gás de proteção adicional, conforme ilustrado na Figura 2.

Os principais equipamentos utilizados no processo são um alimentador e uma máquina de solda. Outros componentes necessários incluem cilindros de gás, uma tocha de soldagem e um reservatório de fio de metal de adição. Gases inertes ou gases ativos são utilizados com base no metal base para garantir a proteção adequada. Com a blindagem correta, a soldagem GMAW pode ser diferenciada. A soldagem com proteção de gás ativo (MAG) e a soldagem com gás inerte (MIG) são opções populares.

Figura 2 - Soldagem com arame sólido sob proteção gasosa.



Fonte: Bracarense, A.; Marques (2007)

O processo de transferência é definido através da seleção de parâmetros do processo, tais como:

- Corrente de soldagem: Corresponde a intensidade da corrente elétrica utilizada para a fusão do material a ser soldado, a realização do ajuste corretamente é essencial para garantir uma penetração adequada no material de base;
- Tensão de soldagem: Voltagem aplicada para manter o arco elétrico durante o processo, sendo necessário um ajuste adequado de acordo com o modo de transferência;
- Velocidade de soldagem: Consiste na taxa de avanço do arame de solda no processo, sendo necessário um ajuste adequado para o fornecimento de material de adição na poça de fusão;
- Taxa de gás de proteção: Quantidade de gás utilizado para proteger a poça de fusão contra a oxidação. Os gases mais comuns são argônio e dióxido de carbono, mas também podem ser utilizados a mistura entre estes gases para a obtenção de propriedades específicas no cordão de solda;
- Diâmetro do arame: Deve ser estipulado de acordo com o tipo de material soldado e as características do cordão de solda;
- Ângulos de soldagem: Consiste no ângulo entre bocal da tocha e a peça, devem ser calculados corretamente para garantir a penetração do cordão de solda;

4.3 Ignição robotizada do arco no Processo

Na soldagem automatizada, o meio de ignição é frequentemente utilizado para garantir um processo contínuo. Esse método é diferencial, pois o sistema de alimentação do arame é exclusivo do robô. Por essa razão, a configuração muda, necessitando um alimentador adicional para o arame no cabo da tocha de soldagem. (Holliday;1993)

Antes de tocar a superfície da peça de trabalho, o arame deve avançar lentamente. O fio é puxado na direção de alimentação e ajustado conforme detectado pelo toque da máquina de solda. Utilizando uma tensão elétrica, a máquina ioniza o gás de proteção entre o fio e a peça de trabalho. À medida que a distância aumenta, o comprimento do arco também aumenta até atingir um valor específico de tensão.

O processo de soldagem começa assim que o arco é estabelecido através de uma programação elaborada em linguagem “G”, comuns para esse tipo de procedimento. Ao acionar um interruptor, a máquina de solda muda dos parâmetros de ignição para os parâmetros de soldagem, que serão descritos a seguir (Bracarense, A.; Marques;2007).

Figura 3 - Robô yaskawa para ignição.



Fonte: O autor (2024)

4.4 Gases de proteção e suas propriedades

O gás de proteção tem uma essencial na soldagem ao proteger o material do fio fundido contra a contaminação da atmosfera, como oxigênio e nitrogênio. A poça de fusão, em contato com o arco elétrico, é protegida contra os efeitos prejudiciais vindo do hidrogênio, como a formação de poros e defeitos de fusão. O gás de proteção também permite controlar o excesso de óxidos, inclusões e fissuras.

Certas aplicações podem exigir alterações no processo de soldagem. A escolha do gás de proteção é necessária devido ao seu impacto na velocidade de soldagem. Os gases influenciam várias características do arco, a transferência do metal, a penetração e o perfil do cordão de solda, o aspecto superficial da solda, a velocidade de soldagem e as propriedades mecânicas da solda (Norman, E.W.L; 1980).

Para selecionar o gás de proteção ideal para um processo de soldagem, é importante compreender suas propriedades, como densidade, potencial de ionização ou dissociação, e condutividade térmica e elétrica. Abaixo, segue uma lista classificando as características dos gases (Soderstrom, E.J., Mendez 1970).

Figura 4 - Propriedades de variedades de gases de proteção.

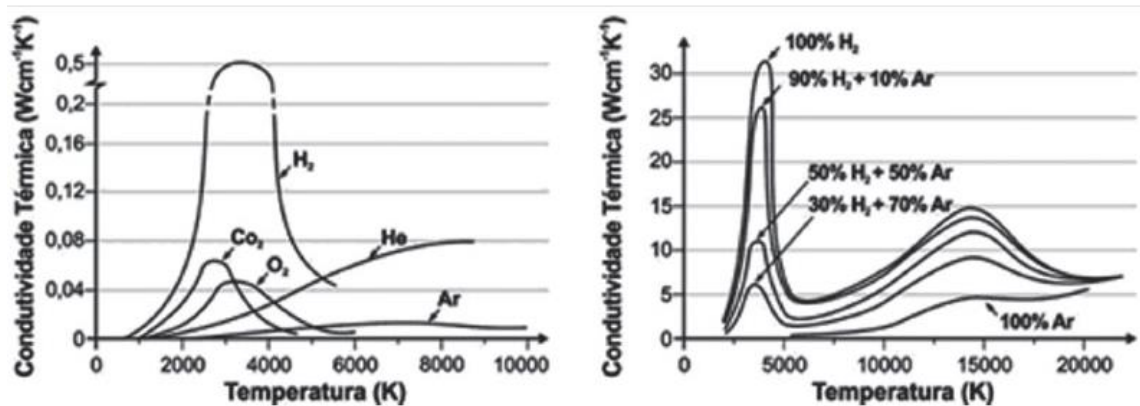
Gás	Característica	Densidade [g/l]	Potencial de ionização [eV/Molécula]	Energia de dissociação [eV/Molécula]
Hélio (He)	Inerte	0,17	24,6	-
Argônio (Ar)	Inerte	1,66	15,8	-
Dióxido de Carbono (CO ₂)	Ativo	1,85	14,4	4,3

Fonte: Boheme, D (1989).

A densidade do gás impacta diretamente o seu fluxo. Gases de alta densidade requerem taxas de fluxo mais elevadas para garantir uma proteção eficaz no local de solda, onde o arco fica suspenso, tornando uma poça de fusão mais eficiente.

O potencial de ionização do gás de proteção tem grande influência na ignição e estabilidade do arco. Gases com baixo potencial de ionização são mais facilmente convertidos em íons, facilitando a ignição do arco.

A energia de dissociação é a energia liberada durante a recombinação dos íons. Quando as moléculas do gás são ionizadas, os íons livres podem se recombinar, gerando calor adicional. A condutividade térmica está relacionada à quantidade de calor transferido do arco para o metal de base durante o processo de soldagem. Esta transferência ocorre pelo choque de partículas na coluna do plasma, influenciando diretamente na transferência metálica e podendo variar com a temperatura. A figura abaixo mostra, à esquerda, um gráfico detalhando a variação da condutividade térmica com a temperatura para diversos gases. À direita, é detalhada a condutividade para várias misturas de gases.

Figura 5 - Condutividade térmica de alguns gases em função da temperatura.

Fonte: SUBAN, M.; TUSEK (2001).

Os gases utilizados no processo MIG/MAG podem ser classificados como ativos, inertes ou uma mistura. Geralmente, são empregadas misturas, como argônio, dióxido de carbono, hélio ou oxigênio, sendo o argônio predominante na maioria dos casos. A seguir, serão detalhadas as características específicas de cada gás no processo.

O argônio (Ar) é considerado um gás inerte devido à sua facilidade de liberação de elétrons, resultante de seu baixo potencial de ionização. Isso possibilita a formação de um arco muito estável mesmo com correntes mais baixas, facilitando a ignição do arco de maneira mais prática. Além disso, o argônio permite a transferência do metal por spray em correntes menores. Em soldagens por curto-circuito, também é viável para materiais de espessuras reduzidas, dependendo das propriedades aplicadas no processo. No entanto, seu baixo potencial de condutividade térmica e ionização resulta em uma energia de arco mais baixa e, conseqüentemente, menor capacidade de penetração.

O dióxido de carbono (CO₂) é amplamente utilizado em processos de soldagem atuais devido ao seu menor custo e à capacidade de trabalhar com várias liga. Durante a fusão, o CO₂ forma óxidos que são liberados como escória, variando conforme o tipo de arame. É comumente empregado em processos MAG. No entanto, oferece uma instalação simples e resulta em soldas de excelente qualidade.

O gás hélio (He), ao contrário do argônio, não proporciona um arco tão estável e apresenta uma variação de tensão elevada e alta condutividade térmica. Devido ao seu custo elevado no mercado, raramente é usado sozinho na soldagem. Geralmente, é combinado com argônio em diferentes proporções. Misturas de argônio com hélio são preferidas em soldagens que requerem melhor penetração em perfis arredondados.

O fluxo do gás de proteção depende de diversos fatores, como o diâmetro do bocal, posição de soldagem, densidade do gás, distância entre o bico de contato e a peça de trabalho, velocidade de soldagem e corrente de soldagem. É crucial ajustar adequadamente o fluxo para evitar (Smith, A;1966).

4.5 Modos de transferência metálica

Os modos de transferência metálica nos processos de soldagem envolvem o transporte de gotas metálicas fundidas de um eletrodo totalmente consumível para a poça de fusão. Este processo influencia diversos aspectos críticos, como a posição da soldagem, a quantidade de respingos, e as características do cordão, entre outros. O modelo de deposição é determinado pelos parâmetros específicos do processo, tais como corrente e tensão do arco elétrico, tipo de metal de adição, polaridade, comprimento do arco e seleção do gás de proteção. A tabela a seguir, apresenta os diferentes modos de transferência e processos de soldagens que podem ser aplicados nesses diversos tipos de deposição. (Lesnewich, A;1958).

Tabela 1 - Tipos de transferência metálica.

Tipo de transferência				Processo de Soldagem
1	Queda Livre	Globular	Globular	GMAW - baixa corrente
			Repelida	GMAW com proteção de CO ₂
		Goticular ou Aerossol	Projetado	GMAW - corrente intermediária
			Com Alongamento	GMAW - corrente média
			Rotacional	GMAW - corrente elevada
		Explosiva		SMAW (eletrodos revestidos)
2	Por Contato	Curto-Circuito		GMAW - arco "curto"
		Continua		GTAW com alimentação contínua
3	Protegida por Escória	Guiada pela parede		SAW
		Outros modos		SMAW, FCAW, ESW, etc

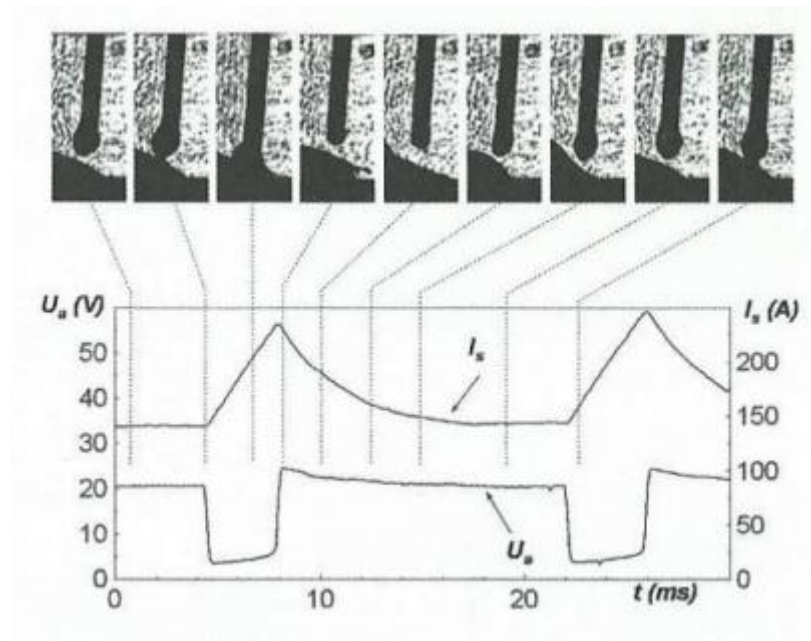
Fonte: Lesnewich, A.: Control (1958).

4.5.1 Transferência do metal por curto-circuito

A transferência por curto-circuito é caracterizada pelo uso de comprimentos de arco reduzidos, recebendo esse nome devido à forma de transferência, na qual o eletrodo cria uma ponte intermitente com a poça de fusão. Durante o processo, o eletrodo toca periodicamente a peça, resultando em um curto-circuito, o que provoca um aumento rápido na corrente de soldagem, concentrando calor no eletrodo. Esse modo de transferência é conhecido por sua instabilidade, em função da quantidade de respingos, que pode variar de 20 a 200 gotas por segundo. No entanto, é possível reduzir essa instabilidade ajustando a frequência da transferência, perceptível pelo som gerado durante a operação. A estabilidade também é influenciada pela variação da corrente: um aumento rápido pode causar a ruptura do arame no final do ciclo, enquanto um aumento mais gradual pode evitar interrupções para substituição.

Devido à baixa energia envolvida, esse tipo de transferência é utilizado principalmente para soldagem de chapas finas, já que, em materiais mais espessos, há risco de falta de fusão e mordedura. Oscilogramas de tensão e corrente durante o curto-circuito são analisados para compreender o comportamento das gotas durante sua formação e separação. Para isso, foram realizados experimentos detalhados, utilizando um sistema de visualização desenvolvido por Lin et al. (2001), Bálsamo et al. (2000) e outros pesquisadores. A plataforma experimental incluía uma câmera digital de alta velocidade, operando a 2000 quadros por segundo, e um laser He-Ne de 632,2 nm para iluminar o arco. Filtros ópticos foram utilizados para aprimorar a visualização, enquanto os sinais elétricos foram sincronizados com os quadros de vídeo por meio de um programa dedicado, desenvolvido na plataforma LabView. Essa metodologia permitiu correlacionar variações na tensão do arco e na corrente de soldagem com a formação e separação das gotas de metal durante o processo de curto-circuito. A figura 6 ilustra esse procedimento.

Figura 6 - Oscilogramas de tensão e corrente durante curto-circuito.



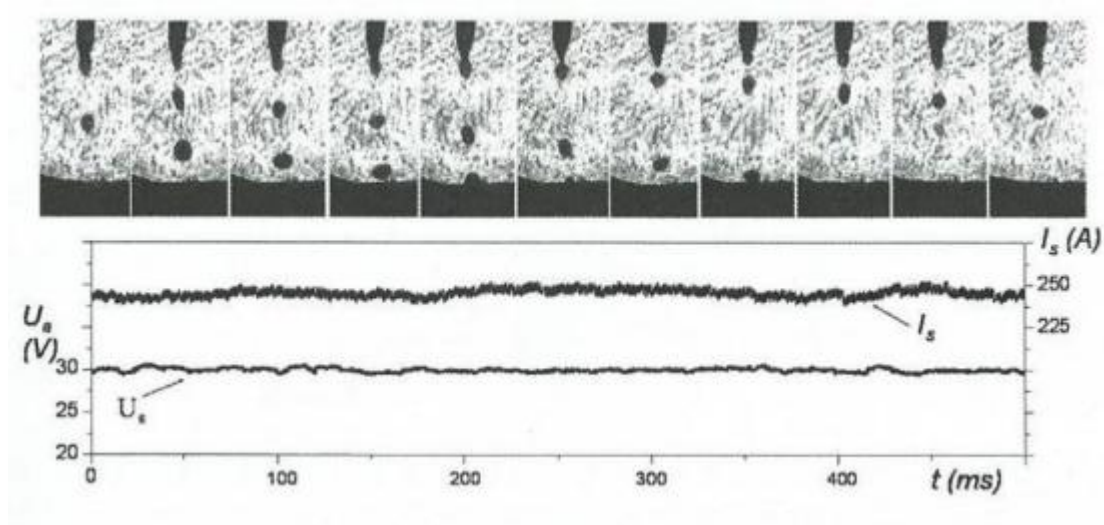
Fonte: Scotti e Ponomarev (2008).

4.5.2. Transferência do metal por modo globular

Na transferência globular, as gotas de metal formadas são geralmente maiores que o diâmetro do eletrodo, com a deposição ocorrendo de maneira semelhante ao gotejamento de uma torneira. Esse modo de transferência utiliza baixa corrente, o que gera uma força magnética reduzida, e alta tensão, devido ao longo comprimento do arco elétrico. Ele é comumente aplicado em soldagem de chapas de grande espessura, entre 12 e 22 mm, resultando em uma elevada taxa de deposição. No entanto, é limitado à posição plana de soldagem, apresenta alta incidência de respingos e é suscetível a problemas como falta de fusão e penetração, tornando o processo relativamente instável.

Assim como no modo de curto-circuito, Lin et al. (2001) e Bálsamo et al. (2000) realizaram estudos aprofundados sobre a transferência globular, utilizando parâmetros semelhantes, com corrente em torno de 250 A e tensão de 30 V. Por meio da plataforma LabView, foi possível realizar uma análise detalhada do comportamento desse tipo de transferência.

Figura 7 - Variação de tensão e corrente em modo globular.

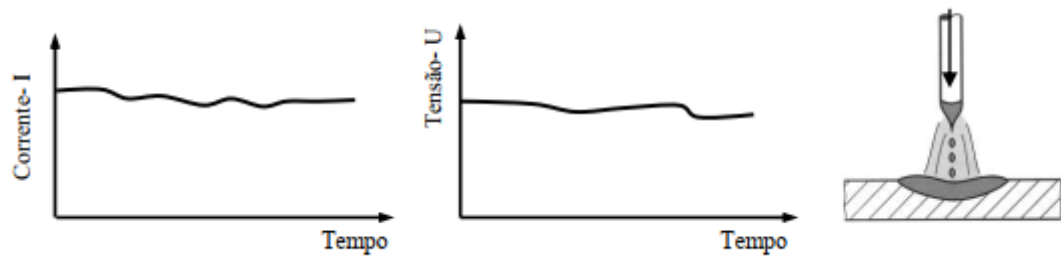


Fonte: Scotti e Ponomarev (2008).

4.5.3 Transferência do metal por modo spray

Este modo de transferência é caracterizado pela passagem contínua de pequenas gotas de metal fundido do arame de solda para a poça de fusão, com mínima geração de respingos. É um método eficaz para a soldagem de materiais mais espessos e em altas correntes, proporcionando uma solda de alta qualidade, crucial para controlar a força magnética durante o processo. Reconhecido por sua estabilidade, esse modo exige que o arco seja mantido suficientemente longo para evitar curtos-circuitos, resultando em uma deposição com gotas muito finas. Devido à alta energia envolvida, ele é particularmente adequado para soldagem de chapas mais grossas, tanto na posição horizontal quanto vertical. A seguir, são apresentadas as características da corrente e tensão aplicadas nesse modo de transferência (Jeffus, L. F., 2002).

Figura 8 - Corrente e tensão no modo spray.



Fonte: Jeffus, L. F (2002).

5. MATERIAIS

5.1 Câmera Photron Fastcam Mini UX100

Com o objetivo de observar os fenômenos intrínsecos ao processo de soldagem e avaliar sua eficácia em termos de penetração, foi necessária a montagem inicial de uma bancada experimental capaz de realizar os procedimentos e o acompanhamento do estudo. Para este fim, optou-se pela utilização de uma câmera Photron FASTCAM Mini UX100, com alto desempenho e potência em alta velocidade. Esta câmera possui resolução de 1.280 por 1.024 pixels e pode capturar até 4.000 quadros por segundo (fps), com capacidade de resolução de 720p HD até 6.400fps.

Figura 09 - Modelo câmera Photron FASTCAM Mini UX100.



Fonte: photron.com (2017)

5.2 Tripé

Durante o processo, um tripé foi utilizado para suportar a câmera, posicionado a uma distância aproximada de 120 mm da área de aplicação. Esse equipamento foi escolhido devido à sua capacidade de fixação estável por meio de um parafuso, garantindo que a câmera permanecesse imóvel e livre de interferências durante as gravações.

Figura 10 - Tripé de apoio.



Fonte: O autor (2024).

5.3 Lente

Para melhorar a visualização da deposição, além da câmera, foram necessárias lentes adequadas ao procedimento. No INTM, foram disponibilizados vários modelos de lentes, e após análise das características, a lente mais apropriada para a câmera foi a de modelo 1.4D, com distância focal de 50mm. Após a instalação desta lente, a visualização se mostrou mais nítida e focalizada.

Figura 11 - Lente adequada para instalação na câmera.



Fonte: O autor (2024).

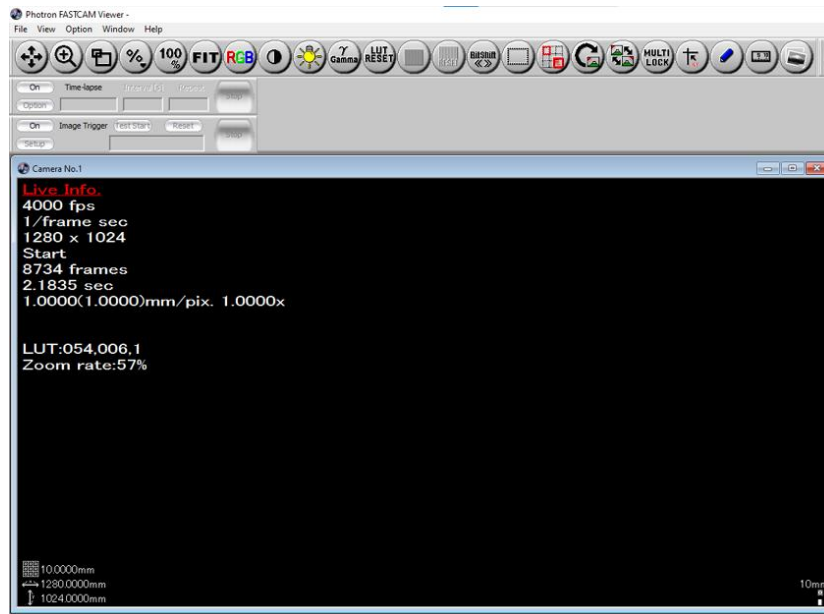
5.4 Software PFV

Para a análise detalhada do processo, utilizamos o software recomendado para operar a câmera, conhecido como PHOTRON FASTCAM VIEWER 3 (PFV). Este software permite identificar diversos aspectos de visualização e otimizar parâmetros como resolução, taxa de quadros e modos de disparo.

As imagens capturadas são sincronizadas, proporcionando uma análise clara e precisa. Além disso, é possível salvar cada imagem em diferentes formatos, como JPG ou TIFF, para análise posterior utilizando programas externos.

No sistema, diversas funcionalidades estão disponíveis para aprimorar a visualização, como o ajuste de brilho e contraste, essenciais para obter uma imagem mais nítida do processo. Além disso, há a opção de zoom, utilizada para a deposição do arco, bem como para ajustar a angulação e o redimensionamento das imagens. A seguir segue a visualização inicial do software para inicializar as configurações na figura 12.

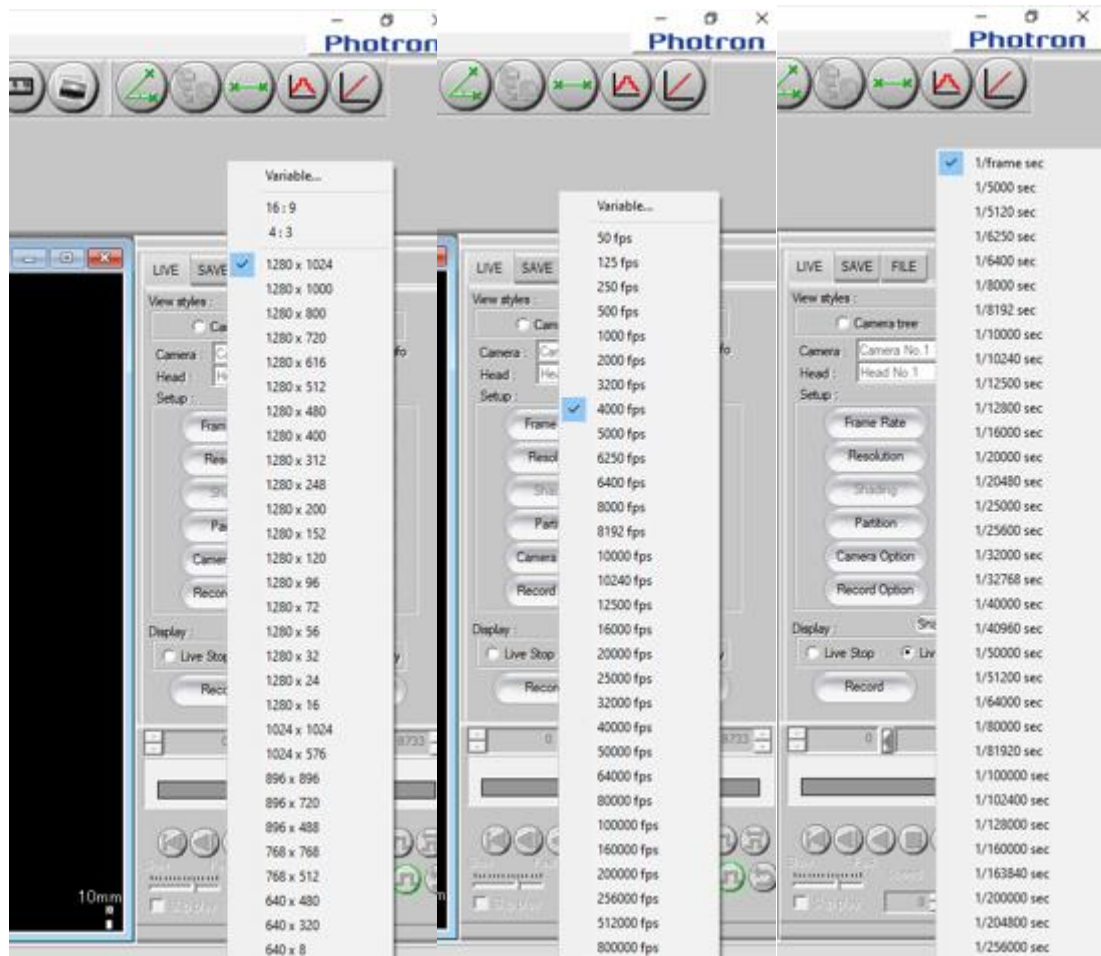
Figura 12 - Layout do software PFV.



Fonte: O autor (2024).

Abaixo na figura 13, é possível verificar algumas configurações que podem ser ajustadas no software para melhorar a visualização, tais como a resolução e velocidade de aquisição.

Figura 13 - Configurações adotadas no software.



Fonte: O autor (2024).

5.5 Filtros

Com o objetivo de proteção contra a radiação emitida durante a soldagem, foi necessário o uso nos ensaios realizados. Neste estudo, esses filtros foram incorporados à proteção metálica para proporcionar uma melhor visualização da deposição. Sem esses filtros, o acompanhamento do gotejamento torna-se extremamente difícil. Foram utilizados filtros de três tonalidades: 14 (KALIPSO), 10 e 12 (CC-DIN). Essas numerações referem-se à capacidade de filtragem de luz de cada modelo, quanto maior o número, mais escura a lente e maior a proteção. A seguir serão demonstrados todos os modelos que foram utilizados nessa pesquisa.

Figura 14 - Filtros 10.



Fonte: O autor (2024).

Figura 15 - Filtro 12.



Fonte: O autor (2024).

Figura 16 - Filtro 14.



Fonte: O autor (2024).

5.6 Fonte

A fonte escolhida para a realização das soldas foi a ESAB 4004i pulse, que possui uma faixa de operação de 4 a 400 A e um controlador eletrônico Aristo U8_2. Esse controlador facilitou o manuseio, pois foi estabelecido os parâmetros de acordo com o modo de transferência. Para a movimentação da tocha, foi adicionado à bancada um sistema de deslocamento mecanizado do robô yaskawa, permitindo uma movimentação constante e garantindo a repetibilidade dos ensaios. Para a aquisição dos sinais de corrente e tensão, foi utilizado um sistema de dados portátil (SAP). A Figura 17 mostra a disposição do modelo de fonte no laboratório.

Figura 17 - Modelo da fonte.



Fonte: O autor (2024).

Para o estudo de caso como teste 1, foi utilizada uma voltagem de 22.5 V, com uma amperagem de 96A e com velocidade de 4m/min.

Figura 18 - Máquina configurada com parâmetros selecionados.



Fonte: O autor (2024).

5.7 ROBÔ

A utilização de robôs em processos de soldagem proporciona maior confiabilidade, pois os parâmetros utilizados garantem uma maior precisão e evitam variações causadas por operadores e imperfeições na regulagem. No experimento, foi utilizado o robô Motoman Yaskawa MA1440, com 6 eixos, para depósitos, acionado pelo controlador ESAB.

Figura 19 - Robô da soldagem.



Fonte: O autor (2024).

5.8 Chapa de testes

As chapas base de aço para testes de soldagem MIG/MAG são peças de aço carbono A56, utilizadas como substrato nos experimentos de soldagem, proporcionando uma superfície adequada para avaliar a eficácia e a qualidade das soldas. Durante os testes, as chapas foram preparadas e posicionadas de acordo com as especificações do procedimento de soldagem, permitindo a análise da penetração da solda, formação de cordões e integridade estrutural.

Figura 20 - Chapa após alguns testes.



Fonte: O autor (2024).

5. 11 Arame

Utilizado como material de adição, o arame de aço carbono é alimentado por um sistema que o funde e deposita metal na junta que está sendo soldada. Esse metal de adição é necessário para preencher a lacuna entre as peças a serem unidas, garantindo uma conexão forte e durável. Nesta pesquisa, foi utilizado o arame modelo ER70S-6, com diâmetro de 1,2 mm.

A velocidade de deposição do arame é controlada por meio do arco elétrico, onde a corrente determina a quantidade de metal depositado por unidade de tempo, e a tensão influencia a estabilidade do arco e a transferência do metal do arame para a peça. Para esta análise, a velocidade de alimentação foi de 1,3 m/min.

Figura 21 - Arame utilizado nos testes.



Fonte: O autor (2024).

5.12 Tocha

O modelo de tocha foi o Yaskawa da série MA1900-45, que proporciona maior flexibilidade para esses tipos de soldagem. Este modelo possui um bico de contato refrigerado a ar, com dimensões de 0,8 mm. Para cada início de testes, a tocha precisava ser lubrificada com spray, e o arame da última solda precisava ser cortado, pois se encontrava modificado devido às soldagens realizadas anteriormente.

Figura 22 - Tocha utilizado nos testes.



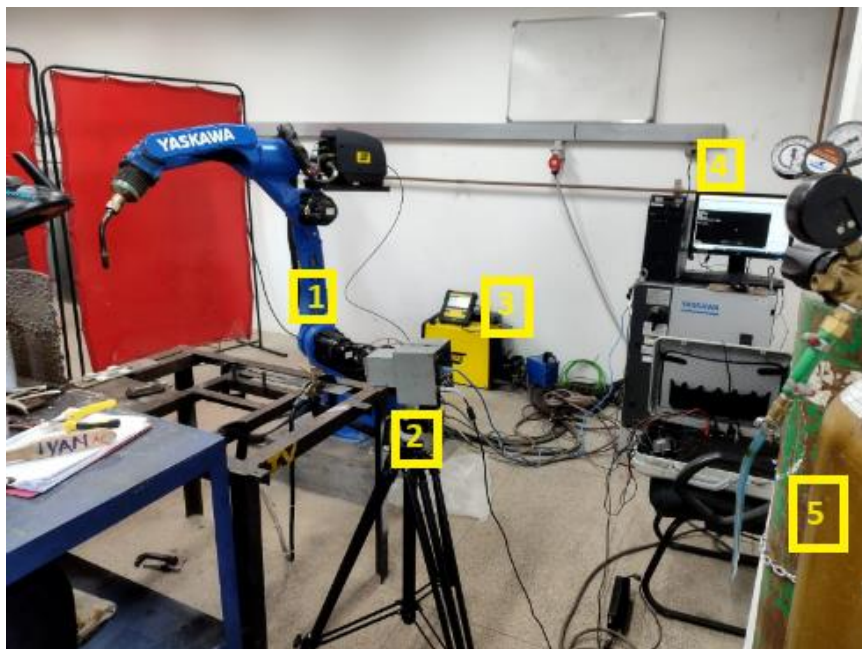
Fonte: O autor (2024).

5.13 Bancada Experimental

A bancada experimental foi montada com o objetivo de realizar as soldagens testes para essa pesquisa, analisando a taxa de fusão e deposição metálica. A bancada era composta por uma fonte de potência, cabeçote de alimentação de arame, cilindro de gases de proteção, chapas para testes e uma unidade robótica para solda.

A câmera foi posicionada a uma distância de 120 mm da chapa, a menor distância possível devido ao tripé estar em contato direto com a superfície que sustenta a chapa, impedindo um posicionamento mais próximo. Após ser posicionada, a câmera foi ajustada com uma inclinação de 20° em relação à tocha, uma angulação que proporciona a melhor obtenção de imagens no software PFV. A seguir na figura 25, está retratado cada equipamento que compõe essa bancada, são respectivamente: 1-Unidade robótica, 2 – Câmera para verificação de solda com protótipo, 3- Fonte, 4- Software para análise de solda, 5- Cilindro de gás de proteção.

Figura 23 – Bancada experimental



Fonte: O autor (2024).

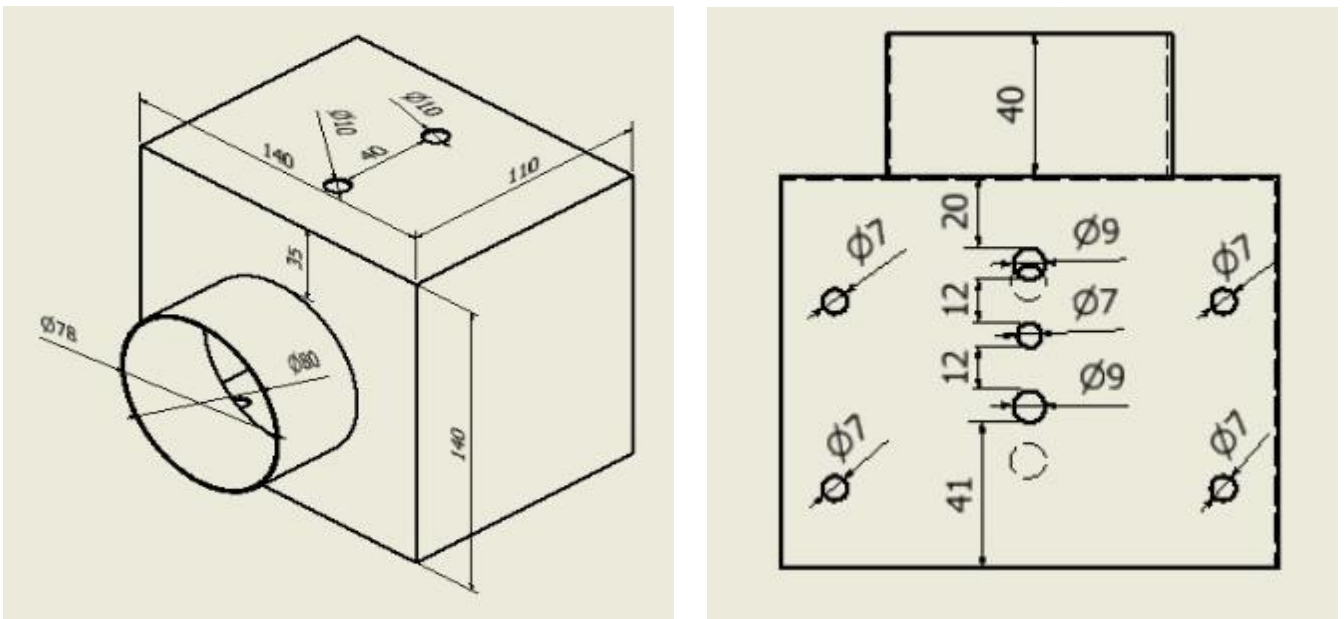
6. MÉTODOLOGIA

6.1 Setup experimental

Devido a grande quantidade de respingos que são gerados nas soldagens, primeiramente tornou-se necessário o desenvolvimento de uma capa de proteção para a câmera utilizada no processo. Com isso, foi desenvolvido um protótipo baseado em chapa de aço carbono 1020, visando assegurar a integridade da câmera contra os respingos de solda gerados durante o processo, devido a sua alta resistência ao calor.

As dimensões e a geometria da capa foram definidas considerando o tamanho da câmera e da ótica, bem como a necessidade de fixação adequada. O projeto foi elaborado com medidas precisas para que a capa se encaixasse perfeitamente na câmera, oferecendo a proteção necessária. Na chapa foram incluídas duas faixas de acrílico para proteger a lente da câmera sem prejudicar a visibilidade do processo de soldagem. Abaixo seguem as dimensões básicas da solução proposta. Abaixo na figura 24 segue as vistas projetadas no software “inventor 3D”.

Figura 24- Vista isométrica e inferior da proteção.



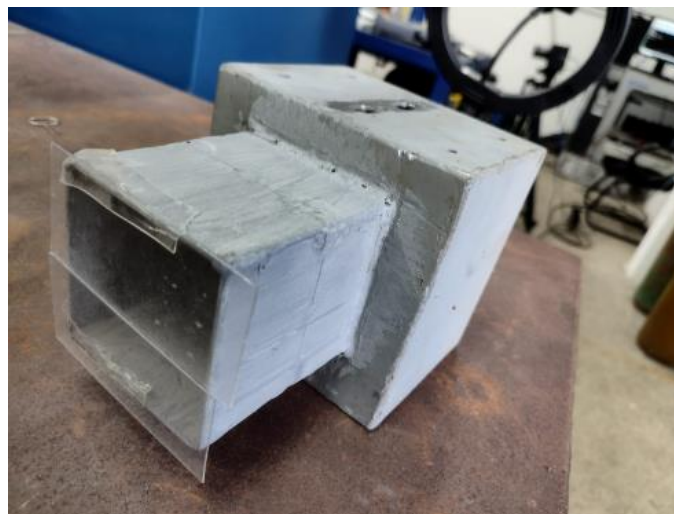
Fonte: O autor (2024).

Dimensões Básicas da Capa de Proteção:

- Altura: 140 mm
- Largura: 140mm
- Profundidade: 110mm
- Espessura da chapa: 5mm

A figura 25 apresenta o modelo padrão final confeccionado. Com a instalação da proteção na câmera, foi possível analisar a visualização de cada variação dos parâmetros utilizando os filtros aplicados.

Figura 25 - Câmera com protótipo de proteção projetadas.



Fonte: O autor (2024).

6.2 Procedimento de aquisição

Durante esta pesquisa, foi necessário alterar a velocidade, tensão e corrente, a fim de obter comprimentos de arco curtos, médios e longos nas chapas. Inicialmente, a superfície da chapa foi fixada no suporte de base e, em seguida, foi realizada a limpeza das impurezas presentes. A altura da tocha foi ajustada de acordo com o tamanho do cordão desejado.

Em seguida, foi realizada a modificação do ponto de partida da solda na programação do robô, permitindo entender o percurso que ele realizará. Com o teste sem o arco, a câmera foi fixada e ajustada para obter a melhor captação de imagens do processo. Os filtros foram alocados na proteção vinculada à câmera, a qual foi submetida a cada teste de intensidade. Após todo o procedimento ser finalizado, iniciou-se a aquisição no software PFV com a filmagem do processo, juntamente com a programação do robô, elaborada pelo fabricante e ajustada com os parâmetros.

Com as variáveis estabelecidas, foi possível realizar soldas em curto-circuito e spray, onde o robô foi programado para executar as funções em linguagem “G”, específica para esse tipo de solda MIG/MAG com robô, que realiza um trabalho mais forçado. Abaixo serão destacadas apenas as linhas onde os principais parâmetros do processo foram definidos para acompanhar a visualização, detalhando a deposição da gota na chapa na trajetória vertical da superfície.

0013	DOUT OG#(7) 1
0014	ARCON
0015 0007 00	MOVL P095 V=18
0016	ARCOF
0017	TIMER = T=2.00
0018 0008 00	MOVJ P001 VJ=500
0019	TIMER T=300.00
0020 0009 00	MOVL P091 V=500
0021 0010 00	MOVL P092 V=30 SRCH RIN#(1)=ON T=1.00 DIS=50.0
0022 0011 00	IMOV P093 V=100
0023 0012 00	IMOV P098 V=500
0024	GETS PX099 \$PX001
0025	TIMER T=1.00
0026 0013 00	IMOV P100 V=500
0027	TIMER T=1.50
0028	GETS PX101 \$PX001
0029	DOUT 0T#(40) ON// COM REMOTO
0030	DOUT OG#(7) 1
0031	ARCON
0032 0014 00	MOVL P099 V=18
0033	ARCOF

Após a definição da metodologia, foi necessário preparar os materiais e verificar se o metal base estava limpo e livre de oxidações, além de organizar a bancada com o posicionamento adequado para os experimentos. Após todos esses procedimentos, foram iniciados os primeiros testes com os dois tipos de soldagem estudados. Abaixo serão detalhados todos os parâmetros estudados com base nas pesquisas dos doutorandos da instituição de materiais. A partir desses valores estabelecidos, foi possível compreender o comportamento da solda e identificar o tipo de deposição através da quantidade de respingos e do som emitido durante o processo.

O experimento começou com a definição dos seguintes parâmetros para a soldagem por curto-circuito e a faixa de intervalo de cada um. Esses valores estão apresentados na tabela 2. Para a soldagem spray, foram definidas as mesmas variáveis, porem com os limites de intervalos adaptados para esse modelo, mostrada na tabela 3.

Tabela 2 - Parâmetros utilizados no processo curto circuito.

Curto-circuito	
Variáveis	Limites de intervalo
Velocidade de alimentação do arame [Va]	2...5 [m/mim]
Frequencia [Hz]	40...80 [Hz]
Velocidade de soldagem [Vs]	2...6 [m/min]
Corrente [Ip]	200...240 [A]
Tensão[U]	16...20 [V]

Fonte: O autor (2024).

Tabela 3 - Parâmetros utilizados no processo spray.

Spray	
Variáveis	Limites de intervalo
Velocidade de alimentação do arame [Va]	2...5 [m/mim]
Frequencia [Hz]	40...80 [Hz]
Velocidade de soldagem [Vs]	6...10 [m/min]
Corrente [Ip]	240...340[A]
Tensão[U]	20...28 [V]

Fonte: O autor (2024).

Inicialmente, foi conduzido um teste de curto-circuito para verificar a visualização sem o uso de filtros de proteção. Os parâmetros do teste incluíram uma tensão de 20V, corrente de 210A, velocidade de alimentação do arame de 10 m/min e velocidade de soldagem de 6 m/min. A câmera foi posicionada sem qualquer filtro de proteção e com os parâmetros definidos no software, realizando uma análise a 1/5000 fps e com resolução de 1280 x 720 no modo centralizado. Esses parâmetros foram selecionados por serem apropriados para o processo, proporcionando uma melhor visualização dos dados.

Portanto, foi necessário implementar os procedimentos ao redor da câmera para iniciar as etapas seguintes. O objetivo era aplicar os três filtros disponíveis no INTM e comparar a visualização de cada um com os parâmetros aplicados nos dois tipos de solda estudados.

6.2 Otimização da visualização de transferência

Para todas as práticas subsequentes, foi estabelecido um tempo de 11 segundos, considerado ideal para a captura de imagens e o armazenamento no servidor do computador, o que facilitou a visualização do processo. As variações de corrente e tensão foram ajustadas para garantir a soldagem em curto-circuito nas condições de correntes e tensões mais baixas, enquanto as condições com correntes e tensões mais altas foram destinadas ao modo spray. A tabela 4 a seguir detalha os testes realizados para os dois tipos de soldagem, incluindo a aplicação dos três filtros para cada teste.

Tabela 4: Parâmetros de solda curto-circuito e spray realizados no teste 1.

Teste	Curto-circuito				
	FREQ	Vs[m/min]	Va[m/min]	Ip[A]	U[V]
1	40	6	2	210	20
	Spray				
	FREQ	Vs[m/min]	Va[m/min]	Ip[A]	U[V]
	80	10	5	240	24

Fonte: O autor (2024).

No teste 2, os parâmetros foram alterados para realizar uma análise semelhante, mas aguardando um comportamento diferente na visualização. Abaixo estão as variáveis aplicadas para o segundo teste, tanto para o modo de curto-circuito quanto para o modo spray, respectivamente.

Tabela 5: Parâmetros de solda curto-circuito realizados no teste 2.

Teste	Curto-circuito				
	FREQ	Vs[m/min]	Va[m/min]	Ip[A]	U[V]
2	30	4	2	210	20
	Spray				
	FREQ	Vs[m/min]	Va[m/min]	Ip[A]	U[V]
	80	16	3.5	240	24

Fonte: O autor (2024).

7. RESULTADOS

Com a instalação da proteção na câmera, foi possível analisar a visualização de cada variação de parâmetro utilizando os filtros aplicados. A seguir, serão detalhados os resultados obtidos para cada tipo de solda com os filtros.

Detalha-se como o software captava o processo sem a implementação da proteção metálica e dos filtros. Observou-se que, sem a proteção, apenas uma alta luminosidade com os respingos era visível, o que impossibilitava o acompanhamento do gotejamento.

Figura 26 - Captura sem o uso do filtro.



Fonte: O autor (2024).

7.1 Resultados da aplicação das variáveis no teste 1 em curto circuito

Após a aplicação dos filtros, os ensaios iniciais não geraram resultados satisfatórios, pois as gotas de solda não foram detectadas claramente pelo software em nenhum dos tipos de soldagem testados. No entanto, na soldagem por curto-circuito, observou-se um aumento significativo na quantidade de respingos, que foram visíveis no software. Esse resultado confirmou a identificação do tipo de soldagem como sendo de curto-circuito, devido à presença característica dos respingos e às variáveis previamente selecionadas, como a alta velocidade de soldagem, conforme apresentado na tabela 4.

Durante o experimento com o filtro 10, o ponto de soldagem que acompanhava o arco tornou-se praticamente imperceptível, enquanto os respingos passaram a ser bastante visíveis nas imagens capturadas. A seguir, apresenta-se a visualização obtida.

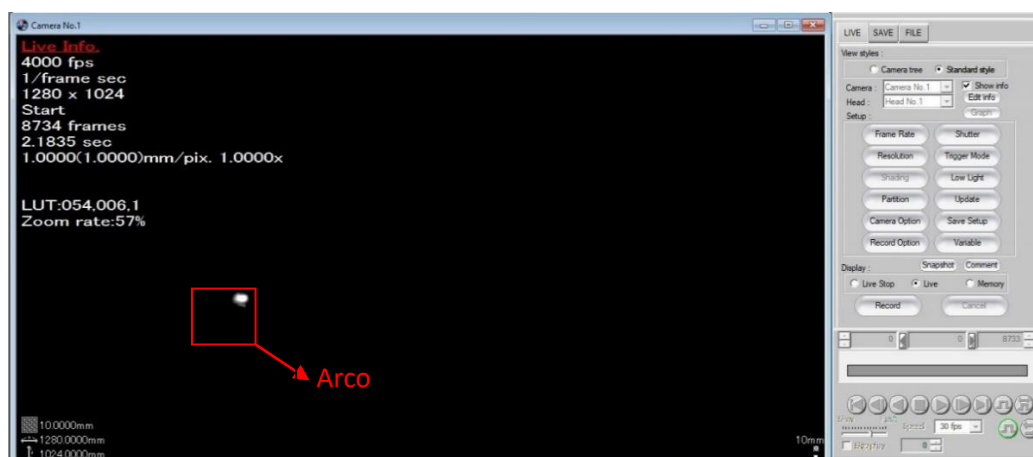
Figura 27 - Captação do teste 1 no software por solda curto-circuito com filtro 10.



Fonte: O autor (2024).

Em seguida, foi implementado o filtro número 12 para analisar a influência desse processo de soldagem. Os parâmetros de soldagem permaneceram os mesmos dos testes realizados com o filtro 10. Abaixo, apresenta-se a visualização obtida, na qual foi possível identificar apenas o ponto do arco. No entanto, os respingos, embora ainda presentes, tornaram-se completamente imperceptíveis nas capturas do processo.

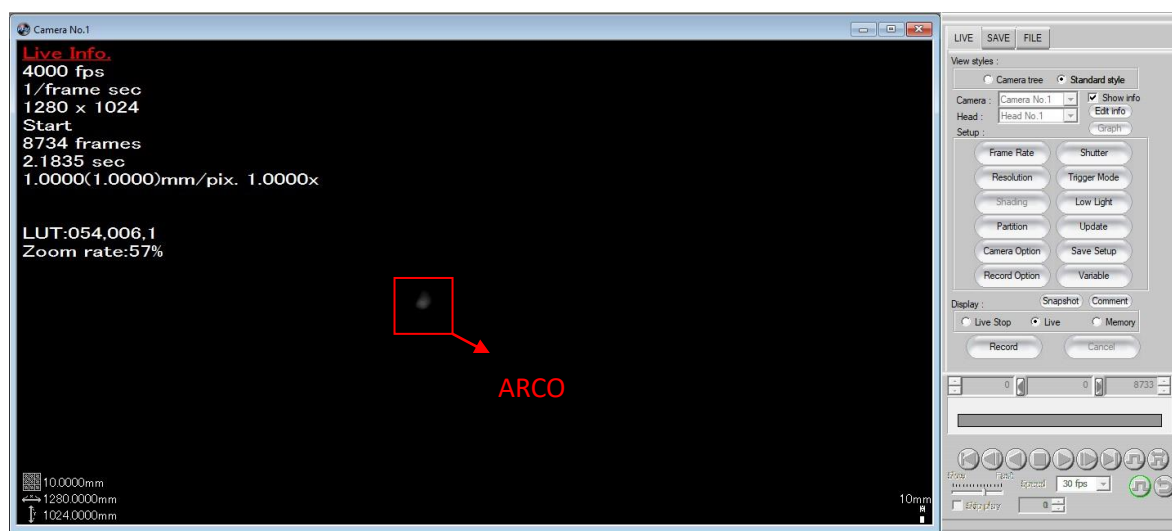
Figura 28 - Captação do teste 1 no software por solda curto-circuito com filtro 12.



Fonte: O autor (2024).

Para concluir o Teste 1, foi implementado o filtro número 14. A análise realizada seguiu os mesmos critérios aplicados aos filtros anteriores, com a expectativa de obter uma visualização mais complexa e detalhada. A visualização obtida mostrou que, com pouca nitidez, apenas o arco era visível, apresentando uma baixa concentração de deposição na imagem e sem qualquer evidência de respingos.

Figura 29 - Captação do teste 1 no software por solda curto-circuito com filtro 14.



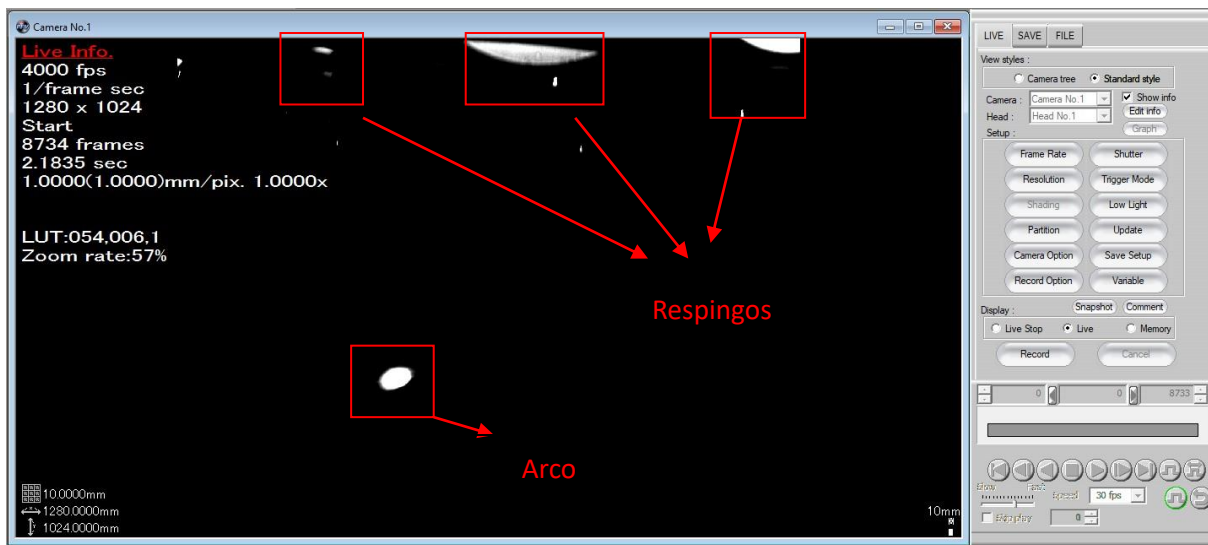
Fonte: O autor (2024).

7.2 Resultados da aplicação das variáveis no teste 2 em curto circuito

Para o segundo teste, as variáveis foram ajustadas a fim de proporcionar uma melhor compreensão desse tipo de soldagem. Esses valores continuam dentro do regime de curto-circuito, uma vez que a corrente e a tensão permaneceram inalteradas e são consideradas baixas para o procedimento.

A visualização dos parâmetros utilizando o filtro 10. Observa-se que o arco se destaca com uma forte concentração de deposição, e também é possível acompanhar alguns respingos, com gotas maiores do que as observadas no Teste 1. Isso indica que a redução da velocidade de soldagem tem uma influência significativa na quantidade e no tamanho dos respingos gerados.

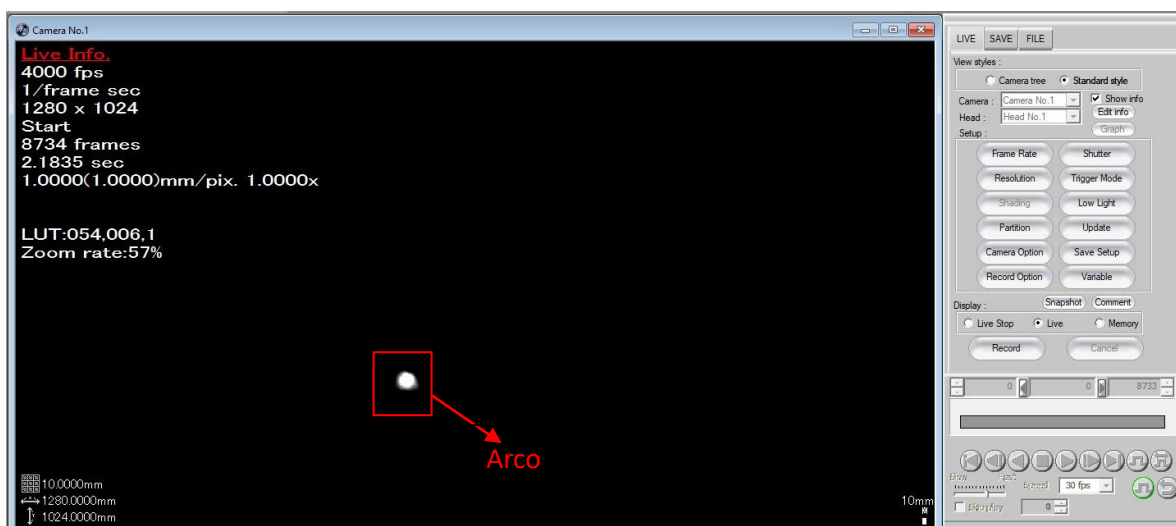
Figura 30 - Captação do teste 2 no software por solda curto-circuito com filtro 10.



Fonte: O autor (2024).

Para o filtro 12 com as mesmas condições aplicadas, os respingos não foram possíveis de serem visualizados, na imagem somente é possível verificar o ponto de concentração de deposição do arco.

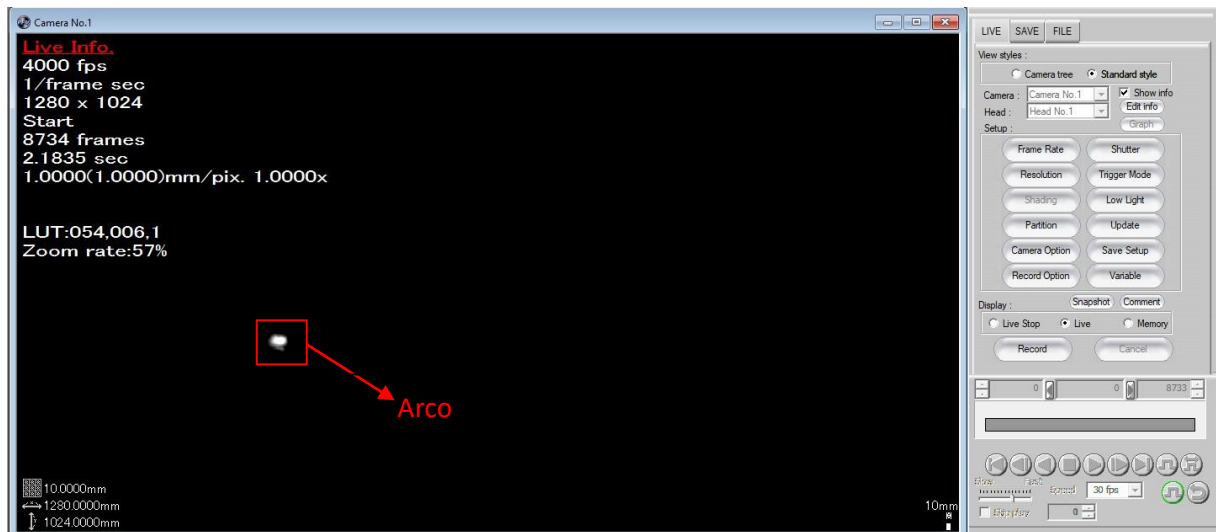
Figura 31 - Captação do teste 2 no software por solda curto-circuito com filtro 12.



Fonte: O autor (2024).

Para a finalização dos testes a curto-circuito, foi aplicado o filtro 14 nesse segundo teste com as mesmas condições aplicadas, mantendo a similaridade com o ultimo filtro, os respingos não foram possíveis de serem visualizados também pelo grau de luminosidade perceptível nesse filtro, onde somente o arco é notado nesse meio.

Figura 32 - Captação do teste 2 no software por solda curto-circuito com filtro 14.



Fonte: O autor (2024).

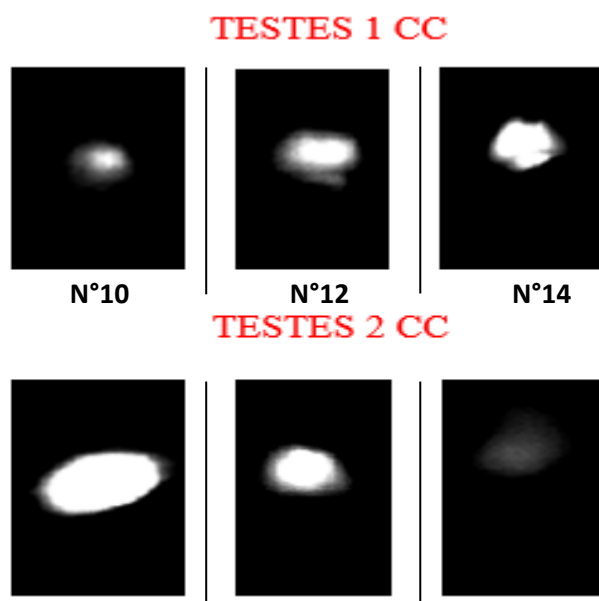
Observou-se que, à medida que filtros de numerações mais elevadas são implementados, a visualização torna-se menos nítida, muitas vezes permitindo apenas a identificação do ponto do arco. Isso ocorre mesmo quando a lente da câmera está configurada para a menor distância possível em relação à solda aplicada. Além disso, os poucos respingos gerados durante o processo só foram visíveis com o uso do filtro de numeração 10. Esses resultados destacam a significativa influência da numeração dos filtros, pois, apesar da utilização dos mesmos parâmetros nos três casos analisados, a qualidade da visualização variou consideravelmente.

7.3 Comparação entre os testes 1 e 2 em curto-circuito

Ao comparar todos os experimentos em curto-circuito, observa-se que o ponto de concentração do arco torna-se progressivamente menos visível com o aumento do grau dos filtros. No Teste 2, utilizando o filtro 14, o arco torna-se quase imperceptível, com os parâmetros aplicados resultando em um processo menos concentrado e praticamente invisível.

Infelizmente, o gotejamento permaneceu imperceptível em todos os casos, devido à indisponibilidade dos equipamentos necessários para um acompanhamento adequado deste aspecto. Abaixo, apresenta-se uma vista mais detalhada dos pontos observados.

Figura 33 – Comparação entre testes em curto-circuito.



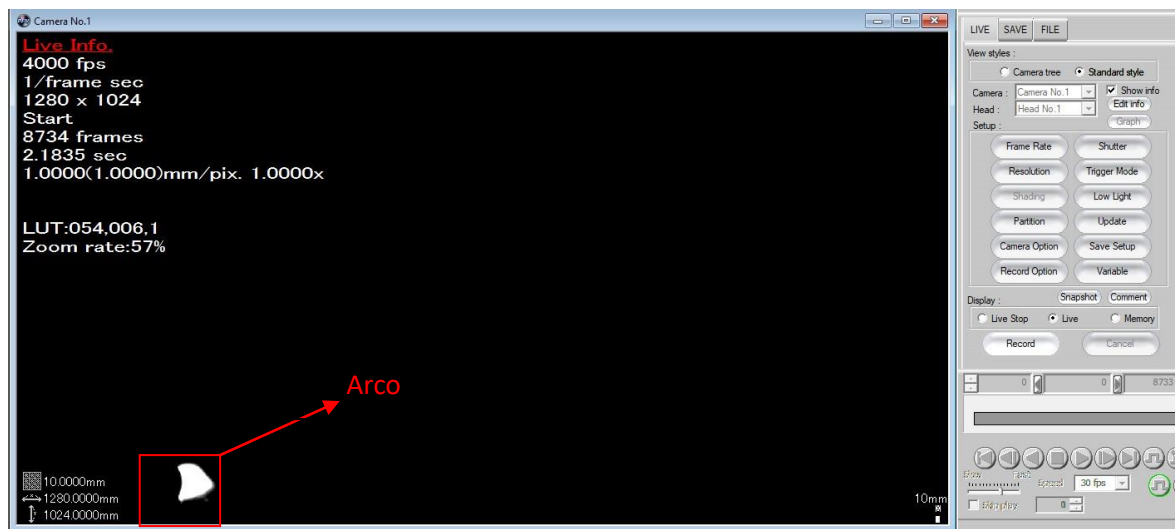
Fonte: O autor (2024).

7.4 Resultados da aplicação das variáveis no teste 1 em spray

Iniciando os procedimentos do tipo spray, as variáveis foram configuradas no robô conforme especificado na Tabela 5. Inicialmente, assim como nos testes de curto-circuito, o filtro 10 foi o primeiro a ser acoplado na proteção para os testes. A seguir, serão apresentadas as imagens obtidas com a aplicação dos demais filtros.

Com o filtro 10, observou-se um arco bem mais concentrado durante a deposição. O ponto de solda apresentou um volume consideravelmente maior em comparação aos outros filtros.

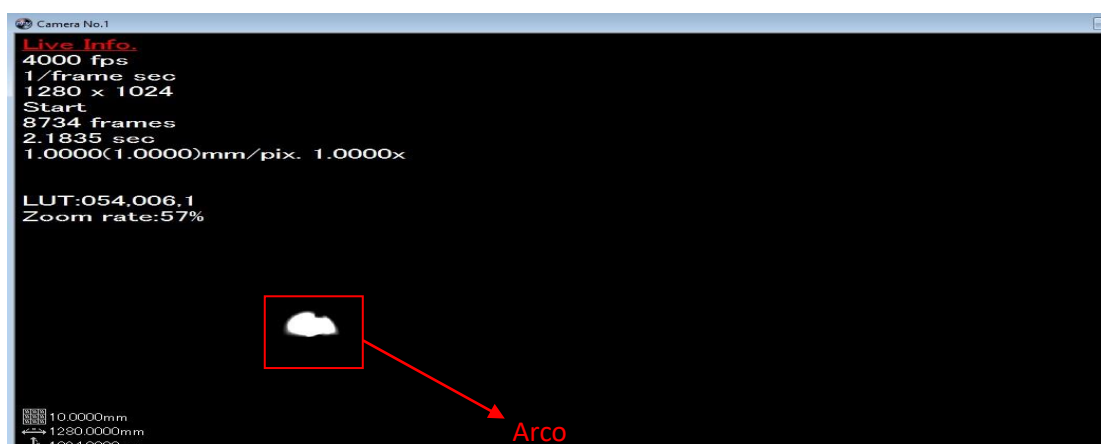
Figura 34 - Captação do teste 1 no software por spray com filtro 10.



Fonte: O autor (2024).

Após a verificação, o filtro 12 foi implementado seguindo com as mesmas variáveis, e percebe-se que não houve uma variação significativa comparada com o filtro 10,

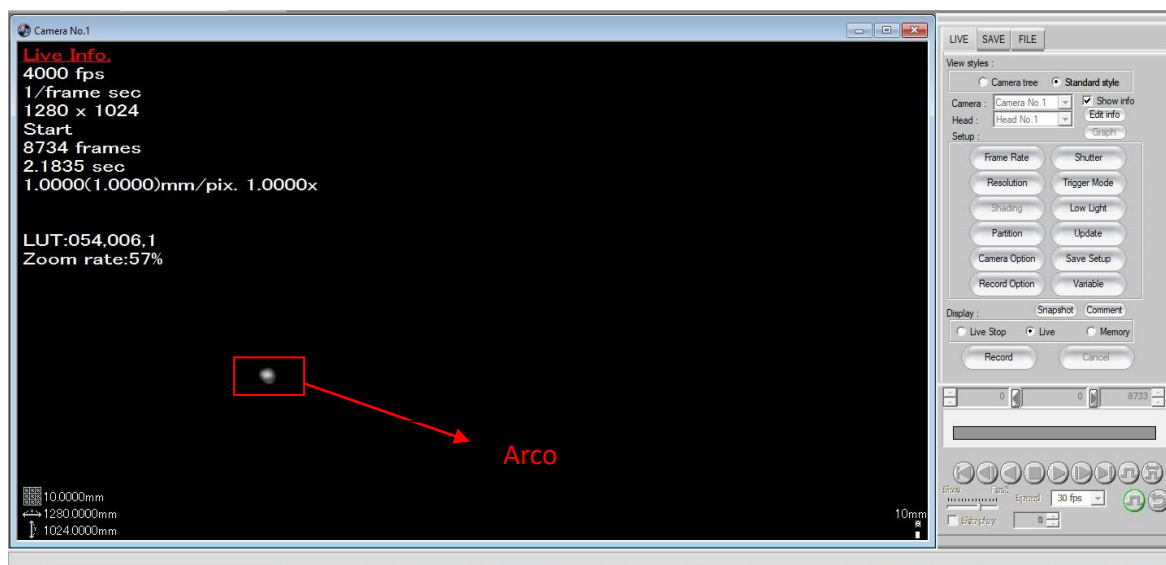
Figura 35 - Captação do teste 1 no software por spray com filtro 12.



Fonte: O autor (2024).

Para finalizar o teste 1 em spray, agora foi colocado o filtro 14 para ser feita a análise, nele abaixo, percebe-se que a visualização do arco se encontra menos concentrada devido ao próprio filtro, não significando menos deposição, mas sim em questão da visualização, sendo possível verificar somente o arco e a não identificação de respingos.

Figura 36 - Captação do teste 1 no software por spray com filtro 14.

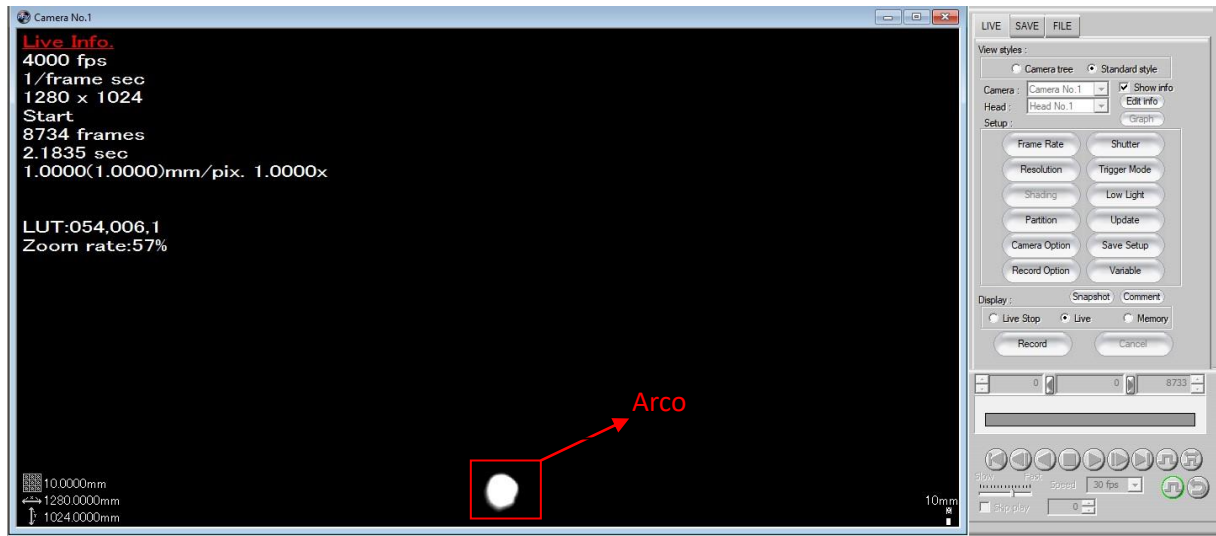


Fonte: O autor (2024).

7.5 Resultados da aplicação das variáveis no teste 2 em spray

Após a finalização da primeira análise, iniciou-se o Teste 2 do tipo spray. Os valores atribuídos no processo estão detalhados na Tabela 7. Abaixo, como nos testes anteriores, observa-se apenas a visualização do ponto do arco de forma mais concentrada. Abaixo, segue a captação do arco obtida neste teste.

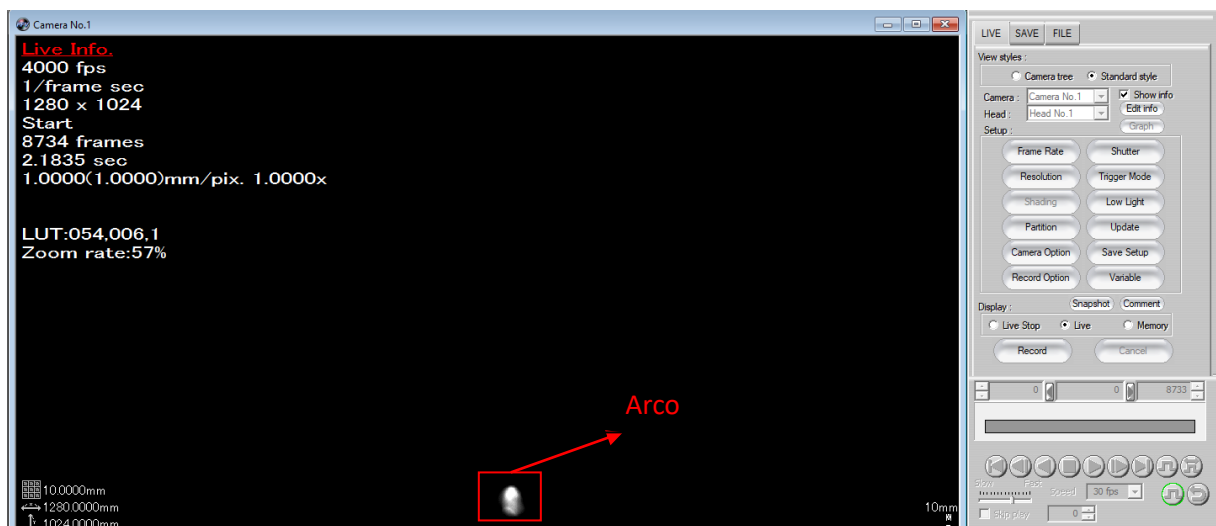
Figura 37 - Captação do teste 1 no software por spray com filtro 10.



Fonte: O autor (2024).

Em seguida, o filtro 10 foi substituído pelo filtro 12 com as mesmas variáveis configuradas. Nesta visualização, é possível observar um arco menos concentrado na deposição.

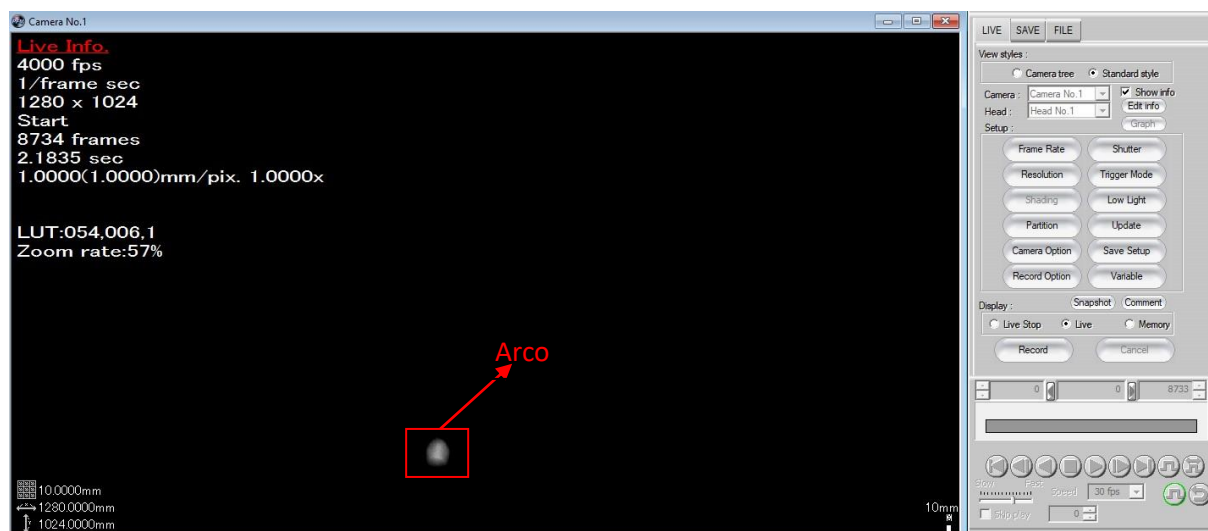
Figura 38 - Captação do teste 2 no software por spray com filtro 12.



Fonte: O autor (2024).

Para concluir todas as amostragens, o filtro 12 foi substituído pelo filtro 14 na proteção. Com a implementação do filtro 14, a visualização manteve-se semelhante à obtida com o filtro 12, apresentando características similares. Contudo, observou-se que o arco se mostrou menos concentrado, um efeito atribuído às propriedades específicas do filtro 14.

Figura 39 - Captação do teste 2 no software por spray com filtro 14.

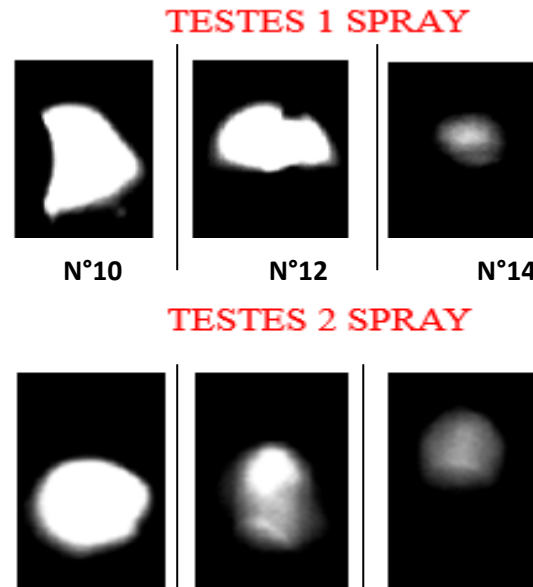


Fonte: O autor (2024).

7.6 Comparação entre os testes 1 e 2 em spray

Ao comparar todos os experimentos realizados com soldagem por spray, observou-se que o processo se assemelha bastante ao observado no curto-circuito. Nota-se uma diminuição na visibilidade conforme o aumento do grau dos filtros aplicados, como observado nos testes anteriores. Assim como no teste anterior, o gotejamento também permaneceu imperceptível em todos os casos, devido à falta de equipamentos necessários para uma análise mais precisa. Abaixo, segue a análise comparando os pontos de arco nos diferentes testes realizados.

Figura 40 – Comparação entre testes em spray.



Fonte: O autor (2024).

8. CONCLUSÃO

A realização deste trabalho destacou a dificuldade que é de observar este gotejamento. Assim como na montagem da bancada, com todos os materiais posicionados corretamente para a realização da solda e a tentativa de captura visual dos modos de transferência de material.

No entanto, a limitação de recursos, especialmente a ausência de um laser infravermelho, impossibilitou a visualização direta dos fenômenos de soldagem. Muitas aplicações de soldagem exigem um laser de alta potência em um comprimento de onda específico, que poderia ser utilizado para iluminar o arco de soldagem de maneira mais eficiente, melhorando assim a visibilidade do processo. Apesar dessa limitação, foram obtidos alguns resultados importantes:

1. Testes Preliminares e Proteção da Câmera: Os testes preliminares realizados evidenciaram a presença de projeções durante o processo de soldagem tanto no modo curto quanto no modo spray. Para proteger a câmera rápida desses respingos, foi projetada, fabricada e instalada uma capa de proteção. Essa capa se mostrou eficiente, pois nenhum respingo atingiu a câmera durante a execução do plano experimental. A proteção foi essencial para o desenvolvimento do setup experimental, possibilitando a tentativa de visualização dos modos de transferência no INTM.

2. Otimização do Setup Experimental: Após a otimização, foram realizadas filmagens das soldas de acordo com as condições descritas no plano experimental. No entanto, durante essas filmagens, observou-se que a intensa luminosidade do arco elétrico provocava a saturação da câmera, o que impossibilitava a visualização da zona de transferência do material fundido.

3. Investigação de Alternativas e Plano de Experimentos Secundário: Para lidar com essa dificuldade, foi elaborado um segundo plano experimental, visando investigar a influência da intensidade do filtro utilizado sobre a saturação percebida nas filmagens. Após a conclusão desse segundo experimento, constatou-se que o aumento da intensidade do filtro minimizou a saturação da câmera. Contudo, essa alteração não foi suficiente para permitir a visualização clara da transferência do material durante a soldagem, devido ao brilho intenso do plasma gerado ao redor do arco elétrico.

4. A disponibilidade de equipamentos e recursos no laboratório ressaltou a importância desses meios para facilitar a pesquisa experimental. A viabilidade de cada material foi essencial para compreender como os parâmetros devem ser adequadamente estabelecidos, garantindo que o processo não seja prejudicado.

Conclusão Geral, os resultados obtidos por meio deste estudo indicam que o INTM não possui, atualmente, todos os equipamentos necessários para a visualização adequada dos modos de transferência durante o processo de soldagem. Embora alguns progressos tenham sido feitos, a alta luminosidade e o brilho intenso do plasma gerado durante o arco elétrico representam desafios que exigem melhorias adicionais no equipamento ou a utilização de técnicas mais avançadas para a captura dessas imagens.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSEN, K.; JOEL, R.; COOK, G. Weldsmart a vision-based expert system for quality control. Mid-South Engineering Inc, 1992.

Interchangeable metal transfer phenomenon in GMA welding: Features, mechanisms, classification 2014

Conn, W.M.: Die technische Physik der Lichtbogenschweissung einschließlich der Schweißmittel, Springer-Verlag, München 1959

Schellhase, M.: Der Lichtbogen – ein technologisches Werkzeug, DVS – Verlag, Düsseldorf, 1985

Killing, R.; Sönnichsen, H.; Glowicki, G.: Beitrag zur Klassifizierung des Werkstoffüberganges beim Metallschutzgasschweißen, Schweißen und Schneiden, Band 36, Nr.12, Seiten 575-578, 1984

Holliday, D.B.: ASM Handbook Vol. 6 (1993), Welding, Brazing and Soldering: Gas-Metal Arc Welding, P560-p572, - ISBN 0-87170-382-3

Matthes, K.-J.; Richter, E.: Schweißtechnik. 2. Auflage Leipzig, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2003. – ISBN 3-446 22046-1

DIN EN 14610:2005-02: Welding and allied processes - Definitions of metal welding processes

Bracarense, A.; Marques, P. V. ; Modenesi, P.J.: Soldagem – Fundamentos e tecnologia. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007

Norman, E.W.L.: The MIG Spot Welding of Aluminium Alloy Sheets – Process Operation and Control, The Welding Institute Research Bulletin, Nov 1980

Soderstrom, E.J., Mendez P. F.: Metal Transfer during GMAW with Thin Electrodes and ArCO₂ Shielding Gas Mixtures, Welding Journal, MAY 2008, VOL. 87, p.124-p.133.

Boehme, D. : Schutzgase – Physikalische Eigenschaften als Grundlage fuer die Entwicklung und den optimalen Einsaty Von gasen und Gasgemischen in der Schweisstechnik. In: Schweisstechnische Fertigungsverfahren: Strahltechnik – Lichtbogenschweisstechnik, Duesseldorf, Verlag fuer Schweissen und verwandte Verfahren (DVS-Verlag), 1989 (DVSVerichte 127), S.70 – 90

SUBAN, M.; TUSEK, J. Dependence of Melting Rate in MIG/MAG Welding on the Type of Shielding Gas Used. Materials Processing Technology, n. 119, p. 185-192, 2001.

Smith, A.: CO₂ Welding of Steel. Cambridge, U.K.: The Welding Institute, 1966, 21-25

Lesnewich, A.: Control of melting rate and metal transfer in gas shielded metal arc welding: Part 1 Welding J. 37, 1958, 343–353, Part 2 Welding J. 37 418–25s

Lancaster, J.F. The Physics of Welding, Pergamon Press & International Institute of Welding, (1986)

Jeffus, L. F.: Welding: Principles and Applications, Edition: 5, Cengage Learning, 2002 ISBN1401810462, p218 –225

Scotti, A., Ponomarev, V. (2008) Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho. 1. ed. São Paulo: Artliber Editora, 284 p