

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**UMA METODOLOGIA PARA MONITORAMENTO EM
TEMPO REAL DOS MODOS DE TRANSFERÊNCIA DE
METAL CONVENCIONAIS NO PROCESSO DE
SOLDAGEM GMAW.**

FABIÁN EDUARDO GIRÓN CRUZ

**ORIENTADOR: SADEK CRISÓSTOMO ABSI ALFARO
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS
MECATRÔNICOS**

**PUBLICAÇÃO:
BRASÍLIA/DF: JULHO – 2019**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**UMA METODOLOGIA PARA MONITORAMENTO EM TEMPO
REAL DOS MODOS DE TRANSFERÊNCIA DE METAL
CONVENCIONAIS NO PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW**

FABIÁN EDUARDO GIRÓN CRUZ

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM SISTEMAS MECATRÔNICOS.**

APROVADA POR:

**Prof. Sadek Crisóstomo Absi Alfaro, PhD, ENM/UnB
Orientador**

**Prof. Alysson Martins Almeida Silva, Dr, ENM/UnB
Examinador externo**

**Prof. Evandro Leonardo Silva Teixeira, Dr, FGA/UnB
Examinador externo**

BRASÍLIA/DF, DE JULHO DE 2019.

FICHA CATALOGRÁFICA

CRUZ, FABIAN EDUARDO GIRON.

Uma metodologia para monitoramento em tempo real dos modos convencionais de transferência de metal no processo de soldagem GMAW. [Distrito Federal] 2019.

xiii, 113p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Sistemas Mecatrônicos, 2019).
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Soldagem GMAW.

2. Modos de transferência metálica.

3. Sinais elétricos.

4. Processamento de imagens digitais.

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CRUZ, F. E. G. (2019) Uma metodologia para monitoramento em tempo real dos modos convencionais de transferência de metal no processo de soldagem GMAW. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.DM, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 113p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Fabián Eduardo Girón Cruz.

TÍTULO: Uma metodologia para monitoramento em tempo real dos modos convencionais de transferência de metal no processo de soldagem GMAW.

GRAU: Mestre

ANO: 2019

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta Dissertação de Mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Fabián Eduardo Girón Cruz
SCLN 407 Bloco A, Sala 216.
70.855-510 – Brasília – DF – Brasil.

DEDICATÓRIA

Dedicado aos meus pais que com seu amor, paciência e esforço me permitiram perseguir meus sonhos e ilusões com dedicação e coragem. Ao meu irmão Andrés por seu amor e apoio incondicional durante todo este processo. Ao meu avô Luís por ser um exemplo e pelos conselhos dados em vida que foram de grande ajuda para a minha vida e crescimento.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pelas suas bênçãos, por me guiar durante toda a minha vida, por ser o suporte e a força naqueles momentos de dificuldade e fraqueza e por ter colocado no meu caminho pessoas maravilhosas que fizeram isto possível.

Aos meus pais: Jorge e Deiby, suas bênçãos, seu amor e esforço me mantiveram lutando em cada um dos diferentes momentos que levou este processo. Ao meu irmão Andrés pelo seu amor e apoio incondicional durante todo este processo. Para toda a minha família, porque, com suas orações e palavras de encorajamento, eles me tornaram uma pessoa melhor.

Ao professor Sadek Absi Alfaro, pela orientação durante o desenvolvimento do trabalho.

Aos meus professores, funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília e do Laboratório do GRACO, que, com sua ajuda e sugestões, tornaram possível este trabalho.

Aos meus colegas pela ajuda, conselhos e também pelas alegrias compartilhadas e pela companhia nos momentos difíceis.

RESUMO

UMA METODOLOGIA PARA MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DOS MODOS CONVENCIONAIS DE TRANSFERÊNCIA DE METAL NO PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW.

Autor: Fabián Eduardo Girón Cruz.

Orientador: Sadek Crisóstomo Absi Alfaro.

Programa de Pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos.

Brasília, Julho de 2019.

A soldagem a arco de metal com gás de proteção (GMAW) é um dos processos mais importantes na produção e reparo de equipamentos e estruturas, caracterizando-se por ser inspecionado contra imperfeições somente após sua finalização. Por essa razão, a demanda de sistemas para o monitoramento e o controle nos processos de soldagem tem aumentado a necessidade de melhorar a produtividade e qualidade, implicando ao desenvolvimento e aperfeiçoamento de técnicas e sistemas para monitoramento e controle dos processos de soldagem. Diante do exposto, o presente estudo apresenta uma metodologia que permite a extração de características próprias dos modos de transferência de metal convencionais (curto-circuito, globular, spray) através da aquisição de sinais de corrente e tensão de soldagem, e pelo processamento de imagens obtidas pela técnica de perfilografia. Foi possível desenvolver uma metodologia para monitoramento em tempo real do comportamento do processo com base em características como a dinâmica do curto-circuito ou o tamanho da gota, conforme seja o caso. A validação da metodologia foi realizada alterando variáveis pré-selecionadas (tipo de gás de proteção, tipo de arame) e variáveis primárias (tensão do arco, velocidade de alimentação do arame, velocidade de soldagem). Foi demonstrado que a partir dessa metodologia é possível monitorar o processo permitindo visualizar o comportamento através de uma interface gráfica que mostra informações relevantes para determinar a estabilidade do processo.

ABSTRACT

Autor: Fabián Eduardo Girón Cruz.

Orientador: Sadek Crisóstomo Absi Alfaro.

Programa de Pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos.

Brasília, Julho de 2019.

Metal arc welding with protective gas (GMAW) is one of the most important processes in the production and repair of equipment and structures, characterized by being inspected against imperfections only after its completion. For this reason, over the years, the demand for systems for monitoring and control in welding processes has increased as well as the need to improve productivity and quality, implying the development and improvement of techniques and systems for monitoring and control of welding processes. In view of the above, the present study presents a methodology that allows the extraction of characteristics of the conventional metal transfer modes (short circuit, globular, spray) through the acquisition of welding current and voltage signals, and the processing of images obtained by the shadowgraph technique. It was possible to obtain a methodology for real-time monitoring of the behavior of the process based on characteristics such as the short circuit dynamics or the size of the drop, as the case may be. The validation of the methodology was performed by changing pre-selected variables (protection gas type, wire type) and primary variables (arc voltage, wire feed speed, welding speed). It was demonstrated that from this methodology it is possible to monitor the process by visualizing the behavior through a graphical interface that shows relevant information to determine the stability of the process.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1. OBJETIVOS.....	14
1.1.1. Objetivo geral	14
1.1.2. Objetivos específicos	14
1.2. MOTIVAÇÃO E CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	15
1.3. ESTRUTURA DO DOCUMENTO	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. SOLDAGEM.....	17
2.2. PROCESSO DE SOLDAGEM	17
2.2.1. PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW.....	18
2.2.2. Definição do Processo GMAW	18
2.2.3. Parâmetros Operacionais do Processo GMAW.....	24
2.2.4. Modo de Transferência de Metal.....	30
2.2.5. Fatores que Afetam os Modos de Transferência de Metal	35
2.3. ASPECTOS ESPECIAIS EM PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS	36
2.3.1. Processamento Digital de Imagens	36
2.3.2. Imagem Digital	37
2.4. ILUMINAÇÃO POR PERFILOGRAFIA	42
3. ESTADO DA ARTE.	46
3.1. ESTUDOS BASEADOS EM MÉTODOS TRADICIONAIS PARA O MONITORAMENTO DO PROCESSO GMAW.	46
3.2. ESTUDOS BASEADOS EM MÉTODOS NÃO TRADICIONAIS PARA O MONITORAMENTO DO PROCESSO GMAW.....	50
4. PROPOSTA METODOLÓGICA E MONTAGEM EXPERIMENTAL	59
4.1. EQUIPAMENTOS E MATERIAIS.....	60
4.1.1. Sistema de Soldagem.....	60
4.2. DELIMITAÇÃO DA REGIÃO DE TRABALHO.	63
4.3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	65
4.3.1. Sistema de Aquisição dos Sinais Elétricos.....	65
4.3.2. Identificação das Características dos Sinais para a Classificação dos Modos de Transferência	66
4.3.3. Sistema de Aquisição de Imagens	67
4.3.4. Processamento de Imagens.....	70
4.3.5. Identificação das Características das Imagens para a Classificação dos Modos de Transferência.	73
4.3.6. Implementação do Sistema e Desenvolvimento do Relatório de Dados do Processo na Interface de Usuário.	79
5. RESULTADOS	82
5.1. RESULTADOS DO PROJETO	82
5.1.1. Aquisição dos Sinais Elétricos de Tensão e Corrente de Soldagem	82

5.1.2.	Identificação de Características de Sinais Elétricos para a Classificação dos Modos de Transferência	84
5.1.3.	Identificação de Características a partir de Imagens para a Classificação dos Modos de Transferência	87
5.2.	RESULTADOS DE IMPLEMENTAÇÃO	93
5.2.1.	Implementação do Sistema e Desenvolvimento do Relatório de Dados do Processo na Interface de Usuário.	93
6.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	96
7.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	100
7.1.	CONCLUSÕES	100
7.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	101
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Classes e respectivos modos naturais de transferência metálica no processo GMAW (Ponomarev <i>et al.</i> , 2009)	32
Tabela 4.1: Composição química dos arames usados	62
Tabela 4.2: Projeto experimental do planejamento experimental	64
Tabela 5.1: Comparativo entre os resultados oferecidos pelo algoritmo em labVIEW e pelo fracionamento do sinal corrente.	86
Tabela 5.2: Resultado obtido do teste 1.....	87
Tabela 5.3: Resultado obtido do teste 2 com velocidade de alimentação de arame variável e mantendo fixas a tensão e a velocidade de soldagem.....	87
Tabela 5.4: Resultado obtido do teste 3 a partir da configuração 3 para a extração de características do modo de transferência por curto-circuito.....	88
Tabela 5.5: Resultados obtidos do teste 4 com câmbios na tensão, velocidade de alimentação do arame e velocidade de soldagem.....	88
Tabela 5.6: Resultado obtido do teste 1 com tensão variável.....	89
Tabela 5.7: Resultado obtido do teste 2 com velocidade de alimentação de arame variável e mantendo fixas a tensão e a velocidade de soldagem.....	89
Tabela 5.8: Resultado obtido do teste 3 a partir da configuração 3 para a extração de características do modo de transferência por curto-circuito.....	90
Tabela 5.9: Resultados obtidos do teste 4 com mudanças na tensão, velocidade de alimentação do arame e velocidade de soldagem.....	90
Tabela 5.10: Resultado obtido do tamanho da gota no modo de transferência globular.....	91
Tabela 5.11: Resultado obtido do tamanho da gota no modo de transferência spray	92
Tabela 5.12: Resultado da frequência de destacamento das gotas no modo de transferência globular.....	92
Tabela 5.13: Resultado da frequência de destacamento das gotas no modo de transferência spray	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Processo de soldagem GMAW (modificado de Modenesi <i>et al.</i> , 2012).....	19
Figura 2.2: Equipamentos básicos de soldagem GMAW (modificado Nadzam, 2011).....	19
Figura 2.3: Fonte de soldagem (modificado Nadzam, 2011).	20
Figura 2.4: Características das Fontes de Alimentação Volt-Amp, (a) Corrente constante; (b) Tensão constante (Nadzam, 2011).	21
Figura 2.5: Mecanismo do Alimentador de arame (modificado Nadzam, 2011).	22
Figura 2.6: Tocha típica para soldagem GMAW (modificado Nadzam, 2011).	22
Figura 2.7: Tocha de soldagem GMAW com configuração push pull (Nadzam, 2011).	23
Figura 2.8: Dispositivo de blindagem com gás.	24
Figura 2.9: Stick-out ou extensão livre do eletrodo (modificado Silva, 2014).	27
Figura 2.10: Inclinação da tocha de soldagem, (a) ângulo de empurre; (b) ângulo perpendicular; (c) ângulo de arraste.	28
Figura 2.11: Tipo de polaridade utilizada na soldagem GMAW.	28
Figura 2.12: Mapas esquemáticos dos modos principais de transferência metálica da corrente e da tensão (Ponomarev <i>et al.</i> , 2009).	31
Figura 2.13: Mecanismo típico de transferência por curto-circuito associado à corrente de soldagem.	33
Figura 2.14: Modo de transferência Globular.	34
Figura 2.15: Modo de transferência por spray.	35
Figura 2.16: Passos fundamentais em processamento de imagens digitais, (Modificado Lopera, 2016).	37
Figura 2.17: Representação de uma imagem digitalizada com baixa resolução espacial (modificada Gonzales, 2010).	38
Figura 2.18: Conectividade entre dois pontos $p(x,y)$ e $q(s,t)$ (Albuquerque, 2001).....	39
Figura 2.19: Perímetro de uma forma usando conectividade D8 (Albuquerque, 2001).....	40
Figura 2.20: Filtragem no domínio espacial, (a) imagem original; (b) imagem com um filtro de mediana (passa-baixas); (c) filtro de detecção de variações bruscas no sentido horizontal (Passa-Alta); (d) filtro Passa-Alta (Albuquerque, 2001).	41
Figura 2.21: Exemplo de um processo de binarização, (a) uma imagem original; (b) imagem com aplicação de filtro; (c) imagem binarizada.	42
Figura 2.22: Princípio da perfilografia aplicado à soldagem (modificado Bálsamo <i>et al.</i> , 2000).	43
Figura 2.23: Formação de ondas planas a partir de ondas esféricas mediante o uso de uma lente convergente, em que a letra F representa o foco imagem da lente e a luz incidente se propaga na direção das setas (Lopera, 2011).	44
Figura 2.24: Sistema expensor de feixe laser de Galileu (Lopera, 2011).....	44
Figura 2.25: Expensor de feixe laser de Kepler, onde F representa o foco de cada lente e DL a distância entre as duas lentes (Lopera, 2011).	45
Figura 4.1: Esboço do procedimento experimental desenvolvido para este trabalho.	59
Figura 4.2: Distribuição e localização do sistema computacional, hardware e equipamentos utilizados neste estudo (modificado Torres, 2013).	60
Figura 4.3: Imagem frontal do painel de controle da fonte TransPuls Synergic 5000.	61
Figura 4.4: Mesa de deslocamento linear (modificado Franco, 2007; Franco, 2008).	62
Figura 4.5: Placa de aquisição da National Instrument de referência USB 6353.....	66
Figura 4.6: Sinal de corrente dividida em intervalos de 2 segundos.	67

Figura 4.7: Iluminação de peças (arame e metal base) envolvidas na transferência metálica mediante a técnica de perfilografia.	69
Figura 4.8: Bancada experimental da técnica de iluminação por perfilografia.	70
Figura 4.9: Ruídos presentes nas imagens obtidas pela técnica de perfilografia.	71
Figura 4.10: Aplicação dos filtros, (a) imagem original; (b) com o filtro gaussiano; (c) com o filtro de mediana.	72
Figura 4.11: Aplicação da limiarização global numa imagem (a) imagem original; (b) imagem limiarizada.	73
Figura 4.12: Detecção da borda do metal base, (a) localização do ponto inicial; (b) Linha imaginária projetada na borda do metal base.	74
Figura 4.13: Detecção das bordas do elemento arame, (a) Projeção da linha imaginária na detecção da primeira borda do arame; (b) Projeção da linha imaginária na detecção da segunda borda do arame.	75
Figura 4.14: Localização dos pontos extremos da janela de trabalho.	76
Figura 4.15: Desenho e dimensões da área de trabalho.	77
Figura 4.16: Estimativa do diâmetro aproximado da gota em termos de pixels.	78
Figura 4.17: Interface gráfica do usuário desenvolvida para monitoramento em tempo real do processo.	80
Figura 4.18: Diagrama do sistema em tempo real desenvolvido neste trabalho.	81
Figura 5.1: Sinais elétricos obtidos do teste com tensão variável.	83
Figura 5.2: Sinais de tensão e corrente de soldagem alcançados no teste com velocidade de alimentação do arame variável.	83
Figura 5.3: Resultados alcançados do experimento com velocidade de soldagem variável.	84
Figura 5.4: Sinais elétricos alterando as três variáveis (tensão, velocidade de alimentação do arame e velocidade de soldagem).	84
Figura 5.5: Análise do sinal de corrente na primeira fração.	85
Figura 5.6: Análise do sinal de corrente na segunda fração.	85
Figura 5.7: Análise do sinal de corrente na terceira fração.	85
Figura 5.8: Análise do sinal de corrente na quarta fração.	86
Figura 5.9: Resultado da Implementação do sistema de monitoramento dos modos de transferência metálica no processo GMAW- Parte 1.	94
Figura 5.10: Resultado da Implementação do sistema de monitoramento dos modos de transferência metálica no processo GMAW- Parte 2.	95
Figura 5.11: Resultado da Implementação do sistema de monitoramento dos modos de transferência metálica no processo GMAW- Parte 3.	95
Figura 5.12: Cordão obtido do experimento.	96

1. INTRODUÇÃO

O processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) é considerado um dos processos mais relevantes na indústria devido às suas boas características. Este processo de união utiliza um arco elétrico (tensão e corrente elétrica) formado e mantido entre um arame consumível alimentado continuamente e as peças a serem soldadas. Para produzir a união de metais, o arco elétrico funde o eletrodo pelo aquecimento proporcionado pelo efeito Joule e pelo calor inerente do arco. O processo é utilizado com uma proteção através de um gás fornecido externamente para a proteção do arco e da poça de fusão de poluentes atmosféricos visando evitar defeitos de soldagem.

Outra característica da soldagem GMAW consiste no fato de que o processo pode ser executado em diferentes posições com altas velocidades de soldagem e com alta taxa de deposição do metal de adição. No processo GMAW, podem ser encontradas as principais maneiras pelas quais o metal é transferido do arame para a poça de fusão, as quais são conhecidas como os modos de transferência de metal: curto-circuito, globular ou spray. Os modos de transferência têm muita influência no nível operacional na soldagem GMAW, já que eles intervêm em características tais como a estabilidade do processo, níveis de respingos, geometria do cordão de solda, entre outros, o que converte o estudo dos modos de transferência como um fator importante no desenvolvimento do processo de soldagem GMAW.

O monitoramento de algumas variáveis físicas geradas pelo arco elétrico, a monitorização dos modos de transferência metálica, a análise de parâmetros operacionais do processo (como, por exemplo, a tensão, a corrente e a velocidade de alimentação) têm sido considerados fatores importantes nos esforços de monitoramento e controle da execução do processo de soldagem, bem como na supervisão e no melhoramento da qualidade da solda.

O exposto acima transmite a importância da transferência de metal no processo GMAW, de modo que neste trabalho é desenvolvida uma metodologia que permite o monitoramento e a análise em tempo real das características dos principais modos de transferência, a fim de obter um relatório de dados que possibilite identificar o estado atual do processo e oferecer informações para garantir atributos de qualidade de soldagem, como a estabilidade do processo, a eficiência de soldagem e a geometria desejada do cordão.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

Desenvolver uma metodologia que permita o monitoramento em tempo real das principais características dos modos de transferência metálica convencionais no processo de soldagem GMAW.

1.1.2. Objetivos específicos

Para o cumprimento do objetivo geral deste trabalho, procura-se atingir os seguintes objetivos específicos:

1. Implementar um sistema de aquisição dos sinais elétricos de corrente e tensão de soldagem no processo GMAW.
2. Implementar um sistema de captura de imagens da transferência para a observação da transferência metálica a partir da técnica de iluminação por perfilografia e filmagem de alta velocidade.
3. Realizar o processamento digital das imagens a fim de facilitar a identificação e a extração das características próprias de cada modo de transferência.
4. Desenvolver uma aplicação de monitoramento em tempo real que permita observar o comportamento do processo a partir das variações das características dos modos de transferência metálica.
5. Validar a metodologia proposta a partir da implementação do conjunto de procedimentos exposto acima.

1.2. MOTIVAÇÃO E CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

No momento em que a soldagem atingiu níveis industriais, as exigências e demandas no âmbito da qualidade da solda e estabilidade do processo foram aumentando. Para garantir esses aspectos, ao longo desses anos, o avanço na tecnologia (eletrônica e informática) nos processos de soldagem tem possibilitado significativas melhorias nos equipamentos de soldagem e na implementação de novas técnicas de monitoramento e controle do processo. A finalidade é atingir o aumento na produtividade do processo.

A soldagem GMAW é particularmente considerada como um dos processos mais importantes na produção e reparo de equipamentos, mas o processo caracteriza-se por ser inspecionado contra imperfeições somente após sua finalização. Por isso a principal motivação para o presente trabalho foi o desenvolvimento de uma metodologia para o monitoramento do processo GMAW, visando obter informações que permitam um seguimento ao comportamento do processo durante a soldagem.

Uma contribuição tecnológica bastante significativa é o projeto de um sistema o qual visa o monitoramento em tempo real dos modos de transferência metálica. Além disso, o projeto possui um sistema de aquisição de imagens de baixo custo para a identificação de características da transferência metálica em tempo real, que pode ser utilizado posteriormente para controlar o processo. Desta forma, ao estudar como acontece, o presente trabalho procura ampliar o conhecimento de técnicas de visão computacional que permitam identificar o comportamento do processo. Visa-se uma maior utilização do mesmo pelo setor industrial para reduzir os custos de produção ao diminuir a saída de produtos defeituosos das linhas de produção a partir do monitoramento em tempo real do processo. Também, na área educacional, o desenvolvimento da metodologia proposta tem significativos aportes, já que permite aos alunos entenderem de forma visual e didática o comportamento em tempo real do processo de soldagem.

1.3. ESTRUTURA DO DOCUMENTO

A presente Dissertação contém sete capítulos, em detalhes:

Capítulo 2 – apresenta a revisão bibliográfica necessária para o desenvolvimento da pesquisa; tem-se uma abordagem nas áreas de processos de soldagem GMAW, modos de transferência metálica e processamento digital de imagens.

Capítulo 3 – apresenta uma análise da informação relevante da bibliografia disponível, permitindo identificar o avanço da investigação no campo do monitoramento do processo de soldagem GMAW a partir de métodos tradicionais e não tradicionais.

Capítulo 4 – trata do procedimento experimental, com a descrição dos equipamentos e a metodologia utilizada para a obtenção das características do processo GMAW que permitam a identificação dos modos de transferência metálica e o desenvolvimento dos programas responsáveis pelo monitoramento do comportamento do processo.

Capítulo 5 – têm-se os resultados obtidos nas fases da metodologia proposta, apresentam-se os resultados na interface gráfica de usuário desenvolvida para a integração das diferentes etapas realizadas, visando a obtenção do sistema de monitoramento do processo em tempo real.

Capítulo 6 – expõe a discussão dos resultados alcançados no procedimento experimental.

Capítulo 7 – têm-se as conclusões finais, além das sugestões de trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica dos temas envolvidos nesta pesquisa. Primeiramente, é desenvolvida uma introdução sobre a soldagem e seus processos. Em seguida, faz-se uma revisão dos conceitos que rodeiam o processo de soldagem por *Gas Metal Arc Welding* (GMAW). Depois, tem-se a apresentação de noções básicas de processamento digital de imagens e, finalmente, é exposta a descrição da técnica de iluminação por perfilografia.

2.1. SOLDAGEM

A soldagem é tão antiga como o trabalho com metais. Foi no final do século XIX que o primeiro processo de soldagem surgiu, o qual foi denominado como a soldagem por forja. Ele foi utilizado pelos ferreiros para unir ferro e aço mediante aquecimento e martelamento. Em seguida, a soldagem a arco e a soldagem por resistência elétrica foram desenvolvidas devido ao crescimento da indústria metalúrgica e à demanda pela construção de ferrovias, pontes e edifícios. Desde então, a tecnologia de soldagem avançou rapidamente, gerando técnicas modernas para melhorar os processos de soldagem devido à necessidade de uniões confiáveis com ótima qualidade de solda (TLC, 2018).

A Sociedade Americana de Solda (AWS, 1987) define uma solda como uma coalescência localizada de metais ou não metais, produzida pelo aquecimento dos materiais até a temperatura de solda, com ou sem a aplicação de pressão e com ou sem o uso de material de aporte. Na época atual, a soldagem é considerada como um dos mais importantes e versáteis meios de fabricação disponíveis na indústria. Sua importância caracteriza-se pelo fato de unir uma quantidade considerável de metais comerciais, de ser aplicado em certos locais, por proporcionar flexibilidade ao projeto, por reduzir custos de produção e pela facilidade em ser utilizado para recuperação e manutenção de estruturas. É por isto que as indústrias de diferentes ramos não poderiam ter atingido seu desenvolvimento atual sem a tecnologia de soldagem.

2.2. PROCESSO DE SOLDAGEM

O processo de soldagem é o conjunto de elementos operacionais básicos utilizados para fazer a união soldada, que devem cumprir com os seguintes requisitos: fornecer a energia

necessária para criar a união (térmica, mecânica ou uma combinação de ambas); evitar a contaminação atmosférica ou seus efeitos sobre o metal fundido; prover o metal de adição; e controlar a metalurgia dos metais implicados (Giraldo, 1997). Segundo AWS (1987), podem-se diferenciar os diferentes métodos de união de materiais através da soldagem em dois grandes grupos: a soldagem por fusão e a soldagem em estado sólido. Os processos de soldagem por fusão são aqueles em que a fusão do metal base sempre ocorrerá, assim como a do metal de adição quando é utilizado. Neste caso, haverá sempre uma fase líquida que será formada no metal base ou pelo metal de base acompanhado de um metal de adição. Por sua parte, nos processos de soldagem em estado sólido, em nenhum momento existe a fusão do metal base ou do metal de adição; pode-se dizer, portanto, que nunca haverá uma fase líquida nesse processo.

2.2.1. PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW.

2.2.2. Definição do Processo GMAW

GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) é um processo de soldagem que utiliza um arco elétrico formado e mantido entre um fio de eletrodo consumível alimentado continuamente e a peça de trabalho. Para produzir a coalescência de metais, o arco elétrico funde o eletrodo mediante o aquecimento proporcionado pelo efeito Joule e pelo próprio calor inerente ao arco (AWS, 1987).

O processo é protegido utilizando um gás fornecido externamente. A proteção do arco e da poça de fusão, em relação a contaminantes atmosféricos, visa evitar defeitos. Em relação ao gás de proteção, o processo GMAW pode ser dividido em duas categorias: se é inerte puro (hélio, argônio, etc.), o processo é designado MIG (Metal Inert Gas); ao contrário, se a proteção gasosa estiver ativa, por exemplo, utilizando dióxido de carbono ou alguma mistura de Argônio/Dióxido de carbono, então o processo é chamado MAG (Metal Active Gas) (Weglowski *et al.*, 2008). A Figura 2.1 ilustra esquematicamente o referido processo.

Esse processo caracteriza-se por sua versatilidade, pois pode ser utilizado na soldagem de materiais com várias espessuras, ferrosos ou não ferrosos, como alumínio, cobre, magnésio, níquel e suas ligas, aços de alta resistência e aços inoxidáveis. Também é apropriado na fabricação e manutenção de estruturas, equipamentos e elementos metálicos, na recuperação

de objetos deteriorados e no recobrimento de superfícies metálicas, podendo ser utilizado em várias posições de soldagem.

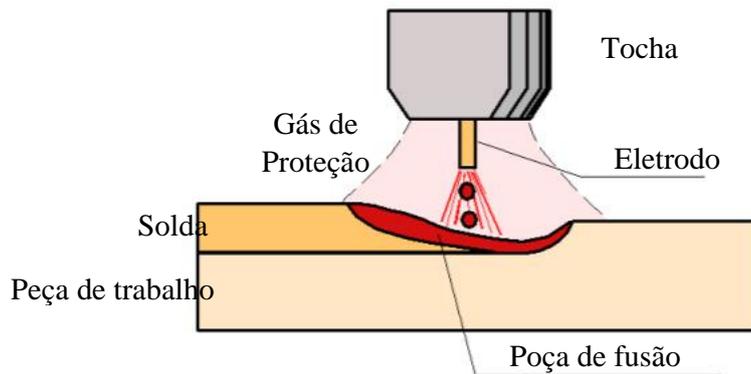


Figura 2.1: Processo de soldagem GMAW (modificado de Modenesi *et al.*, 2012).

A atual necessidade de melhorar aspectos como a produtividade e a qualidade nas peças soldadas, além da redução de resíduos e erros humanos, levou à automação do processo de soldagem. Os sistemas automatizados de soldagem são caracterizados por apresentar uma melhor integridade da solda devido ao uso de controladores eletrônicos, garantindo resultados superiores aos obtidos em processos manuais. Para escolher o equipamento certo, no entanto, é necessário ter em consideração o processo de soldagem a ser executado, a disponibilidade de corrente, a portabilidade, o amperagem e os ciclos de trabalho. Por exemplo, o processo GMAW é caracterizado por ser normalmente operado de forma semiautomática e apresenta elevada produtividade. Um sistema básico do processo GMAW inclui quatro componentes principais como é evidenciado na Figura 2.2.

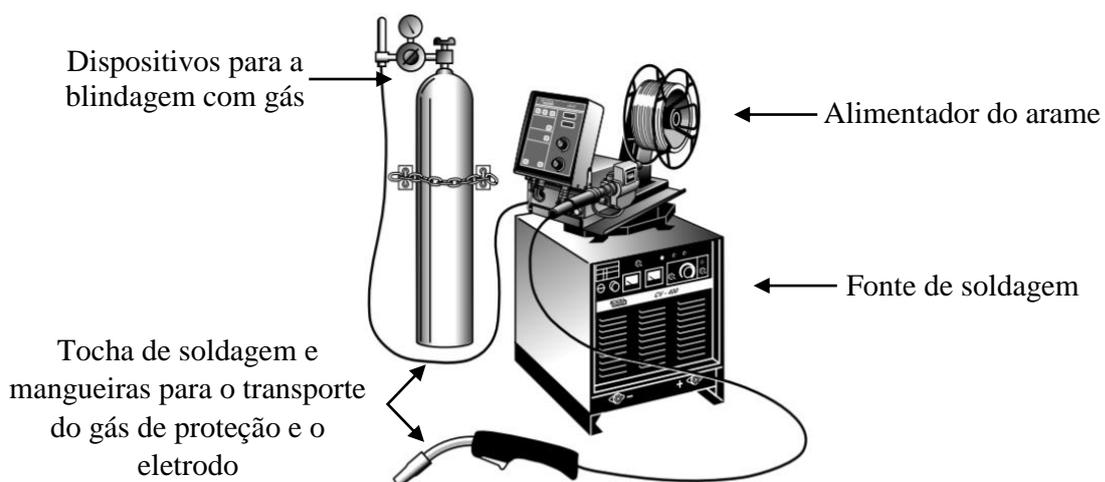


Figura 2.2: Equipamentos básicos de soldagem GMAW (modificado Nadzam, 2011).

2.2.2.1. Fonte de Soldagem

As fontes de energia para soldagem (vide Figura 2.3) podem ser consideradas simplesmente como o ponto de alimentação da energia elétrica. As fontes realizam, entretanto, uma grande influência sobre o desempenho de um processo de soldagem. Na GMAW, as fontes de soldagem têm como característica produzir saídas projetadas para otimizar o rendimento do arco. Ditas características dividem-se em dois grupos principais: fontes de corrente constante e fontes de tensão constante.



Figura 2.3: Fonte de soldagem (modificado Nadzam, 2011).

As fontes de soldagem de corrente constante foram amplamente utilizadas tempos atrás, tendo seu uso contínuo na soldagem de alumínio. O projeto destas fontes utiliza uma curva de saída descendente (vide Figura 2.4-a). Em corrente constante, a CTWD (distância bico de contato ao metal base) é o fator que determina o comprimento do arco elétrico. Sendo assim, um aumento no CTWD geraria um maior comprimento no arco; caso contrário, ou seja, quando o CTWD é reduzido, o comprimento do arco elétrico tenderia a minorar. Esta situação representa um problema na soldagem semiautomática devido aos inconvenientes de manter um valor estável do CTWD.

Por sua vez, as fontes de soldagem de tensão constante são projetadas para fornecer uma tensão de arco específica para uma velocidade de alimentação de arame pré-selecionada. A curva de característica volt-ampere é relativamente plana (vide Figura 2.4-b). À medida que aumenta a CTWD com estes tipos de fontes, a máquina repassa menos corrente, uma vez

que o eletrodo funde lentamente. Ao fundir o arame a uma taxa mais lenta, a longitude do arco e a tensão mantêm-se constantes. De outro modo, à medida que diminui a CTWD, o comprimento do arco também diminui, a máquina fornece mais corrente para fundir o eletrodo de forma mais rápida, mantendo a longitude do arco e a tensão constantes (Nadzam, 2011).

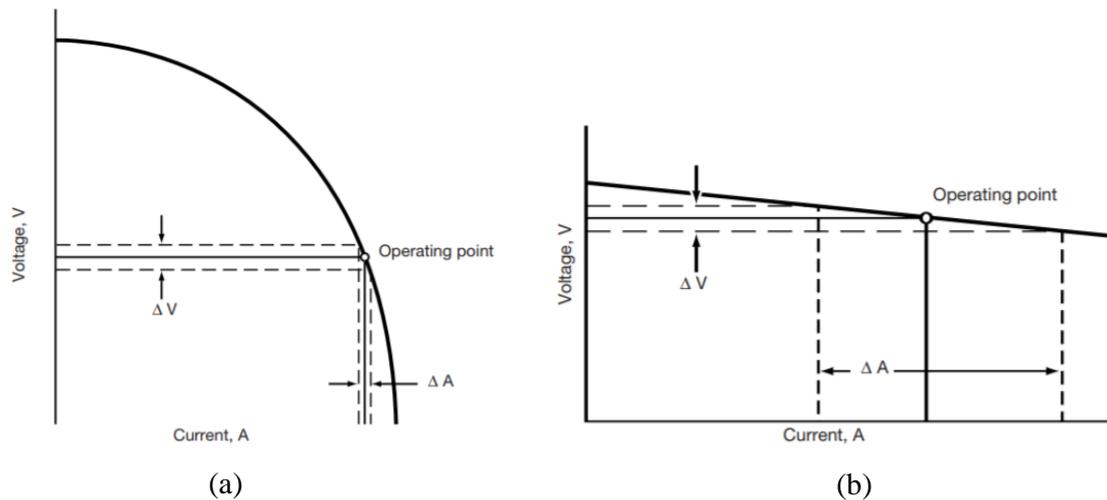


Figura 2.4: Características das Fontes de Alimentação Volt-Amp, (a) Corrente constante; (b) Tensão constante (Nadzam, 2011).

2.2.2.2. Alimentador do Arame

O fornecimento do arame no processo GMAW é frequentemente abastecido por um único módulo, identificado como o alimentador de arame (vide Figura 2.5). Sua principal função é puxar o arame do carretel e alimentá-lo ao arco (ESAB, 2004). Os alimentadores de arame consistem em um dispositivo de montagem para a bobina, um conjunto de rodas de tração para o arame e um motor ajustável de velocidade constante para girar as rodas de tração. As bobinas de arame estão montadas em eixos de giro livre próximo ao mecanismo de alimentação de arame. O arame pode ser extraído da bobina ou do tambor através das rodas de tração. Tais rodas possuem dentes na circunferência exterior para a execução de movimento sincronizado entre as mesmas, gerando, assim, o fornecimento de arame ao processo. A roda motriz é acionada pelo motor que, por sua vez, move as demais rodas através dos dentes das engrenagens. A pressão no arame que passa entre as rodas supramencionadas pode ser ajustada utilizando-se um dispositivo tensor (Cruz, 2014).

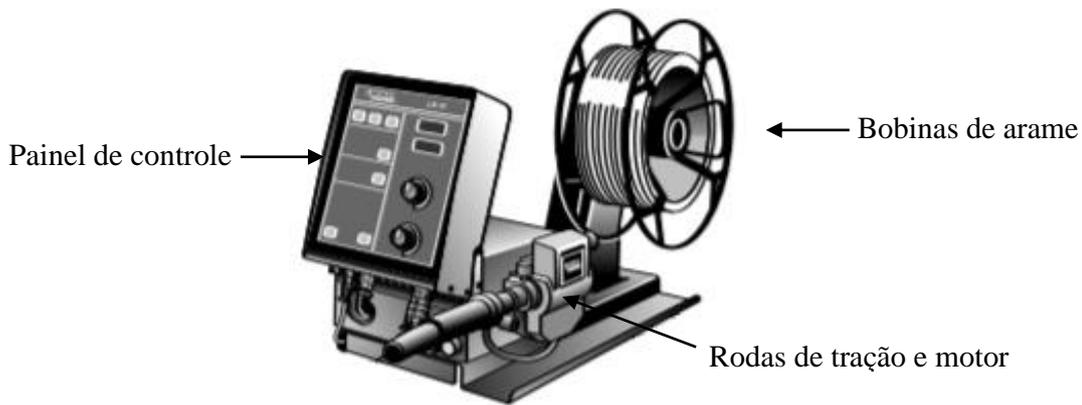


Figura 2.5: Mecanismo do Alimentador de arame (modificado Nadzam, 2011).

2.2.2.3. Tocha de Soldagem

A tocha para soldagem GMAW dispõe de um contato elétrico deslizante (bico de contato) para transmitir a corrente ao eletrodo, canais para a passagem de gás de proteção e bocal para dirigir o fluxo de gás à região do arco e da poça de fusão (vide Figura 2.6). Para a soldagem semiautomática, a tocha de soldagem porta um interruptor para o acionamento da corrente de soldagem, da alimentação de arame e do fluxo de gás de proteção (Tasalloti, 2013).

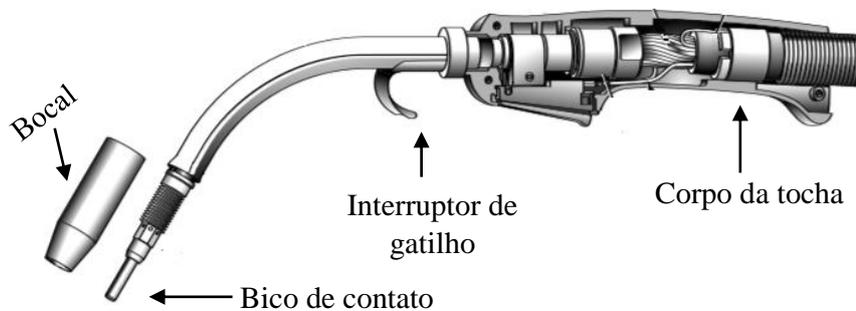


Figura 2.6: Tocha típica para soldagem GMAW (modificado Nadzam, 2011).

As tochas têm evoluído devido aos diferentes inconvenientes e às necessidades demandadas na soldagem, solucionando problemas como a contorção ao tentar alimentar de longas distâncias ou o desgaste do arame causado por grandes atritos, mediante a inclusão de novos mecanismos ou configurações no fornecimento do eletrodo. As tochas modernas, como a do tipo tração, possuem motor que puxa o arame, enquanto a unidade de alimentação empurra-o (vide Figura 2.7). Esta é uma configuração *push pull* e permite que a solda seja feita a uma distância de 16 metros do alimentador de arame.



Figura 2.7: Tocha de soldagem GMAW com configuração *push pull* (Nadzam, 2011).

As tochas para soldar utilizadas em GMAW automática com frequência têm um corpo reto sem cabo, permitindo que sejam firmemente unidas a um carro, a um robô ou a outro mecanismo para a soldagem, além de serem quase sempre refrigeradas por água. O arame do eletrodo e o gás de proteção alimentam-se através do corpo da pistola à zona do arco da mesma maneira que as demais tochas.

2.2.2.4. Dispositivos para a Blindagem com Gás

O desenvolvimento de gases de proteção para aplicações GMAW tem sido de crescente interesse e importância por três razões principais: melhorar a produtividade do processo, aumentar a integridade e a qualidade da solda e reduzir os problemas de segurança e saúde devido às emissões de fumaça e partículas.

O fluxo de gás de proteção na soldagem GMAW é geralmente definido de acordo com as exigências do projeto. Para medir a taxa de fluxo de gás, é requerido um regulador. O regulador oferece a leitura da pressão interna do cilindro além da medida da taxa de fluxo de gás. No processo GMAW, o fluxo geralmente permanece inalterado durante todo o processo de soldagem e é definido nos valores máximos dos parâmetros de soldagem de modo que haja uma cobertura de gás suficiente (Mvola, 2016).



Figura 2.8: Dispositivo de blindagem com gás.

2.2.3. Parâmetros Operacionais do Processo GMAW.

Compreender e modelar a complexa relação entre os parâmetros do processo, a geometria e a qualidade do cordão de solda no GMAW tem sido uma tarefa difícil desde meados do século XX (Karadeniz *et al.*, 2007). A complexidade dessa tarefa deve-se ao fato de que, no GMAW, fenômenos físicos, químicos e mecânicos ocorrem ao mesmo tempo, enquanto todos os estados da matéria interagem em uma área muito pequena sob altas temperaturas. Em geral, o processo GMAW é controlado por um conjunto de parâmetros de soldagem que podem ser ajustados. Devido a esse fato, torna-se necessário conhecer o efeito de cada variável sobre as propriedades do processo. Tais variáveis são caracterizadas por não serem completamente independentes, ou seja, a mudança no valor de alguma delas tem impacto na mudança de uma ou várias outras, influenciando fortemente na qualidade global e na geometria da solda.

Segundo Modenesi (2005), é possível dividir as variáveis de soldagem do processo GMAW em três grupos básicos, a saber:

- Variáveis pré-determinadas;
- Parâmetros ajustáveis primários;
- Parâmetros ajustáveis secundários.

As variáveis pré-determinadas são consideradas como fatores que só podem ser mudados em intervalos grandes de tempo e são desfavoráveis para o controle. Algumas destas variáveis são: o diâmetro do arame, o tipo de arame, o tipo de gás, a taxa de fluxo do gás de proteção, a polaridade da soldagem, a composição do material de base e a espessura do

material de base. Por outro lado, os parâmetros denominados primários são os que controlam o processo depois que as variáveis pré-selecionadas foram eleitas, podendo ser alterados durante o processo GMAW. Estes controlam a estabilidade do arco, a geometria do cordão de solda, a velocidade de deposição, a solidez e a qualidade da solda. Estas variáveis são a tensão do arco, a corrente e a velocidade de soldagem.

Por último, as variáveis secundárias, como o *stick-out* e a inclinação da tocha de soldagem, podem ser modificadas de maneira contínua, mas são comumente difíceis de medir com precisão, especialmente em soldagem automática. Estas não afetam diretamente a geometria do cordão. Em seu lugar, esses parâmetros geralmente causam uma mudança nos parâmetros primários, e estes por sua vez influem no cordão de solda. As variáveis apresentadas a seguir são algumas das existentes no processo GMAW.

2.2.3.1. Tensão de Soldagem

A tensão de soldagem tem influência no tipo do eletrodo, no acabamento da peça soldada. Como o processo é manual e dependendo do soldador, ele irá afastar ou aproximar a ponta do eletrodo da peça. Essa variável do processo terá uma oscilação em todo o percurso de soldagem. A tensão na soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido é dependente do comprimento do arco. Arcos longos produzem altas tensões, e arcos pequenos produzem baixa tensão. Como uma regra geral, o comprimento do arco não deveria exceder o diâmetro da alma do eletrodo, embora seja usado o comprimento menor que este valor para eletrodo com revestimentos espessos. Uma mão fixa do soldador é importante para prevenir flutuações da força elétrica que podem ser prejudiciais à soldagem (Bohorquez,1989).

2.2.3.2. Corrente de Soldagem

A corrente de soldagem é considerada como um dos parâmetros mais importantes para a soldagem, pois representa o fluxo de corrente que vai fornecer a energia de soldagem necessária para a formação da poça de fusão e todo o aporte térmico necessário para a uniformidade do processo.

A corrente de soldagem controla de maneira hegemônica certas características operatórias do processo, o aspecto do cordão e a qualidade da solda. Além disso, a corrente controla de modo direto a magnitude e a distribuição espacial da energia térmica disponível no arco

elétrico e também a maior parte dos fenômenos que ali ocorrem. A intensidade de corrente é o mais importante efeito no controle da geometria do cordão de solda (penetração, largura e reforço), além da diluição (Guedes, 2009).

2.2.3.3. Velocidade de Soldagem

A velocidade de soldagem é a velocidade de deslocamento do arco elétrico ao longo do comprimento da junta. A penetração da solda é maior para velocidades menores de avanço da tocha e diminui com o aumento da velocidade, assim como a largura do cordão e a altura do reforço. A redução das características de largura e penetração do cordão a partir da velocidade de soldagem estão associadas à redução da quantidade de energia provida por unidade de comprimento da junta. A ingerência no reforço do cordão está associada à diminuição da quantidade de material de adição proporcionado à solda, com o incremento da velocidade de soldagem. Além disso, uma velocidade de soldagem demasiadamente alta pode provocar descontinuidade no cordão pela ausência de fusão do material (Modenesi, 2005).

2.2.3.4. Diâmetro do Arame

Um diâmetro de arame adequado é essencial para segurar a correta passagem da corrente do bico de contato até o eletrodo (arame). O uso de um arame inadequado produz a formação do arco entre o arame e o diâmetro interno do bico, originando corrosão no material, gerando eventualmente o fundição do arame no bico. Além disso, usar um arame de dimensões desproporcionadas provoca força de alimentação excessiva, bloqueio do bico, escorregamento do fio e tempo de inatividade para correção do problema.

2.2.3.5. *Stick-out* ou Extensão Livre do Eletrodo

O *Stick-out* é determinado como a distância presente entre o fim do bico de contato e o final do arame (Vide Figura 2.9). A distância existente entre o início do arame e a peça de trabalho é conhecida como o comprimento do arco. O *stick-out* está vinculado à velocidade de fusão do arame; se o *stick-out* for incrementado, o calor é aumentado por efeito Joule, logrando que se torna maior a velocidade de fusão do arame. No caso em que o *stick-out* seja demasiado baixo, o calor produzido não terá energia suficiente para fundir o arame adequadamente; pelo contrário, se for muito elevado, o arco terá um comportamento

instável, o gás de proteção deixará de existir, tendo como consequência a aparição de imperfeições no cordão de solda. É preciso, portanto, controlar de forma estrita o *stick-out*.

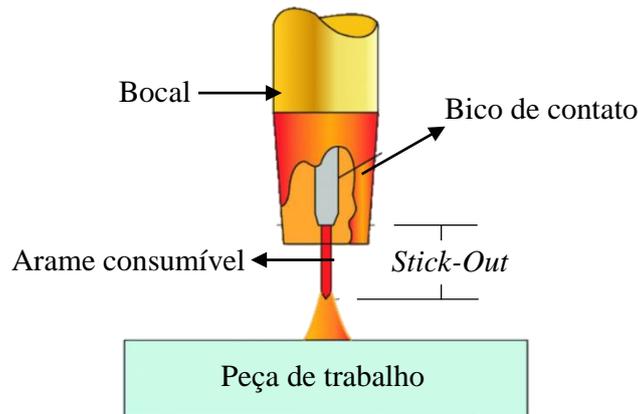


Figura 2.9: *Stick-out* ou extensão livre do eletrodo (modificado Silva, 2014).

2.2.3.6. Ângulo de Inclinação da Tocha de Soldagem

A posição da tocha em relação à direção e ao sentido da soldagem pode afetar consideravelmente a geometria do cordão. Nos processos automatizados, o posicionamento da tocha é realizado de forma perpendicular à peça de trabalho. No caso dos processos semiautomáticos, a tocha pode ser posicionada de diversas formas para soldar (para frente ou para trás). Isso contribui ao soldador para visualizar o trabalho e permite que ele realize as manobras necessárias.

A posição da tocha para frente gera certas características em um cordão de solda, como a pouca penetração e um cordão bastante espesso. A posição da tocha para trás produz um cordão caracterizado por ser bastante estreito e com boa penetração. Tanto a penetração quanto o tamanho do cordão são características que podem ser manipuladas a partir da mudança da posição da tocha para frente para a posição da tocha para trás. Esse não é considerado, no entanto, como um método ótimo de controle da geometria do cordão como é o método baseado na alteração da corrente de soldagem ou na tensão do arco (Felizardo e Bracarense, 2013).

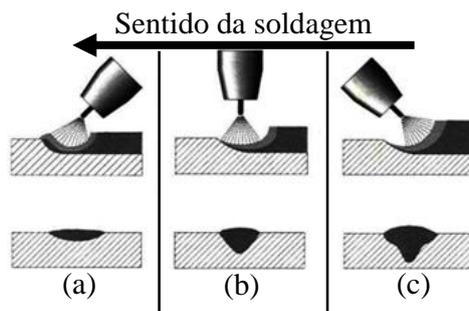


Figura 2.10: Inclinação da tocha de soldagem, (a) ângulo de empurre; (b) ângulo perpendicular; (c) ângulo de arraste.

2.2.3.7. Polaridade de Soldagem

A direção do fluxo de corrente influi na eficiência de fusão da solda por arco. No processo de soldagem GMAW, existem dois tipos de polaridade empregadas: polaridade direta e polaridade inversa. Quando se utiliza a corrente direta (DC) ou a conexão de corrente contínua ao eletrodo negativo (DCEN), o eletrodo é o polo negativo e a peça de trabalho é o polo positivo do arco de solda; os elétrons deslocam-se do eletrodo para a peça.

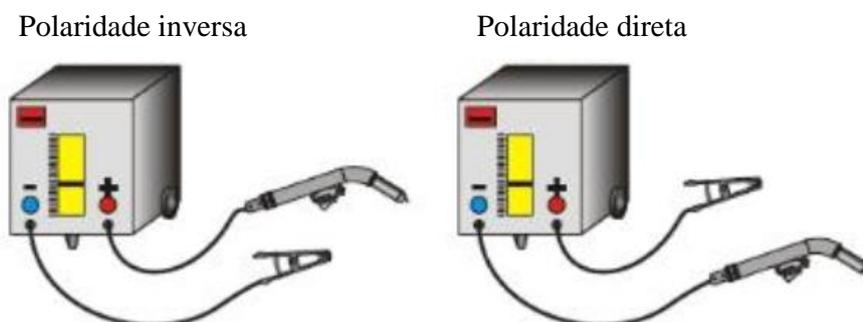


Figura 2.11: Tipo de polaridade utilizada na soldagem GMAW.

Quando se trabalha com a polaridade inversa DC, ou seja, quando é realizada a conexão da corrente contínua ao arame positivo (DCEP), o arame é fixado como o polo positivo e a peça de trabalho é estabelecida como o polo negativo; os elétrons deslocam-se da peça para o eletrodo.

2.2.3.8. Tipo de Gás de Proteção

O uso correto do gás de proteção (adequado ao tipo de aplicação) ou de uma mistura de gases é outro fator determinante em soldagem, pois sua função principal é proteger e resguardar o metal de solda fundido da contaminação atmosférica e das imperfeições

resultantes. Os gases de proteção utilizados com a soldagem por arco metálico com gás (GMAW) podem ser inertes, reativos ou a mistura de ambos. Entre os gases inertes, encontra-se o Argônio (Ar), um gás que se caracteriza por ter uma baixa capacidade de ionização, baixa capacidade de oxidação e uma condutividade térmica relativamente baixa. Por outra parte, os altos níveis de densidade que apresenta o argônio em comparação com os outros gases (1,38 em relação ao ar) produz uma maior eficiência em termos de proteção, posto que o argônio pode facilmente substituir o ar em torno da solda (Ferreira *et al.*, 2013). A proteção com argônio, por se basear em um gás inerte, propicia a concentração de elementos de liga no cordão de solda, concedendo um cordão de solda livre de inclusões e melhorando suas propriedades mecânicas. Além disso, essa proteção gasosa favorece à abertura do arco elétrico, contribui no aumento na estabilidade do processo em baixas correntes e permite a transferência "spray".

Outro gás inerte é o Hélio (He), utilizado nas aplicações de soldagem onde é necessário obter um maior aporte térmico para contribuir no melhoramento da maleabilidade do cordão de solda, ter aumento na penetração e na velocidade de soldagem. Na soldagem MIG, o Hélio não produz um arco tão estável quanto o Argônio, além de ter um custo mais elevado. Segundo a literatura, ao fazer uma comparação entre o Argônio e o Hélio, o Hélio oferece maior condutividade térmica, maior variação de tensão e conduz a um perfil de penetração mais largo e mais raso (ESAB, 2005).

Por sua parte, os gases reativos não são práticos para usar sozinhos como gases de proteção. Neste grupo, encontra-se o oxigênio (O₂), o qual é conhecido como um oxidante que, na mistura com argônio, produz certos benefícios como suavização dos perfis dos cordões de solda, melhoramento na qualidade dos cordões, principalmente na maleabilidade da poça de fusão. Esta é produto da redução da tensão superficial no contato poça de fusão/metal de base e da estabilização da posição da raiz do arco (Ferreira *et al.*, 2013). A adição de pequenas porcentagens de oxigênio ao argônio (até 5% de oxigênio) gera uma ingerência sobre a coluna do arco, diminuindo a corrente de transição globular/spray. No caso em que os níveis de oxigênio foram aumentando na mistura, as perdas de elementos de liga aumentaram também, podendo ocasionar uma deterioração nas propriedades mecânicas.

O dióxido de carbono (CO₂) é um dos gases de proteção mais baratos e mais utilizados na soldagem GMAW em aço no modo de transferência por curto-circuito. O CO₂ se separa no arco para produzir CO e O, tendo assim um efeito global que é gerar uma proteção

oxidante. O CO₂ apresenta características de gás inerte em temperatura ambiente, ou seja, não reagindo com outros elementos, mas seu comportamento é de gás ativo nas temperaturas de soldagem (Ferreira *et al.*, 2013). Sua característica de alta condutividade térmica é devida à alta transferência de calor para o metal de base. Obtém-se um padrão de penetração mais largo e arredondado que o obtido com o argônio.

Para cotejar o efeito do gás de proteção na qualidade do cordão de solda (tanto em termo de aspecto, metalurgia e resistência mecânica), é essencial encontrar a condição de soldagem que se adapte melhor para cada um dos tipos de gás de proteção. A busca desta condição pode-se converter em um processo um pouco complexo, isto em função da quantidade de variáveis envolvidas no processo de soldagem, sendo assim fundamental contar com algumas considerações. “É importante ter sempre a mesma corrente de soldagem, mesma taxa de deposição (ter um valor constante entre a velocidade de alimentação do arame eletrodo e a velocidade de soldagem) e se possível ter sempre a mesma energia depositada no cordão de solda para todos os gases de proteção utilizada. É importante também obter sempre uma transferência metálica estável para a condição encontrada. Misturas de Ar+CO₂ têm sido utilizadas para muitas aplicações de soldagem em aços carbono, pois permitem uma grande estabilidade do arco elétrico, reduzindo assim a quantidade de respingos, melhorando a qualidade das soldas quando comparadas com as executadas com CO₂ puro” (Lyttle e Stapon, 1990).

2.2.4. Modo de Transferência de Metal

A transferência de metal é o processo do movimento do metal fundido da ponta do eletrodo até a peça de trabalho, o que inclui a formação de gotas, o descolamento e a transferência na abertura do arco (Węglowski *et al.*, 2008). A formação das gotas de metal é governada por vários fatores como: o equilíbrio de forças que atuam sobre a gota, fenômenos térmicos no arame, calor transferido da coluna de plasma e distribuição da densidade de corrente na gota de metal. O balanço entre os fatores estabelecem certas características, como a forma, o volume e a frequência de destacamento das gotas que são concebidas na ponta do arame, constituindo assim as características próprias de cada modo de transferência no processo de soldagem (Lopera, 2010).

Segundo Ponomarev *et al.* (2009), a forma como é transferido o metal fundido arranja-se em duas classes. A primeira é denominada transferência por curto-circuito, na qual há

contato da gota com a poça antes do destacamento. A segunda é conhecida como transferência por voo livre, na qual se encontram a transferência globular e a spray. Nestes modos, a gota destaca-se antes do contato com a poça.

Cada um desses modos tem um comprimento de arco característico, penetração e forma da poça de solda. Estas características afetam aspectos do processo de soldagem, como taxa de fumaça, estabilidade do arco, forma do cordão, ângulo de molhamento e respingos (Liu *et al.*, 1989). A Figura 2.12 mostra esquematicamente os campos operacionais das formas principais de transferência metálica na soldagem GMAW em função da corrente e da tensão. Já a Tabela 2.1 apresenta as duas classes e os principais modos naturais de transferência no processo GMAW.

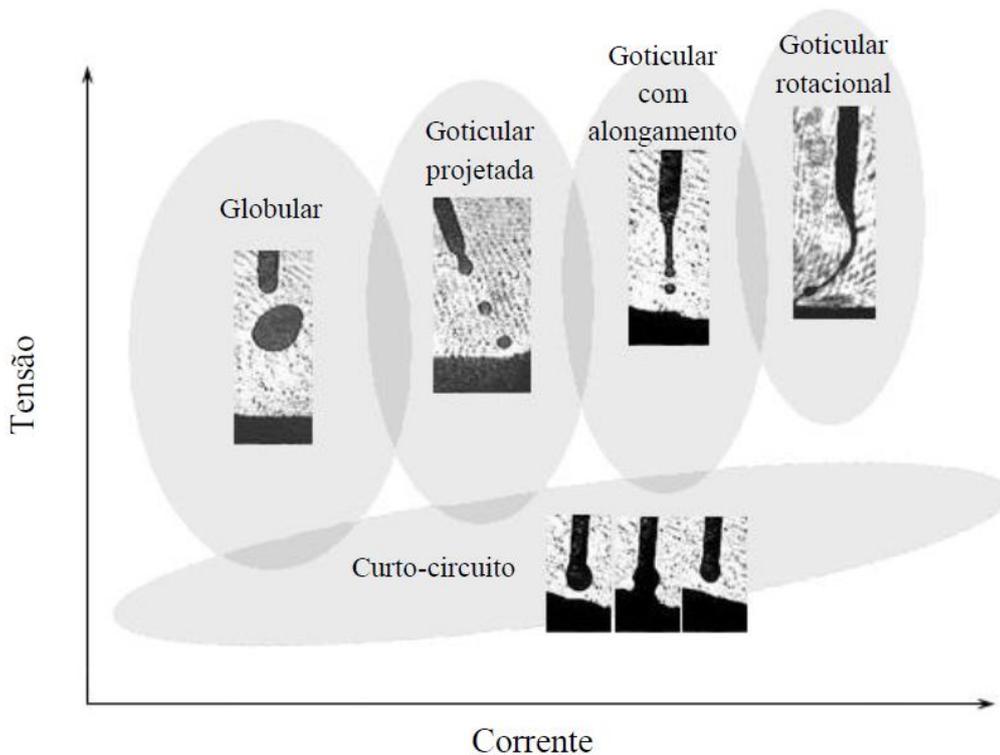
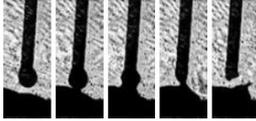
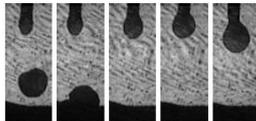
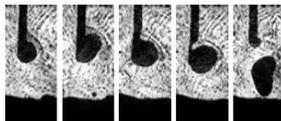
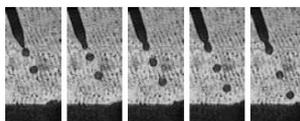
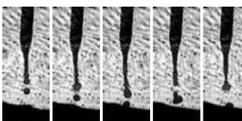
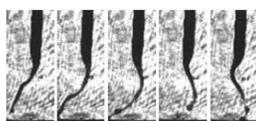
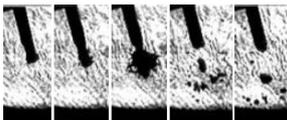


Figura 2.12: Mapas esquemáticos dos modos principais de transferência metálica da corrente e da tensão (Ponomarev *et al.*, 2009).

Tabela 2.1: Classes e respectivos modos naturais de transferência metálica no processo GMAW (Ponomarev *et al.*, 2009)

Classe de transferência	Modo de transferência	Imagem	Força governante principal
Por curto-circuito	Curto-Circuito		Tensão superficial e eletromagnética
Por voo livre	Globular		Eletromagnética
	Globular repulsiva		
	Spray Projetada		
	Spray com Alongamento		
	Spray Rotacional		
	Explosiva		

Em geral, pode-se considerar que existem três formas principais de transferência do metal de adição do eletrodo para a peça, a saber: transferência por curto-circuito, transferência globular e transferência spray. O modo de transferência metálica muda conforme a variação dos parâmetros de soldagem utilizados (Modenesi, 2001).

2.2.4.1. Modo de Transferência por Curto-circuito

Attingir o modo de transferência por curto-circuito vem ajuntado à redução da corrente, que, por sua vez, faz a velocidade de alimentação do arame exceder a velocidade de fusão do eletrodo, de modo que o comprimento de arco não pode ser mantido constantemente. Isso faz que a abertura do arco seja fechada e o extremo do eletrodo entre em contato com a poça de fusão. Ao realizar-se o contato, a corrente começa a incrementar-se e, ao alcançar um valor alto, o metal é transferido à poça de fusão e o arco é reaberto novamente. Dado que o arame é alimentado mais rapidamente do que o arco consegue fundi-lo, o arco elétrico será extinto eventualmente por outro curto-circuito momentâneo. A transferência por curto-circuito caracteriza-se por produzir uma pequena poça de soldagem de esfriamento rápido, por ser adequado para unir seções finas em todas as posições de soldagem e apresentar grande instabilidade do arco, podendo proporcionar intensas formações de respingos (Cuiuri, 2000). A Figura 2.13, a seguir, ilustra um ciclo completo de um curto-circuito.

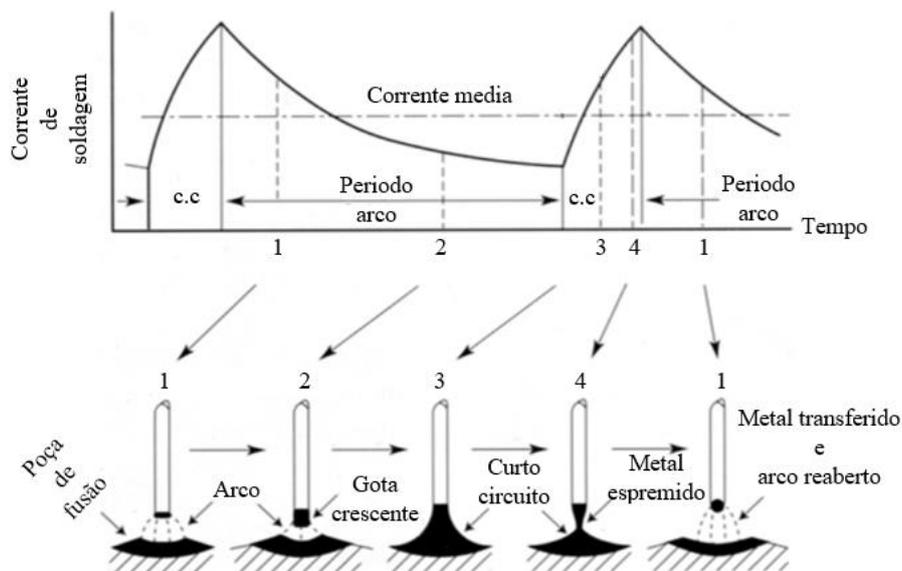


Figura 2.13: Mecanismo típico de transferência por curto-circuito associado à corrente de soldagem.

2.2.4.2. Modo de Transferência Globular

O modo de transferência globular encontra-se situado entre a transferência por curto-circuito e a transferência spray, ocorrendo tipicamente em correntes baixas e moderadas, mas com faixa de tensão relativamente alta. Este modo de transferência é caracterizado, porém, por ser o mais caótico e imprevisível por causa da passagem das gotas através da coluna do arco elétrico, o qual pode originar a presença de eventuais curtos-circuitos e altos níveis de respingos (ESAB, 2004). Segundo a literatura, o diâmetro médio das gotas transferidas nos modos de transferência por voo livre varia com a corrente, tendendo a diminuir com o aumento desta. Em geral, as gotas de metal fundido terminam sendo maiores que o diâmetro do eletrodo.

Segundo Modenesi (2009), o comportamento da transferência globular típica é semelhante ao gotejamento de uma torneira de água relativamente aberta. O metal fundido forma-se na ponta do eletrodo, produto da fusão deste, sustentando-se preso pela ação da tensão superficial. Devido ao aumento no tamanho da gota, tem-se um aumento em seu peso, originando a separação da ponta do arame. O metal fundido é transferido para a poça de fusão pela ação da gravidade. A Figura 2.14 representa a transferência globular no processo GMAW.

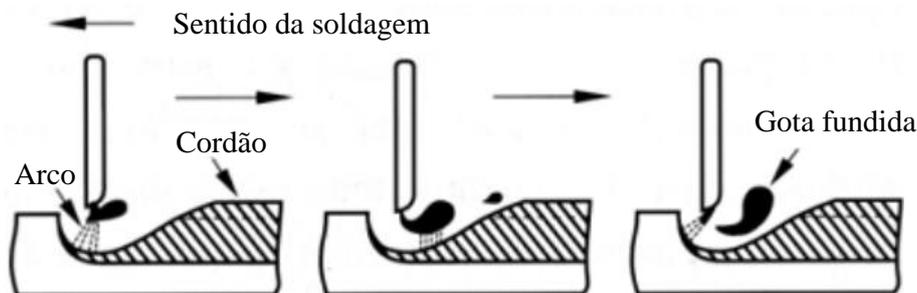


Figura 2.14: Modo de transferência Globular.

2.2.4.3. Modo de transferência por Spray

A transferência por spray é assim chamada pela pulverização de pequenas gotas fundidas no arco, semelhante à pulverização que sai de uma mangueira de jardim quando a abertura é restrita (Campos, 2005). No modo de transferência por spray, as gotas de metal fundido são geralmente caracterizadas por apresentar um menor diâmetro que o diâmetro do eletrodo e usar tensões e correntes (velocidade de alimentação de arame) relativamente altas (Vide

Figura 2.15). Ao contrário da transferência por curto-circuito, na transferência por spray, uma vez que o arco é estabelecido, ele é ativado todo o tempo.

Este modo é muito usado principalmente nas posições plana e horizontal, porque produz uma grande poça de solda devido às altas taxas de deposição que pode alcançar (PONOMAREV *et al.*, 2009). Este tipo de transferência, porém, é facilmente influenciado por campos magnéticos por causa das características do comprimento do arco. Se isso não for controlado, o perfil de penetração, a aparência do cabo e os níveis de respingo podem ser afetados negativamente.

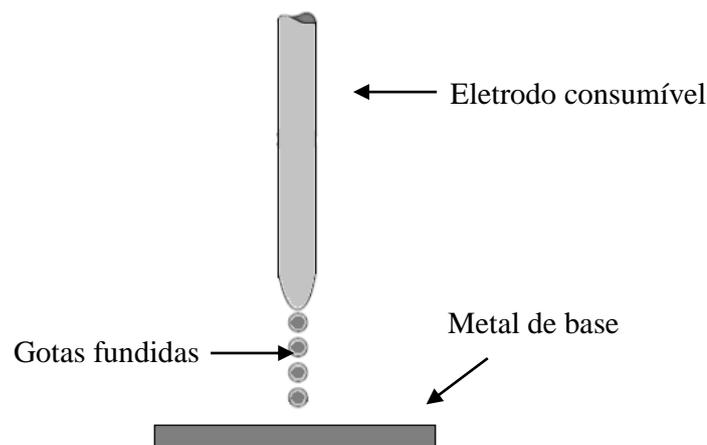


Figura 2.15: Modo de transferência por spray.

2.2.5. Fatores que Afetam os Modos de Transferência de Metal

Os modos de transferência de metal são afetados por vários fatores operacionais, como corrente de soldagem, composição do gás de proteção, extensão do eletrodo, pressão ambiente, elementos ativos no eletrodo, polaridade e material de soldagem (O'Brien, 1991). Desses fatores, a corrente de soldagem é o fator mais importante para determinar o modo de transferência de metal.

Diferentes gases de proteção podem gerar tipos de transferência de metal totalmente diferentes. O argônio e o hélio são os dois gases de proteção inertes geralmente usados para proteger a poça de solda fundida no GMAW, porque não reagem com o metal fundido, de tal forma que não afetam os componentes das soldas. No processo GMAW, a proteção gasosa será ionizada para tornar-se um gás condutor. A condutividade térmica é a mais importante consideração para selecionar um gás de proteção. Altos níveis de condutividade

térmica resultam em mais condução da energia térmica para a peça de trabalho. A condutividade térmica também afeta de certa maneira a forma do arco e a distribuição da temperatura dentro da região. Como o argônio tem uma taxa de condutividade térmica mais baixa, que é cerca de 10% do nível do hélio, é adequado para pesquisas relacionadas com a penetração. O CO₂ é um gás de proteção reativo usado no GMAW. Quando o CO₂ é adotado, é muito difícil obter a transferência de metal por voo livre, pois a força eletromagnética se tornará força de retenção.

2.3. ASPECTOS ESPECIAIS EM PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

2.3.1. Processamento Digital de Imagens

Na atualidade, as técnicas empregadas no processamento de imagens digitais podem ser encontradas em diferentes campos da vida cotidiana, desde propósitos simples em entretenimento até as mais elaboradas aplicações nos âmbitos industriais e militares. Estas técnicas incluem princípios básicos, mas crescem constantemente por causa dos avanços contínuos nas tecnologias de hardware e software, o que permite um aumento na eficiência dos algoritmos empregados. Na área da soldagem, existem diversas aplicações e abundantes trabalhos desenvolvidos que expõem como base o processamento de imagens digitais em áreas como transferência metálica, medições geométricas de peças, estudos da poça de fusão, otimização de parâmetros, entre outras, o que contribui para o aperfeiçoamento dos processos de soldagem em geral (Lopera, 2016).

A ideia principal do processamento de uma imagem vem alusiva à transformação da forma original da imagem para outra na qual as características desejadas estejam melhor evidenciadas e permitam uma melhor análise. Na Figura 2.16, são expostos de forma geral as fases fundamentais e o objetivo global no processamento de imagens digitais.

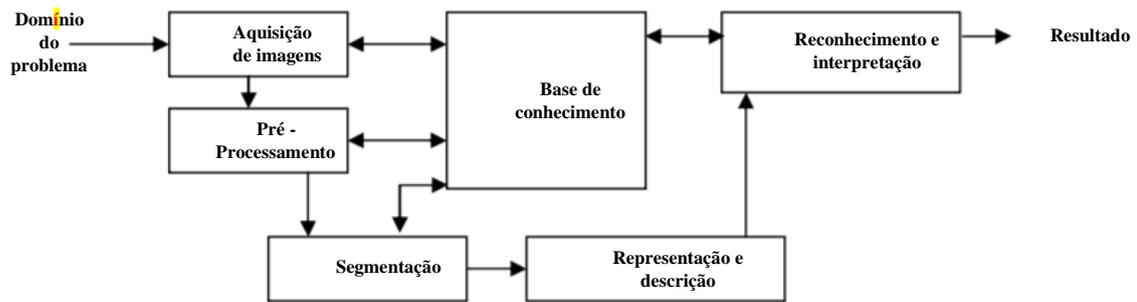


Figura 2.16: Passos fundamentais em processamento de imagens digitais
(modificado Lopera, 2016).

A base do conhecimento depende do problema a ser investigado, desde identificar regiões na imagem que contêm informações importantes, até enumerar características próprias exigidas na imagem. A etapa de aquisição da imagem digital é particularizada pelo emprego de sensores sensíveis a determinados espectros de energia eletromagnética para, seguidamente, digitalizar o sinal elétrico adquirido. O Pré-processamento é a parte na qual são feitas as transformações sobre a imagem aspirando obter melhores benefícios na imagem para o êxito das fases seguintes. Tais benefícios podem ser alcançados, por exemplo, avivando contrastes ou reduzindo ruídos. A segmentação é a etapa encarregada de dividir a imagem em áreas independentes com algum significado para a aplicação. Esta fase é caracterizada por ser totalmente dependente do domínio do problema. No passo de representação e descrição, busca-se extrair características das áreas segmentadas que apresentem maior relevância para o processo. Finalmente, a classificação é a fase encarregada de identificar a imagem (Cruz, 2018). A seguir, alguns conceitos de interesse referentes ao processamento digital de imagens são apresentados.

2.3.2. Imagem Digital

A representação visual de um objeto é conhecida como imagem. Essa representação pode ser feita através de vários procedimentos ou técnicas, como fotografia, pintura ou vídeo. O conceito de Digital, por sua vez, é atualmente utilizado no campo da tecnologia em referência à representação de informações em modo binário (em dois estados). Essas definições nos permitem indicar que uma imagem digital é aquela representação bidimensional usando números binários.

Uma imagem digital é exibida por $f(x,y)$, em que a amplitude de f nas coordenadas espaciais (x,y) oferece o brilho da imagem no ponto específico. Para que a imagem seja

propícia para um processamento computacional, a função $f(x,y)$ necessita ser digitalizada em termos de intensidade e de espaço. A digitalização destas coordenadas é conhecida como a amostragem da imagem, e a digitalização da intensidade é denominada como quantização em níveis de cinza. A imagem contínua $f(x,y)$ é formada por amostras espaçadas, organizadas em forma de uma matriz (Lopera, 2016). Os fatores que compõem a matriz são definidos como elementos da imagem ou pixel. Esses elementos simbolizam a menor das unidades que formam uma imagem digital (Ribeiro, 2007).

O nível de detalhe de uma imagem vem dado pela resolução espacial e pelo número de níveis de cinza que a compõem. Quanto maiores esses parâmetros, melhor será a aproximação da matriz digitalizada com a imagem original, além de melhorar o espaço de armazenamento e o tempo de processamento demandado. Um aspecto importante a ter em consideração é que o conceito de qualidade da imagem depende do detalhe da mesma. A Figura 2.17 exposta a seguir representa a digitalização de uma imagem, neste caso com uma baixa resolução espacial.

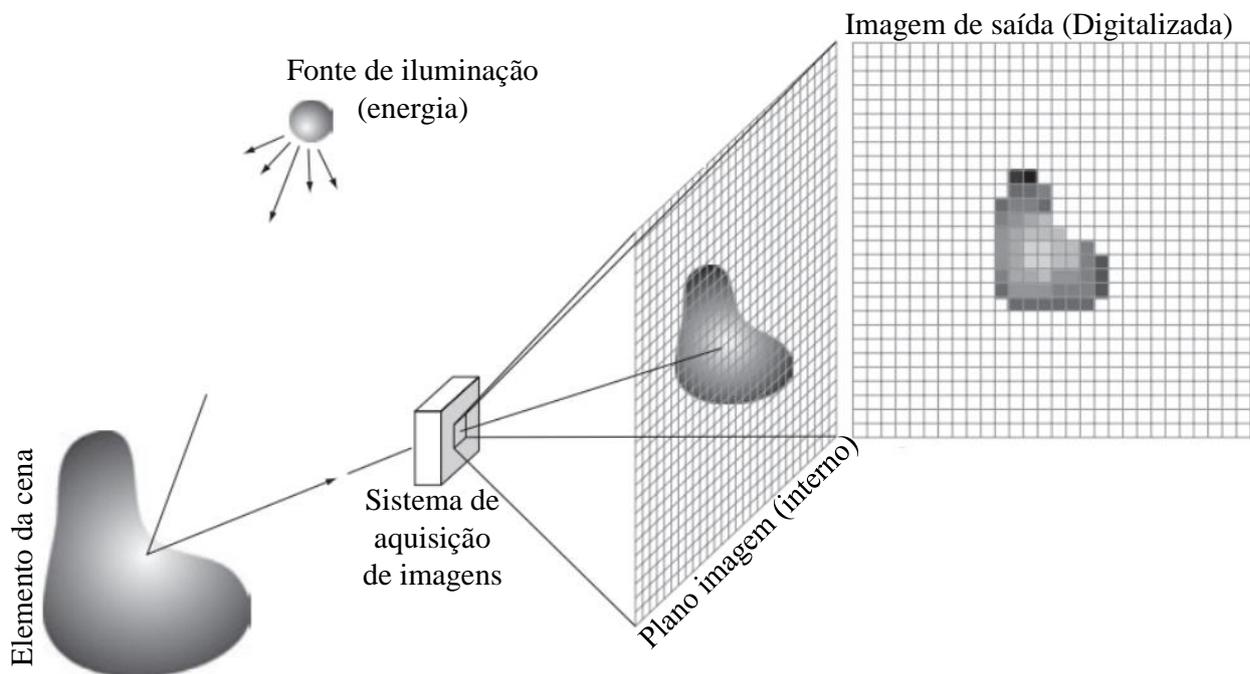


Figura 2.17: Representação de uma imagem digitalizada com baixa resolução espacial (modificada Gonzales, 2010).

2.3.2.1. Área de interesse

Segundo Albuquerque (2001), a área de interesse é um dos conceitos mais importantes no processamento de imagens. Tal região é definida pelo operador e é o lugar onde o processamento estará totalmente reunido. Pode-se, por exemplo, definir uma área de interesse onde por anterioridade sabe-se que a iluminação de fundo é constante ou foi corrigida para ter esta característica. Comumente, em processamento de imagens, sempre podem-se encontrar problemas nas bordas da imagem. A criação de regiões de interesse faz que apareçam também problemas nas bordas das regiões de interesse. A solução deste problema é completamente dependente da situação à qual o processamento de imagens está associado.

2.3.2.2. Distância

Geralmente, no momento de trabalhar com imagens, é comum a reiterada medição de distâncias. Na maioria dos casos, se utiliza a definição de distância euclidiana entre dois pontos. A razão dos problemas apresentados nas bordas da imagem esclarecem que a simetria quadrada tem influência direta no desempenho de certos algoritmos. Atualmente, existem diferentes medidas de distância em função da conectividade utilizada (Albuquerque, 2001). A figura 2.18 representa o anteriormente exposto.

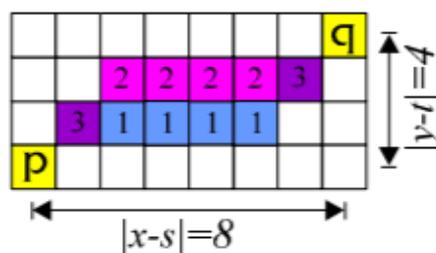


Figura 2.18: Conectividade entre dois pontos $p(x,y)$ e $q(s,t)$ (Albuquerque, 2001).

Em uma imagem, o perímetro de um determinado elemento obedece à contagem dos pixels concernentes à borda do elemento. Em certos momentos, antes de concretizar a medida de distâncias, é necessário isolar a forma do elemento do resto da imagem. Devem-se conectar todos os pixels que pertençam ao seu contorno para, em seguida, poder medir o seu perímetro (vide figura 2.19) (Albuquerque, 2001).

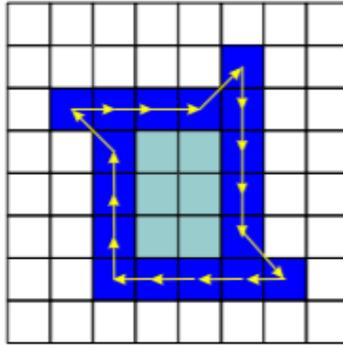


Figura 2.19: Perímetro de uma forma usando conectividade D8 (Albuquerque, 2001).

2.3.2.3. Filtros Espaciais

Os filtros espaciais são considerados o pré-processamento realizado nas imagens para melhorá-las de forma a aumentar as chances para o sucesso dos processos seguintes. Esses filtros operam diretamente nos pixels. São utilizadas máscaras espaciais que alteram o nível de brilho de cada pixel e podem exercer função de filtro passa-baixa (filtrando as altas frequências), passa-alta (filtrando as baixas frequências) ou passa-banda (filtrando uma região específica de frequências espaciais).

Os filtros passa-baixa diminuem ou eliminam os elementos de alta frequência, mas deixam as frequências baixas puras. Os elementos de alta frequência são os encarregados de caracterizar as bordas e outros detalhes finos de uma imagem, de tal maneira que a consequência resultante seja uma imagem mais borrada. Os filtros passa-alta diminuem ou eliminam elementos de baixa frequência. A influência que apresentam esse filtros é uma visível agudização das bordas e outros detalhes finos. Outra filtragem denominada passa-banda remove regiões selecionadas de frequências, e esses filtros são usados para restauração de imagens (Ramos, 2011).

Um filtro bastante usado para redução de ruídos presentes na imagem é o filtro por mediana. Esse filtro é uma espécie de filtro passa-baixa, só que preserva sem borrar as bordas e outros detalhes da imagem. Para calcular a filtragem por mediana em uma vizinhança de um pixel, primeiramente selecionam-se os valores do pixel e de seus vizinhos, determina-se a mediana, e se estabelece um valor ao pixel. Por exemplo, em uma vizinhança 3x3, a mediana é o quinto maior valor.

Na Figura 2.20, são expostos três filtros e seus respectivos resultados sobre a imagem original.

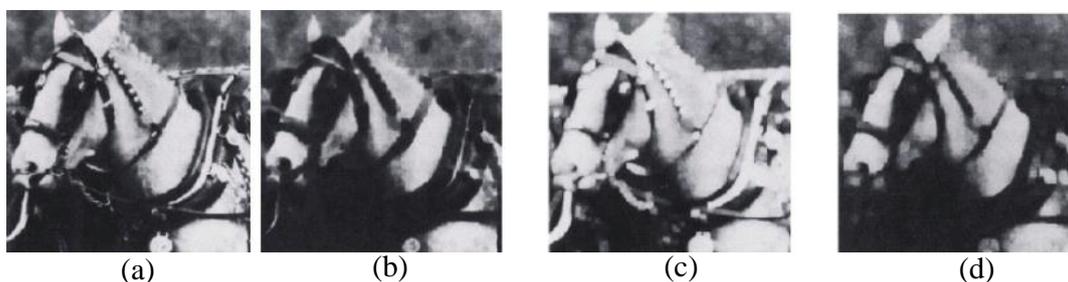


Figura 2.20: Filtragem no domínio espacial, (a) imagem original; (b) imagem com um filtro de mediana (passa-baixa); (c) filtro de detecção de variações bruscas no sentido horizontal (Passa-Alta); (d) filtro Passa-Alta (Albuquerque, 2001).

2.3.2.4. Segmentação

Outra etapa no processamento das imagens vem relacionada com a segmentação. Esta área representa até hoje uma linha de pesquisa importante do processamento de imagens, principalmente por ela estar na base de todo o processamento da informação em uma imagem. Em termos gerais, a segmentação divide uma imagem de entrada em partes ou objetos constituintes e permite diferenciar estes objetos do fundo da imagem e entre eles. Segundo Escalera (2001), a segmentação se caracteriza por similaridade (cada um dos pixels tem valores parecidos para alguma propriedade), descontinuidade (os objetos destacam-se do entorno, apresentando mudanças bruscas nos níveis de cinza) e conectividade (os pixels que pertencem a um objeto têm que estar contíguos, ou seja, agrupados).

2.3.2.5. Binarização

No campo do processamento de imagens, a binarização é estabelecida como um método de segmentação de áreas semelhantes em tons de cinza, fundamentada em características de semelhança (Lopera, 2016). A segmentação por binarização tem como finalidade dividir os elementos de interesse do fundo. Baseia-se na aplicação de um limite de tom de cinza (T) à imagem, tornando-lhe uma imagem binária, aplicando (Vide Eq. 2.1), estabelecendo “0” para os pixels proporcionais ao objeto e “1” para aqueles do fundo ou vice-versa.

$$g(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{se } f(x, y) < T \\ 1 & \text{se } f(x, y) \geq T \end{cases} \quad (2.1)$$

Segundo Weska em 1978 e Sahoo *et al.* em 1988, os métodos de binarização se classificam em três categorias: dinâmico, local e global. A norma usada neste conceito é a vinculação do operador limitante. Se for estabelecido usando somente as intensidades, é considerado como global. Se são empregadas as intensidades e as informações espaciais da imagem, é considerado como local; e, se são usadas as duas informações além das coordenadas espaciais, é rotulado como dinâmico.

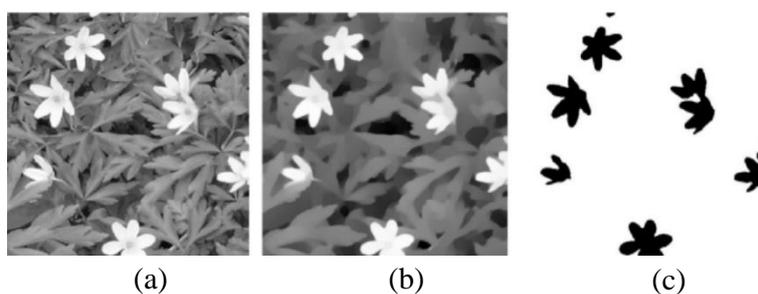


Figura 2.21: Exemplo de um processo de binarização, (a) uma imagem original; (b) imagem com aplicação de filtro; (c) imagem binarizada.

2.4. ILUMINAÇÃO POR PERFILOGRAFIA

Um dos maiores problemas na visualização de um processo de soldagem é a alta intensidade luminosa emitida em todas as direções pelo arco, principalmente no processo de soldagem GMAW por causa das altas correntes utilizadas. O termo perfilografia (shadowgrafia) tem sido usado quando se refere a uma sombra projetada de vários elementos numa região. Em soldagem, por exemplo, a perfilografia com uma fonte adicional de luz pode ser utilizada quando não se pretende ver o arco e sim projetar a sombra da tocha, o arame, o metal fundido, o cordão de solda e o metal base (Rusu *et al.*, 2011).

Neste método, uma fonte de luz externa, por exemplo, um laser, ilumina a área que se planeja visualizar, de modo que a imagem de interesse seja a sombra dessa área. O feixe de luz é normalmente ampliado com o auxílio de lentes divergente e convergente. Por outro lado, a câmera com filtro ótico captura a luz presente na área do comprimento do laser e o que não se encontrar nessa área permanece escuro, como é o caso da sombra do metal fundido sendo depositado.

Um aspecto importante a ressaltar em relação ao emprego da técnica de perfilografia é o baixo custo computacional que é necessário para analisar as imagens. As imagens adquiridas a partir da técnica por perfilografia apresentam a vantagem de ter um maior contraste entre o fundo e os elementos envolvidos na transferência de metal (arame, metal fundido, metal base). A partir disso, é possível extrair informações provenientes da utilização de filtros espaciais, da morfologia matemática e da binarização de baixo custo. A desvantagem da perfilografia é que, por enquanto, é utilizada a tocha de soldagem fixa, devido ao arranjo óptico que utiliza, de modo que sua implementação depende da aplicação (Lopera, 2016).

Na figura 2.22, é apresentado o princípio da perfilografia aplicado à soldagem. Neste arranjo, é utilizado um expansor de feixe laser de tipo *Galileu*. O expansor utiliza uma lente divergente como entrada do feixe e uma convergente como saída, que produz idealmente uma frente de onda plana na saída do expansor, não tendo assim distorção nem ampliação nas geometrias dos elementos.

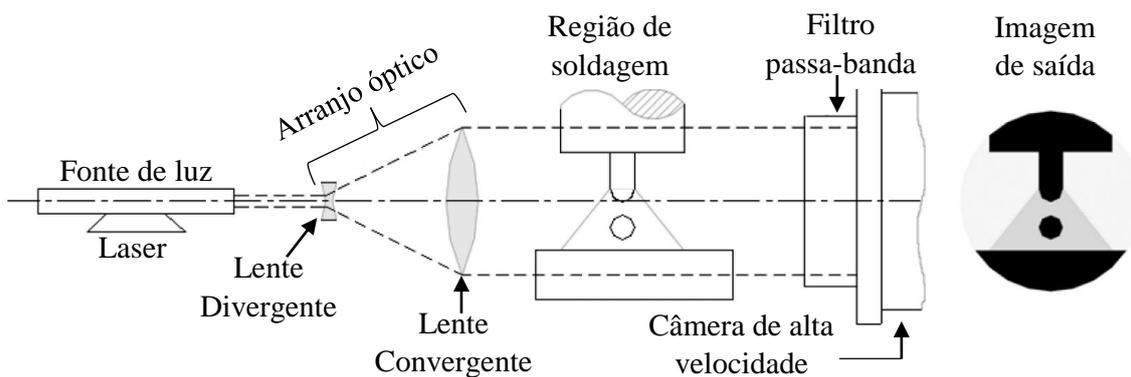


Figura 2.22: Princípio da perfilografia aplicado à soldagem (modificado Bálamo *et al.*, 2000).

A frente de onda plana se consegue quando as frentes de onda esféricas de luz que entram na lente convergente partem do ponto focal objeto da mesma. Depois de atravessar a lente, os raios ficam paralelos ao eixo óptico e as frentes de onda perpendiculares ao mesmo, como é exposto na figura 2.23.

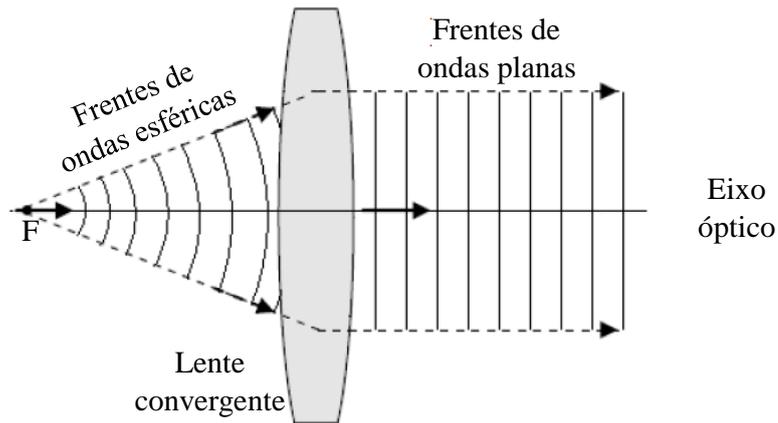


Figura 2.23: Formação de ondas planas a partir de ondas esféricas mediante o uso de uma lente convergente, em que a letra F representa o foco imagem da lente e a luz incidente se propaga na direção das setas (Lopera, 2011).

A distância entre as lentes no expansor de Galileu é a diferença dos valores positivos dos comprimentos focais das mesmas (por convenção, o comprimento focal da lente divergente é tomado como negativo). Assim, o ponto focal objeto da lente convergente coincide com o ponto focal objeto da lente divergente (Lopera, 2011). Isso é indicado na Figura 2.24.

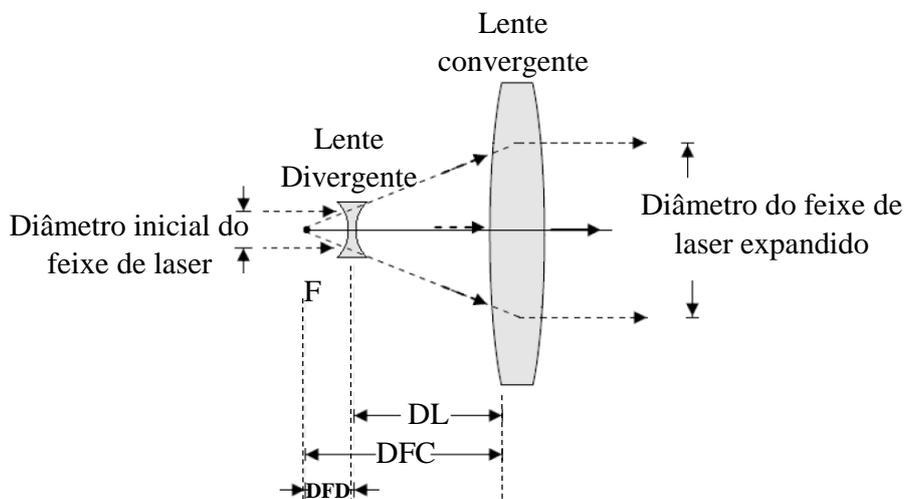


Figura 2.24: Sistema expansor de feixe laser de Galileu (Lopera, 2011).

Da figura 2.24, tem-se que o foco objeto da lente convergente e da lente divergente vem representado por F, DFC simboliza o comprimento focal da lente convergente e DFD é o comprimento focal da lente divergente.

A distância entre as duas lentes (DL) é estabelecida pela expressão:

$$DL = DFC - DFD \tag{2.2}$$

O diâmetro do feixe de laser expandido é encontrado com a seguinte relação:

$$D_o = (MP)D_i \quad (2.3)$$

Onde D_o é o diâmetro do feixe de laser expandido, D_i representa o diâmetro do feixe laser inicial e o *Magnifying Power* simbolizado por MP é igual à relação entre os comprimentos focais das lentes e é calculado por:

$$MP = \frac{fc}{fd} \quad (2.4)$$

Nesta expressão, o fator fc representa o comprimento focal da lente convergente e o termo fd é o comprimento focal da lente divergente.

Outro tipo de expansor de feixe laser é conhecido como Expansor de Kepler que utiliza duas lentes convergentes e faz coincidir o foco imagem da primeira com o foco objeto da segunda (vide Figura 2.25). Neste caso, a distância entre as duas lentes vai ser a soma dos comprimentos focais das lentes. O diâmetro do feixe laser expandido obedece à mesma relação do expansor de Galileu, mas neste caso fc é o comprimento focal da lente convergente 2 e fd é o comprimento focal da lente convergente 1.

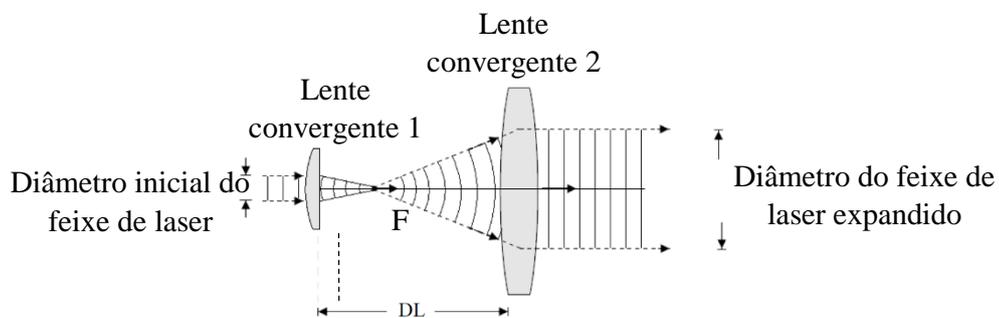


Figura 2.25: Expansor de feixe laser de Kepler, em que F representa o foco de cada lente e DL a distância entre as duas lentes (Lopera, 2011).

3. ESTADO DA ARTE.

O valor do modo de transferência de metal em termos de forma, dimensão e frequência no desempenho do processo de soldagem é bem conhecido, especialmente no GMAW. Na indústria, há soldadores experientes que conseguem reconhecer o tipo de transferência a partir do som emitido pelo arco e, assim, fazer as mudanças necessárias na configuração dos parâmetros. Do ponto de vista científico, porém, é necessário desenvolver trabalhos que identifiquem e expliquem as características que regem esse fenômeno, a fim de contribuir no monitoramento do processo e garantir que os parâmetros operacionais requeridos sejam aplicados para obter boa qualidade de soldagem, aumento de produtividade, redução de custos e maior confiabilidade dos componentes soldados.

A análise do estado da arte aqui apresentada é focada no monitoramento dos processos de soldagem e é dividida em duas partes: a primeira está relacionada aos métodos tradicionais baseados no monitoramento de parâmetros elétricos e outros parâmetros diretos de soldagem, e a segunda corresponde aos métodos não tradicionais que utilizam diferentes sinais, como emissão de IR, emissão de som acústico e sistemas de visão para analisar e detectar o processo.

3.1. ESTUDOS BASEADOS EM MÉTODOS TRADICIONAIS PARA O MONITORAMENTO DO PROCESSO GMAW.

Esta breve revisão ilustra trabalhos de monitoramento realizado através de métodos conhecidos para o estudo do comportamento do processo de soldagem a arco de metal com gás de proteção (GMAW) a partir da aquisição dos sinais de corrente e tensão. A simplicidade da medição de tensão e corrente de soldagem é a razão pela qual esses parâmetros são os mais utilizados para monitoramento e avaliação da qualidade do processo de soldagem.

O monitoramento do processo de soldagem pode desempenhar um papel importante no controle de qualidade on-line, portanto é essencial encontrar um método rápido e seguro para analisar os dados registrados durante o monitoramento. Deste modo, diversos autores mostram em seus trabalhos o efeito dos sinais elétricos no processo GMAW. Luksa (2006), por exemplo, investigou a influência das imperfeições de soldagem na estabilidade do arco elétrico no modo de transferência por curto-circuito a partir da análise conjunta dos sinais, como potência momentânea do arco, resistência momentânea do arco, corrente e tensão de

soldagem. Os resultados do estudo mostram que é possível detectar as imperfeições relacionadas aos fenômenos que ocorrem no arco, que acabam afetando a proteção do arco do gás e o comprimento da extensão do eletrodo.

Xiao *et al.* (2013) pesquisaram o efeito da forma de onda da corrente na oscilação das gotas, encontrando que uma modificação em sua forma reduz a entrada de calor e uma oscilação de gotas mais fortes com uma corrente média mais baixa. Por sua parte, em Chen *et al.* (2013), estudaram-se os efeitos da corrente máxima do arco, a corrente de fundo do arco e a estabilidade do processo de transferência de curto-circuito. Verificou-se que qualquer alteração nessas condições causará aumentos anormais na tensão do arco, o que indica uma extinção instantânea do arco e um aumento nos respingos.

No trabalho de Wu *et al.* (2004), é apresentado um sistema inteligente para monitoramento e reconhecimento de perturbações do processo durante o modo de transferência por curto-circuito. O sistema baseia-se nos dados medidos e estatisticamente processados dos parâmetros elétricos de soldagem. Uma matriz de 12 dimensões é projetada para descrever várias condições de soldagem e é empregada como vetor de entrada do sistema inteligente. Três métodos foram utilizados, como fuzzy c-means, rede neural e rede difusa de clustering de Kohonen.

Yudodibroto *et al.* (2013) determinam as diferentes contribuições e os efeitos da tensão do arco na queda do metal de adição a partir da sincronização das medidas de tensão com a análise de imagens adquiridas por um sistema de vídeo de alta velocidade composto e duas lâmpadas halógenas para iluminar o campo de interesse.

Em Wu *et al.* (2005), o principal objetivo da investigação foi comparar o efeito das formas de onda de corrente pulsada na transferência de metal no GMAW-P e encontrar os conjuntos apropriados de parâmetros de pulso para alcançar o modo de transferência de uma gota por pulso. Um estudo relacionado à influência da corrente de soldagem na transferência de metal no GMAW foi feito em Weglowski *et al.* (2008), observando-se que a velocidade de alimentação do arame (corrente de soldagem) tem uma influência significativa no diâmetro da gota, na velocidade da gota e na taxa de transferência.

Um guia eficiente é apresentado por Chu *et al.* (2004) para identificar a estabilidade e a qualidade da soldagem GMAW no modo de transferência por curto-circuito. Teve como

objetivo analisar os sinais elétricos do processo utilizando métodos de análise de densidade espectral de potência e frequência de tempo. Descobriu, ao analisar a tensão e a corrente de soldagem no domínio da frequência, uma relação entre a frequência de curto-circuito e a estabilidade do processo com parâmetros como a velocidade de deslocamento, a velocidade de alimentação do arame e a tensão de soldagem.

Um modelo integral foi desenvolvido por Hu e Tsai (2006) para estudar os efeitos de diferentes perfis de corrente na formação de gotas, na geração de plasma e na transferência de metal em soldagem GMAW. Os autores mostraram que uma corrente mais alta gera gotas de menor tamanho, maior frequência de gotas e maior força eletromagnética, que se torna o fator dominante a separar a gota da ponta do eletrodo.

No trabalho de Dos Santos *et al.* (2017), o objetivo foi investigar a influência dos perfis da corrente e o pulso de parâmetros do processo na formação e na velocidade de gotas que são transferidas para a poça de fusão. A sequência de eventos que ocorrem durante a formação e a separação de gotas é investigada através da análise de fotos obtidas usando fotografia de alta velocidade.

Lee *et al.* (2018) investigaram os efeitos da corrente de soldagem e dos parâmetros de posição da tocha na geometria do cordão e a penetração na soldagem de arco de metal de gás de junta única. Encontraram que tanto a corrente de soldagem quanto a posição da tocha têm uma forte linearidade entre eles e a geometria do cordão.

Sumesh *et al.* (2017) expõem uma tentativa para estabelecer correlação entre os sinais de corrente e tensão com a boa solda, solda com porosidade e defeito de queima de elementos de liga durante a soldagem de aço carbono usando o processo GMAW.

Um estudo de um parâmetro de soldagem que pode contribuir na previsão da qualidade da soldagem é feito em Mazlan *et al.* (2017). Esse parâmetro é a corrente de soldagem, que é analisada utilizando o processamento do sinal de energia de curta duração (STE), permitindo quantificar o padrão da corrente. Os autores de Carvalho *et al.* (2015) também tomam por base o emprego dos sinais de corrente e tensão no processo de soldagem a arco pulsante de corrente alternada (AC GMAW-P) para otimizar os níveis de trabalho dos parâmetros deste processo. Para consegui-lo, eles propõem uma metodologia de otimização

baseada na caracterização numérica dos sinais elétricos de corrente e tensão mediante o processamento digital dos sinais.

Mvola *et al.* (2018) apresentam como os parâmetros de corrente, tensão e taxa de alimentação do arame contribuem diretamente para melhorar as condições de transferência de calor do eletrodo para o metal base, determinando os efeitos desses parâmetros na geometria da junta soldada.

Em Praveen *et al.* (2006), fez-se um estudo dos efeitos de vários parâmetros os quais foram investigados (corrente de pico, corrente de base, tempo de pico e tempo base) no modo de transferência de metal em chapas finas de alumínio soldadas por GMAW-P. A pesquisa baseou-se na sincronização dos sinais de soldagem e da câmera de alta velocidade para caracterizar e identificar as condições sob as quais diferentes tipos de modos de transferência de metal são observados no sistema GMAW-P.

Em Farzadi *et al.* (2018), é realizada uma investigação teórica e experimental da influência da corrente de soldagem na geometria da poça de fusão durante a soldagem a arco metálico de alumínio. Os autores divulgam que, com o aumento da corrente de soldagem, a temperatura média da amostra, a temperatura de pico e os componentes da velocidade na poça de fusão aumentam devido à maior entrada de calor e à força de impacto do metal fundido.

Zhu e Simpson (2005) expõem a influência que tem uma gota fundida viajando no arco na mudança da tensão Ne na forma da geometria do arco.

O uso de parâmetros de controle derivados dos sinais de tensão de arco e corrente de soldagem como um meio de controle, automação e monitoramento do processo dentro dos diversos modos de transferência de metal foi a principal motivação para a investigação feita por Adam e Siewert (1990).

Ogunbiyi e Norrish (2014) propõem uma metodologia para o monitoramento do processo GMAW utilizando índices desenvolvidos a partir das características estatísticas das formas de onda transientes de corrente e de tensão de soldagem. Quatro índices são apresentados e dão uma interpretação qualitativa do modo de transferência de metal e também uma indicação do comportamento de ignição e da estabilidade do arco de soldagem.

Em Di *et al.* (2000), é apresentado um método para a detecção automática de defeitos de soldagem no processo GMAW durante o modo de transferência por curto-circuito. Baseia-se na extração das características do sinal de arco, bem como na classificação das características obtidas utilizando redes neurais do Mapa de Características de Auto-Organização (SOM) para obter informações sobre a qualidade da solda.

Campos *et al.* (2018) propõem a utilização de um classificador de sistemas lógicos fuzzy do tipo 1 e singleton para identificar a taxa de velocidade do modo de transferência de curto-circuito na soldagem GMAW. O conjunto de dados investigados para a extração de características foi adquirido a partir dos sinais de corrente e tensão, a fim de obter um critério para quantificar a estabilidade da transferência de metais em processos por curto-circuito.

No trabalho realizado por Mohandas *et al.* (2018), é feita uma tentativa usando o algoritmo da árvore de decisão para estabelecer uma correlação entre os sinais de corrente e tensão com a qualidade da solda. Para classificar os defeitos de soldagem, é utilizado um algoritmo de árvore de decisão com critérios de divisão, como "índice de gini", "reboque" e "desvio".

3.2. ESTUDOS BASEADOS EM MÉTODOS NÃO TRADICIONAIS PARA O MONITORAMENTO DO PROCESSO GMAW.

Embora os métodos tradicionais tenham a vantagem de serem baratos e terem contribuído com grandes avanços, como mencionado acima, muitos problemas no processo de soldagem GMAW podem exigir o uso de outras informações que os sinais de corrente de soldagem, a tensão do arco e outros parâmetros diretos de soldagem não podem oferecer. Um exemplo disso está no monitoramento e no controle da geometria e da penetração do cordão de solda, ações importantes que podem exigir o uso de métodos não tradicionais para o seu estudo.

Em Cruz *et al.* (2015), tem-se a apresentação de uma metodologia para realizar a modelagem, otimização e controle da largura do cordão de solda, possibilitando o ajuste dos parâmetros do processo em tempo real. Um sistema integrado foi desenvolvido para aquisição de imagens, modelagem e controle do processo de soldagem, permitindo uma resposta em tempo real, através de redes neurais artificiais.

Kwak e Doumanidis (2002) focam o estudo na regulação em tempo real da geometria de deposição do material implementado em um processo GMAW, para o qual uma varredura

térmica é realizada por câmeras IR e dois profilômetros de banda laser. Esses sensores fornecem medições da largura do cordão para seu controle de realimentação, modulando a alimentação do arame.

Uma nova técnica para medição em tempo real da largura e do reforço dos cordões de solda em soldagem a arco de metal a gás (GMAW) usando uma única câmera de alta velocidade e filtragem óptica de longa passagem em um sistema de visão passiva é desenvolvido por Lopera *et al.* (2016). Este método de medição é baseado em técnicas de processamento digital de imagens, e o processo de calibração da imagem é fundamentado em transformações projetivas.

Para a medição on-line da geometria do cordão depositado, Xiong e Zhang (2013) propõem um sistema de detecção de visão passiva, composto por duas câmeras e técnicas de filtragem para a detecção em tempo real da altura e largura do cordão através da deposição de paredes finas. A distância entre o bocal e a superfície superior foi monitorada para eliminar os erros de altura acumulados durante o processo de deposição de múltiplas.

Um sensor de processamento em tempo real para o melhoramento da qualidade da soldagem durante o processo GMAW é desenvolvido em Jin *et al.* (2017). O sensor encontra-se composto por um conjunto de sistemas de visão que foi projetado, consistindo em um sensor de visão ativo e um sensor de visão passivo. As imagens claras e estáveis do grupo de soldagem foram obtidas com a parte de visão passiva, e as imagens da banda de laser projetada no cordão de solda com a parte de visão ativa. As características das imagens adquiridas foram analisadas, e os parâmetros geométricos da seção transversal da solda e do grupo de soldagem foram extraídos com sucesso das imagens.

Em Adolfsson *et al.* (1999), são abordados os problemas envolvidos no monitoramento automático da qualidade da solda produzida pela soldagem robotizada de arco curto. Para isso, os autores fizeram uso de um algoritmo de detecção de mudança estatístico simples para a qualidade da solda (teste repetido de razão de probabilidade sequencial - SPRT).

Uma metodologia que permite ajustar os parâmetros do processo para a modelagem e o controle do reforço da altura da soldagem foi feita por Cruz *et al.* (2018), contribuindo para o controle das geometrias do cordão de solda. A formação do cordão é medida através de um sistema de aquisição e processamento de imagens usando uma câmera de baixo custo.

Por outro lado, monitorar a penetração da soldagem é um trabalho desafiador em indústrias modernas de manufatura automatizada. A qualidade da soldagem pode ser melhorada com uma maior profundidade de penetração e menor área da poça de fusão. Diante do exposto, Pal e Pal (2011) investigam as influências da variação em pulsos de vários parâmetros operacionais na penetração da solda na soldagem de gás inerte de metal pulsado (P-MIG). Tiveram, como objetivos principais, o controle e o melhoramento da profundidade de penetração da solda.

Além dos trabalhos realizados com base na penetração e na geometria do cordão de solda, diversos autores têm sua atenção focada no estudo da poça de fusão, como é o caso de Sun *et al.* (2006), que desenham um novo sensor visual para detectar as imagens da poça de soldagem durante a soldagem a arco de CO₂ no modo de transferência por curto-circuito. Este sensor é baseado em uma câmera de dispositivo de carga acoplada (CCD), alcançando um tamanho menor e gerando um maior espaço operacional para a tocha de soldagem. Chapuis *et al.* (2010), por sua parte, apresentam uma metodologia para o estudo do comportamento dinâmico da poça de fusão. Tal metodologia é dividida em duas partes: na primeira, é realizada a aquisição de imagens mediante câmera de alta velocidade com dispositivos ópticos específicos e, na segunda, é promovida a análise dos parâmetros geométricos da poça de fusão durante a soldagem.

Reisgen *et al.* (2014) apresentam um sistema de sensor óptico que permite a observação on-line da poça de soldagem no processo GMAW. Além disso, um software de processamento de imagens é desenvolvido para fornecer informações sobre a largura real da poça de fusão, bem como a posição do espaço real em relação à posição do eletrodo.

Um sistema de detecção com visão computacional é desenvolvido por Wu *et al.* (2011) para observar o perfil da superfície da poça de solda durante o modo de transferência por curto-circuito. Com base nas imagens completas e claras capturadas da poça de fusão, são medidos diretamente a dimensão e o tamanho do perfil, incluindo a altura do reforço do cordão de solda.

Ma e Zhang (2009) apresentam um estudo para a observação e a medição da superfície da poça de fusão. Para este propósito, uma linha de laser é projetada na superfície da poça no processo de soldagem a arco de metal com gás pulsado (GMAW-P). As imagens resultantes do laser refletido são adquiridas pela câmera de alta velocidade e um filtro passa-faixa que

reduz a perturbação da radiação do arco que se propaga em uma faixa muito maior de comprimentos de onda.

A investigação feita por Wang *et al.* (2011) consegue fazer a extração de características da gota fundida analisando a deformação das linhas do laser projetadas na superfície da poça de fusão. Para isso, os pontos de interceptação são extraídos e a gota é modelada por meio da combinação de quatro modelos locais ajustados separadamente.

Wang (2014) propõe um sistema de monitoramento para inferir a geometria da poça de soldagem com base em linhas de laser projetadas. As linhas retas paralelas são distorcidas de acordo com o perfil do poça e, portanto, contêm as informações de sua forma.

Por sua parte, em Baskoro *et al.* (2011), é proposto um estudo sobre o monitoramento da imagem da poça de fusão durante a soldagem de tubos em GMAW usando visão computacional. Como os tubos soldados de topo são frequentemente usados em usinas de energia, estruturas marítimas e indústrias de processo, é necessária uma técnica avançada de processo de monitoramento de soldagem. A investigação foi realizada para a soldagem de aços doces com corrente contínua, velocidade de soldagem controlada e uma câmera de Charge-Coupled Device (CCD) como sensor de visão.

Zeng (2002) explora uma solução para a compatibilidade do monitoramento e controle do destacamento de gotas e geração de imagens da poça de fusão durante um processo GMAW-P, que estabelecerá uma base para o controle em tempo real da penetração total da poça de fusão.

Lertrusdachakul *et al.* (2015) apresentam uma abordagem baseada em visão computacional para a medição da extensão do eletrodo e a detecção da poça de fusão. A análise da imagem é aplicada às sequências de imagens, que são extraídas de um vídeo gravado durante a soldagem. O objetivo do trabalho foi utilizar estes parâmetros computados para auxiliar no controle da soldagem e no exame de defeitos.

De acordo com o acima exposto, os sistemas de visão assumem a liderança nos métodos de monitoramento não tradicionais, já que, mediante técnicas de captura de imagens em alta velocidade, é possível ajudar a compreender os fenômenos físicos durante a soldagem a arco como Ogawa (2011) expõe em seu trabalho. Além disso, a visão computacional tem

vital relevância no monitoramento e na classificação dos modos de transferência de metal de adição. Isso pode ser visto, por exemplo, em investigações como a realizada por Fan e Kovacevic (1999), na qual os autores utilizaram a técnica de shadowgrafia em conjunto com filmagem de alta velocidade. Desenvolveram, assim, um modelo matemático para descrever a transferência globular em soldagem GMAW, aproveitando o método do volume de fluidos (VOF), o fluxo de fluidos e os fenômenos de transferência de calor para o estudo dinâmico da formação e do descolamento de gotas fundidas, do impacto de uma gota em um substrato sólido, do impacto de múltiplas gotas na poça de fusão e da solidificação após o arco extinguir.

Em Subramaniam *et al.* (1998), o trabalho centra-se na determinação da tensão superficial dos líquidos a partir da captação de imagens das gotas oscilantes no modo de transferência spray por meio da técnica óptica de shadowgrafia que utiliza iluminação a laser e grava com uma câmera de vídeo de alta velocidade.

Rusu *et al.* (2011) apresentam uma metodologia utilizada na investigação do processo de transferência de metal, em particular para processos de soldagem a arco. Para isso, uma técnica de laser combinada com uma câmera digital de alta velocidade foi aplicada para monitorar a fusão do fio de enchimento e a dinâmica das gotas de metal durante o processo de soldagem a arco em diferentes condições e com diferentes parâmetros.

Huang e Zhang (2010) propõem uma maneira alternativa de aplicar uma força necessária para separar as gotas sem produzir efeitos colaterais indesejáveis. O objetivo final é usar um laser pulsado de baixa potência na gota para separá-la quando for necessário, de modo que a gota possa ser desprendida no amperagem que melhor se adapte para o controle da poça de fusão. Como o raio laser deve ser aplicado sobre a gota para separá-la, utilizou-se uma câmera de alta velocidade para gravar o processo.

Em de Oliveira *et al.* (2018), é apresentado um estudo sobre visão de máquina, no qual são discutidos alguns algoritmos aplicáveis a análises de processos de soldagem. Como um estudo de caso, os algoritmos foram adotados sobre imagens obtidas, a partir de uma câmera de alta velocidade, pela técnica de shadowgrafia da transferência de metal pelo modo globular no processo GMAW.

Mediante um sistema de fotografia de alta velocidade em Guo *et al.* (2009), é observado com sucesso o processo de transferência de metal na soldadura horizontal de abertura estreita com arco rotativo. Os resultados indicaram que a força centrífuga induzida pela rotação do arco tem grande efeito no modo de transferência globular, que possui menor frequência de transferência e maior tamanho de gotas, quando comparado ao modo de transferência por spray, que tem efeito limitado.

Yudodibroto *et al.* (2006) centram sua atenção no comportamento físico da gota em suspensão durante o processo GMAW-P, com ênfase especial na oscilação da gota. A frequência de oscilação da gota em suspensão foi monitorada por meios visuais usando uma câmera de vídeo de alta velocidade.

Węglowski *et al.* (2008) verificaram se um filtro de banda estreita e uma câmera de vídeo digital de alta velocidade podem ser utilizados sem um laser de luz de retroiluminação para observar o processo de transferência de metal. Além disso, apresentaram a influência da velocidade de alimentação de arame (corrente de soldagem) no diâmetro, na trajetória e na velocidade da gota.

Dois modelos empíricos para representar o comportamento de transferência de metal no modo de transferência por spray foram propostos por Lopera e Alfaro (2012). Os modelos foram estabelecidos para estudar dois parâmetros fundamentais: o tamanho das gotículas e a taxa de transferência de gotas. Para medir esses parâmetros em diferentes processos de soldagem, foi necessário fazer filmagem com uma câmera de alta velocidade e uma técnica de iluminação de fundo.

Uma nova abordagem é proposta por Zhang *et al.* (1998) para controlar e monitorar on-line, mediante um sistema de imagem de alta frequência, o processo de transferência de metal. Essa abordagem aproveita o momento descendente de oscilação da gota para reduzir o nível de corrente necessário para separá-la. A redução no nível atual garante que a gota não saia a menos que a ação de ejeção ativa seja aplicada.

O objetivo do trabalho desenvolvido por de Miranda *et al.* (2007) foi desenhar e desenvolver um dispositivo de identificação para o descolamento de gotas durante GMAW-P, bem como avaliar a possibilidade de implementar um sistema de controle de transferência de metal. O dispositivo de identificação desenvolvido baseou-se em um sensor

de luminescência e em uma interface eletrônica, capaz de detectar o fluxo de luz do arco. As transferências de metal foram gravadas usando uma câmera de alta velocidade e aplicando a técnica de shadowgrafia para validar o desempenho do dispositivo.

Wang e Zhang (2007) propõem um algoritmo baseado na luminosidade para localizar a gota e calcular o tamanho da gota automaticamente na transferência de metal no processo GMAW com duplo eletrodo. Embora esse algoritmo possa localizar a gota com a precisão apropriada, sua precisão no cálculo do tamanho da gota precisa de melhorias. Assim, para melhorar o algoritmo, a correlação entre as imagens adjacentes é explorada devido ao crescimento da gota fundida.

Lin *et al.* (2001) apresentam uma técnica combinada entre shadowgrafia, filmagem de alta velocidade e detecção do arco elétrico para investigar experimentalmente o processo dinâmico de transferência de metal. O tamanho e as frequências de transferência das gotas são estudados usando os métodos de processamento de imagens e de transformada rápida de Fourier (FFT).

Shao *et al.* (2011) aplicam um método conformado por aquisição de imagens em alta velocidade e um laser de baixa potência, mas ajustável, projetado à gota para separá-la no tamanho desejado que possa contribuir para um controle de retroalimentação.

Por sua parte, Wang (2016) visa estabelecer a capacidade de monitorar o processo de transferência de metal nos ambientes de soldagem reais para que o robô de soldagem automatizada controle o processo de forma on-line. Para isso, foi desenhado um sistema de monitoramento compacto e prático para medir a transferência de metal de maneira robusta mediante a captura de imagens e algoritmos efetivos de processamento de imagem.

Por outro lado, existem métodos não tradicionais baseados em fontes de informação como os sinais de som e na acústica do ar emitido pelo arco elétrico. Esses elementos podem ser considerados como indicadores indiretos da estabilidade do arco e das características da transferência de metal. Por isso, tornaram-se, há algum tempo, importantes fatores para o monitoramento dos processos de soldagem GMAW. Recentemente, estudos relacionados a esse contexto vêm se desenvolvendo, como é o caso de Sanchez *et al.* (2007), que apresentam um novo índice para a análise de estabilidade do processos GMAW tomando como base a emissão acústica gerada pelo arco durante a transferência de curto-circuito. A

validade deste novo índice foi demonstrada com base nas comparações com os sinais de tensão do arco e na inspeção visual do cordão de solda. Cayo e Absi (2008), por sua vez, expõem em sua pesquisa a identificação dos modos de transferência de soldagem através do nível de pressão acústica a fim de determinar as instabilidades no processo, determinar defeitos e avaliar a qualidade da soldagem ao longo do cordão.

Estudo e análise experimental dos sinais acústicos feitos por Cudina *et al.* (2008) mostraram que existem dois mecanismos principais que geram ruído: o primeiro é a extinção do arco e a ignição do arco; o segundo é o mesmo arco que funciona como uma fonte sonora de ionização. Nesse trabalho, os sinais acústicos são utilizados para avaliar e monitorar o processo de soldagem, além de prever estabilidade e qualidade do processo de soldagem.

Em 2011, Lv e Chen, com o objetivo de monitorar on-line a qualidade da soldagem com base na acústica dela, analisam a utilidade das fontes do som de soldagem, as características e o processamento da acústica de soldagem, além da modelagem e do reconhecimento de padrões de sinais sonoros no processo GTAW.

Grad *et al.* (2004) realizaram medições de ondas acústicas no ar circundante e nas peças sendo soldadas durante o processo GMAW, empregando um microfone e sensor PZT com a finalidade de obter informações sobre o comportamento da coluna do arco, a poça de fusão e a transferência de gotas fundidas. Também, no estudo de Ting *et al.* (2011), o objetivo era observar a forte relação existente entre os sinais acústicos com o comportamento da coluna de arco, da poça de fusão e da transferência de gotas mediante um procedimento experimental baseado na soldagem de todas as peças de trabalho na mesma velocidade com correntes diferentes.

Em Pal *et al.* (2010), verificou-se que o som do arco estava fortemente relacionado aos parâmetros (corrente e tensão de soldagem) do processo e à qualidade da soldagem. Para isso, os autores adquiriram conjuntamente o sinal acústico do arco de soldagem com os sinais de corrente e tensão, analisando-os no domínio do tempo e no domínio da frequência para correlacioná-los com os diversos parâmetros do processo e os modos de transferência do metal.

Alfaro e Cayo (2012) apresentam em seu estudo a relação entre a qualidade da soldagem e as emissões óptico-acústicas do arco elétrico durante as operações de soldagem no processo

GMAW-S. Durante as operações, interferências foram induzidas no caminho da soldagem, usando tinta, graxa ou gás. Concluiu-se que a avaliação da qualidade da soldagem ao utilizar o sensoriamento das emissões de arco poderia permitir a detecção de perturbações que originam defeitos nos cordões de solda.

O estudo de Prezelj e Čudina (2003) apresenta análises teóricas e experimentais dos sinais acústicos, mostrando que existem dois mecanismos principais geradores de ruído. O primeiro mecanismo que gera impulsos sonoros característicos é a extinção e ignição do arco; o segundo mecanismo gerador de ruído é o próprio arco atuando como uma fonte sonora de ionização e produzindo principalmente ruído de “turbulência” de alta frequência de baixo nível. O nível muito mais alto de ruído impulsivo domina o nível total de pressão sonora e é usado tanto para avaliar e monitorar o processo de soldagem quanto para prever a estabilidade e a qualidade dele.

O estado da arte apresentado tem como finalidade expor as diferentes pesquisas realizadas com o objetivo do monitoramento do processo de soldagem GMAW. Pode-se identificar que os estudos realizados seguem principalmente dois tipos de metodologias. Uma primeira seria mediante o uso de métodos tradicionais baseados nas análises de parâmetros elétricos e outros parâmetros diretos de soldagem. O outro tipo persegue a utilização de métodos não tradicionais para analisar o processo por meio das características extraídas por som acústico e sistemas de visão, precisando de um maior investimento de recursos para sua determinação.

Nos estudos realizados a partir de métodos tradicionais, como se percebe, é possível entender a influência que têm os sinais elétricos na estabilidade do processo e na qualidade da solda, além de proporcionar certa informação de características próprias de certos modos de transferência, como é o caso da dinâmica dos curtos-circuitos. As pesquisas desenvolvidas com base em métodos não tradicionais estão focadas principalmente no monitoramento do comportamento dos modos de transferência e do pool de fusão, deixando de lado fatores importantes do processo, como estabilidade e qualidade da soldagem. Por isso, recomenda-se, para conseguir um monitoramento completo do comportamento do processo, integrar técnicas de ambos os métodos.

4. PROPOSTA METODOLÓGICA E MONTAGEM EXPERIMENTAL

O monitoramento *on-line* dos processos de soldagem, em particular o GMAW, apresenta uma abordagem que agrega ferramentas hardware e software, com o propósito de obter conhecimentos do comportamento do processo visando gerar soluções de automação e promover o aumento da produtividade e da qualidade na indústria. Os procedimentos e os métodos desenvolvidos são apresentados neste capítulo em três etapas. A primeira compreende os fatores de entrada que permaneceram constantes e a delimitação da região do trabalho, além de conter a descrição do projeto experimental desenvolvido. A segunda etapa cita os equipamentos e materiais e aborda a descrição dos equipamentos, consumíveis e componentes da bancada experimental. A terceira, denominada procedimento experimental, engloba a aquisição e o processamento dos sinais elétricos, além da captura e do processamento das imagens. Uma vez concluídas, essas etapas materializam a implementação do sistema de monitoramento, conforme detalhamento na Figura 4.1, apresentada a seguir.

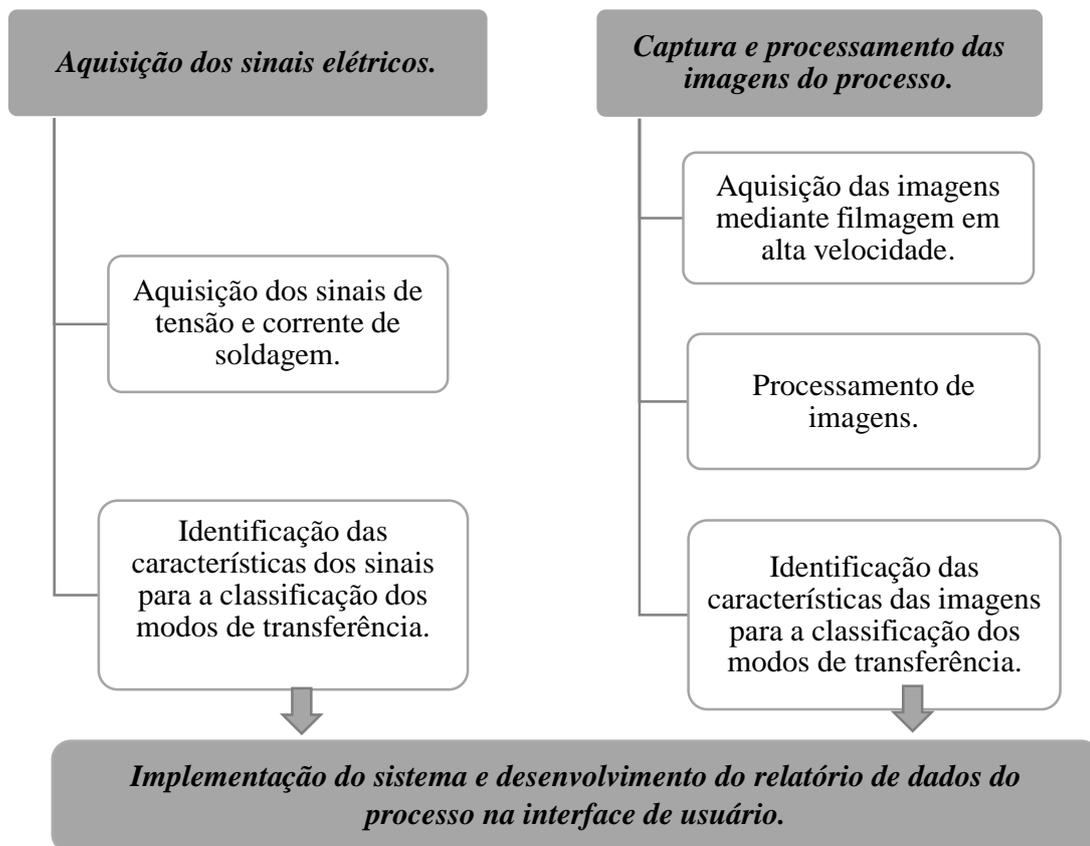


Figura 4.1: Esboço do procedimento experimental desenvolvido para este trabalho.

4.1. EQUIPAMENTOS E MATERIAIS.

A seguir, é descrito cada um dos dispositivos da montagem experimental utilizada. A bancada experimental está composta por três sistemas principais:

- Sistema de soldagem;
- Sistema de aquisição de imagens;
- Sistema de aquisição dos sinais elétricos.

Na Figura 4.2, são apresentados a distribuição do sistema computacional e o hardware usado.

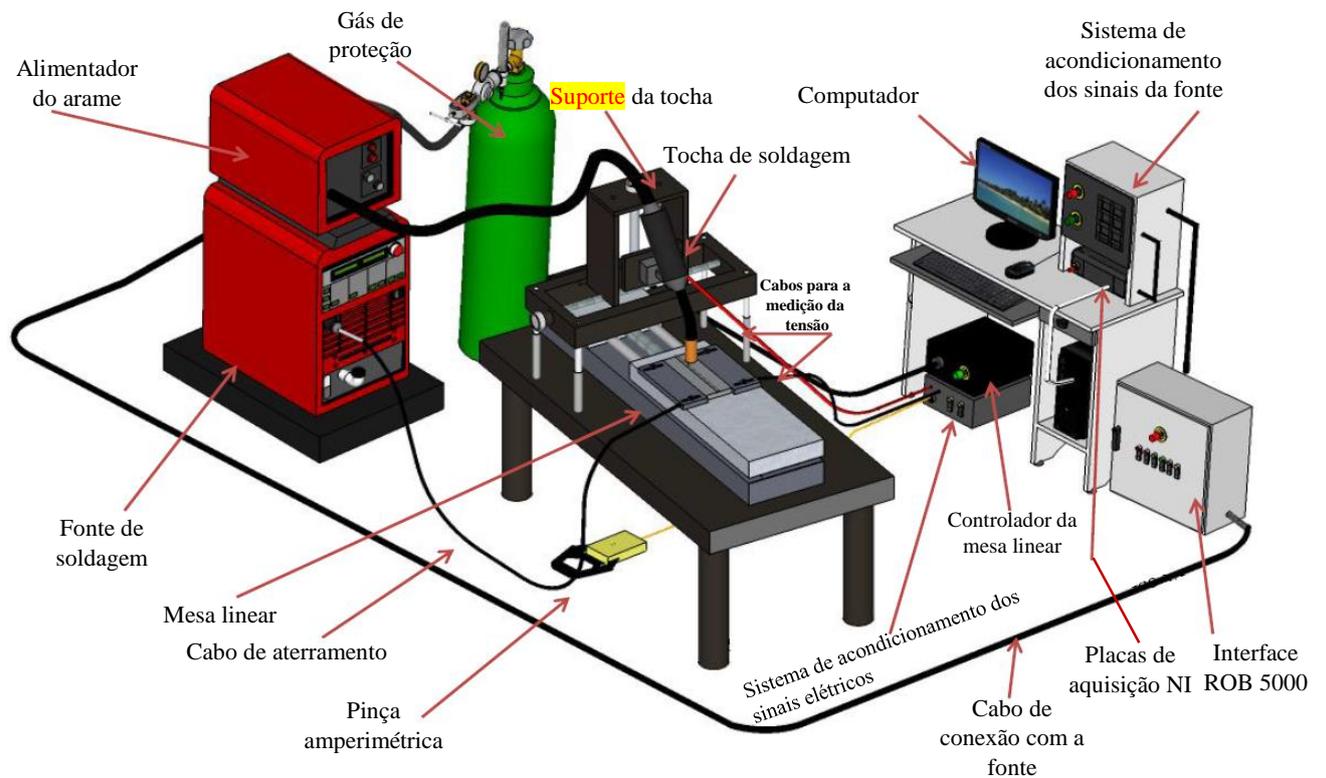


Figura 4.2: Distribuição e localização de sistema computacional, hardware e equipamentos utilizados neste estudo (modificado Torres, 2013).

4.1.1. Sistema de Soldagem

O sistema de soldagem deste estudo é composto por:

4.1.1.1. Fonte de Soldagem

Para o desenvolvimento deste trabalho, fez-se uso da fonte de soldagem TransPuls Synergic 5000 da Fronius, que se caracteriza por ser digital e multiprocesso (SMAW, GTAW e

GMAW). No processo de soldagem por *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), a fonte trabalha de forma convencional, operando no modo de tensão constante, sendo as variáveis reguladas a tensão de soldagem e a velocidade de alimentação do arame. Para o processo, a fonte possui um sistema alimentador de arame, VR 1500, equipado com sistema de 4 roletes, que possibilita a alimentação de arame de diversos tipos. O manejo da fonte é feito com um computador industrial por meio de uma interface para robôs ROB 5000.



Figura 4.3: Imagem frontal do painel de controle da fonte TransPuls Synergic 5000.

4.1.1.2. Computador Industrial

O controle da soldagem foi feito através do computador industrial de marca *ADVANTECH* de referência *ICP-622*, que possui uma placa de aquisição de dados *PCI Eagle 703s* designada à aquisição e ao armazenamento dos sinais elétricos (tensão de arco e corrente de soldagem), além de ser responsável, com apoio de duas placas *NI USB 6009* da National Instruments, pela ação de comunicação entre o computador e a interface ROB 5000. Esta, por sua vez, comunica o computador com a fonte de soldagem e a mesa linear. A operabilidade da fonte, da mesa linear e a aquisição dos sinais elétricos são realizadas mediante algoritmos desenvolvidos nas ferramentas software *LabVIEW 13* da National Instruments e *MATLAB 12a* da Mathworks.

4.1.1.3. Mesa de Deslocamento Linear

A mesa deslocamento linear desenvolvida em trabalhos anteriores (Franco, 2007; Franco, 2008) é uma estrutura na qual a peça de trabalho é fixada e que pode deslocar-se

linearmente numa direção. O deslocamento da peça é transmitido por um motor de passo através de um parafuso sem fim. A velocidade, a direção e o tempo de deslocamento da mesa são ajustados via RS-232 por meio do algoritmo desenvolvido em *LabVIEW*, isto possibilita o controle do início e do fim dos cordões de solda. A Figura 4.4 exhibe o diagrama da mesa linear.

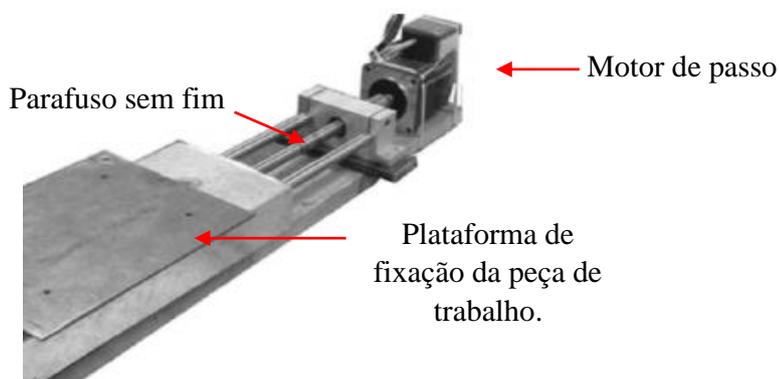


Figura 4.4: Mesa de deslocamento linear (modificado Franco, 2007; Franco, 2008).

4.1.1.4. Materiais e Consumíveis

Devido aos recursos disponíveis no laboratório, os materiais empregados no presente estudo foram:

- Metais de Adição Utilizados nos Processos

Neste estudo, foram utilizados dois tipos de arame (vide tabela 4.1) a fim de verificar a aplicabilidade da metodologia proposta para diversas condições de soldagem. O primeiro é um arame maciço AWS A5.18 ER70S com diâmetro de 1,2 mm, e o segundo é um arame maciço da classe 410NiMo inoxidável com diâmetro de 1,2 mm.

Tabela 4.1: Composição química dos arames usados

<i>Tipo de arame</i>	<i>C %</i>	<i>Mn %</i>	<i>Si %</i>	<i>P %</i>	<i>S %</i>	<i>Ni %</i>	<i>Mo %</i>	<i>Cr %</i>	<i>Cu %</i>
AWS A5.18 ER70S-6	0,08	1,51	0,89	0,15	0,013	0,016	-	0,021	0,18
410 NiMo inox	0,06	0,6	0,5	0,03	0,03	4	0,7	13	0,75

- Peças de Trabalho ou Metal de Base

O material do metal de base usado para efetuar tanto a soldagem dos testes como a confecção das placas de teste definitivas foi o aço carbono ABNT 1020, em formato de chapa plana, com dimensões 6,35 mm de espessura e 200 mm x 50 mm de comprimento e largura, respectivamente, previamente limpados e lixados.

- Blindagem Gasosa

Assim como realizado com os metais de adição, a proteção gasosa do processo GMAW em estudo foi feita com dois tipos de gases diferentes com o propósito de validar a metodologia em distintos ambientes de soldagem. O primeiro tipo de gás utilizado foi uma mistura de 96% Ar e 4% CO₂. Aquele tipo de gás foi utilizado por ser frequentemente empregado na soldagem de aço carbono, segundo os fabricantes e pesquisadores consultados. O segunda proteção gasosa foi feita mediante mistura de 94% Ar e 6% CO₂.

4.2. DELIMITAÇÃO DA REGIÃO DE TRABALHO.

A primeira fase para delimitar a região de trabalho foi estabelecer os parâmetros de soldagem que permaneceriam fixos durante os experimentos. De acordo com a literatura consultada e em conformidade com o trabalho e com as características do equipamento, os parâmetros mantidos fixos são:

1. Polaridade positiva (com o eletrodo no ânodo);
2. Distância bico de contato-peça igual a 15 mm;
3. Vazão de gás de proteção igual a 15 litros/min (medida na saída do cilindro);
4. Ângulo de trabalho de 90° (eletrodo perpendicular à chapa).

A seguir, a Tabela 4.2 apresenta o projeto experimental desenvolvido para o presente estudo, o qual tem quatro configurações constituídas por três parâmetros operacionais (tensão de soldagem, velocidade de alimentação do arame e velocidade de soldagem). Em cada configuração, há 4 experimentos realizados com a variação de um parâmetro e mantendo fixos os restantes, a fim de abordar diferentes estados durante a soldagem. A partir disso, as seguintes configurações foram estabelecidas:

Configuração 1:

- Variação da tensão de soldagem com valor inicial de 18V até 30V em intervalos de 1,5V;
- Velocidade de alimentação do arame fixa em 5 m/min;
- Velocidade de soldagem fixa em 8 mm/s.

Configuração 2:

- Variação da velocidade de alimentação do arame com valor inicial de 4 m/min até 9,4 m/min em intervalos de 0,6 m/min;
- Tensão de soldagem fixa em 24 V;
- Velocidade de soldagem fixa em 8 mm/s.

Configuração 3:

- Variação da velocidade de soldagem com valor inicial de 5 mm/s até 9,5 mm/s em intervalos de 0,5 mm/s;
- Tensão de soldagem fixa em 24 V;
- Velocidade de alimentação do arame fixa em 5 m/min.

Configuração 4 (Variação dos três parâmetros operacionais):

- Variação da tensão de soldagem com valor inicial de 18V até 30V em intervalos de 1,5V;
- Variação da velocidade de alimentação do arame com valor inicial de 4 m/min até 9,4 m/min em intervalos de 0,6 m/min;
- Variação da velocidade de soldagem com valor inicial de 5 mm/s até 9,5 mm/s em intervalos de 0,5 mm/s.

Tabela 4.2: Projeto experimental do planejamento experimental

		Tipo de Arame	
		AWS A5.18 ER70S-6	410 NiMo inox
Tipo de Gás	96% Ar + 4% CO ₂	Configuração 1 [4 Exp]	Configuração 1 [4 Exp]
		Configuração 2 [4 Exp]	Configuração 2 [4 Exp]
		Configuração 3 [4 Exp]	Configuração 3 [4 Exp]
		Configuração 4 [4 Exp]	Configuração 4 [4 Exp]
	94% Ar + 6% CO ₂	Configuração 1 [4 Exp]	Configuração 1 [4 Exp]
		Configuração 2 [4 Exp]	Configuração 2 [4 Exp]
		Configuração 3 [4 Exp]	Configuração 3 [4 Exp]
		Configuração 4 [4 Exp]	Configuração 4 [4 Exp]

4.3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.3.1. Sistema de Aquisição dos Sinais Elétricos

A obtenção dos parâmetros, tais como corrente e tensão de soldagem, ligados aos seus respectivos valores médios e tempos de atuação, foram adquiridos para serem analisados, podendo mostrar a ocorrência do modo de transferência. Para este trabalho em particular, a aquisição dos sinais elétricos é importante, pois ela proporciona características diferentes das obtidas pelos processos de aquisição de imagens. É o caso da diferenciação entre o modo de transferência por curto-circuito e por curto-circuito forçado, facilitando a medição do número de curtos-circuitos por unidade de tempo. Reverteu-se, assim, em dados úteis para o conhecimento do comportamento e da estabilidade do processo.

Os sinais elétricos de corrente e tensão de soldagem foram capturados nos experimentos com ajuda de um sistema de aquisição de sinais composto por um sensor de efeito Hall (pinça amperimétrica Fluke i1010 CA/CC) com faixa de medição de ± 600 A para a medição da corrente e um divisor de tensão resistivo para a medição da tensão, calculada entre a região equivalente ao final da tocha (região de contato) e o metal de base. Os sinais foram adquiridos a uma taxa de aquisição de 20 khz por meio da placa de captura de dados PCI Eagle 703s e uma placa da National Instrument de referência USB 6353 (vide figura 4.5). Esse sistema tem a função de acondicionar e isolar as variáveis elétricas para reduzir o ruído elétrico de origem eletromagnética e para resguardar das sobretensões.

O arquivamento dos sinais elétricos da corrente e tensão obtidos nesta etapa de aquisição ocorre por meio de um algoritmo desenvolvido no software Labview. Para tanto, os sinais de tensão foram adquiridos entre a região equivalente ao final da tocha (região de contato) e a mesa de soldagem. As análises dos dados coletados durante a realização dos experimentos foram realizadas por meio do software MATLAB, que permitiu avaliar e manipular os valores da tensão e corrente, assim como permitiram identificar e extrair características úteis para o desenvolvimento deste estudo.



Figura 4.5: Placa de aquisição da National Instrument de referência USB 6353.

4.3.2. Identificação das Características dos Sinais para a Classificação dos Modos de Transferência

Em geral, a aquisição dos sinais elétricos de corrente e tensão nos processos de soldagem são a forma mais direta de monitorar o comportamento do processo, já que o arco mesmo é o principal descritor dos fenômenos presentes na aplicação da soldagem, que, no caso do processo GMAW, está relacionado diretamente com o fenômeno da transferência de metal. Neste trabalho, os sinais de corrente e tensão de soldagem serão analisados com o fim da medição da frequência de curto-circuito e da extração de características que permitam a identificação dos modos de transferência por curto-circuito e curto-circuito forçado.

Ressalta-se que, mediante apenas a análise e o processamento das imagens, não se pode garantir a correta diferenciação entre esses dois modos. Tais características serão os picos formados pela queda de tensão e o aumento máximo da corrente, produto do contato entre o eletrodo e a poça de fusão. A detecção destas flutuações é feita pelo bloco *peak detection* no software LabVIEW. O citado bloco recebe os sinais provenientes da etapa de processado e encarrega-se de encontrar as localizações e amplitudes dos máximos e mínimos locais dos sinais; cada amplitude máxima é determinada como a existência de um curto-circuito, facilitando a contagem deste fenômeno.

A fim de corroborar os resultados obtidos pelo bloco *peak detection* empregado no software LabVIEW, o sinal de corrente é utilizado para este processo, dividindo-o em 4 partes determinadas a cada 2 segundos, como evidenciado na figura 4.6.

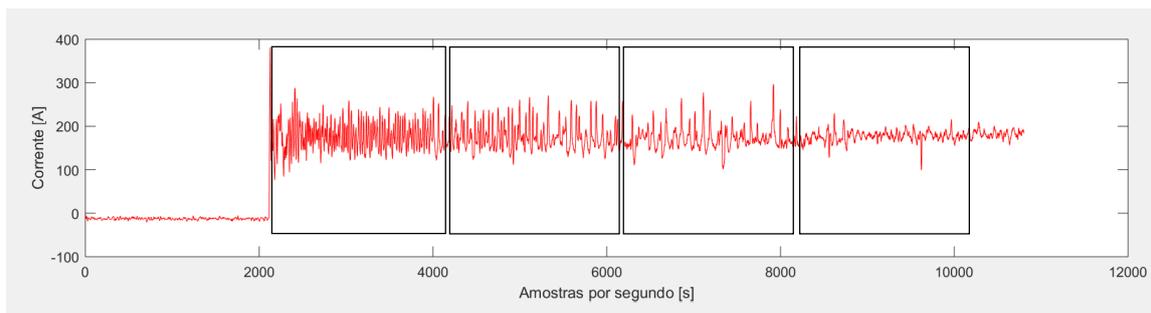


Figura 4.6: Sinal de corrente dividida em intervalos de 2 segundos.

4.3.3. Sistema de Aquisição de Imagens

4.3.3.1. Determinação do Sistema de Captura das Imagens do Processo

Para a determinação do sistema de captura das imagens do processo, é feita previamente uma introdução do processo GMAW com o objetivo de reconhecer os requisitos de desempenho e analisar os fenômenos implicados nos modos de transferência de metal. A eleição e a configuração do sistema de captura são geradas tendo em consideração distância de localização, proteção frente a respingos, tipo de iluminação, tipo de sinal de entrada e saída, etc.

Para a aquisição das imagens, foi empregada uma câmera de alta velocidade DALSA modelo DS-21-001M150 de tecnologia CMOS, monocromática com 256 níveis de cinza. Para adquirir as imagens, a câmera utiliza um algoritmo desenvolvido em linguagem C na plataforma Microsoft Visual Studio apresentado no trabalho de Franco (2007); o qual, a partir de um arquivo de configuração da câmera, executa uma captura (imagens/filmagem) durante um período determinado e cria um conjunto de arquivos contendo, em cada um, o quadro capturado pela câmera e um arquivo com o vídeo gerado com as imagens capturadas. O arquivo de configuração é gerado a partir do programa CamExpert, a partir do qual são testadas e definidas as características do processo de captura.

O ajuste do sistema de captura foi estabelecido no programa PFRemote da seguinte forma: o tempo de exposição no sensor da câmera foi fixado em 0,010 ms e o tempo entre quadros fixado em 1,863 ms obtendo uma taxa de quadros de 537 fps. Tais valores foram obtidos a partir de testes exploratórios a fim de reduzir a reiteração da mesma gota de metal fundido (no caso em que o processo se encontra no modo globular ou spray) na sequência de imagens e garantir uma baixa alteração na extração das características, melhorando a sua

medida. Por outra parte, a abertura do diafragma da lente da câmera foi fixada em $f/4.0$ procurando a menor quantidade de luz do arco que possa saturar a lente e um campo de trabalho que permita observar o comportamento dos modos de transferência durante o processo de soldagem.

4.3.3.2. Sistema de Iluminação.

Tradicionalmente, nos processos de soldagem, os especialistas humanos realizam o controle da qualidade da solda mediante inspeção visual após o término do processo. Os seres humanos não podem monitorar, no entanto, o processo quando está ocorrendo, porque a luz da radiação emitida pelo arco elétrico impede que o olho humano observe os fenômenos desenvolvidos durante o processo. Uma alternativa, portanto, para dissipar a luminosidade do arco é realizar o monitoramento do processo de soldagem mediante técnicas de visão artificial. Uma destas técnicas empregadas atualmente, para a visualização do processo sem a influência do arco, baseia-se em iluminar a área de trabalho com uma fonte de luz externa durante a captura das imagens com câmera de alta velocidade. Essa fonte de luz é primordial para a análise e a visualização dos fenômenos que ocorrem dentro do arco durante o processo de soldagem, sendo que, se a intensidade e a qualidade da fonte de luz não são as apropriadas, os dados visuais adquiridos pelos sistemas de imagem podem levar a uma medição errada.

Uma parte importante nesta metodologia é a seleção conveniente da técnica e dos elementos que compõem a fonte de luz externa, a fim de obter imagens fixas individuais de qualidade do comportamento da transferência de metal durante a soldagem. Atualmente, podem ser encontradas várias técnicas de iluminação utilizadas para realçar diferentes aspectos das peças que serão analisadas numa aplicação de visão artificial. Com base no descrito, para o desenvolvimento deste trabalho, optou-se pela técnica de iluminação por perfilografia. Esta técnica é utilizada com o propósito de neutralizar a luz do arco e ter maior contraste entre o fundo e os componentes implicados na transferência metálica (vide Figura 4.7). Ao conseguir um maior contraste, a imagem resultante será a sombra dessa região.

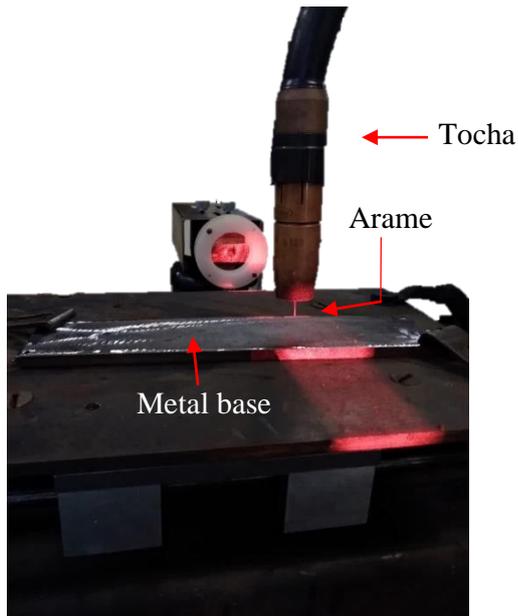


Figura 4.7: Iluminação de peças (arame e metal base) envolvidas na transferência metálica mediante a técnica de perfilografia.

Nesta pesquisa, um laser de He-Ne com comprimento de onda de 633 nm, potência de 15 mW e que emite um feixe de luz com 1.2 mm de diâmetro foi utilizado como fonte de luz externa. A fim de expandir o feixe de luz, utilizou-se um expensor de feixe de Galileu composto por uma lente divergente com um comprimento focal (f_d) de 40 mm e uma convergente com um comprimento focal (f_d) de 500 mm. A disposição das lentes divergente e convergente vem dada com distâncias focais de 30 mm e 400 mm, respectivamente. De outra forma, um filtro de interferência óptica na banda do laser é instalado na câmera com a finalidade de só capturar a luz na banda do laser e deixar escuro o que não estiver nessa banda. A bancada experimental com a disposição das lentes é apresentada na Figura 4.8.

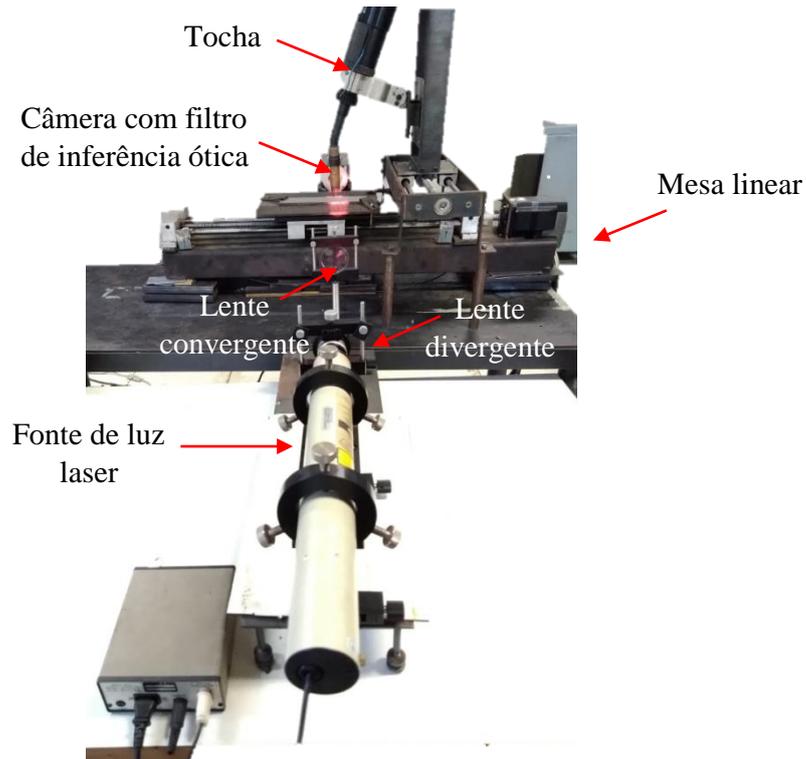


Figura 4.8: Bancada experimental da técnica de iluminação por perfilografia.

4.3.4. Processamento de Imagens

O processamento de imagens digitais caracteriza-se pelo alto consumo em recursos computacionais, causando um aumento no tempo de processamento. Desse modo, a escolha apropriada das técnicas de processamento digital de imagens para o monitoramento tem um papel importante na solução desse problema.

As imagens adquiridas neste estudo apresentam uma resolução espacial de 144 colunas por 220 linhas. Com o objetivo de facilitar a extração de características dos modos de transferência metálica que permitam monitorar o processo, a metodologia de processamento empregada faz uso de duas etapas descritas: a primeira consiste no pré-processamento da imagem digital e a segunda versa sobre limiarização ou binarização das imagens. As etapas são descritas a seguir.

4.3.4.1. Pré-processamento da Imagem Digital

As imagens obtidas por meio da técnica de iluminação por perfilografia são caracterizadas por apresentar ruído gaussiano constante, que é gerado pela repartição da energia da fonte

de luz externa (laser) e sua interação com fragmentos no ar ou nas lentes do sistema expensor de feixe. Além disso, outro ruído presente é causado pelos vestígios nos vidros de proteção, produto dos respingos (vide Figura 4.9). Em certa forma, a presença destas interferências nas imagens pode alterar a segmentação dos objetos, já que, em alguns casos, os pontos do ruído podem estar perto da área de interesse.

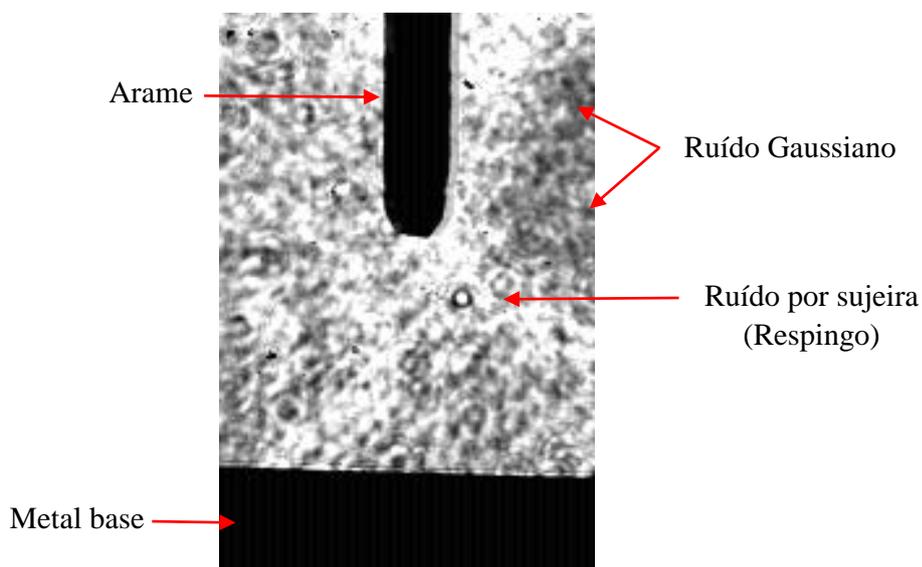


Figura 4.9: Ruídos presentes nas imagens obtidas pela técnica de perfilografia.

Desta forma, para conseguir as características próprias dos modos de transferência a partir das imagens deve-se fazer um pré-processamento para eliminar o ruído. Para tal fim, foram usados filtros gaussiano e de mediana criados com máscara kernel de tamanho 3x3 desenvolvidos em linguagem C no software Microsoft Visual Studio.

A função do filtro gaussiano é atenuar a imagem e reestruturar o valor dos pixels conforme os seus vizinhos a partir de uma função espacial gaussiana. Desse jeito, após a aplicação do filtro, os pontos de ruído são atenuados.

Por outra parte, o filtro de mediana tem como propósito eliminar pixels isolados e, assim, separar grandes extensões de ruído compostas por cadeias de pixels disjuntos. A aplicação do filtro descrito sobre uma imagem é evidenciada na Figura 4.10.

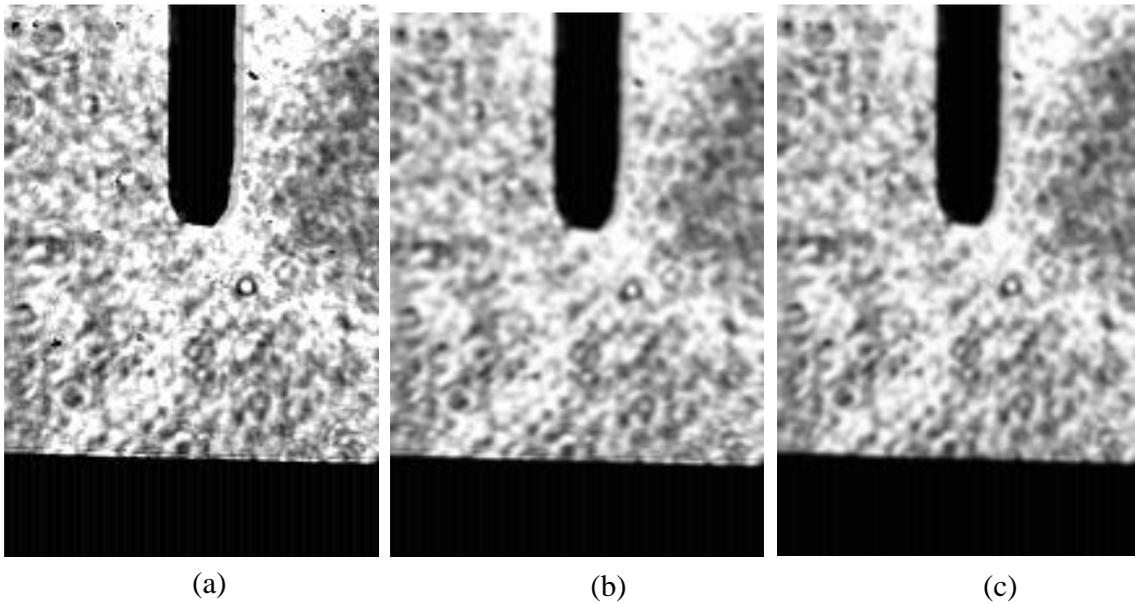


Figura 4.10: Aplicação dos filtros; (a) imagem original; (b) com o filtro gaussiano; (c) com o filtro de mediana.

4.3.4.2. Limiarização ou Binarização das Imagens.

A limiarização das imagens é importante para a extração de características dos modos de transferência metálica porque mudanças no comprimento do arco e na corrente de soldagem fazem que a intensidade luminosa do arco seja alterada. Desse fato, os tons de cinza dos objetos implicados pelo arco mudam também, assim como o ruído no fundo. Por esse motivo, existe a necessidade de um limiar nas imagens para que se assegure a sua correta segmentação.

Partindo do descrito acima, o interesse nesta etapa é omitir o ruído e separar o fundo da imagem, obtendo assim a identificação dos elementos importantes na área de trabalho (arame, metal de adição e metal base). Para isso, foi empregada a limiarização global implementada no software Microsoft Visual Studio. O efeito da limiarização global em uma imagem é descrito na Figura 4.11.

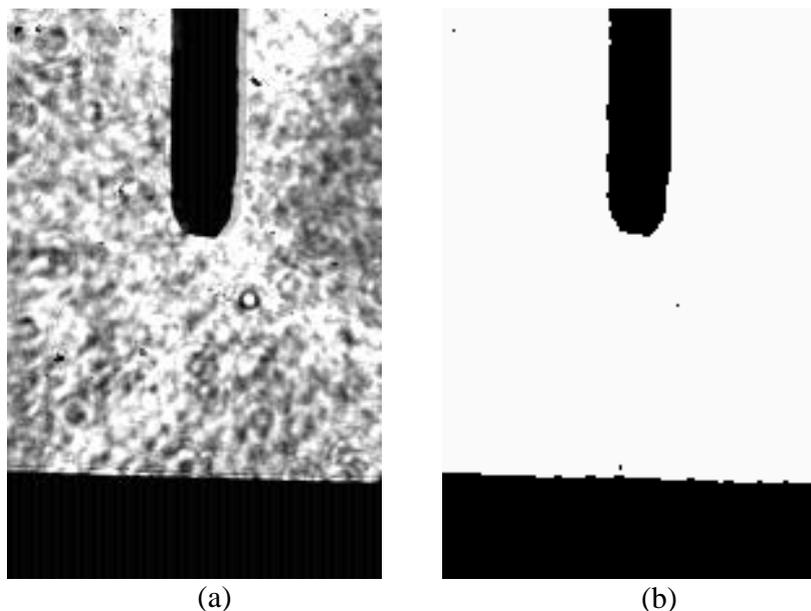


Figura 4.11: Aplicação da limiarização global numa imagem; (a) imagem original; (b) imagem limiarizada.

4.3.5. Identificação das Características das Imagens para a Classificação dos Modos de Transferência.

Uma vez segmentada e limiarizada a imagem, é necessário extrair as diferentes características da região de interesse selecionada com o propósito de identificar os modos de transferência metálica no processo GMAW. O espaço das características pode-se tornar muito grande e complexo devido à grande variabilidade de fenômenos envolvidos na transferência de metal. Deve-se levar em conta, no entanto, que nem todas as características obtidas são igualmente significativas.

Usar um número excessivo de características pode aumentar a complexidade ao identificar os modos de transferência e alterar o desempenho do monitoramento do processo. Será avaliado neste estudo: o contato entre o eletrodo e a peça de trabalho, fator que permite identificar o modo de transferência por curto-circuito e fazer a medição da frequência dos curtos. As características a serem analisadas relacionadas à transferência por voo livre (Globular e Spray) são o tamanho e a frequência de destacamento das gotas.

Para a identificação das características mencionadas acima, nesta pesquisa, foi necessário, em primeira instância, realizar uma etapa de calibração do sistema de captura a fim de garantir que os elementos implicados na transferência metálica (arame e metal base) se

localizem situados na mesma posição em cada experimento, já que, ao trocar o arame ou o metal base entre experimentos, pode ocorrer uma alteração em suas posições levando a medições erradas.

A etapa de calibração consiste basicamente em capturar imagens dos perfis do arame e do metal base durante 1 segundo mediante a técnica de perfilografia. A partir disso, uma imagem é extraída e analisada no software Microsoft Visual Studio para obter a localização do arame. Com respeito à detecção da localização do metal base, é estabelecido um ponto de referência o qual representa o ponto inicial na procura da sua borda. Tal ponto é ajustado na posição (linha, coluna) = 220, 0 da imagem como é apresentado na figura 4.12a.

Com a finalidade de desenhar uma linha imaginária que represente a borda do metal base e sirva de referência para situar no mesmo sítio um tal elemento em cada experimento, se realiza um deslocamento do ponto inicial pixel por pixel ao longo das linhas, em uma direção de baixo para cima até encontrar um pixel com nível de cinza de “0”. A posição anterior a tal pixel representaria o ponto no qual inicia a borda do metal base e a linha será projetada a partir desse ponto pixel por pixel ao longo das colunas na direção da esquerda para a direita como é visto na figura 4.12b.

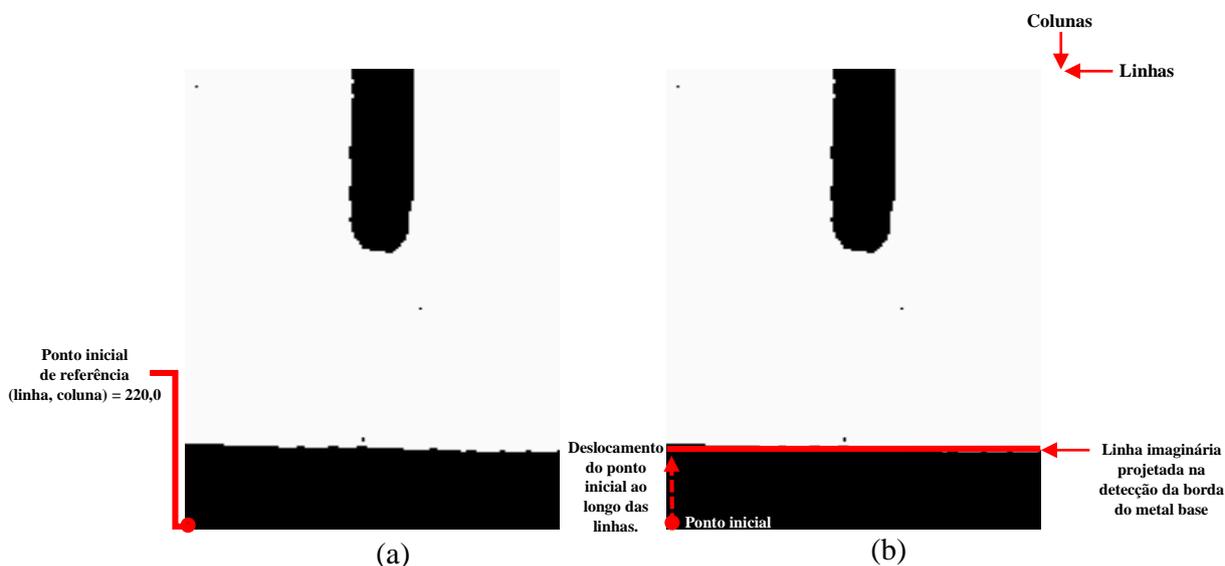


Figura 4.12: Detecção da borda do metal base; (a) localização do ponto inicial; (b) Linha imaginária projetada na borda do metal base.

Para a localização das bordas do arame, é feito um procedimento similar ao realizado para o metal base. O primeiro foi estabelecer o ponto de referência na posição (linha, coluna) = 0, 0 e, a partir desse ponto, percorrer pixel por pixel ao longo das colunas em um sentido de esquerda para direita até encontrar um pixel com nível de cinza de “1”. A posição deste

pixel representa uma das bordas do arame e, apoiado nesta, é projetada uma linha imaginária pixel por pixel ao longo das linhas com uma direção de cima para baixo (vide Figura 4.13a). Para a segunda borda, toma-se como ponto inicial a posição encontrada anteriormente. Com base nela, se recorre de esquerda para direita, pixel por pixel, ao longo das colunas da imagem a fim de encontrar um pixel com nível de cinza de “0”. Desta maneira, é encontrada a localização da borda restante, permitindo, em seguida, projetar a linha como é visto na figura 4.13b.

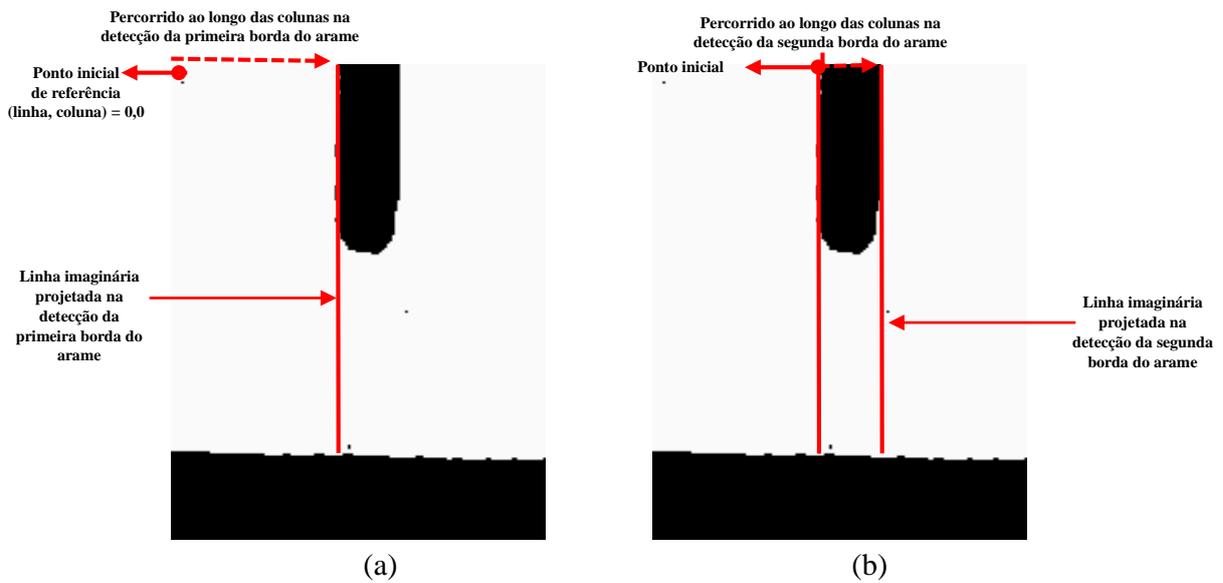


Figura 4.13: Detecção das bordas do elemento arame; (a) Projeção da linha imaginária na detecção da primeira borda do arame; (b) Projeção da linha imaginária na detecção da segunda borda do arame.

Concluída a etapa de calibração, dá-se início ao processo de extração de características dos modos de transferência metálica para seu monitoramento. A primeira característica que entra em estudo é o contato entre o eletrodo e o metal base, que permite identificar o modo de transferência por curto-circuito. Para isso, se estabelece uma área de trabalho representada por uma janela imaginária localizada perto do metal base nos pontos (fileira, coluna) = [(175, 47) - (175, 96) - (206, 47) - (206, 96)], como é evidenciado a seguir na figura 4.14.

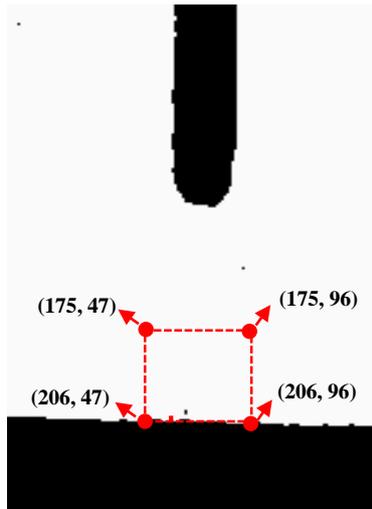


Figura 4.14: Localização dos pontos extremos da janela de trabalho.

Dentro dessa área de trabalho, é analisada cada uma das 31 linhas que compõem a janela, revisando nelas a existência de mais de 10 pixels com nível de cinza “1”. As linhas que apresentem esta situação serão contadas. O fato em que o contador seja igual ao número de linhas (contador = 31) indicaria a presença do contato entre o arame e o metal base, sendo assim relacionado diretamente com a existência de um curto-circuito e atribuindo a este acontecimento o índice de contato arame-peça igual a um (ICAP=1). No caso em que o contador seja diferente do número de linhas (contador \neq 31), o índice de contato arame-peça será atribuído com ICAP=0, indicando a não presença de contato e, portanto, a inexistência do curto-circuito. A utilidade dos índices de contato arame-peça (ICAP) em “1” e “0” consiste em permitir a contagem dos curtos-circuitos exclusivamente a partir da mudança de estados de “0” para “1”. Isso é feito com o objetivo de garantir a não contagem do mesmo curto-circuito várias vezes.

Por outra parte, na extração de características dos modos de transferência por voo livre (globular e spray), também foi necessária a implementação de uma área de trabalho (janela). Para a obtenção da janela, porém, foi fundamental realizar testes exploratórios com o objetivo de analisar o comportamento das gotas transferidas e encontrar um padrão de destacamento que permita uma adequada localização. Com base nesse padrão, os limites da janela de trabalho foram estabelecidos da seguinte forma:

A partir do conhecimento real em termos de medidas dos elementos, sabendo-se que o valor do diâmetro do arame utilizado é de 1,2 mm, é realizada uma contagem e, em seguida, uma

média dos pixels do arame com nível de cinza em “1” ao longo das linhas. Este procedimento é realizado a fim de obter uma correlação entre o diâmetro em milímetros e o número de pixels correspondentes a essa medida. Obtém-se, assim, que para a cifra de 1,2 mm seu valor a nível de pixels é de 33.

Tendo como base a correlação descrita acima, inicia-se a localização da janela de trabalho. O limite inferior é estabelecido a partir da borda do metal base a uma distância em termos de pixels de 11 px, cifra, que por meio do método matemático “*interpolação linear*” e com os dados que 1,2 mm equivale a 33 px é convertida em uma medida em milímetros de 0,4.

Para definir o limite superior da janela de trabalho, a localização do limite inferior é tomada como o ponto de partida. Analisando as imagens adquiridas nos testes exploratórios, selecionou-se a imagem com a gota de maior tamanho, o que permitiu estabelecer que o limite superior encontra-se a uma distância do limite inferior de 2,1 mm com uma equivalência em pixels de 58 px.

De acordo com Modenesi *et al.* (2012), onde é mencionado que no modo de transferência globular o tamanho da gota é aproximadamente 2 vezes o tamanho do arame, o comprimento dos limites superior e inferior da janela é determinado a partir do ponto médio do tamanho total do arame a uma distância de 1,45 mm (40 px) distribuídos em ambas direções (direita, esquerda). Isso garante que a janela tenha as dimensões apropriadas para a extração de características, tais como o tamanho e a frequência de destacamento das gotas. Na figura 4.15, é apresentado o desenho da janela e as dimensões equivalentes descritas.

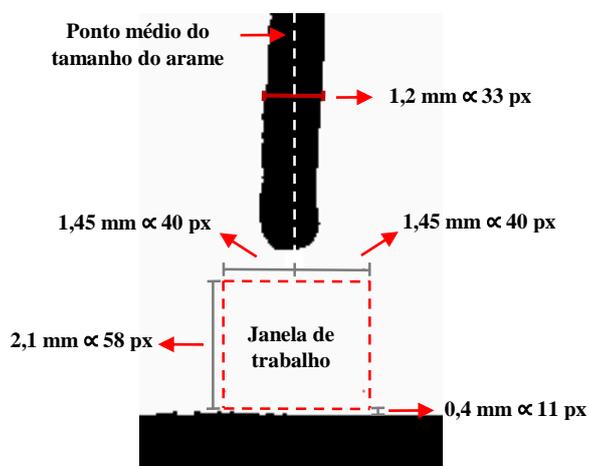


Figura 4.15: Desenho e dimensões da área de trabalho.

A estratégia implementada para extrair informações correspondentes ao tamanho da gota é baseada na análise dos pixels com níveis de cinza em “1” em cada linha da janela de trabalho. Isso é feito com a intenção de encontrar em qual linha existe o maior número de pixels com nível de cinza em “1” e, assim, estabelecer o valor encontrado como o diâmetro aproximado da gota em escala de pixels. A seguir, a figura 4.16 expõe o descrito anteriormente.

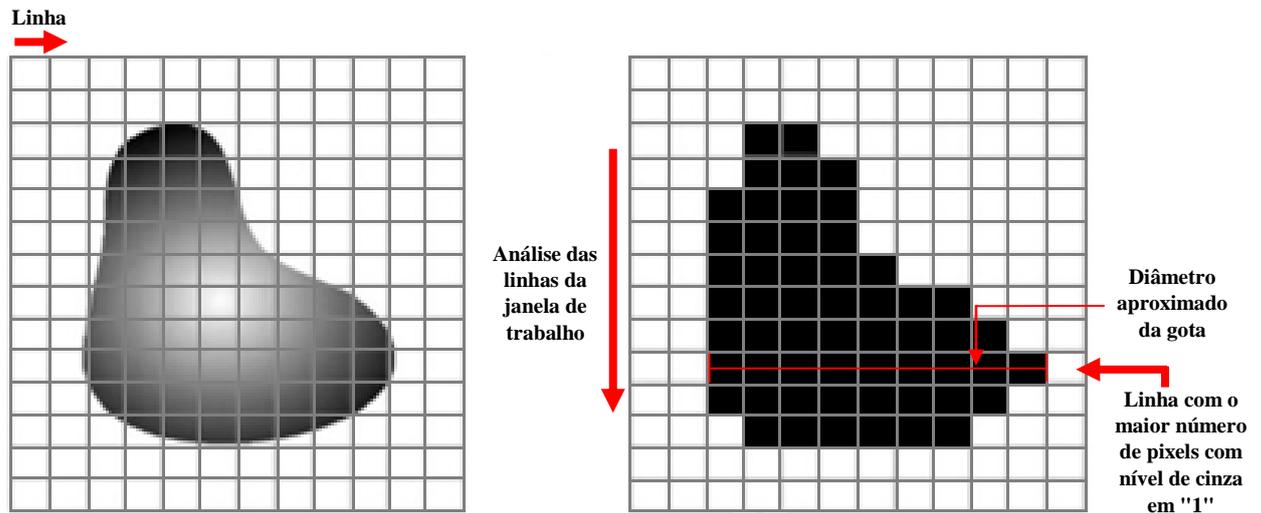


Figura 4.16: Estimativa do diâmetro aproximado da gota em termos de pixels.

Para determinar o tamanho da gota, é necessário estabelecer as gotas de metal fundido como corpos geométricos de superfície esférica, a fim de designar uma equivalência entre o tamanho da gota e o cálculo do volume de uma esfera realizado pela equação 4.1.

$$v = \frac{4}{3} \pi R^3, \quad \text{onde } R = \text{diâmetro}/2 \quad (4.1)$$

A partir disso, tem-se um valor aproximado do diâmetro da gota em termos de pixels. Ainda que esse valor seja nestas unidades, é necessário convertê-lo em uma medida em milímetros. Para isso, usa-se o mesmo método empregado no desenho da janela de trabalho, onde o diâmetro do arame de 1,2 mm e sua equivalência em pixels são tomados como valores de referência para calcular esta medida através de uma regra de três simples. Por outro lado, na mesma janela onde é realizado o cálculo do tamanho da gota para logo ser comparado com o diâmetro do arame e classificar se o processo encontra-se na transferência globular ou na transferência spray, também é efetuada a estimativa da frequência de destacamento, a qual é calculada pela contagem das gotas transferidas que passam pela janela.

4.3.6. Implementação do Sistema e Desenvolvimento do Relatório de Dados do Processo na Interface de Usuário.

Uma vez concluídas as etapas de aquisição, tratamento e extração de características dos sinais elétricos e das imagens, procede-se à implementação do sistema de monitoramento integrado pela visualização de dados em uma interface gráfica do usuário.

O primeiro passo na implementação do sistema é comunicar as duas ferramentas software nas quais são executadas as tarefas programadas para o monitoramento do processo. Estas ferramentas são a plataforma Microsoft Visual Studio, que é a responsável pelo tratamento e pelo fornecimento de informações a partir das imagens, e o software labVIEW, onde se executam a aquisição e o processamento dos sinais elétricos, como também o desenvolvimento da interface gráfica de usuário. O enlaçamento entre os referidos programas foi realizado através de comunicação serial com uma taxa de transferência de dados de 9600 bps.

Ao programa desenvolvido no software de instrumentação virtual labVIEW, chega, proveniente da plataforma Microsoft Visual Studio, um vetor composto de 4 posições. Cada posição do vetor contém uma característica diferente que permitirá o monitoramento do processo. A primeira posição do vetor é designada para a classificação do modo de transferência e é feita a partir do índice de modo de transferência (IMT). No caso em que a primeira janela de trabalho detecta a existência de contato entre o arame e o metal base, tal compartimento do vetor será preenchido com o índice de modo de transferência em “1”, informando que o processo está no modo de transferência de curto-circuito.

Por outro lado, se não houver presença desse contato, a segunda janela de processamento das imagens entra para fazer seu trabalho. Nela, é calculado o diâmetro aproximado da gota em termos de pixel para ser comparado com o tamanho em pixels do arame. Se o resultado indica que o diâmetro da gota excede o tamanho do arame, esse fato será atribuído ao modo de transferência globular representado pelo IMT em “2”. Se ocorrer o oposto, ou seja, que o diâmetro da gota seja menor ou igual ao tamanho do arame, este evento será equivalente ao modo de transferência por spray e será declarado com o IMT em “3”.

A segunda posição do vetor representa a frequência de curtos-circuitos. Esta caixa só é ativada quando o processo está no modo de transferência por curto-circuito (Primeira posição do vetor em “1”). O cálculo da quantidade de curtos é feito exclusivamente a partir

da mudança de estado da janela de “0” para “1”, como foi descrito anteriormente no item “**Identificação de características de imagens para uma classificação de dois modos de transferência**”. Por sua vez, as posições três e quatro do vetor são reservadas para o tamanho da gota e a frequência de destacamento, respectivamente, calculadas segundo o exposto anteriormente.

A Figura 4.17 apresenta a interface gráfica do usuário a qual é estruturada em 5 partes. Na primeira parte, se representa a seção de seleção dos parâmetros do processo (tensão de soldagem, velocidade de soldagem, velocidade de alimentação do arame e tempo de soldagem) e os botões de controle do processo. As seções dois e três representam o controle de direção da mesa linear no qual se deseja soldar (para frente ou para trás) e a comunicação serial entre o algoritmo de extração de características a partir das imagens desenvolvido no Microsoft Visual Studio e o sistema de relatório de dados.

Finalmente, nas seções quatro e cinco, pode-se realmente observar o comportamento do processo. Nestas seções, tem-se uma tabela de exibição onde os dados são visualizados a cada 300 ms, indicadores luminosos que mostram o modo de transferência no qual o processo se encontra e um gráfico onde os sinais elétricos podem ser escolhidos e observado seu comportamento. Cabe ressaltar que a tabela descreve informação importante para a determinação da estabilidade do processo, como é o caso dos valores médios da tensão e corrente, velocidade de alimentação do arame e a frequência dos curtos representados pela caixa “Curtos / Tempo”.

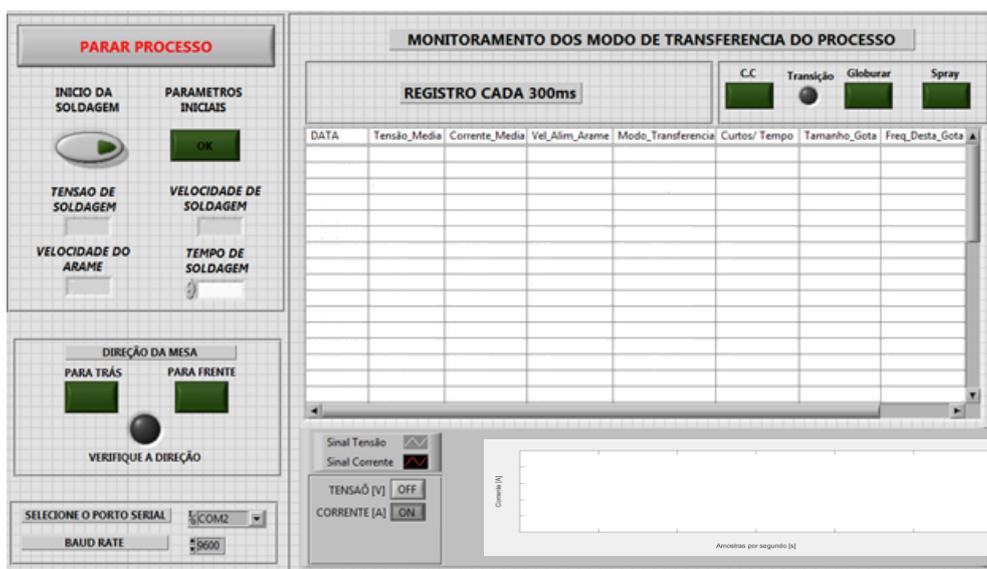


Figura 4.17: Interface gráfica do usuário desenvolvida para monitoramento em tempo real do processo.

A figura 4.18 apresentada a seguir representa o diagrama do sistema em tempo real implementado para o desenvolvimento do trabalho.

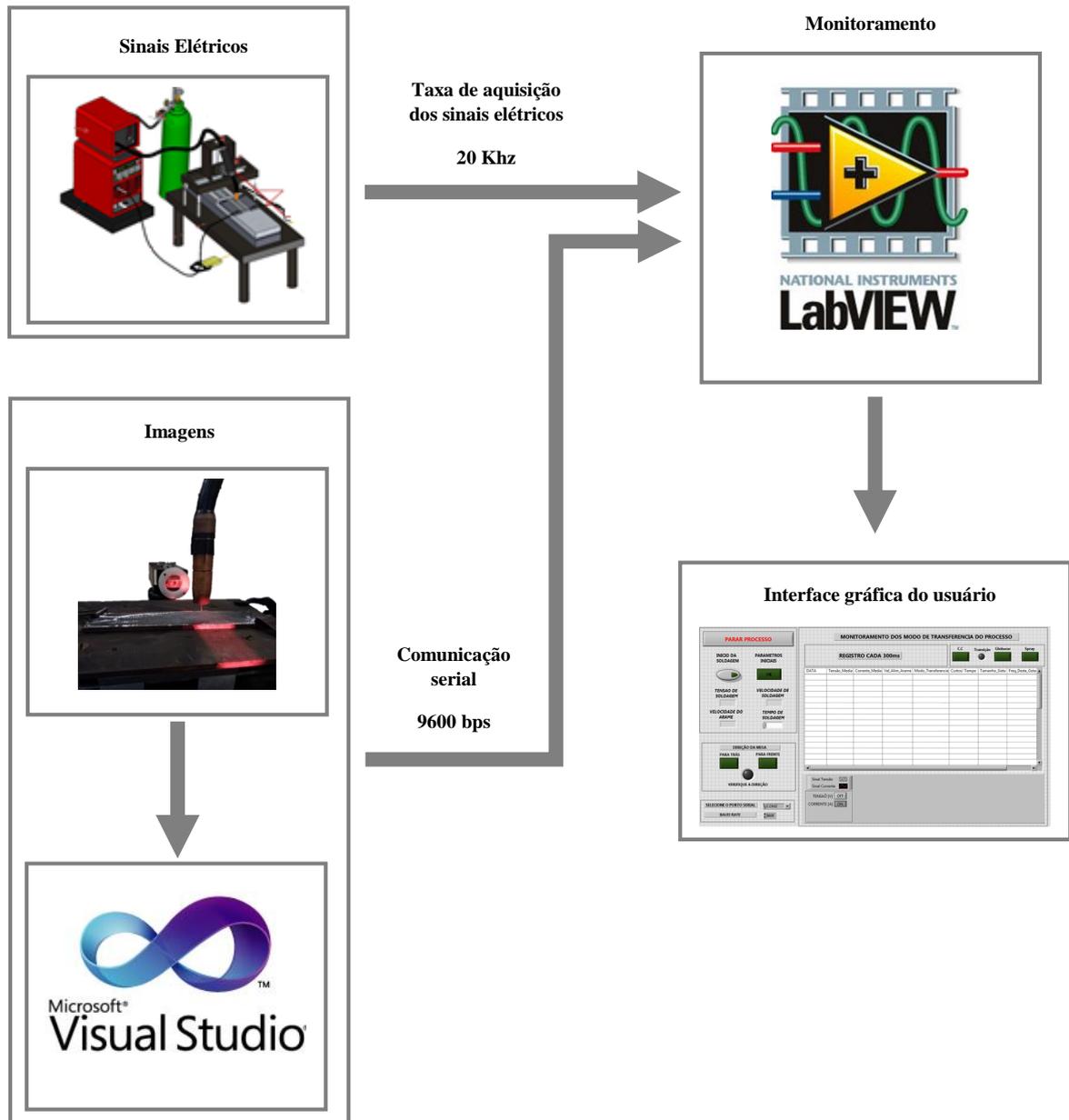


Figura 4.18: Diagrama do sistema em tempo real desenvolvido neste trabalho.

5. RESULTADOS

No presente capítulo, aborda-se a descrição dos resultados alcançados no referencial metodológico exposto anteriormente. Esta seção encontra-se dividida em duas partes: a primeira com os resultados do projeto, ou seja, a descrição dos obtidos das etapas apresentadas na metodologia proposta; e a segunda com os resultados de implementação, onde se encontram os obtidos no sistema em operação, ou seja, os resultados conseguidos no monitoramento em tempo real dos principais modos de transferência metálica no processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*).

5.1. RESULTADOS DO PROJETO

5.1.1. Aquisição dos Sinais Elétricos de Tensão e Corrente de Soldagem

A seguir, são apresentados os sinais elétricos de tensão e corrente de soldagem obtidos dos experimentos realizados da configuração 1 com arame AWS A5.18 ER70S-6 e uma mistura de 96% Argônio + 4% CO₂ para proteção gasosa. Vale ressaltar que os sinais elétricos são obtidos a partir do número da amostra 2000, isso é devido ao tempo que leva para abrir o arco elétrico e o tempo para estabilizar o processo de aquisição.

A figura 5.1 refere-se aos sinais elétricos obtidos variando a tensão e mantendo constantes a alimentação do arame e a velocidade de soldagem. No sinal de tensão na figura 5.1, o comportamento do processo pode ser observado mais claramente à medida que a tensão é aumentada. Na figura, é evidente como, no início, ao apresentar baixas tensões, manifesta-se uma maior presença de flutuações nos sinais. Este fato pode ser atribuído diretamente à existência de curtos-circuitos. Além disso, pode-se observar que, à medida que a tensão aumenta, essas oscilações diminuem até o ponto de presenciar um sinal praticamente estável.

Já a figura 5.2 representa o comportamento dos sinais elétricos alcançado no experimento com velocidade de alimentação do arame variável e mantendo fixas a tensão e a velocidade de soldagem. Neste caso, acontece o contrário ao descrito anteriormente na figura 5.1, já que, por ter uma menor velocidade de alimentação de arame, isso gera uma menor quantidade de contatos entre o arame e o metal base, como pode ser visto na primeira seção do gráfico de tensão. Observa-se também que o incremento da velocidade de alimentação tem influência direta no aumento de curtos-circuitos no processo.

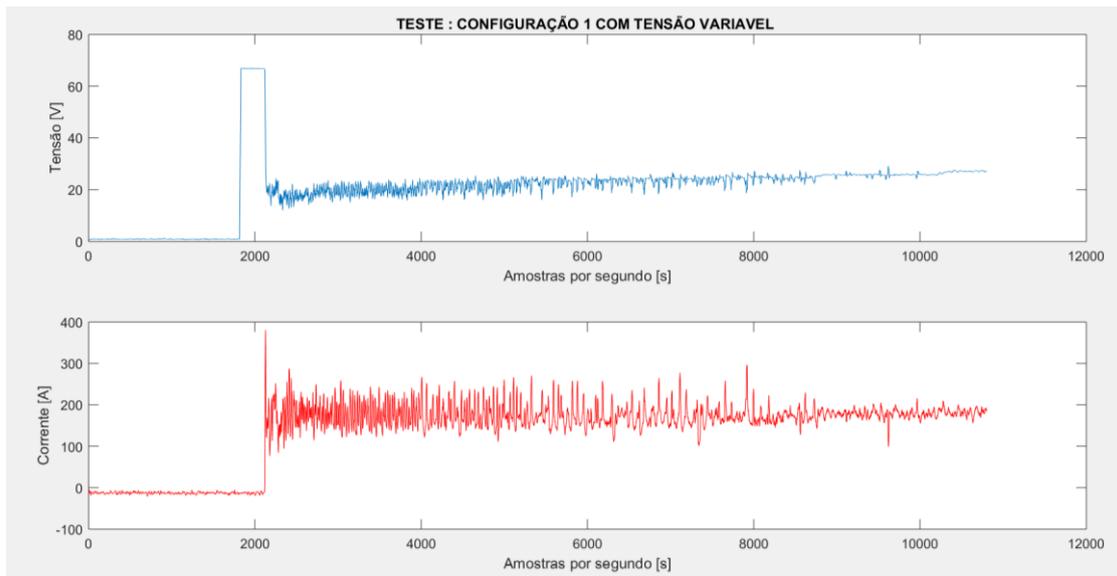


Figura 5.1: Sinais elétricos obtidos no teste com tensão variável.

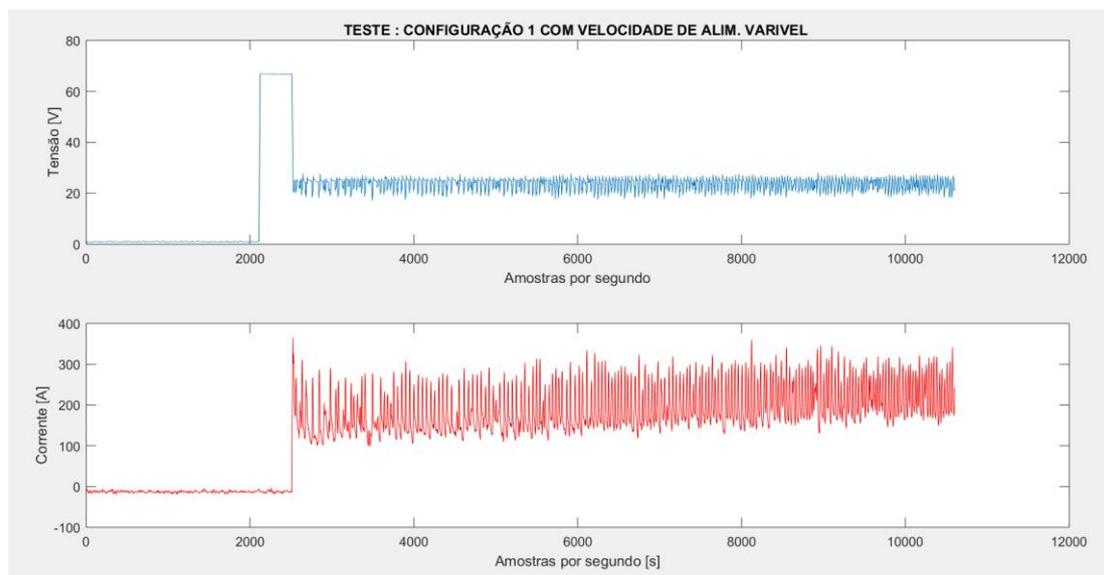


Figura 5.2: Sinais de tensão e corrente de soldagem alcançados no teste com velocidade de alimentação do arame variável.

As figuras 5.3 e 5.4 apresentam os resultados obtidos dos testes com velocidade de soldagem variável e com variação dos três parâmetros (tensão, velocidade de alimentação do arame e velocidade de soldagem), respectivamente. Na figura 5.3, pode-se evidenciar que os sinais apresentam um padrão constante em termos de sua forma. Isso é devido à velocidade de soldadura não ter um efeito significativo no comportamento do processo. De outra parte, na figura 5.4, é refletido o comportamento da tensão e da corrente de soldagem sobre a variabilidade dos três parâmetros.

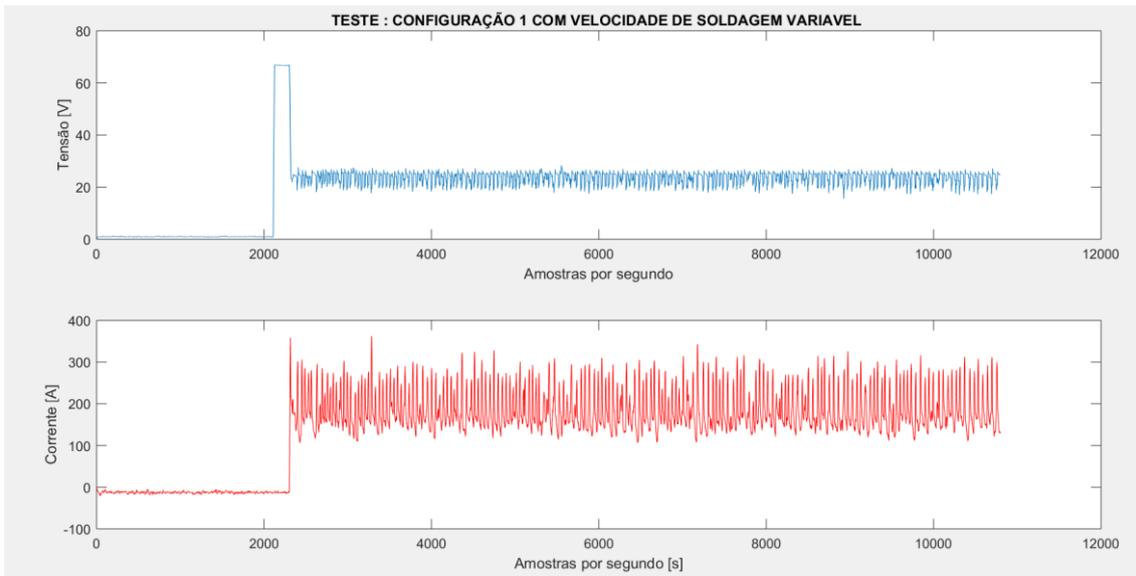


Figura 5.3: Resultados alcançados do experimento com velocidade de soldagem variável.

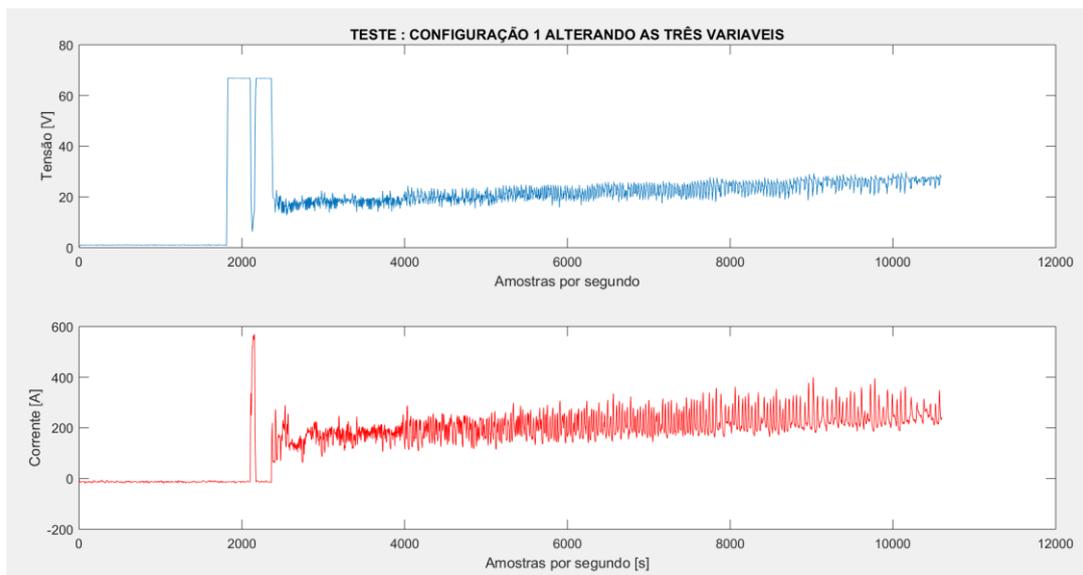


Figura 5.4: Sinais elétricos alterando as três variáveis (tensão, velocidade de alimentação do arame e velocidade de soldagem).

5.1.2. Identificação de Características de Sinais Elétricos para a Classificação dos Modos de Transferência

A característica em análise a partir dos sinais elétricos foi o contato entre o arame e o metal base, fato que, basicamente, está diretamente relacionado aos curtos-circuitos no processo e permite a contagem do fenômeno. As figuras 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9 exibem o sinal de corrente

do teste da configuração 1 com tensão variável e sua respectiva fração utilizada na comprovação da contagem correta dos curtos-circuitos. As frações foram localizadas em intervalos entre as amostras de 2000 até 10000.

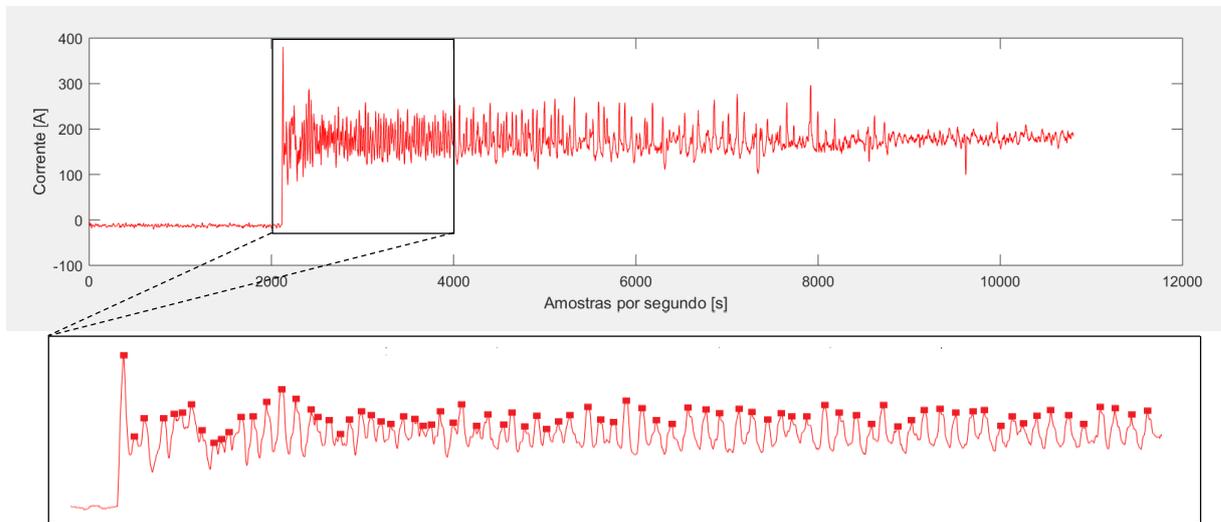


Figura 5.5: Análise do sinal de corrente na primeira fração.

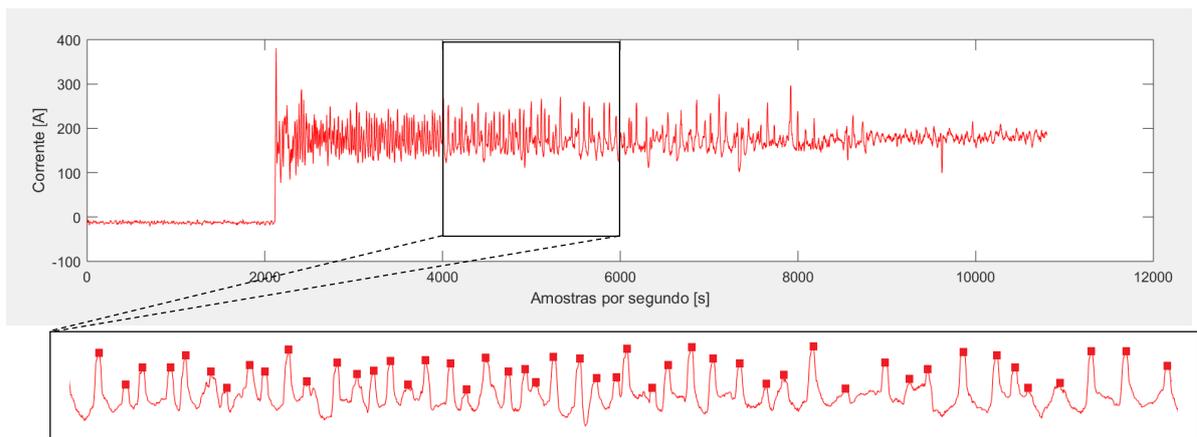


Figura 5.6: Análise do sinal de corrente na segunda fração.

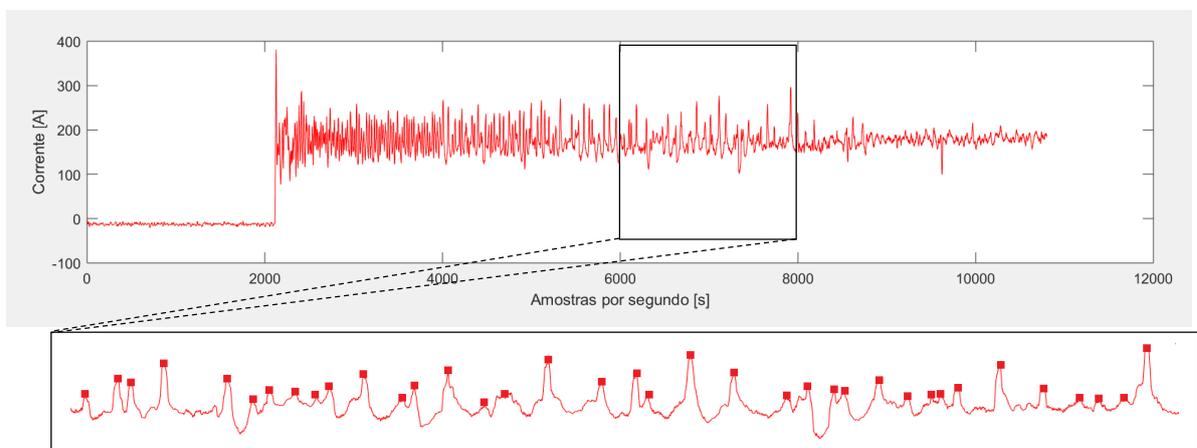


Figura 5.7: Análise do sinal de corrente na terceira fração.

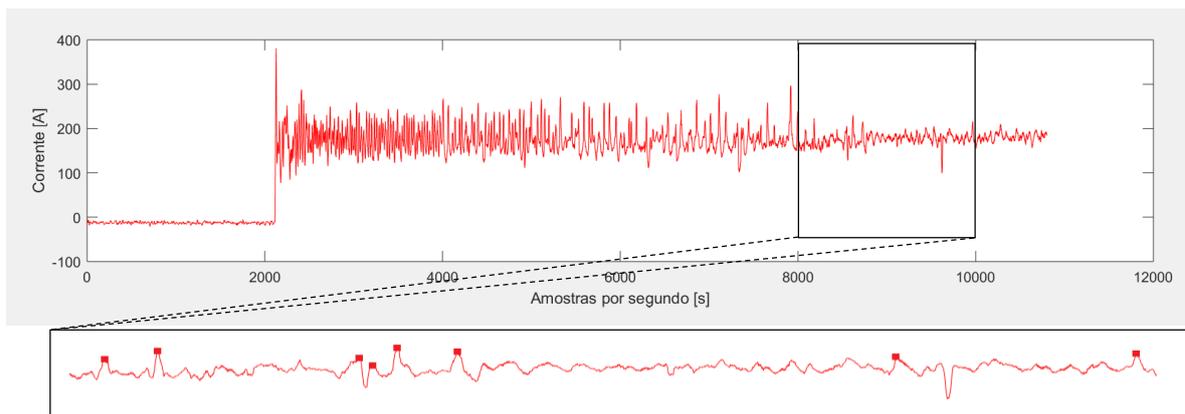


Figura 5.8: Análise do sinal de corrente na quarta fração.

A seguir, na tabela 5.1, são mostrados os valores obtidos pelo bloco *peak detector* em labVIEW e os valores conseguidos a partir do fracionamento do sinal. Tais valores são comparados a fim de conhecer a efetividade do método empregado, obtendo um resultado bem sucedido.

Tabela 5.1: Comparativo entre os resultados oferecidos pelo algoritmo em labVIEW e pelo fracionamento do sinal corrente.

Fração do sinal	Resultado do fracionamento	Resultado em labVIEW a cada 400ms
2000 - 4000	80	17
		23
		19
		20
		Total: 80
4000 - 6000	48	13
		15
		11
		9
		Total: 49
6000 - 8000	37	11
		9
		10
		5
		Total: 35
8000 - 10000	8	3
		2
		2
		1
		Total: 8
Total:	173	Total: 172

5.1.3. Identificação de Características a partir de Imagens para a Classificação dos Modos de Transferência

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos na identificação do modo de transferência por curto-circuito. As tabelas 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5 representam os resultados para testes realizados com arame AWS A5.18 ER70S-6 e gás de proteção 96 % Ar + 4% CO₂.

Tabela 5.2: Resultado obtido do teste 1.

Teste: configuração 1: tensão variável								
Sequência de imagens binarizadas:								
								
Índices obtidos do contato entre o arame e o metal base (sim: 1 - não: 0):								
0	1	1	0	0	0	0	0	1
Resultado da contagem de curtos-circuitos na sequência (mudança de estados 0 para 1):								
2								

Tabela 5.3: Resultado obtido do teste 2 com velocidade de alimentação de arame variável e mantendo fixas a tensão e a velocidade de soldagem

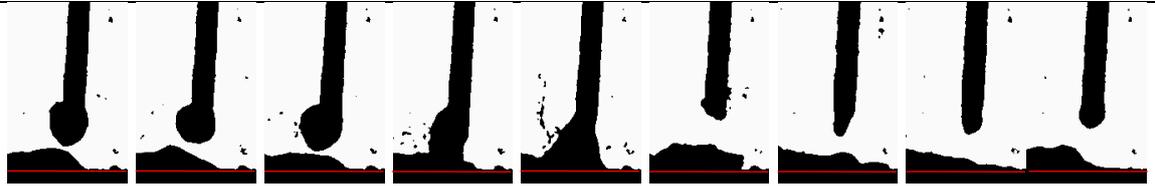
Teste: configuração 2: velocidade de alimentação do arame variável								
Sequência de imagens binarizadas:								
								
Índices obtidos do contato entre o arame e o metal base (sim: 1 - não: 0):								
0	0	0	1	1	0	0	0	0
Resultado da contagem de curtos-circuitos na sequência (mudança de estados 0 para 1):								
1								

Tabela 5.4: Resultado obtido do teste 3 a partir da configuração 3 para a extração de características do modo de transferência por curto-circuito

Teste: configuração 3: velocidade de soldagem variável								
Sequência de imagens binarizadas:								
Índices do contato entre o arame e o metal base (sim: 1 - não: 0):								
0	1	0	0	1	1	1	0	0
Resultado da contagem de curtos-circuitos na sequência (mudança de estados 0 para 1):								
2								

Tabela 5.5: Resultados obtidos do teste 4 com mudanças na tensão, velocidade de alimentação do arame e velocidade de soldagem

Teste: configuração 4: com mudanças nos três parâmetros (Tensão, Vel. Alim. Arame, Vel. Soldagem)								
Sequência de imagens binarizadas:								
Índices do contato entre o arame e o metal base (sim: 1 - não: 0):								
0	1	1	0	0	0	0	1	1
Resultado da contagem de curtos-circuitos na sequência (mudança de estados 0 para 1):								
2								

As tabelas 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9 mostram os resultados obtidos para experimentos realizados a partir dos materiais: arame inoxidável 410 NiMo e mistura de 94% Ar + 6% CO₂ para a proteção gasosa.

Tabela 5.6: Resultado obtido do teste 1 com tensão variável

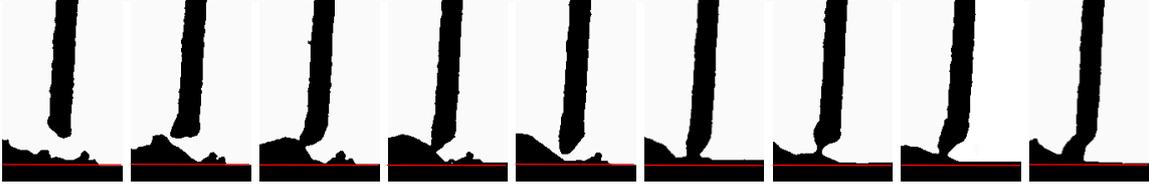
Teste: configuração 1: tensão variável									
Sequência de imagens binarizadas:									
									
Índices do contato entre o arame e o metal base (sim: 1 - não: 0):									
0	0	1	1	0	1	1	1	1	1
Resultado da contagem de curtos-circuitos na sequência (mudança de estados 0 para 1):									
2									

Tabela 5.7: Resultado obtido do teste 2 com velocidade de alimentação de arame variável e mantendo fixas a tensão e a velocidade de soldagem

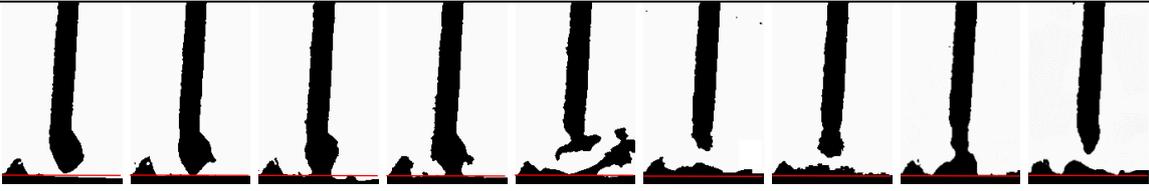
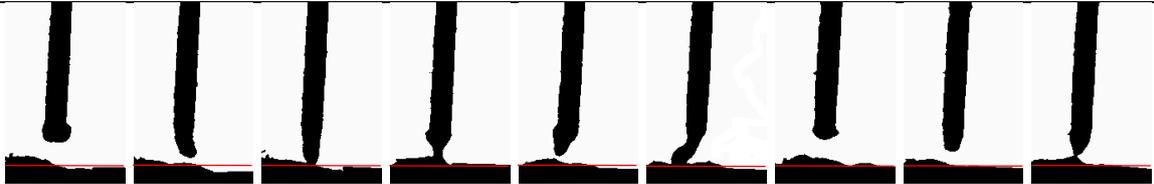
Teste: configuração 2: velocidade de alimentação do arame variável									
Sequência de imagens binarizadas:									
									
Índices do contato entre o arame e o metal base (sim: 1 - não: 0):									
0	1	1	1	0	0	0	1	0	0
Resultado da contagem de curtos-circuitos na sequência (mudança de estados 0 para 1):									
2									

Tabela 5.8: Resultado obtido do teste 3 a partir da configuração 3 para a extração de características do modo de transferência por curto-circuito

Teste: configuração 3: velocidade de soldagem variável								
Sequência de imagens binarizadas:								
								
Índices do contato entre o arame e o metal base (sim: 1 - não: 0):								
0	1	1	1	0	0	0	1	1
Resultado da contagem de curtos-circuitos na sequência (mudança de estados 0 para 1):								
2								

Tabela 5.9: Resultados obtidos do teste 4 com mudanças na tensão, velocidade de alimentação do arame e velocidade de soldagem

Teste: configuração 4: com mudanças nos três parâmetros (Tensão, Vel. Alim. Arame, Vel. Soldagem)								
Sequência de imagens binarizadas:								
								
Índices do contato entre o arame e o metal base (sim: 1 - não: 0):								
0	0	1	1	0	1	0	0	1
Resultado da contagem de curtos-circuitos na sequência (mudança de estados 0 para 1):								
3								

A seguir, são expostos os resultados obtidos da análise realizada na segunda janela de trabalho. A análise permitiu a extração de características como o volume e a frequência de destacamento das gotas, tornando-se, assim, os fatores que permitiram a identificação dos modos de transferência globular e spray.

A Tabela 5.10 apresenta os resultados obtidos no experimento com a configuração 1 (tensão variável) e utilizando como materiais o arame AWS A5.18 ER70S-6 e uma mistura de 96 %Ar + 4%CO₂ para a blindagem gasosa. Esse resultado mostrou a identificação do modo de transferência globular a partir de uma comparação entre o diâmetro do arame e o volume aproximado da gota de acordo com o método exposto na metodologia. Encontrou-se, na referida comparação, que o tamanho aproximado da gota, diretamente relacionado ao volume encontrado, é maior que o tamanho do arame. A literatura diz que tal evento está associado à transferência globular.

Na tabela 5.11, podem-se observar os resultados da identificação do modo de transferência spray. A referida identificação foi feita seguindo o mesmo método descrito acima. Neste caso, porém, o resultado mostrou que o tamanho aproximado da gota é menor que o tamanho do arame, portanto, e de acordo com a literatura, tal acontecimento é relacionado com a transferência spray.

Tabela 5.10: Resultado obtido do tamanho da gota no modo de transferência globular

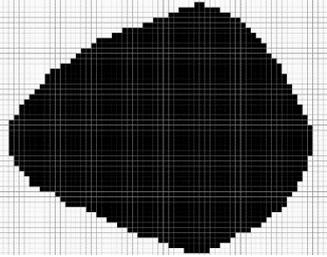
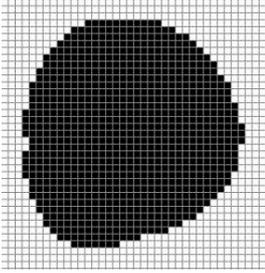
Teste: configuração 1: tensão variável		
Sequência de imagens binarizadas:		
		
Análise da gota na janela de trabalho:		
	Diâmetro em Pixels = 60 px. (Valor neste teste)	
	Conversão de pixels para milímetros do diâmetro:	
	Diâmetro arame 1,2 mm → 33 px (valor fixo)	
	Diâmetro gota em mm ← 60 px (diâmetro em px)	
	Diâmetro gota em mm = 2,18 mm.	
Raio = 1,09 mm		
Volume = $\frac{4}{3} * \pi * 1,09\text{mm}^3 = 5,42 \text{ mm}^3$ →		
Tamanho da gota		
Identificação do modo de transferência de metal:		
Diâmetro gota > Diâmetro arame	⊗	Modo de transferência globular
Diâmetro gota ≤ Diâmetro arame	⊙	-

Tabela 5.11: Resultado obtido do tamanho da gota no modo de transferência spray

Teste: configuração 1: tensão variável	
Sequência de imagens binarizadas:	
	
Análise da gota na janela de trabalho:	
	Diâmetro em Pixels = 32 px. (Valor neste teste)
	Conversão de pixels para milímetros do diâmetro:
	Diâmetro arame 1,2 mm → 33 px Diâmetro gota em mm ← 32 px (diâmetro em px)
	Diâmetro gota em mm = 1,16 mm. Raio = 0,58 mm Volume = $\frac{4}{3} * \pi * 0,58^3 = 0,81\text{mm}^3$ → Tamanho da gota
Identificação do modo de transferência de metal:	
Diâmetro gota > Diâmetro arame	<input type="radio"/> -
Diâmetro gota ≤ Diâmetro arame	<input checked="" type="radio"/> Modo de transferência spray

As Tabelas 5.12 e 5.13 apresentadas abaixo representam os resultados obtidos em relação à frequência de destacamento de gotas de metal fundido. A Tabela 5.12 mostra a contagem de gotas no modo de transferência globular, enquanto, na Tabela 5.13, o cálculo da frequência de destacamento das gotas no modo de transferência spray é exibida.

Tabela 5.12: Resultado da frequência de destacamento das gotas no modo de transferência globular

Teste: configuração 1: tensão variável								
Sequência de imagens binarizadas:								
								
Deteção da presença da gota na janela de trabalho (sim: 1 - não: 0)								
0	0	0	0	0	0	0	1	0
Resultado da frequência de destacamento das gotas na sequência:								
1								

Tabela 5.13: Resultado da frequência de destacamento das gotas no modo de transferência spray

Teste: configuração 1: tensão variável								
Sequência de imagens binarizadas:								
								
Detecção da presença da gota na janela de trabalho (sim: 1 - não: 0)								
1	0	1	0	1	0	1	1	1
Resultado da frequência de destacamento das gotas na sequência:								
6								

5.2. RESULTADOS DE IMPLEMENTAÇÃO

Uma vez descritos os resultados obtidos nas etapas apresentadas na metodologia, tem-se a exposição dos resultados obtidos na implementação do sistema de monitoramento em tempo real dos modos de transferência metálica no processo GMAW.

5.2.1. Implementação do Sistema e Desenvolvimento do Relatório de Dados do Processo na Interface de Usuário.

Nas Figuras 5.9, 5.10 e 5.11, é mostrado como, na interface gráfica do usuário, são apresentados os resultados obtidos no monitoramento do experimento com configuração 1 (tensão variável; velocidade de alimentação do arame e velocidade de soldagem constantes), arame AWS A5.18 ER70S-6 e proteção gasosa com 96% Argônio + 4% CO₂. Na seção de seleção dos parâmetros da interface, os valores iniciais dos parâmetros para o desenvolvimento do experimento podem ser observados. A tensão foi iniciada em 18 V e aumentada em intervalos de 1,2 V a cada 1,2 segundos até o valor final de 30 V. Por outro lado, tanto a velocidade de alimentação do arame quanto a velocidade de soldagem foram fixadas em 5,5 m/min e 8 mm/s, respectivamente. Na interface, também pode ser observado o sentido em que a mesa linear foi deslocada, o que foi na direção “Para trás”.

Em relação aos dados adquiridos durante o teste, a interface apresenta uma tabela que obedece à tarefa de registrar de forma ordenada os resultados alcançados a partir da metodologia proposta. Os dados mostrados na tabela são registrados a cada 300 ms: isso foi feito a fim de permitir uma melhor visualização do comportamento do processo, já que, se

fosse feito um registro “dado por dado”, a quantidade de informação fornecida não permitiria facilmente o seguimento do comportamento do processo, dificultando seu monitoramento. Na tabela, pode-se observar como o registro, por causa da instabilidade gerada no processo enquanto o arco elétrico é aberto, leva um tempo para mostrar a informação. Este tempo é representado no início do monitoramento pela mensagem “Estabilização”. Após a estabilização, o registro das informações referentes a cada modo de transferência identificado é iniciado. Para o modo de transferência por curto-circuito, são apresentados os valores médios da corrente e da tensão, bem como a frequência dos curtos. Nos modos de transferência globular e spray, as informações fornecidas indicam os valores médios de corrente e tensão e o tamanho e a frequência do destacamento da gota. Na figura 5.12, é apresentado o cordão obtido do experimento.

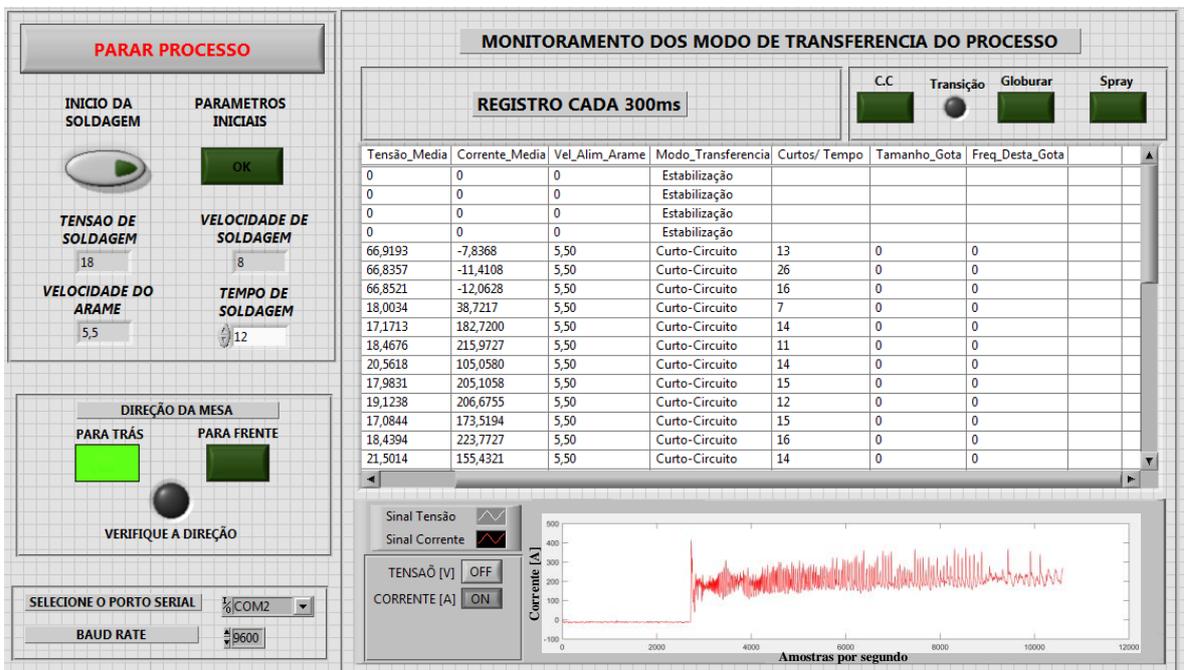


Figura 5.9: Resultado da implementação do sistema de monitoramento dos modos de transferência metálica no processo GMAW - Parte 1.

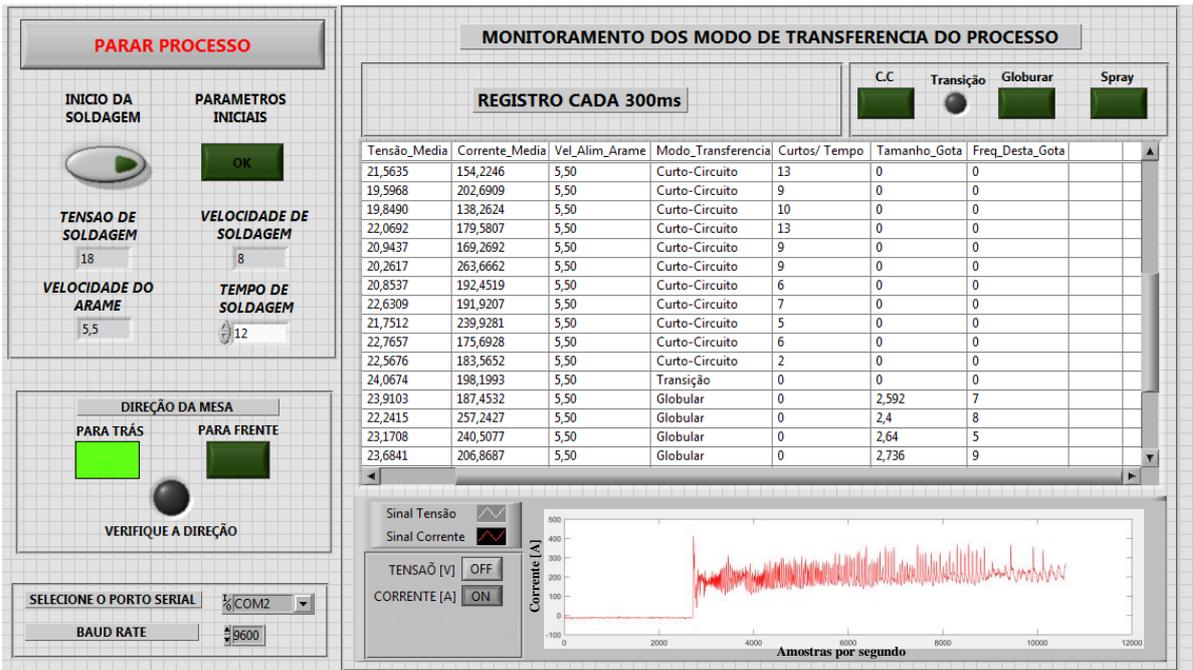


Figura 5.10: Resultado da implementação do sistema de monitoramento dos modos de transferência metálica no processo GMAW - Parte 2.

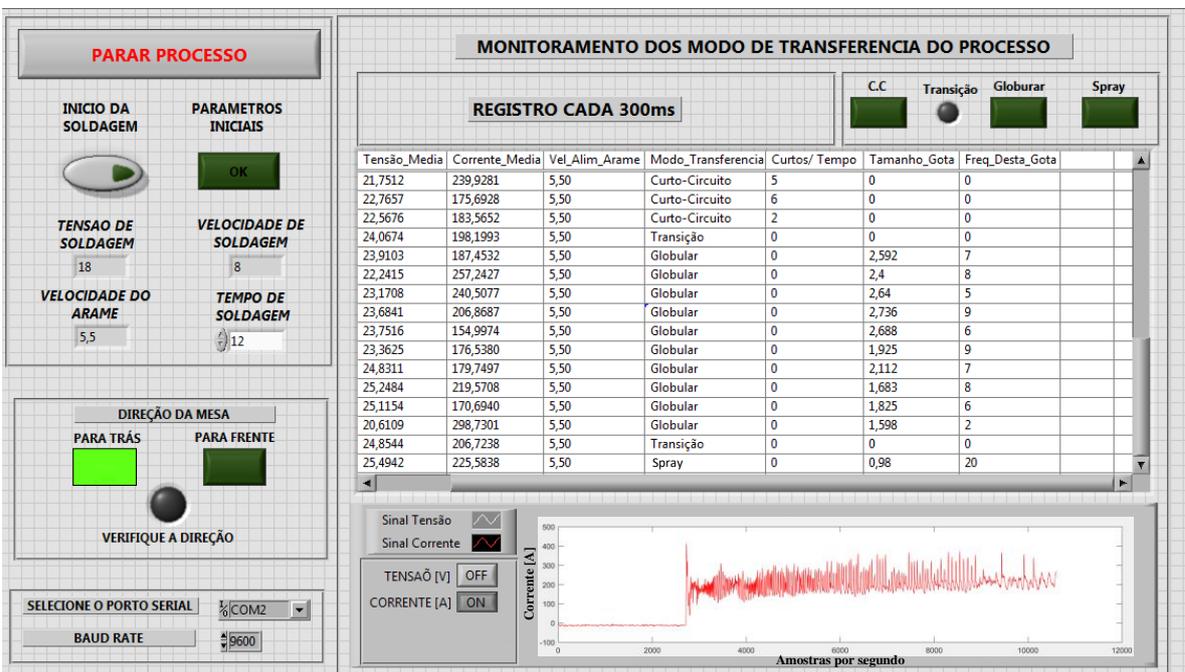


Figura 5.11: Resultado da implementação do sistema de monitoramento dos modos de transferência metálica no processo GMAW - Parte 3.



Figura 5.12: Cordão obtido do experimento.

6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, é apresentada a discussão dos resultados alcançados a partir de diversos estudos e experiências realizadas no trabalho em questão. O sistema implementado para o monitoramento do processo integrou vários elementos e constituiu-se desta maneira em um trabalho de complexidade elevada, devido à grande quantidade de componentes necessários para serem sincronizados que possibilitaram o cumprimento dos objetivos propostos.

Para o desenvolvimento do sistema encarregado do monitoramento que integra todos os componentes de hardware (mesa de deslocamento linear, computador, sistema de comunicação e controle da fonte de soldagem, sistema de aquisição dos sinais elétricos e sistema de aquisição de imagens) e do software responsável pela extração de características próprias de cada modo de transferência, do processamento de imagens e da visualização da interface de usuário, fez-se necessário analisar e modificar o funcionamento de cada aspecto, em favor da identificação de compatibilidade com as necessidades e condições de soldagem. Para isso, foi preciso adquirir experiência em todas as atividades envolvidas por meio de sistemas de aquisição e transmissão de dados, comunicação e configuração da fonte de soldagem e aquisição e processamento de imagens. Desta forma, desenvolveu-se, a partir da experiência e do conhecimento aprendido, o software de integração e implementação que gerencia todos os componentes e procedimentos que compõem o sistema de monitoramento dos modos de transferência metálica estudados no processo GMAW.

A partir dos resultados, pode-se aceitar e aprofundar a ideia geral que estabelece a existência de uma relação de dependência entre os fenômenos físico-elétricos e os modos de transferência metálica. Foi possível observar a influência dos parâmetros operacionais, como a tensão de soldagem e a velocidade de alimentação do arame na formação dos modos de transferência de metal de adição. Esse fato comprova-se neste trabalho através da

aquisição e da verificação dos sinais elétricos em conjunto com as imagens adquiridas para a identificação das diferentes características da transferência que ocorrem durante o processo de soldagem GMAW em posição plana.

Sem dúvida, o método mais popular para identificar o tipo de transferência de metal e o momento em que ocorre a transferência é a análise oscilográfica dos sinais elétricos. Em muitos casos, é importante conhecer a relação entre o metal transferido e os sinais, já que o conhecimento dessa interação torna-se relevante quando o objetivo é a otimização e o controle dos processos. Com base nisso, a análise dos sinais que foi realizada contribuiu para a extração de características, permitindo reproduzir o comportamento de alguns modos de transferência e facilitando seu monitoramento. Por exemplo, durante a transferência por curto-circuito, quando a gota de metal fundido está começando a se desenvolver, a tensão oscila em torno de um valor médio, mas tende a zero quando o metal fundido toca a poça de fusão. Esse fenômeno gera um pico no sinal de tensão e na corrente de soldagem, o qual encontra-se ligado à presença de curtos-circuitos e a sua contagem, a partir da qual pretende-se obter um indicador que forneça informações sobre a estabilidade do processo.

A informação extraída dos sinais elétricos, no entanto, não é suficiente para conseguir um monitoramento completo do processo. Isso acontece porque os sinais, no caso em que o processo está em transferência de metal por voo livre (globular ou spray), não fornece informações relacionadas ao tamanho da gota de metal fundido ou à frequência com que as gotas são destacadas da ponta do arame e são transferidas para a poça de fusão. Essa informação só pode ser determinada a partir de um seguimento visual do processo durante a soldagem. Por essa razão, foi importante realizar uma correlação entre a análise de sinais elétricos e um sistema de visão que, quando integrado, permite extrair o máximo de informações possível e obter um monitoramento aceitável do comportamento do processo.

O procedimento proposto para identificação e extração de características dos sinais elétricos apresentou bons resultados. Um deles é o que permite separar e identificar a transferência por curto-circuito da transferência por curto-circuito forçado, situação que, por meio da aquisição de imagem, resultava em um processo com maior grau de complexidade. Por outro lado, em termos da dinâmica dos curtos-circuitos, o método e o algoritmo empregados deram resultados semelhantes aos evidenciados logo da análise dos sinais a partir do

fracionamento dos mesmos. Isto proporcionou viabilidade e validade a esta etapa da metodologia para ajudar no objetivo do monitoramento do processo.

Continuando com os resultados obtidos na transferência de metal por curto-circuito, mas desta vez relacionados com a aquisição de imagens, a estratégia proposta para a identificação de curtos a partir da existência de contato ou não contato entre o arame e o metal base mostrou resultados similares aos fornecidos pela análise dos sinais. Obteve-se, assim, um monitoramento completo desse modo de transferência graças à integração dessas duas estratégias (sinais-imagens). Deve-se notar que a validação desta estratégia foi feita a partir de uma comparação entre as informações obtidas e o estudo do vídeo gerado durante os experimentos.

Os bons resultados obtidos na extração de características para a identificação dos modos de transferência por voo livre (globular e spray) são atribuídos aos testes exploratórios realizados inicialmente. Estes testes contribuíram para revelar um padrão no comportamento destes modos e facilitar as tarefas de desenho e localização da janela de trabalho para a avaliação do tamanho aproximado do metal derretido e a frequência de destacamento. Os resultados obtidos relacionados ao tamanho aproximado do metal de adição forneceram informações claras e acertadas, já que os dados proporcionados concordam com o citado na literatura. Nela, é mencionado que, no modo de transferência globular, o tamanho da gota de metal fundido excede o tamanho do arame e, na transferência de spray, o tamanho do metal transferido é menor ou igual ao tamanho do arame. Com relação à frequência de destacamento, os resultados obtidos foram validados com base em uma comparação entre os dados fornecidos pelo sistema de monitoramento visualizados na interface gráfica do usuário e a análise do vídeo adquirido durante o processo. Nessa comparação, encontrou-se que os resultados obtidos foram acertados e congruentes, confirmando este procedimento como uma técnica adequada para a extração de características em prol do monitoramento do processo de soldagem GMAW.

O processo GMAW, conhecido como um dos mais importantes na produção e reparo de equipamentos e estruturas, é caracterizado por ser inspecionado contra danos somente após a sua conclusão. Por isso, surge a necessidade de um método de detecção e monitoramento dos modos de transferência de metal, devido a sua influência em níveis operacionais, estabilidade do processo, qualidade da soldagem e para evitar a perda de materiais,

contribuindo para reduzir os custos de produção. Diante do exposto, o resultado da integração das etapas da metodologia proposta neste artigo apresenta-se como uma interessante ferramenta didática para a determinação de características dos modos de transferência de metal. Dentre elas, a dinâmica de curto-circuito, o tamanho e a frequência de destacamento das gotas transferidas e os valores médios dos sinais de corrente de tensão e soldagem. Gerou, desse modo, uma grande contribuição para o monitoramento do comportamento do processo durante sua execução e converteu o trabalho em um primeiro passo para a abordagem de sistemas de controle das diferentes características identificadas pelos métodos previamente expostos.

7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

7.1. CONCLUSÕES

O objetivo geral do presente estudo foi o desenvolvimento de uma metodologia que permita o monitoramento em tempo real das características principais dos modos de transferência metálica convencionais no processo de soldagem GMAW a partir dos sinais elétricos e do processamento digital de imagens. Os resultados adquiridos permitiram concluir os seguintes aspectos:

- A partir do Projeto experimental do planejamento experimental e com a região de estudo estabelecida, foi possível simular ambientes de trabalho diferentes, convenientes e suficientemente significativos, onde os modos de transferência metálica em estudo poderiam ser encontrados para logo conformar os conjuntos de dados para cada um deles.
- A análise dos sinais elétricos adquiridos durante a execução dos testes permitiram a extração de uma das características mais relevantes no modo de transferência por curto-circuito, como é o caso da dinâmica dos curtos. Além disso, os sinais elétricos também foram importantes na individualização da transferência de curto-circuito e da transferência forçada de curto-circuito.
- Ao basear o projeto experimental na mudança progressiva dos parâmetros operacionais da soldagem, tais como tensão de soldagem, velocidade de alimentação de arame e velocidade de soldagem, logrou-se corroborar a grande influência que tais parâmetros apresentam no comportamento do processo, particularmente na forma como o metal de adição é transferido. A partir disso, foi evidenciado que o modo de transferência que é mais fortemente afetado é o modo de transferência globular, já que esse modo precisa de valores adequados para ter estabilidade, comprovando o relatado na literatura sobre o modo de transferência em menção.
- A principal novidade que apresenta a técnica de perfilografia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho é a quantidade de informação que pode ser extraída do comportamento do processo durante a execução da solda, além de ser uma

técnica mais econômica que outras técnicas de iluminação como por lâmpadas halógenas.

- A partir da análise das imagens obtidas, demonstrou-se que grande parte da luz intensa do arco pode ser eliminada com sucesso e que uma quantidade considerável de informação pode ser extraída em tempo real durante o desenvolvimento da solda. Isso foi graças ao sistema desenvolvido que realiza a aquisição e o processamento das imagens digitais que extraem características dos modos de transferência metálica. Demonstra, assim, que é possível a construção de sistemas de monitoramento do processo eficazes, de baixo custo e aplicáveis na indústria e para fins de pesquisa.
- Os programas computacionais que realizam o processamento das imagens digitais foram avaliados e validados como convenientes por apresentarem resultados conforme os requerimentos e as expectativas do trabalho.
- A interface gráfica de usuário se apresenta como uma ferramenta útil e interativa que permite a interação do usuário com o sistema de monitoramento em tempo real dos modos de transferência de metal no processo GMAW. O sistema fornece informações úteis para o seguimento e a visualização do comportamento do processo, o que pode abrir uma brecha para um controle posterior do processo.

7.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Em trabalhos futuros, pode-se empregar um maior número de câmeras, o que permitirá observar e calcular melhor e com mais exatidão o tamanho da gota, pois se trabalhará em 3D.
- Sabe-se que, pelos modos de transferência, pode-se inferir características como a penetração. Mais estudos, no entanto, devem ser realizados, como, por exemplo, qual é o efeito dos modos de transferência nas características microestruturais da solda.
- Novas técnicas de processamento de imagens podem ser pesquisadas e aplicadas a fim de que se melhorem a qualidade das imagens e o processamento delas.

- Implementar novas técnicas de iluminação para a filmagem da dinâmica dos modos de transferência metálica, utilizando como base a metodologia de monitoramento proposta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adam, G., e Siewert, T. A. (1990). “Sensing of GMAW Droplet Transfer Modes Using an ER100S-1 Electrode”. *Welding Journal*, March, 1103–1108.
- Adolfsson, S., Bahrami, A., Bolmsjö, G., e Claesson, I. (1999). “On-Line Quality Monitoring in Short-Circuit *Gas Metal Arc Welding*”. *Welding Research*, 59–73.
- Albuquerque, M. P. (2001). “Processamento de imagens: métodos e análises”. Rio de Janeiro: Editora da FACET. Brazil.
- Alfaro, S., e Cayo, E. (2012). “Sensing fusion data from the optic and acoustic emissions of electric arcs in the GMAW-S process for welding quality assessment”. *Sensors (Switzerland)*, 12(6), 6953–6966. <https://doi.org/10.3390/s120606953>.
- AWS. (1987). “Welding Handbook”. *Welding Technology*. 8a. edition. Volume 1.
- Bohorquez, C. E. N. (1989). “Previsão de dureza máxima na zona afetada pelo calor em soldagem”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, 93p.
- Baskoro, A. S., Erwanto, e Winarto. (2011). “Monitoring of molten pool image during pipe welding in *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) using machine vision”. 2011 International Conference on Advanced Computer Science and Information Systems, 381–384.
- Campos, P. (2005). “Caracterização mecânica e microestrutural de juntas soldadas pelos processos MIG/MAG e Arame Tubular”. p.p 61. Dissertação de mestrado. PUC do Paraná, Curitiba, Brazil.
- Campos, R. A., Amaral, R. P. F., De Menezes, I. F. M., da Fonseca, L. G., Júnior, M. L. L., e de Aguiar, E. P. (2018). “Classification of short circuit GMA welding using type-1 and singleton fuzzy logic system”. *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, 2018–July, 1–7. <https://doi.org/10.1109/FUZZ-IEEE.2018.8491599>.
- Cayo, E., e Absi, S. (2008). “Weld transference modes identification through sound pressure level in GMAW process”. *Journal of Achievements in Materials And*, 29(1), 57–62. Retrieved from http://www.journalamme.org/papers_vol29_1/2918.pdf.
- Chapuis, J., Romero, E., Bordreuil, C., Soulié, F., e Fras, G. (2010). “Dynamic behavior of the weld pool in stationary GMAW”. *EPJ Web of Conferences*, 6, 07002. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20100607002>.
- Chen, M. A., Yuan, N. J., e Chuan, S. W. (2013). “Effect of Current Waveform on Metal Transfer in Controlled Short Circuiting *Gas Metal Arc Welding*.” *Advanced Materials Research* 718–720:202–8.
- Chu, Y. X., Hu, S. J., Hou, W. K., Wang, P. C., e Marin, S. P. (2004). “Signature analysis for quality monitoring in short-circuit GMAW - An effective method has been developed to identify the process stability and weld quality of short-circuit GMA”. *Welding Journal*, 83(12), 336s–343s.

Cruz, J. A. G. (2014). “Uma metodologia para modelagem e controle da altura do reforço e da largura do cordão de solda no processo GMAW”. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 153p.

Cruz, J., Torres, E., e Alfaro, S. (2015). “A methodology for modeling and control of weld bead width in the GMAW process”. <https://doi.org/10.1007/s40430-014-0299-8>.

Cruz, J., Torres, E., & Alfaro, S. (2018). “Modelling and control of weld height reinforcement in the GMAW process”. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40(3). <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1080-1>.

Cruz, J. A. G. (2018). “Monitoração e análises da penetração do cordão de solda através da observação da oscilação da poça de fusão no processo GMAW-S”. Tese de Doutorado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.TD/18, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 122p.

Cudina, M., Prezelj, J., e Polajnar, I. (2008). “Use of audible sound for on-line monitoring of *Gas Metal Arc Welding* process”. *Metalurgija*, 47(2), 81–85.

Cuiuri, D. (2000). “Control of the short-circuit *Gas Metal Arc Welding* process using instantaneous current regulation”. Doctor of Philosophy thesis, School of Electrical, Computer and Telecommunications Engineering, University of Wollongong. <http://ro.uow.edu.au/theses/1944>.

de Carvalho, L., de Paiva, A., Leme, R., da Costa, S., e Aguiar, T. (2015). “Optimization Methodology of Alternating Current GMAW-P Process by Voltage-Current Signal Analysis.” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 86(1–4):565–80.

de Miranda, H. C., Scotti, A., e Ferraresi, V. A. (2007). “Identification and control of metal transfer in pulsed GMAW using optical sensor”. *Science and Technology of Welding and Joining*, 12(3), 249–257. <https://doi.org/10.1179/174329307X164229>.

de Oliveira, P., da Silva, R., e Werhli, A. (2018). “Machine vision in *Gas Metal Arc Welding* process: a case study”. *ENGEVISTA*, 20(1), 139–154.

Di, L., Yonglun, S., e Feng, Y. (2000). “On line monitoring of weld defects for short-circuit *Gas Metal Arc Welding* based on the Self-Organize feature Map neural networks”. *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, 5, 239–244.

dos Santos, E. B. F., Pistor, R., e Gerlich, A. P. (2017). “Pulse profile and metal transfer in pulsed *Gas Metal Arc Welding*: droplet formation, detachment and velocity”. *Science and Technology of Welding and Joining*, 22(7), 627–641. <https://doi.org/10.1080/13621718.2017.1288889>.

ESAB , (2004) . “Soldagem MIG / MAG. https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev0_apostilasoldagemmigmag_low.pdf”.

Escalera, A. (2001). “Visión por Computador Fundamentos y métodos”, Pearson Prentice Hall, Madrid, España, 303 p.

Fan, H. G., e Kovacevic, R. (1999). “Droplet formation, detachment, and impingement on the molten pool in *Gas Metal Arc Welding*”. Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science, 30(4), 791–801.

Farzadi, A., Morakabiyan, E. M., & Alavi, Z. S. R. (2018). “Effect of Welding Speed on Gas Metal Arc Weld Pool in Commercially Pure Aluminum: Theoretically and Experimentally”. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 59(1), 82–92. <https://doi.org/10.3103/s1067821218010121>.

Felizardo, I., e Bracarense, A.Q. “Soldagem MIG/MAG e com Arame Tubular”. Disponível em: <http://www.ivanilzafe.dominiotemporario.com/doc/GMAWFCAW_Ivanilza.pdf>. Acesso em: 29/03/2013.

Ferreira F. D., Bálamo, P.S.S., e FERRARESI, V.A. (2013). “Influência do Tipo de Gás de Proteção da Soldagem MIG/MAG na Qualidade do Cordão de Aço Inoxidável”. Disponível em: <<http://www.grima.ufsc.br/cobef4/files/021008077.pdf>>. Acesso em: 29/03/2013.

Franco, L.D.N., 2007, “Sincronização, Captura e Análise de Imagens da Poça de Soldagem no Processo GMAW Convencional, no modo de Transferência Metálica por Curto-Circuito”, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.

Franco, F.D., 2008, “Monitorização e Localização de Defeitos na Soldagem TIG através do Sensoriamento Infravermelho”, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.

Giraldo, J. (1997). “Aspectos básicos del control de calidad de estructuras metálicas soldadas”. Proceedings of Aciem. ISSN: 0120-4904 ed: v.1 fasc.1 pp.10 - 15.

Gonzalez, R. C. (2010). “Processamento digital de imagens”. 3. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall.

Grad, L., Grum, J., Polajnar, I., e Slabe, J. M. (2004). “Feasibility study of acoustic signals for on-line monitoring in short circuit *Gas Metal Arc Welding*”. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 44(5), 555–561. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2003.10.016>.

Guedes, R. P. (2009). “Influência da corrente de soldagem nas propriedades de juntas de aço de alta resistência e baixa liga soldadas com eletrodo revestido”. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, 89p.

Guo, N., Lin, S. B., Zhang, L., e Yang, C. L. (2009). “Metal transfer characteristics of rotating arc narrow gap horizontal GMAW”. Science and Technology of Welding and Joining, 14(8), 760–764. <https://doi.org/10.1179/136217109x12505932584655>.

- Hu, J., e Tsai, H. L. (2006). "Effects of current on droplet generation and arc plasma in *Gas Metal Arc Welding*". *Journal of Applied Physics*, 100(5). <https://doi.org/10.1063/1.2337261>.
- Huang, Y., e Zhang, Y. M. (2010). "Laser-Enhanced GMAW". *Welding Research*, 89(September), 181–188.
- Jin, Z., Li, H., Wang, Q., e Gao, H. (2017). "Online Measurement of the GMAW Process Using Composite Sensor Technology". *Welding Journal*. Retrieved from http://s3.amazonaws.com/WJ-www.aws.org/supplement/WJ_2017_04_s133.pdf.
- Karadeniz, E., Ozsarac, U., e Yildiz, C. (2007). "The effect of process parameters on penetration in *Gas Metal Arc Welding* processes". *Materials & Design*. 28(2). pp. 649-56.
- Kwak, Y. M., e Doumanidis, C. C. (2002). "Geometry regulation of material deposition in near-net shape manufacturing by thermally scanned welding". *Journal of Manufacturing Processes*, 4(1), 28–41. [https://doi.org/10.1016/S1526-6125\(02\)70131-X](https://doi.org/10.1016/S1526-6125(02)70131-X).
- Lancaster, J. F. (1984). "The Physics of Welding". Pergamon Press, Oxford, England.
- Lee, H., Changwook, J., e Jiyoung, Y. (2018). "Effects of Welding Current and Torch Position Parameters on Bead Geometry in Cold Metal Transfer Welding." *Journal of Mechanical Science and Technology* 32(9):4335–43.
- Lertrusdachakul, I., Aubreton, O., e Mathieu, A. (2015). "Vision-based control of wire extension in GMA welding". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(5–8), 1201–1210. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6290-9>.
- Lin, Q., Li, X., e Simpson, S. W. (2001). "Metal transfer measurements in *Gas Metal Arc Welding*". *Journal of Physics D: Applied Physics*, 34(3), 347–353.
- Liu, S., Siewert, T., e Lan, H. (1989). "Metal Transfer Mode in *Gas Metal Arc Welding*". 2nd Int. Conf. on Recent Trends in Welding Science and Technology.
- Lopera, J. E. P. (2010). "Modelagem Empírica da Transferência Goticular Projetada em Processos de Soldagem GMAW Baseada em Técnicas de Processamento de Imagens Digitais e Superfícies de Resposta". Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.DM-39A/10, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 135p.
- Lopera, J. E. P. et al. (2011) "Uso da técnica de "perfilografia" para visualização dos modos de transferência metálica no processo de soldagem GMAW usando uma câmera cmos de alta velocidade". Artigo COBEF 2011 - Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica, Brasília, DF, Brasil.
- Lopera, J., e Alfaro, S. (2012). "Response Surface Methodology To Model the Projected Spray Metal Transfer in GMAW". *ABCM Symposium Series in Mechatronics*, 5, 11.
- Lopera, J. E. P. (2016). "Uso de Agentes Inteligentes no Controle Simultâneo da Largura e do Reforço dos Cordões de Solda no Processo GMAW-S". Tese de Doutorado em Sistemas Mecatrônicos, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, p. 159.

Lopera, J., Motta, J., e Alfaro, S. (2016). “Real-time measurement of width and height of weld beads in GMAW processes”. *Sensors (Switzerland)*, 16(9), 1–14. <https://doi.org/10.3390/s16091500>.

Luksa, K. (2006). “Influence of weld imperfection on short circuit GMA welding arc stability”. *Journal of Materials Processing Technology*, 175(1-3), 285–290. doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.04.053.

Lv, N., e Chen, S. (2011). “Investigation on acoustic signals for on-line monitoring of welding”. *Robotic Welding, Intelligence and Automation*, 235–243.

Lyttle, K. A., e Stapon, W. F. G. (1990). “Select the Best Shielding Gas Blend for the Application”. *Welding Journal*. v. 69, n. 11, p. 21 – 27.

Ma, X., e Zhang, Y. (2009). “Reflection of illumination laser from gas metal arc weld pool surface”. *Measurement Science and Technology*, 20(11). <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/11/115105>.

Mazlan, A., Hamdan, D., Amir, I., Mohamed, M. I., e Amran, A. H. (2017). “Monitoring the Quality of Welding Based on Welding Current and Ste Analysis.” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 257(1):0–5.

Modenesi, P. (2001). “Introdução a Física do Arco”. 1.ed. Belo Horizonte - Brasil, Editora UFMG 53 p.

Modenesi, P. (2005). “Introdução à física do arco elétrico”. UFMG, Belo Horizonte, Janeiro.

Modenesi, P. (2009). “Introdução à Física do Arco Elétrico e sua aplicação na Soldagem dos Metais. Editora UFMG, Belo Horizonte, Brasil.

Modenesi, P., Marques, P. e Santos, D. (2012). “Introdução à Metalurgia da Soldagem”. Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais Belo Horizonte.

Mohandas, K., Sumesh, A., Nair, B. B., Rameshkumar, K., Santhakumari, A., e Raja, A. (2018). “Decision tree based weld defect classification using current and voltage signatures in GMAW process”. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 8354–8363. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.528>.

Mvola, B., e Kah, P. (2016). “Effects of shielding gas control: welded joint properties in GMAW process optimization”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88(9-12), 2369–2387. doi:10.1007/s00170-016-8936-2.

Mvola, B., Kah, P., e Layus, P. (2018). “Review of current waveform control effects on weld geometry in *Gas Metal Arc Welding* process”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(9–12), 4243–4265. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1879-z>.

Nadzam J., Armao F., Byall L., Kotecki D., e Miller D. (2011). *Gas Metal Arc Welding Guide lines*, Lincoln Electric literature editorial, 24-33.

Ogawa, Y. (2011). “High speed imaging technique Part 1 – High speed imaging of power beam welding phenomena”. *Science and Technology of Welding and Joining*, 16(1), 44–55. <https://doi.org/10.1179/136217110x12785889549949>.

Ogunbiyi, B., e Norrish, J. (2014). “Monitoring indices for metal transfer in the GMAW process”. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2(1), 33–35. <https://doi.org/10.1179/stw.1997.2.1.33>.

O'Brien, R.L. (1991). “Welding Handbook Vol. 2: Welding Processes”. 8th edition, Miami, FL. American Welding Society.

Pal, K., Bhattacharya, S., e Pal, S. K. (2010). “Investigation on arc sound and metal transfer modes for on-line monitoring in pulsed *Gas Metal Arc Welding*”. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(10), 1397–1410. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.03.029>.

Pal, K., e Pal, S. K. (2011). “Monitoring of weld penetration using arc acoustics”. *Materials and Manufacturing Processes*, 26(5), 684–693. <https://doi.org/10.1080/10426910903496813>.

Ponomarev, V., Scotti, A., Norrish, J., e Lucas, W. (2009), “Metal Transfer Modes in MIG/MAG (GMAW) Welding: Contributions to a New IIW Classification”. In: 62nd Annual Assembly and International Conference of the International Institute of Welding, 2009, Singapore. IIW 2009. Paris: IIW, 2009. v. CD. p. 1-15.

Praveen, P., Kang, M. J., e Prasad, Y. K. D. V. (2006). “Behaviour of Metal Transfer Modes in Pulse *Gas Metal Arc Welding* of Aluminum”. *Proceedings of the 2006 Advanced Materials Processing Technologies Conference*, 2006, 1–8.

Prezelj, J., e Čudina, M. (2003). “Noise as a signal for on-line estimation and monitoring of welding process”. *Acta Acustica (Stuttgart)*, 89(2), 280–286.

Ramos, E. G. (2011). “Análise da Oscilação da Poça de Solda em GMAW por Meio de Processamento de Imagens Obtidas por Perfilografia”. *Dissertação de Mestrado, Publicação ENM.TD/11*, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, DF, 98p.

Reisgen, U., Purrio, M., Buchholz, G., e Willms, K. (2014). “Machine vision system for online weld pool observation of *Gas Metal Arc Welding* processes”. *Welding in the World*, 58(5), 707–711. <https://doi.org/10.1007/s40194-014-0152-9>.

Ribeiro, R. (2007). “Hardware para processamento digital de imagens”. *Trabalho de conclusão do Curso, Centro Universitário Positivo, Núcleo de Ciências Exatas e Tecnológicas, engenharia da computação, Curitiba*, p. 70.

Rusu, C. C., Mistodie, L. R., e Ghita, E. (2011). “Laser shadowgraph system for the electrical arc investigation”. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, 73(2), 189–198.

Sahoo, P.K., Soltaini, S., e Wong, A.K. (1988). “A Survey of Thresholding Techniques”. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Vol. 41, pp. 233-260.

Sanchez, A., Carvajal, H., Blanco., J. E. e Sanz, F. (2007). “New Stability Index for Short Circuit Transfer Mode in GMAW Process Using Acoustic Emission Signals.” *Science and Technology of Welding and Joining* 12(5):460–66.

Shao, Y., Wang, Z., e Zhang, Y. (2011). “Monitoring of liquid droplets in laser-enhanced GMAW”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 57(1–4), 203–214. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3266-x>.

Silva, F. J. G. (2014). “TECNOLOGIA DA SOLDADURA”.

Subramaniam, S., White, D. R., Scholl, D. J., e Weber, W. H. (1998). “In situ optical measurement of liquid drop surface tension in *Gas Metal Arc Welding*”. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 31(16), 1963–1967. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/31/16/004>.

Sumesh, A., Rameshkumar, K., Raja, A., Mohandas, K., Santhakumari, A., e Shyambabu, R. (2017). “Establishing Correlation Between Current and Voltage Signatures of the Arc and Weld Defects in GMAW Process.” *Arabian Journal for Science and Engineering* 42(11):4649–65.

Sun, Z., Chen, Q., Zhang, W., Cao, Y., e Liu, P. (2006). “A novel visual image sensor for CO 2 short circuiting arc welding and its application in weld reinforcement detection”. *Measurement Science and Technology*, 17(12), 3212–3220. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/12/003>.

Tasalloti, H., Kah, P., e Martikainen, J. (2013). “Effects of welding wire and torch weaving on GMAW of S355MC and AISI 304L dissimilar welds”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(1-4), 197–205. doi:10.1007/s00170-013-5484-x.

Ting, Y. Y., Hung, K. C., e Tzeng, Y. F. (2011). “Wavelet Package for the In-Process Monitoring of *Gas Metal Arc Welding* Mild Steel”. *Applied Mechanics and Materials*, 121–126, 3652–3656. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.121-126.3652>.

TLC. (2018). “Basic welding, continuing education unit professional development course”, technical learning college.

Torres, E. M. M. (2013). “Uma metodologia para modelagem e controle da largura do cordão de solda no processo GMAW”. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.DM-64A/13, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 138p.

Wang, Z. Z., e Zhang, Y. M. (2007). “Image processing algorithm for automated monitoring of metal transfer in double-electrode GMAW”. *Measurement Science and Technology*, 18(7), 2048–2058.

Wang, Z. Z., Ma, X. J., e Zhang, Y. M. (2011). “Simultaneous Imaging and Measurement of Pool Surface and Metal Transfer”. *Welding Journal*, 90(6), 121S–128S.

Wang, Z. (2014). “Monitoring of GMAW weld pool from the reflected laser lines for real-time control”. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(4), 2073–2083. <https://doi.org/10.1109/TII.2014.2349360>.

Wang, Z. (2016). "Monitoring the metal transfer process of GMAW by a simplified laser backlight method". *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 975–980. <https://doi.org/10.1109/IECON.2016.7793486>.

Węglowski, M. S., Huang, Y., e Zhang Y. M. (2008). "An Investigation of Metal transfer Process in GMAW". *Engineering Transactions*, 56(4), 345–362.

Węglowski, M., Huang, Y., e Zhang, Y. (2008). "Effect of welding current on metal transfer in GMAW". *Archives of Materials ...*, 33(1), 49–56. Retrieved from http://www.w.archivesmse.org/vol33_1/3318.pdf.

Węglowski, M. S., Huang, Y., e Zhang, Y. M. (2008). "Relationship between wire feed speed and metal transfer in GMAW". *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 29(2), 191–194.

Weska, J. S. (1978). "A Survey of Thresholding Selection Techniques", *Computer Graphics and Image Processing*, Vol. 5, pp. 382-399.

Wu, C. S., Hu, Q. X., Sun, J. S., Polte, T., e Rehfeldt, D. (2004). "Intelligent monitoring and recognition of the short-circuiting gas-metal arc welding process". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 218(9), 1145–1151. <https://doi.org/10.1243/0954405041897121>.

Wu, C. S., Chen, M. A., e Lu, Y. F. (2005). "Effect of Current Waveforms on Metal Transfer in Pulsed *Gas Metal Arc Welding*." *Measurement Science and Technology* 16(12):2459–65.

Wu, C. S., Gao, J. Q., e Wang, D. M. (2011). "Observation of weld pool profiles in short-circuiting *Gas Metal Arc Welding*". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 225(10), 1873–1887. <https://doi.org/10.1177/0954405411398263>.

Xiao, J., Shu, J. C., Guang, J. Z., e Yu, M. Z. (2013). "Effect of Current Waveform on Droplet Oscillation in GMAW." *Advanced Materials Research* 652–654:2285–88.

Xiong, J., e Zhang, G. (2013). "Online measurement of bead geometry in GMAW-based additive manufacturing using passive vision". *Measurement Science and Technology*, 24(11). <https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/11/115103>.

Yudodibroto, B. Y. B., Hermans, M. J. M., Hirata, Y., den Ouden, G., e Richardson, I. M. (2006). "Pendant droplet oscillation during GMAW". *Science and Technology of Welding and Joining*, 11(3), 308–314. <https://doi.org/10.1179/174329306x101409>.

Yudodibroto, B. Y. B., Hermans, M. J. M., den Ouden, G., e Richardson, I. M. (2013). "Observations on Droplet and Arc Behaviour during Pulsed GMAW". *Welding in the World*, 53(7–8), R171–R180. <https://doi.org/10.1007/bf03266729>.

Zeng, B. (2002). "Droplet Oscillation and Weld Pool Imaging Using Computer-Controlled Composite Pulse Current". In T. Siewert & C. Pollock (Eds.), *Eleventh International Conference on Computer Technology in Welding* (p. 340).

Zhang, Y. M., Ligu, E., e Kovacevic, R. (1998). “Active Metal Transfer Control by Monitoring Excited Droplet Oscillation”. *Welding Journal*, (September), 388–395.

Zhu, P., e Simpson, S. (2005). “Voltage change in the GMAW process due to the influence of a droplet travelling in the arc”. *Science and Technology of Welding and Joining*, 10(2), 244–251. <https://doi.org/10.1179/174329305x39275>.