

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS COMPUTACIONAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO  
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

Dissertação de Mestrado

**Análise de características da poça de fusão e dos modos  
de transferência com visão computacional**

Renan Zafalon da Silva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Computação

Orientador: Prof. Dr. Adriano Velasque Werhli

Rio Grande, 2018

### Ficha catalográfica

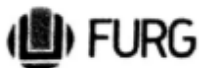
S586a Silva, Renan Zafalon da.  
Análise de características de poça de fusão e de modos de  
transferência com visão computacional / Renan Zafalon da Silva. – 2018.  
76 p.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande –  
FURG, Programa de Pós-graduação em Computação,  
Rio Grande/RS, 2018.

Orientador: Dr. Adriano Velasque Werhli.

1. Visão computacional 2. Câmera de alta velocidade  
3. Processamento de imagem 4. Poça de fusão I. Werhli, Adriano  
Velasque da II. Título.

CDU 00.92



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS COMPUTACIONAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO  
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

## DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Análise de características da poça de fusão e dos modos de transferência  
com visão computacional**

Renan Zafalon da Silva

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Raymundo-Carlos Machado Ferreira Filho

---

Prof. Dr. Ricardo Nagel Rodrigues

---

Prof. Dr. Adriano Velasque Werhli  
Orientador

## **AGRADECIMENTOS**

Quero agradecer a minha família, meus amigos por todo apoio, ajuda e esforço concedido. Agradeço também a FURG e todos envolvidos no desenvolvimento desse trabalho. Agradeço também ao Centro de Pesquisa e Desenvolvimento do Processo de Soldagem da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) pela cessão das imagens utilizada neste trabalho. Este trabalho contou também com o apoio financeiro da CAPES, CNPq e FAPERGS.

## RESUMO

DA SILVA, Renan Zafalon. **Análise de características da poça de fusão e dos modos de transferência com visão computacional**. 2018. 76 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Computação. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.

A soldagem metálica é muito importante e amplamente utilizada nas indústrias no dias de hoje. Embora seja um processo bastante conhecido, os detalhes da poça de fusão são difíceis de serem investigados. Neste trabalho utilizamos câmeras de alta velocidade para filmar a poça de solda. Em um primeiro momento uma revisão sistemática da literatura é apresentada. Em seguida, técnicas de visão computacional são aplicadas para a obtenção automática de parâmetros do processo de transferência metálica. Ademais, técnicas de visão computacional são aplicadas para a determinação automática do tipo de transferência metálica. Os resultados da determinação automática do tipo de transferência metálica são promissores e deverão permitir em estudos futuros o estudo da transição de um modo para outro.

**Palavras-chave:** Visão computacional, câmera de alta velocidade, processamento de imagem, poça de fusão.

## **ABSTRACT**

DA SILVA, Renan Zafalon. **Analyse of characteristics of welding pool and of transfer modes with computer vision.** 2018. 76 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Computação. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.

The metallic welding is very important and widely used in the industry nowadays. Despite being a well known process the details of the welding pool are difficult to be studied. In this work high speed cameras are employed to record images of the welding pool. First, a literature systematic review is presented. Following, computer vision methods are applied to automatically obtain the parameters of the metallic transfer. Moreover, computer vision techniques are employed to the automatic determination of the transference type. The results are promising and should permit the study of the transitions between metallic transfer modes in future studies.

**Keywords:** Computer vision, high speed camera, processing image, welding pool.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Câmera de alta velocidade Phantom R311 . . . . .	17
Figura 2	Laser de alta potência para câmeras de alta velocidade . . . . .	18
Figura 3	Principais características dos gases de proteção . . . . .	24
Figura 4	Relação entre tensão e corrente com o modo de transferência no processo GMAW, adaptado de [1] . . . . .	26
Figura 5	Diferentes tipos de transferência (a) transferência por curto-circuito (b) transferência globular (c) transferência goticular, adaptado de [2] ) . . . . .	27
Figura 6	Poça de fusão . . . . .	28
Figura 7	Forças que agem no destacamento da gota . . . . .	29
Figura 8	Condições da transferência metálica com dependência do tamanho da gota . . . . .	30
Figura 9	Diagrama representativo da perfilografia . . . . .	31
Figura 10	Fluxograma das técnicas de processamento de imagem utilizadas . . . . .	40
Figura 11	Estrutura dos equipamentos . . . . .	41
Figura 12	<i>Setup</i> para geração do <i>dataset</i> . . . . .	43
Figura 13	Laser CAVILUX Smart . . . . .	43
Figura 14	Imagens adquiridas (goticular, globular e curto-circuito) . . . . .	44
Figura 15	Fluxograma com a sequência de passos de execução do programa . . . . .	45
Figura 16	Medição do tamanho do eletrodo no modo de transferência em curto-circuito . . . . .	49
Figura 17	Segmentação da gota no modo de transferência goticular . . . . .	49
Figura 18	Processamento de imagens do <i>dataset</i> . . . . .	49
Figura 19	Processamento de imagem do conjunto de imagens do modo de transferência goticular . . . . .	50
Figura 20	Processamento de imagem do conjunto de imagens do modo de transferência globular . . . . .	51
Figura 21	Processamento de imagem do conjunto de imagens do modo de transferência em curto-circuito . . . . .	51
Figura 22	Processamento dos conjuntos de imagens com <i>image batch processor</i> . . . . .	52
Figura 23	Diagrama explicativo do programa que faz a inferência dos modos de transferência com <i>software</i> MATLAB . . . . .	52
Figura 24	Arduíno Due . . . . .	54
Figura 25	Sinais de tensão, no modo de transferência globular . . . . .	54
Figura 26	Sinais de corrente no modo de transferência globular . . . . .	55
Figura 27	Velocidade de alimentação do arame no modo de transferência globular . . . . .	55

Figura 28	Sinais de tensão, no modo de transferência goticular . . . . .	56
Figura 29	Sinais de corrente, no modo de transferência goticular . . . . .	56
Figura 30	Velocidade de alimentação do arame, no modo de transferência goti- cular . . . . .	57
Figura 31	Sinais de tensão, no modo de transferência em curto-circuito . . . . .	57
Figura 32	Sinais de corrente, no modo de transferência em curto-circuito . . . . .	58
Figura 33	Velocidade de alimentação do arame, no modo de transferência em curto-circuito . . . . .	58
Figura 34	Interface de anotação, adaptado de [3] . . . . .	59



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Resumo dos parâmetros analisados com visão computacional nos artigos revisados . . . . .	33
Tabela 2	Técnicas de visão utilizadas nos artigos revisados . . . . .	34
Tabela 3	Resumo dos <i>softwares</i> linguagens de programação e bibliotecas utilizados nos artigos revisados . . . . .	34
Tabela 4	Métodos utilizados para aquisição das imagens . . . . .	35
Tabela 5	Taxa de aquisição das câmeras . . . . .	35
Tabela 6	Tipo de solda analisada . . . . .	35

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
FCAW	<i>Flux-Cored Arc Welding</i>
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i>
SAW	<i>Submerged Arc Welding</i>
ESW	<i>Eletroslag Welding</i>
EBW	<i>Electron Beam Welding</i>
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i>
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
FPS	<i>Frames Per Second</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
FK	<i>Kalman Filter</i>
LABVIEW	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
OPENCV	<i>Open Source Computer Vision Library</i>
P-GMAW	<i>Pulsed Gas Metal Arc Welding</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
ROI	<i>Region of Interest</i>
VBM	<i>Vision Based Measurement</i>

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	13
1.1	Definição do problema de pesquisa	14
1.2	Objetivos	14
1.2.1	Objetivos específicos	14
1.3	Descrição do trabalho	15
<b>2</b>	<b>VISÃO COMPUTACIONAL</b>	16
2.1	Câmeras	16
2.1.1	Câmera de alta velocidade e laser	17
2.2	Processamento de imagens	17
2.3	Aquisição e extração de características de imagens	19
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	21
3.1	Soldagem	21
3.1.1	Processo GMAW	22
3.1.2	Processo FCAW	22
3.1.3	Outros processos utilizados na soldagem	23
3.1.4	Gás de proteção	23
3.2	Modos da transferência metálica	24
3.2.1	Globular	25
3.2.2	Goticular ou Spray	26
3.2.3	Curto-circuito	26
3.3	Poça de Fusão	27
3.3.1	Variáveis de operação	28
3.4	Parâmetros importantes do processo de soldagem	29
3.4.1	Geometria da gota	29
3.5	Técnica da perfilografia	30
<b>4</b>	<b>REVISÃO SISTEMÁTICA DA BIBLIOGRAFIA</b>	32
4.1	Resultados	33
4.2	Métodos de visão computacional encontrados	33
4.3	Estado da arte dos trabalhos encontrados	36
<b>5</b>	<b>PROJETO DE IMPLEMENTAÇÃO</b>	39
5.1	Processamento do <i>dataset</i> cedido pela universidade de Uberlândia	40
5.2	Metodologia utilizada na geração de um novo <i>dataset</i>	41
5.3	Geração do <i>dataset</i>	42
5.3.1	Processamento das imagens	43

<b>6</b>	<b>RESULTADOS</b>	48
6.1	Processamento do <i>dataset</i>	50
6.2	Sincronização dos sinais de corrente, tensão e velocidade de alimentação do arame	53
6.3	Interface de anotação	58
6.4	Métricas de classificação	59
<b>7</b>	<b>DISCUSSÃO</b>	61
<b>8</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	64
	<b>REFERÊNCIAS</b>	65

# 1 INTRODUÇÃO

Os processos de soldagem são muito utilizados pela indústria para união de estruturas. Existem muitas aplicações, desde a microeletrônica até a fabricação de navios [4]. Os processos de soldagem a arco elétrico também são utilizados na recuperação de peças danificadas. Sua grande aplicação ocorre devido a facilidade do controle, baixo custo relativo aos equipamentos de soldagem e um nível relativamente seguro para o manuseio dos operadores [5].

No desenvolvimento desse trabalho, a construção do conjunto de dados (*dataset*), na área da soldagem apresenta desafios, pois a aquisição dos componentes necessários para geração do *dataset* tem custo financeiro elevado, como por exemplo a câmera de alta velocidade que geralmente é utilizada para obter um conjunto de dados mais preciso. Na literatura já existem diversos trabalhos que investigam poças de fusão com imagens em alta velocidade, porém ainda podem ser descobertas novas informações e características do processo de soldagem. Com avanço da tecnologia de transistores, circuitos integrados, microcontroladores e das linguagens de programação, é possível realizar investigação dos processos de soldagem através de câmeras de alta velocidade e da capacidade de processamento dos computadores. Com as imagens obtidas por uma câmera de alta velocidade serão analisadas características do processo de soldagem da poça de fusão e parâmetros de tensão, corrente, tamanho das gotas destacadas em diferentes modos de transferência.

Além disso, esse trabalho ainda apresenta conceitos, aplicações de soldagem e uma revisão sistemática da bibliografia de técnicas de visão computacional e métodos utilizados para analisar imagens capturadas da poça de fusão com uma câmera de alta velocidade. Para obter imagens nítidas da transferência da gota, é geralmente utilizada uma câmera de alta velocidade, filtros e uma iluminação externa usada na filmagem do processo de soldagem [6]. Também serão apresentadas características gerais do processo de soldagem e observações dos fenômenos físicos que ocorrem durante o processo de soldagem durante a transferência metálica, como por exemplo, a formação e o tamanho das gotas resultantes do processo de soldagem, são fatores importantes que afetam a aparência, e a qualidade da soldagem. O estudo do modo de transferência das gotas pode ser importante em muitos aspectos do processo de soldagem, conhecendo melhor as características da

soldagem é possível obter soldas de melhor aparência e diminuir os respingos.

Para gerar um novo conjunto de imagens é utilizado nesse trabalho a técnica da perfilografia que possibilita uma visualização mais detalhada do processo de soldagem. A geração do conjunto de imagens, os testes de soldagem foram realizados no laboratório de pesquisa e engenharia de soldagem (LAPES) [7] na Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Essa pesquisa é integrada ao grupo de automação e robótica inteligente (NAU-TEC) [8] que desenvolve novas técnicas computacionais e algoritmos em sistemas de automação.

## 1.1 Definição do problema de pesquisa

O problema de pesquisa abordado nesta dissertação é analisar características da poça de fusão através de um sistema de visão computacional e uma câmera de alta velocidade de forma a reconhecer padrões e possíveis problemas recorrentes do processo de soldagem GMAW, de forma que as técnicas de visão computacional contribuam para a melhoria dos processos de soldagem. O avanço dos processos industriais, a otimização de recursos materiais e a automatização dos processos, tem motivado novas pesquisas na área da computação e da robótica. Esse trabalho pretende convergir nesse sentido de busca pela otimização de processos e reconhecimento de padrões na área da soldagem.

## 1.2 Objetivos

Gerar um conjunto de imagens da região de transferência de material do eletrodo para a poça de fusão com uma câmera de alta velocidade e extrair informações do processo de soldagem através do uso de técnicas de processamento de imagem.

### 1.2.1 Objetivos específicos

Abaixo são listados os objetivos específicos desse trabalho:

- Fazer uma revisão sistemática da literatura;
- Analisar características dos modos da transferência metálica na poça de fusão de um *dataset* cedido pela universidade de Uberlândia.
- Gerar um *dataset* de imagens em alta velocidade da poça de fusão;
- Desenvolver um programa que meça o raio da gota destacada e consiga fazer análise e inferência dos modos de transferência com visão computacional;
- Sincronizar sinais de corrente e tensão da fonte de soldagem com o *dataset* gerado;
- Construir uma interface para facilitar a manipulação dos algoritmos implementados.

### **1.3 Descrição do trabalho**

No capítulo 2 é apresentado conceitos de visão computacional e processamento de imagem. Já o capítulo 3 apresenta uma fundamentação teórica sobre soldagem. No capítulo 4 está uma revisão sistemática da bibliografia de câmera de alta velocidade e poças de fusão. No capítulo 5 é apresentado o projeto de implementação, no capítulo 6 é mostrado os resultados práticos obtidos durante o desenvolvimento desse trabalho. No capítulo 7 é feita uma discussão dos resultados desse trabalho. Já o capítulo 8 mostra as conclusões desse trabalho de pesquisa.

## 2 VISÃO COMPUTACIONAL

A visão computacional pode ser definida como uma área que estuda técnicas capazes de extrair informações de imagens, especificamente a visão computacional diz respeito a criação de modelos a partir de imagens de objetos [9] [10][11].

Fatores como a geometria, a forma e a velocidade de objetos são muito buscados por algoritmos da visão computacional. Com os dados obtidos das imagens, pode-se criar um sistema que tome decisões baseadas em informações, como por exemplo, controle de robôs, acionamento de máquinas entre outros. Para fazer a inspeção visual de um sistema, os processos usuais são compostos pela seguinte sequências de procedimentos

- Aquisição de imagem: É a fase em que as imagens são obtidas por uma câmera;
- Processamento de imagem: Neste segundo procedimento são aplicados filtros em imagens adquiridas para remover o ruído ou reflexos desnecessários do sistema de iluminação, tais como o sombreamento pela luz de arco de solda, como destacado por [12] e [13];
- Extração das características: É o procedimento para obter informações sobre a imagem adquirida, por exemplo: tamanho, posição, cor, medição de contorno e textura do objeto analisado, como dito por [14];
- Tomada de decisão: Quando um sistema interage com as tarefas de uma aplicação, por exemplo a execução de uma tarefa em uma indústria baseada em informações, como acontece em um sistema de inspeção visual durante a produção, no qual as peças ou produtos devem atender alguns padrões de qualidade que podem ser comparadas a algum objeto ou modelo conhecido de imagem [15].

### 2.1 Câmeras

Quanto a tecnologia dos sensores utilizados em câmeras destacam-se o CCD e o CMOS. Não existem muitas diferenças quanto a qualidade ou preço entre as duas, porém, segundo [16] alguns cuidados devem ser tomados ao se extrair dimensões por fotos em



soldagem e a escolha de uma tecnologia em detrimento da outra pode fazer diferença, pois a luz gerada pelo arco elétrico pode gerar dificuldades na visualização do processo de soldagem. Basicamente uma imagem digital pode ser definida como sendo uma matriz, onde as linhas e colunas identificam um ponto na imagem e o valor correspondente da matriz identifica o nível de cinza de um determinado ponto. Para visualizar e obter informações precisas do processo de soldagem são utilizadas câmeras de alta velocidade. Esse tipo de câmera oferece diversos recursos, como por exemplo suporte de diferentes lentes, *trigger* para sincronizar o tempo de filmagem desejado, controle remoto da câmera através de *software* e grande capacidade de aquisição em quadros por segundo (FPS) [17].

### 2.1.1 Câmera de alta velocidade e laser

Para obter as imagens em alta velocidade da poça de fusão, foi utilizada a câmera Phantom R311, ver na Figura 1. A câmera possui as seguintes especificações técnicas

- Resolução máxima de 1280x800 com 3200 FPS;
- Taxa de transferência máxima de 3.2 Gpx/s;
- Tempo mínimo de exposição 1MS;
- Câmera monocromática.



Figura 1: Câmera de alta velocidade Phantom R311

Além da câmera de alta velocidade, será utilizado um laser de alta potência para ser usado como fonte de iluminação externa. Esse laser é projetado com especificações técnicas ideais que auxiliam em aplicações com a técnica da perfilografia.

## 2.2 Processamento de imagens

Processamento de imagem é uma técnica utilizada para fazer transformações em uma imagem [11]. Tem sido utilizado em diversas áreas do conhecimento especialmente utili-



Figura 2: Laser de alta potência para câmeras de alta velocidade

zado na extração de características e na obtenção de padrões de imagens digitais [18]. Nas indústrias de soldagem essa técnica é utilizada para analisar características do processo com a finalidade de encontrar soluções para melhorar a qualidade da solda ou identificar possíveis problemas durante o processo de soldagem. Nos trabalhos de [19] e [20] foi realizado o monitoramento do processo de soldagem e a medição da geometria da poça de fusão.

De forma geral a área de processamento de imagens engloba operações que resultam transformações e extrações de informações das imagens. Conforme visto no trabalho de [21] o processamento de imagem pode ser dividido em duas áreas de aplicação:

- Melhoria da informação das imagens para a percepção humana;
- Transmissão e a representação das imagens para máquinas com percepção autônoma.

Alem disso, outra ferramenta útil e muito empregada no processamento de imagem é a filtragem. Dentre os filtros existentes destacam-se:

- Passa-baixa: Esses eliminam os componentes de alta frequência e mantém constante o valor das baixas frequências.
- Passa-alta: Eliminam os componentes de baixa frequência.
- Passa banda: São capazes de remover regiões selecionadas da frequência, esse tipo de filtro pode ser utilizado para restauração de imagens.

Outro procedimento bastante utilizado que pode ser feito antes de executar o processamento de uma imagem é definir a região de interesse (ROI). Como dito por [20], ROI consiste em remover a maioria das informações indesejadas. Além disso, os referidos autores afirmam que o ROI pode ser baseado no brilho das regiões em imagens capturadas.

No trabalho de [22], são apresentadas diversas técnicas de visão computacional que são utilizadas para analisar os processos de soldagem. Nos trabalhos de [23], [24], [25], são apresentados sistemas de visão para aplicações de monitoramento da poça de

fusão, foi percebido que eliminando a luz gerada pelo arco elétrico consegue-se obter informações dos processos de soldagem.

a região das imagens com maior brilho devido a iluminação do laser, muitos autores utilizam essa região para extrair informações do processo de soldagem.

A seguir são listadas algumas técnicas de processamento de imagem encontradas na literatura:

- **Thresholding:** É uma técnica utilizada para extração do formato dos objetos presentes em uma imagem. A forma extraída por essa técnica é definida pelo nível de brilho presente na imagem. Uma alternativa muito utilizada dessa técnica é subtrair os objetos da imagem de um fundo conhecido.
- **Filtro de média:** É um tipo de filtro passa-baixa que consegue suavizar e diminuir ruídos de uma imagem [26].
- **Operadores Morfológicos:** Esse tipo de operador é usado para remover ruído em imagens. Para remover pontos isolados brancos, outros operadores com essa mesma funcionalidade também podem ser usados como por exemplo, os operadores de erosão e dilatação (*opening* e *closing*). O operador de erosão consegue remover ruídos e preservar o formato dos objetos filtrados em uma imagem.

### 2.3 Aquisição e extração de características de imagens

Após a aquisição das imagens por uma câmera, é realizado o processamento de imagens para extrair características desejadas. Nesse trabalho será utilizada uma câmera de alta velocidade e um laser, também será usada a técnica da perfilografia para aquisição das imagens da poça de fusão. Dentro da estrutura de aquisição de imagens é utilizado um conjunto de componentes, por exemplo, lentes, filtros, fonte de soldagem, um computador e um *software* que permita realizar a comunicação dos parâmetros da câmera e do laser. Depois de adquiridas as imagens, inicia-se a fase de extração de dados das imagens, primeiramente é realizado um pré-processamento para eliminar possíveis ruídos das imagens, a seguir são aplicadas técnicas de segmentação para analisar partes ou objetos de uma imagem [27]. Através das técnicas de visão computacional é possível realizar a obtenção de informações desejadas de uma imagem, essas características podem ser, como por exemplo o tamanho, a cor, a posição, a textura e outras informações da imagem [12, 13, 14, 15]. Existem muitas possibilidades de aplicações com técnicas de inspeção visual, como por exemplo, monitorar sistemas e dispositivos robóticos, analisar a formação e propagação de fissuras, rastrear e medir objetos. E também ainda existem aplicações para identificar partes de uma imagem e padronizar classificações de determinados conjuntos de imagens [28].

Além dos procedimentos de aquisição e extração de informações visuais de um conjunto de dados, a etapa de tomada de decisão também está presente. O primeiro passo na tomadas de decisão é encontrar a as características essenciais do problema a ser resolvido de forma a reduzir o conjunto de dados a ser trabalhado. As decisões e os tipos de recursos medidos, analisados e calculados dependem de cada aplicação. Como por exemplo, um sistema de inspeção visual que busca encontrar alguns padrões seguindo alguns modelos ou padrões de qualidade. Sistemas de visão aplicados em sistemas mecânicos como por exemplo dos trabalhos de [29], [30] são classificados conforme as características qualitativas dos objetos analisados.

## 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo são apresentados conceitos gerais dos processos de soldagem, dos modos de transferência e dos parâmetros que influenciam a soldagem. Logo em seguida é apresentada uma revisão bibliográfica de trabalhos que analisam características da poça de fusão com câmeras de alta velocidade e técnicas de processamento de imagem.

### 3.1 Soldagem

A soldagem é muito utilizada nas indústrias para unir diferentes peças. Conforme definição adotada por [31], soldagem é a operação que visa obter a coalescência localizada produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição. A soldagem a arco é amplamente utilizada. Para gerar o arco é utilizada uma fonte elétrica que fornece tensão e corrente com ajustes apropriados para soldagem [5]. A utilização de sensores e sistemas de visão são fundamentais no desenvolvimento de processos industriais, na área da automação com robôs industriais e também em aplicações com uso da soldagem [32]. Dentro do processo de soldagem existem diversas características importantes, como por exemplo: a Força gravitacional, a força eletromagnética, a força de tensão superficial e a força de arrasto dos gases. Uma gota se desprende do eletrodo quando a interação entre as forças resulte em um afastamento em relação ao eletrodo [1]. Outro elemento importante nos processos de soldagem são as fontes de energia [33], que mantém o processo estável através do controle das grandezas de tensão e corrente.

Aplicações de imagens por máquinas e a constante evolução da tecnologia de *softwares e hardwares* fez com que fosse criado um campo de desenvolvimento de pesquisas chamado VBM (Vision based measurement). O principal objetivo dessa área é extrair informações relacionadas a medição de grandezas físicas através do uso de técnicas de visão computacional [34].

### 3.1.1 Processo GMAW

Atualmente o processo de soldagem a arco elétrico apresenta baixo custo e possui grande aplicação industrial em estruturas metálicas [5]. A soldagem a arco elétrico é muito utilizada nas indústrias na construção de produtos com estruturas metálicas [5]. O processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) é muito conhecido e possui ótima produtividade em aplicações industriais [35]. O princípio de funcionamento desse processo é baseado na geração de arco elétrico entre o eletrodo e a poça de fusão [36]. O processo de soldagem GMAW utiliza um arco elétrico entre um arame contínuo sólido ou tubular com a finalidade de obter o metal de adição, esse processo possui um gás de proteção provido por uma fonte externa que atua como um dispositivo que protege as áreas de solda do ar, dessa forma é possível evitar possíveis defeitos na soldagem [37]. O processo de soldagem GMAW pode ser subdividido em duas subcategorias: MIG (*Metal Inert Gas*) possui proteção inerte ou rica em gases inertes, e MAG (*Metal Active Gas*) - quando o gás contém misturas ricas em gases ativos e o processo com arame tubular é preenchido com ligas metálicas também conhecidas pelo inglês como *metal-cored* [35]. As aplicações com GMAW possuem algumas vantagens:

- Pode ser utilizado em todos os tipos de metais e ligas comerciais;
- Permite fazer a soldagem em todas as posições;
- Possui solda de espessura pequena.

### 3.1.2 Processo FCAW

A soldagem FCAW (Soldagem a arco elétrico e arame tubular) oferece alto rendimento e uma boa qualidade para os processos de automação. Nesse tipo de soldagem a parte metálica do arame é a principal responsável por conduzir a corrente elétrica. O material necessita ser aquecido até sua temperatura de fusão e dessa forma ele é transferido do eletrodo para a poça de solda. Existem dois tipos de variações do processo do eletrodo tubular. Na primeira variação o eletrodo tem uma proteção gasosa, a qual possui a função de proteção do arco e a ionização da atmosfera que é feita por um gás (inerte, ativo ou ambos). Na outra variação, não é exigido a proteção gasosa externa, pois os gases gerados pela decomposição interna do eletrodo formam a atmosfera protetora para o arco e metal fundido [38]. O eletrodo é composto por um revestimento que conduz a corrente elétrica e fornece um metal de adição para preenchimento da junta metálica [4]. Além disso, o processo de soldagem com eletrodo tubular possui algumas funcionalidades importantes:

- Proteção da poça de fusão da contaminação do ar e outros elementos atmosféricos;
- Estabilizar o processo de soldagem.

Embora que o processo FCAW possua inúmeras vantagens, no entanto ele possui uma limitação que é seu custo de aquisição, o qual é mais caro do que o material utilizado na soldagem MIG/MAG (GMAW). Por esse motivo o processo GMAW tem grande aceitação na área industrial e principalmente com estudo de equipamentos que melhoram o desempenho de uso do arame maciço [39]. Entretanto, a medida que aumentam os elementos de ligas, o uso da soldagem FCAW pode ser mais vantajoso [40]. Além disso, a soldagem FCAW exige a remoção da escória e tem a predisposição de gerar mais fumos do que o processo MIG/MAG. A escória auxilia na formação do cordão de solda e também reduz a taxa de resfriamento o qual é muito importante quando deseja-se soldar aços de baixa liga.

### **3.1.3 Outros processos utilizados na soldagem**

Além do processo GMAW e FCAW, também existe o processo de soldagem GTAW que é um processo que tem seu princípio de funcionamento baseado com um arco elétrico que utiliza um eletrodo não consumível de tungstênio. O arco elétrico é produzido pela passagem da corrente elétrica e estabelece o arco entre a ponta do eletrodo e a peça. No processo GTAW corrente elétrica alternada é bastante utilizada na soldagem [41]. Existem diversos processos de soldagem, como por exemplos no trabalho de [42] são apresentados diversos processos de soldagem por fusão e suas características.

- Soldagem por eletro-escória (ESW): É aplicada em aços de carbono e peças de grande espessura, o aquecimento é feito por aquecimento de escória líquida;
- Soldagem a arco submerso (SAW): A fonte de calor nesse processo também gerado pelo arco elétrico, a soldagem é realizada da posição plana ou vertical de peças estruturais, tanques;
- Soldagem por feixe eletrônico (EBW): A soldagem é feita através de um feixe de elétrons focalizado em um pequeno ponto, é aplicado na indústria nuclear e aeroespacial;
- Soldagem a arco com eletrodo revestido (SMAW): Esse processo produz a união entre metais através do aquecimentos dos mesmos por um arco elétrico existente entre o eletrodo e a peça de trabalho a ser soldada. A soldagem com eletrodo revestido pode gerar um grande volume de gases e fumos que pode ser prejudicial a saúde do soldador [4].

### **3.1.4 Gás de proteção**

O gás de proteção permite que a corrente elétrica flua com mais estabilidade, assim sustentando o arco elétrico, e protege o metal fundido da oxidação do meio ambiente, do eletrodo até a poça de fusão. Além disso, o gás de proteção tem influência na geometria

e nas propriedades mecânicas do cordão de solda. De forma geral os gases podem ser classificados conforme sua capacidade de transferir calor, sua densidade em relação ao ar e o seu potencial de ionização. A facilidade do arco surgir e a tensão elétrica para mantê-lo são influenciadas pelo potencial de ionização [43].



Figura 3: Principais características dos gases de proteção adaptado de [43]

Conforme visto na figura 3, as principais funções e características dos gases de proteção são:

- Estabilidade do arco: Depende do gás de proteção utilizado no processo de soldagem;
- Modos de transferência: Os modos de transferência são definidos conforme a variação do gás de proteção, pois as forças que atuam na formação da gota são influenciadas pelos gases de proteção;
- Geometria do cordão de solda: O formato do cordão de solda também é afetado pelo gás de proteção;
- Proteção da poça de fusão: A poça de fusão é protegida contra a atmosfera ambiente.

### 3.2 Modos da transferência metálica

Nos processos do tipo GMAW e FCAW o metal fundido do eletrodo é transferido para a poça de fusão. Conforme mencionado em [4] o estudo dos modos de transferência é importante para o processo de soldagem, pois eles afetam características fundamentais da soldagem:

- Estabilidade do arco;
- A quantidade de respingos produzidos;



- A quantidade de gases absorvidas no processo de soldagem;
- Determina as possíveis posições de soldagem.

Além dos modos de transferência que serão abordados nesse trabalho existem outros tipos de transferência que são geradas através de um controle dos parâmetros de soldagem. Como visto no trabalho de [44], os modos de transferência podem ser classificados em três classes:

- **Transferência metálica natural:** Ocorre sem controle específico dos parâmetros de tensão, corrente e velocidade de soldagem;
- **Transferência metálica controlada:** Essa classe consiste em aperfeiçoar os modos de transferência naturais para melhorar as características do processo, como por exemplo diminuir respingos, controlar a geometria da solda e estabilizar o processo de soldagem.
- **Transferência metálica intercambiável:** Descreve uma classe de modos de transferência que ocorrem quando dois ou mais modos de transferência naturais ocorrem em uma sequência de tempos repetidamente.

Para o processo GMAW existem basicamente três modos de transferência que são diretamente relacionados com valores de tensão e corrente de um sistema. Os principais parâmetros que afetam a geração da gota são: a composição do arame, o gás de proteção, as polaridades elétricas, a corrente de soldagem e o comprimento do arco gerado [44].

Na Figura 4 é possível visualizar essa relação entre tensão e corrente com o modo de transferência. Os modos de transferência presentes na figura 5, são classificados em: spray, curto-circuito e globular.

### **3.2.1 Globular**

No modo de transferência globular, o diâmetro da gota é maior que o do eletrodo e as gotas se desprendem principalmente devido a força da gravidade. É um dos modos de transferência mais indesejados, pois apresenta muitos respingos, muito aquecimento e baixa qualidade de soldagem. O diâmetro da gota chega a ser até 3 vezes maior que o diâmetro do arame. Além disso, as gotas possuem uma baixa taxa de transferência, aproximadamente de uma a dez gotas por segundo são transferidas durante o processo de soldagem [44].

No trabalho de [45], foi feita a sincronização de sinais de tensão e corrente e foi observada a dinâmica do processo de transferência da gota na poça de fusão. Acréscimos de tensão e corrente provocam variações na poça de fusão o que impacta na formação da gota.

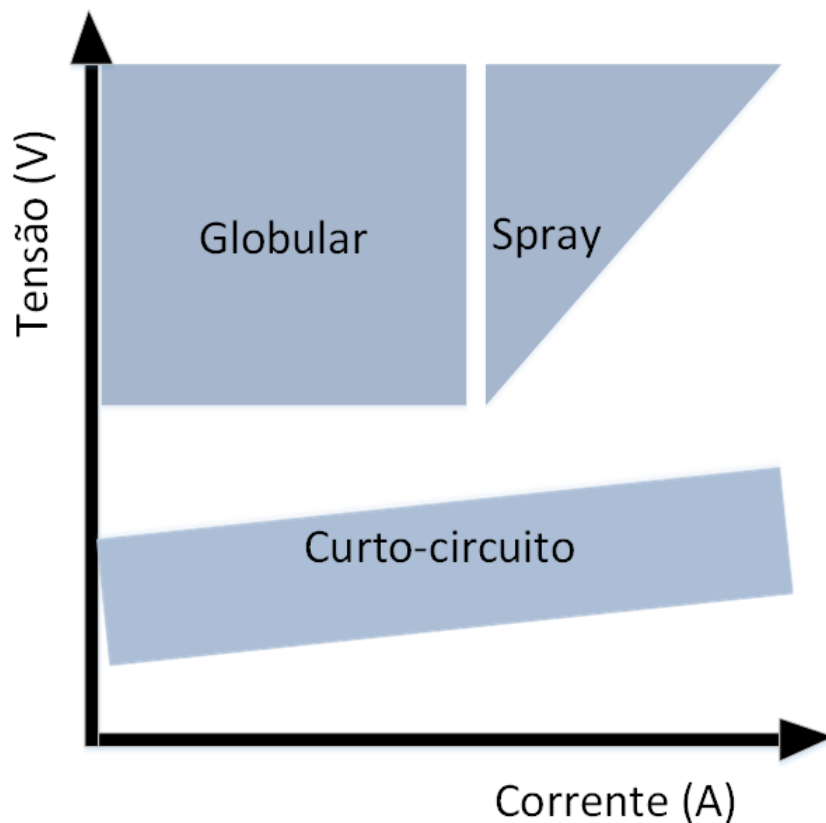


Figura 4: Relação entre tensão e corrente com o modo de transferência no processo GMAW, adaptado de [1]

### 3.2.2 Goticular ou Spray

Neste modo de transferência as gotas são menores e a solda resultante apresenta menos respingos. A corrente elétrica nesse modo de transferência deve ser acima do nível de corrente de transição [46], se a corrente ficar abaixo do nível de transição o modo de transferência é classificado como globular. O valor da corrente de transição entre os modos de transferências depende de alguns fatores que são: A composição do arame, o diâmetro e a extensão do eletrodo e a composição do gás de proteção [47]. O modo goticular é geralmente caracterizado por um valor alto de corrente, boa penetração da solda e uma ótima estabilidade do arco. Apesar de oferecer um processo estável, existe algumas limitações, para soldar com chapas finas e fora da posição plana [2].

### 3.2.3 Curto-circuito

Na transferência por curto-circuito a corrente de soldagem é baixa e o eletrodo possui um diâmetro pequeno. A transferência do metal fundido ocorre no intervalo em que o eletrodo está em contato com a poça de fusão. Se ocorrer mudanças na composição do gás pode haver alterações no tamanho da gota e no tempo de curto-circuito [36]. Segundo [43], o modo de transferência em curto-circuito ocorre quando a velocidade de

alimentação é maior que a velocidade de fusão do arame, dessa forma o arame em forma líquida no formato de gota toca a poça de fusão. Geralmente o curto-circuito ocorre em valores de tensão e corrente baixos. No momento do curto, a tensão entre o eletrodo e a peça de trabalho tende a um valor próximo de zero e a corrente elétrica fica com um valor elevado. Nesse instante o arco extingue-se e a gota é transferida para poça de fusão pela tensão superficial [48]. Esse modo de transferência é mais indicado para utilização em chapas finas, pois produz uma poça de fusão pequena e com resfriamento rápido [1].

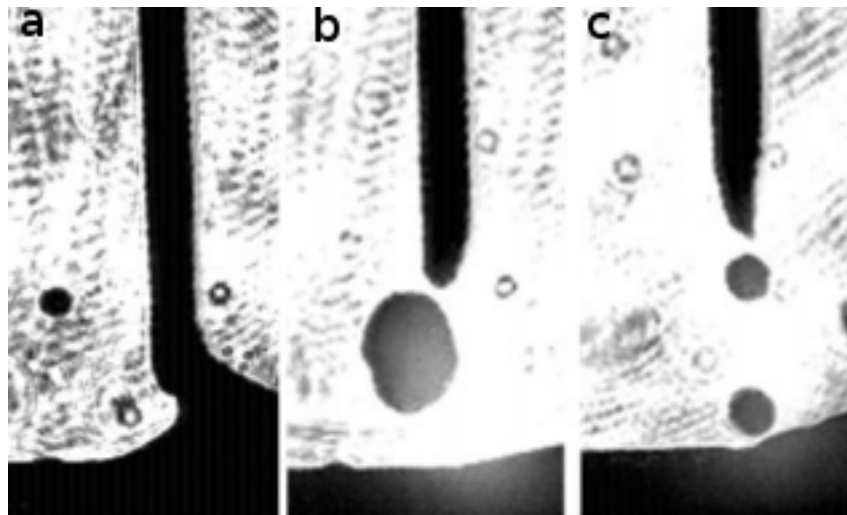


Figura 5: Diferentes tipos de transferência (a) transferência por curto-circuito (b) transferência globular (c) transferência goticular, adaptado de [2] )

### 3.3 Poça de Fusão

A poça de fusão, ver na Figura 6, é a região em que o material soldado encontra-se no estado líquido. Os parâmetros geométricos da poça de fusão exercem influência na estabilidade do processo de soldagem, como visto no trabalho de [49], onde foi utilizado um controlador de largura da poça de fusão baseado em lógica *fuzzy*, que ajudou a manter o processo de soldagem mais estável principalmente no período inicial da soldagem, pois nessa fase o arco apresenta maior instabilidade. Além disso, como observado na pesquisa de [50] quando a gota entra em contato com a poça de fusão pode influenciar a geometria do cordão de solda em virtude da quantidade de calor liberada pela gota ao entrar em contato com a poça de fusão.

A monitoração da poça de fusão durante o processo de soldagem, permite identificar a presença de problemas na soldagem que podem ser ocasionados por problemas de tecnologia, como por exemplo, falhas na fonte de soldagem, proteção inadequada do gás. Para analisar e monitorar a poça de fusão são utilizados algoritmos e sistemas de visão computacional. Para realizar a monitoração da poça de fusão alguns aspectos devem ser considerados como por exemplo, a iluminação e a posição da câmera em relação a tocha

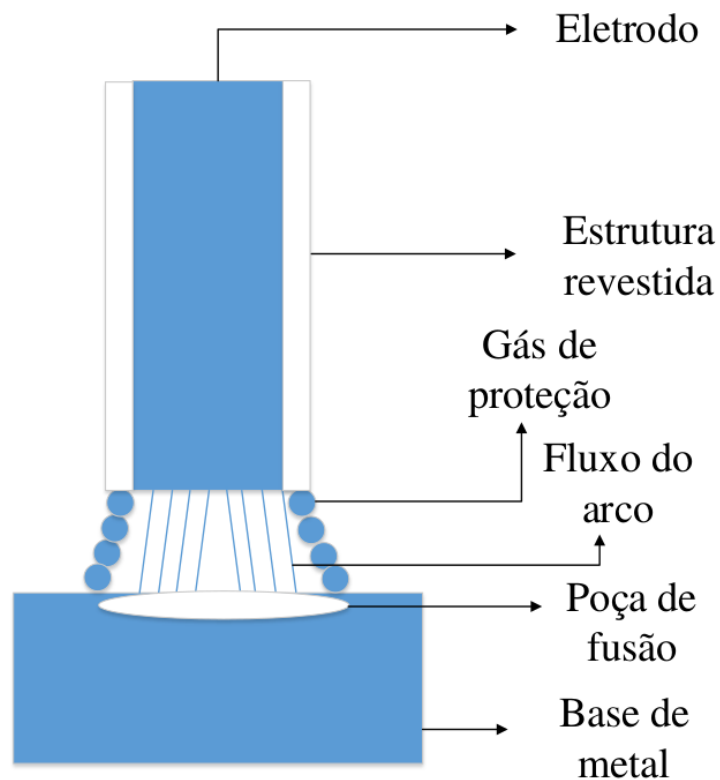


Figura 6: Poça de fusão

[51]. Como visto no trabalho de [52] existem diversas aplicações na área de soldagem com a poça de fusão, como por exemplo aplicações de reparo estruturas *offshore* em aços de carbono, oleodutos submarinos, dutos de transporte de óleo e gás e em reparos na indústria do transporte naval.

### 3.3.1 Variáveis de operação

As principais variáveis inerentes a poça de fusão e a processo de soldagem são:

- Diâmetro do eletrodo;
- Valor da corrente elétrica;
- Tensão elétrica;
- Comprimento do arco elétrico;
- Velocidade de soldagem;

### 3.4 Parâmetros importantes do processo de soldagem

#### 3.4.1 Geometria da gota

As principais forças que agem no processo da transferência metálica influenciando o destacamentos das gotas são: força gravitacional ( $F_g$ ), força eletromagnética ( $F_{em}$ ), força devido a tensão superficial ( $F_y$ ), força de arraste ( $F_a$ ); força de reação por vaporização ( $F_r$ ). A figura abaixo mostra um esquema com o fluxo de atuação das forças [43].

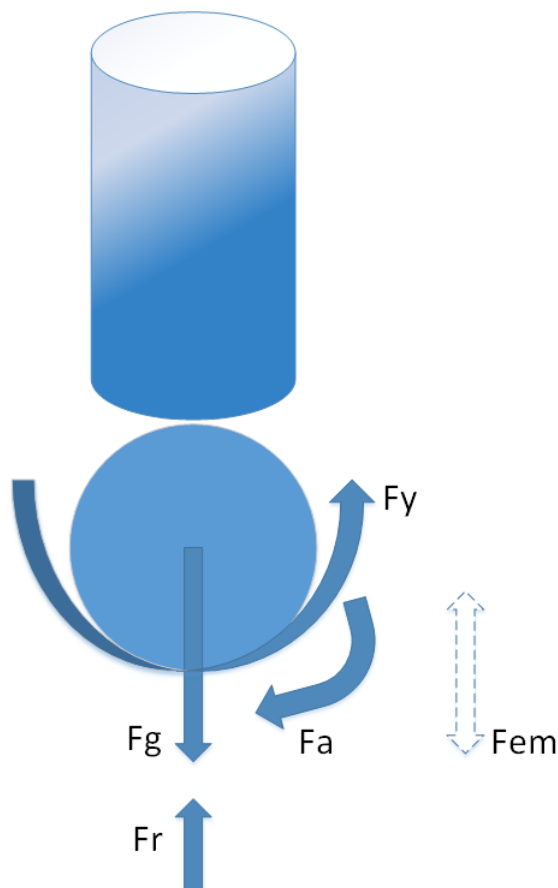


Figura 7: Forças que agem no destacamento da gota

A geometria da gota tem influência nas forças que agem no processo de soldagem durante a transferência. A gota com menor dimensão tem a tendência de formar um menisco entre o eletrodo e a poça de fusão, ver na Figura 8 [53]. Quando as gotas tiverem um tamanho pequeno existe a tendência a formar um menisco estável e a ação devido a tensão superficial não é suficiente para transferir a gota. No entanto, de acordo com [54], quando a gota alcança tamanho crítico, ela é transferida devido a ação apenas da força superficial. É possível ver na Figura 8 a representação dos dois casos mencionados acima.

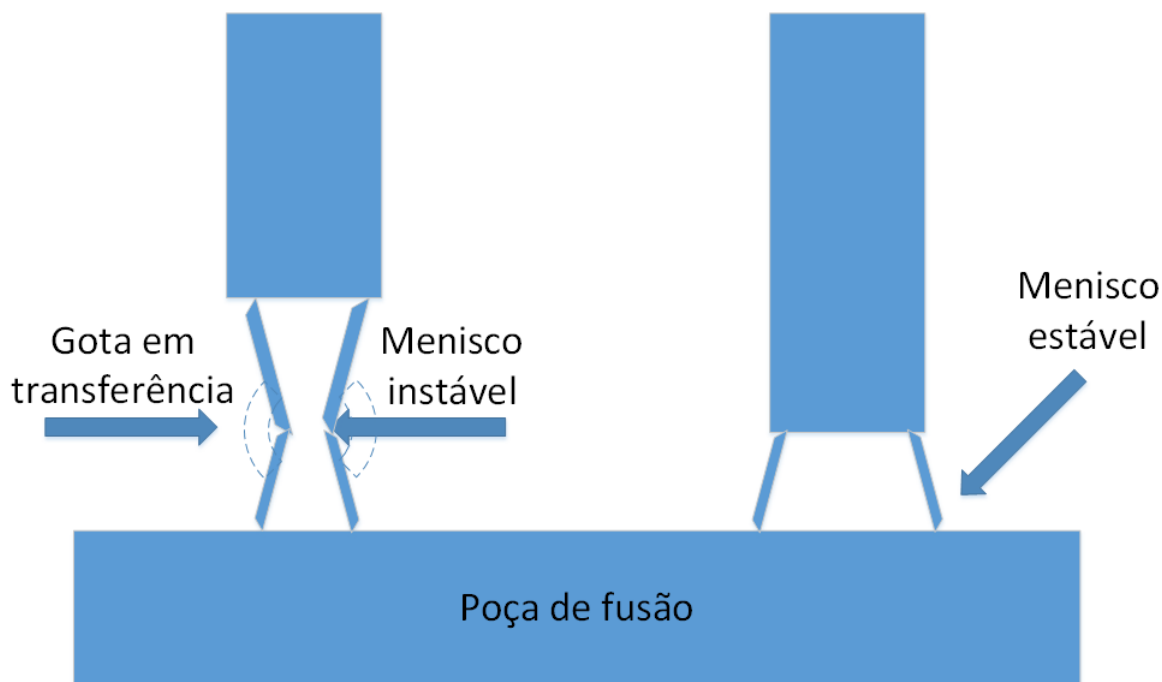


Figura 8: Condições da transferência metálica com dependência do tamanho da gota

### 3.5 Técnica da perfilografia

Desde os anos 80 existem aplicações de câmeras de alta velocidade em soldagem [55]. No trabalho de [56] foram criadas técnicas para aumentar a taxa de aquisição de quadros para obter mais detalhes das imagens. Uma técnica bastante conhecida para fazer análises de filmes em soldagens que utiliza câmeras de alta velocidade é a perfilografia, ela é amplamente utilizada para visualizar fluxos em massa e outros recursos como descritos por [57].

A técnica da perfilografia consiste na incidência de um laser sobre uma superfície resultando na formação de uma sombra projetada em um anteparo que será filmada por uma câmera de alta velocidade. Além disso, para ampliar os feixes de luz presentes no processo é utilizado um conjunto de lentes convergentes e divergentes. A lente divergente recebe o feixe de luz de entrada e a lente convergente fornece uma imagem com melhor precisão de saída conforme as explicações de [58] e [59]

Outro fator interessante é a sincronização das imagens obtidas com uma câmera de alta velocidade com sinais de tensão e corrente obtidos pelo sistema de controle durante o processo de soldagem. É possível ter uma visualização dos equipamentos utilizados na perfilografia na Figura 9. Conforme revisado nos trabalhos de [60] [61] [62] uma das maiores dificuldades encontradas com uso da visão computacional em aplicações de soldagem quando o objetivo é analisar características geométricas é a interferência da luz do arco. Para utilizar a técnica da perfilografia é necessário a utilização de uma fonte externa para conseguir obter mais informações das imagens capturadas através das técnicas de

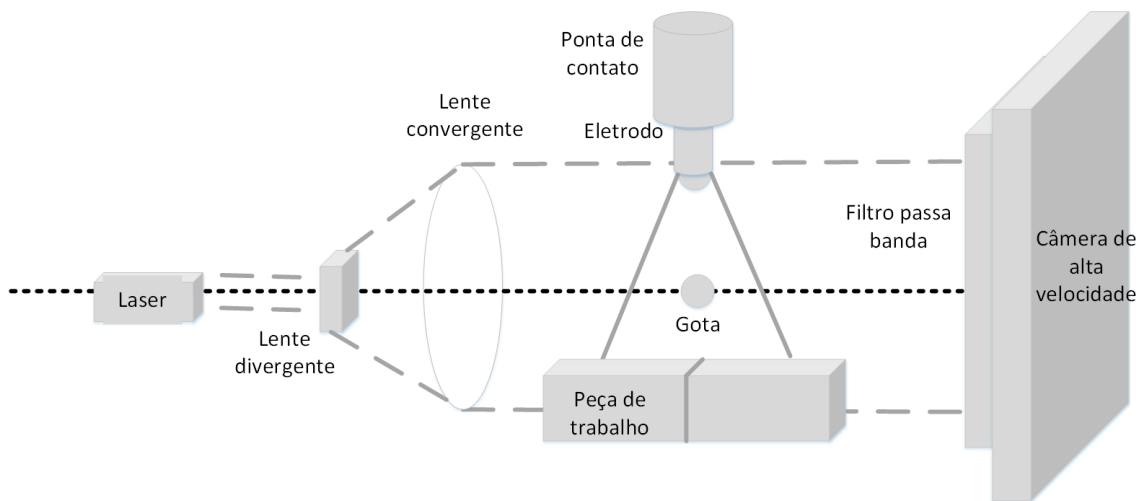


Figura 9: Diagrama representativo da perfilografia

visão computacional. Outra técnica também utilizada para iluminar a região da poça de fusão é apresentada no trabalho de [23], que utiliza diodos de alta potência para iluminar a região da poça de fusão. Foi mencionado como vantagem seu baixo custo, porém consegue-se extrair menos informações do que as técnicas de iluminação externa que utilizam laser.

## 4 REVISÃO SISTEMÁTICA DA BIBLIOGRAFIA

Essa revisão bibliográfica servirá como base para desenvolver um projeto de pesquisa na área de visão computacional, onde será analisado a deposição das gotas de solda na poça de fusão.

Para realizar a revisão sistemática da bibliográfica do estado da arte foram utilizadas as bases científicas de pesquisa: IEEE Xplore [63], ScienceDirect [64], Scielo [65] e Google Acadêmico. Para a busca utilizou-se a seguinte expressão:

*”GMAW process AND high speed camera OR gmaw vision OR welding pool AND high speed camera OR robot welding AND high speed camera OR visao computacional na soldagem OR Câmeras de alta taxa e soldagem OR FCAW process”*

Com o resultado da busca realizada nas bases científicas mencionadas acima, foram organizados em uma planilha do Libreoffice calc os seguintes dados dos artigos:

- Os títulos dos artigos;
- Ano dos artigos;
- Revista de publicação;
- Base onde foi localizado.

A busca inicial retornou 210 artigos distribuídos entre as bases utilizadas, a pesquisa dos artigos foi realizada em novembro de 2016. Depois disso, foram removidos os artigos duplicados e sobraram 161 artigos. A escolha dos artigos foi feita por duas pessoas: Professor especialista em soldagem e um aluno de pós graduação em engenharia da computação. Após a leitura diagonal dos *abstracts* dos artigos sobraram 41 artigos. Desses 41 artigos foi realizada a leitura da introdução, das figuras, das tabelas e da conclusão, restaram 33 artigos. Por fim os artigos que restaram foram utilizados para criar tabelas com parâmetros relevantes para a revisão do estado da arte em filmagens de alta velocidade com poças de fusão.



## 4.1 Resultados

Primeiramente, buscou-se compreender quais as variáveis do processo de soldagem estão sendo utilizadas para a identificação da estabilidade e eficiência do processo de soldagem. Para visualizar e obter informações precisas do processo de soldagem na poça de fusão, são utilizadas câmeras de alta velocidade. Esse tipo de câmera oferece diversos recursos, como por exemplo suporte de diferentes lentes, *trigger* para sincronizar o tempo de filmagem desejado, controle remoto da câmera através de software e grande capacidade de aquisição FPS (*Frames Per Second*) [17].

A Tabela 1 mostra com base nos parâmetros analisados, as características que são frequentemente utilizadas. Nota-se, com maior frequência, a exploração das características geométricas da poça de fusão e o raio da gota. Outros trabalhos, contemplam as características do chanfro, do arco elétrico e da deposição.

Tabela 1: Resumo dos parâmetros analisados com visão computacional nos artigos revisados

Parâmetros analisados	Referências
Raio e características geométricas da gota	[66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77]
Frequência de deposição	[67, 78, 68, 1, 69, 73]
Características geométricas da poça de fusão	[51, 1, 68, 79, 51, 80, 81, 77, 74, 32, 49, 77, 74]
Características geométricas do arco	[82, 77]
Monitoração e segmentação da poça de fusão	[83, 84, 85, 80]
Geometria do cordão de solda	[86, 78, 87]
Secção transversal do filete de solda	[88]
Outros/Não informado	[89, 90, 91, 92, 84, 93, 70, 69, 94, 95, 85]

## 4.2 Métodos de visão computacional encontrados

As principais técnicas e métodos de visão computacional utilizados na bibliografia, estão apresentados na Tabela 2, pode-se observar a ampla utilização das técnicas clássicas, baseadas em operações de convolução sobre a matriz da imagem. Nesta categoria incluem-se os operadores Sobel [96], Previt [97], Roberts [98], filtro Gaussiano, e o filtro média. Destaca-se também a técnica de binarização através de limiarização (*threshold*) da imagem e as técnicas de detecção de borda, implementada principalmente com os método de Canny [99] e pela transformada de Hough [100] para detecção de formas geométricas conhecidas. Técnicas baseadas em lógica difusa aparecem em menor proporção.

A Tabela 3 resume os *softwares* e bibliotecas referenciados com maior frequência.

A maior parte das implementações da literatura são feitas na IDE Matlab. Alguns trabalhos mencionam o uso da ferramenta LabView e da biblioteca OpenCV para visão computacional. Boa parte dos trabalhos revisados, não são apresentados os detalhes de implementação, assim findando maior espaço do trabalho para a discussão das técnicas e métodos.

Tabela 2: Técnicas de visão utilizadas nos artigos revisados

Técnicas de visão	Referências
Canny	[90, 72, 81, 49]
Sobel	[1, 90, 72, 73, 49, 81]
Threshold	[51, 101, 66, 68, 84, 80, 72, 73, 81, 49, 85, 88, 76]
Gaussian	[90, 81]
ROI	[86, 72, 73, 74, 83]
Laplacian	[90, 102, 81]
Prewitt	[90, 97, 81, 49]
Roberts	[90, 81, 49, 98]
Hough	[100, 103, 104]
Filtro de média	[85, 103, 69]
Filtro Gaussiano	[69]
Método de Otsu	[105, 69, 80]
Segmentação	[80, 88]
Lógica fuzzy	[66, 32, 49]
Redes neurais	[76]
Operadores Morfológicos	[49]
Filtro de Kalman	[106, 107]
Outros/Não informado	[67, 83, 78, 68, 89, 79, 106, 91, 92, 93, 71, 70, 94, 108, 95, 77]

Tabela 3: Resumo dos *softwares* linguagens de programação e bibliotecas utilizados nos artigos revisados

<i>Software</i>	Referências
MATLAB	[1, 67, 109, 82, 79, 80, 74, 94, 95, 73, 81]
LABVIEW	[109, 70]
OPENCV	[23, 74]
C	[73]
C++	[83]
Simulador de Realidade Virtual	[86]
Optimas MA 1.4	[70]
Outros/Não informado	[83, 103, 32, 78, 68, 89, 90, 106, 91, 92, 84, 88, 71, 51, 80, 108, 72, 76, 77, 74, 85]

Na tabela 4, que apresenta os métodos utilizados para aquisição das imagens, foi visto que a técnica mais usada foi a utilização de uma câmera de alta velocidade com

Tabela 4: Métodos utilizados para aquisição das imagens

Método	Referências
Câmera de alta velocidade e laser	[78, 109, 70, 84, 71, 80, 108, 72, 75]
Câmera de alta velocidade	[68, 69, 73]
Câmera e iluminação com lâmpadas	[83, 82]
Câmera CCD	[51, 76, 79, 81, 49, 85, 77, 32, 83, 103, 90, 79, 93, 71, 81, 77, 85]
Câmera CMOS	[74, 78]
Outros/Não informado	[86, 101, 68, 89, 106, 91, 92, 84, 88, 70, 80, 108, 72, 76, 95, 77]

Tabela 5: Taxa de aquisição das câmeras

Taxa de aquisição (frames/segundo)	Referências
25	[81]
30	[49]
200	[90]
250	[67]
400	[68]
1000	[71, 74, 110]
2000	[78, 108, 70, 108]
3000	[72, 73]
10000	[75, 78, 71]
33000	[73]
Outros/Não informado	[83, 103, 32, 86, 101, 89, 90, 79, 91, 92, 84, 88, 93, 51, 80, 72, 76, 95, 77, 85]

Tabela 6: Tipo de solda analisada

Tipo de solda	Referências
GMAW	[66, 67, 83, 86, 78, 68, 90, 79, 106, 92, 88, 71, 70, 69, 94, 51, 80, 72, 76, 95, 73, 81, 77, 74, 85]
FCAW	[89]
GTAW	[66, 90, 91, 92, 93]
LBW	[111]
P-GMAW	[1, 84]
Outros/Não informado	[32, 86, 101, 108, 72]

iluminação externa através de laser. Já na tabela 5 foi anotado as taxas de aquisição utilizadas por diferentes câmeras utilizados em diferentes trabalhos encontrados na revisão do estado da arte. Através dos dados da tabela 6 é possível perceber que a solda do tipo GMAW é a mais presente nos trabalhos buscados na literatura. Quanto aos tipos de junta, não foram encontradas nomenclaturas ou classificações na revisão bibliográfica.

### 4.3 Estado da arte dos trabalhos encontrados

Dentre os trabalhos revisados identifica-se a popularidade da técnica de perfilografia, chamada de *shadowgrafia* por vários autores, essa técnica consiste em filmar a sombra projetada da transferência metálica com a utilização do conjunto câmera de alta velocidade e laser de forma a filmar a formação da sombra projetada em um anteparo sobre o qual é incidido um feixe de luz, permitindo a análise de parâmetros como frequência de destacamento das gotas de solda, geometria da gota formada, frequência de extinção do arco e o comprimento do arco [2].

No trabalho desenvolvido por Wang [112], apresenta-se um sistema de sensoriamento visual para o processo de soldagem TIG. O trabalho apresenta um modelo de rede neural capaz de corrigir problemas de ruído das imagens capturadas da poça de fusão associado à técnica da perfilografia. A imagem foi pré-processada utilizando-se de um filtro mediana ponderado, limiarização pelo método de *Otsu*[105] e correção da projeção. Uma rede neural baseada em *back propagation* é utilizada para fazer a detecção das bordas da poça. Nos testes para identificar a qualidade da medição da poça, foram realizadas 16.000 iterações e obtendo-se um erro médio de apenas 1,89%.

Já Figueiredo [113] apresenta um procedimento experimental criado para analisar os modos de transferência metálica do alumínio em função do gás de proteção. A chapa a ser soldada é posicionada na posição plana, variam-se os parâmetros de tensão da fonte e velocidade de alimentação do arame. A aquisição das imagens se dá também pela técnica da perfilografia, com laser conjugado e uma câmera de alta velocidade com 2000 frames por segundo. Com os resultados da pesquisa, os autores mostraram quatro modos de transferência metálica: modo globular, onde a gota atinge um raio maior que o diâmetro do arame antes de se desprender. Modo goticular, o desprendimento da gota ocorre na forma de *spray*. Modo em curto-circuito, existe o contato do arame não fundido com a poça de fusão. E por último, um modo misto entre globular e curto-circuito.

No trabalho desenvolvido por [114] mais uma vez foi utilizada a técnica da perfilografia, com uma câmera de alta velocidade e um laser como fonte de iluminação externa para fazer análise da deposição da solda. A câmera, com capacidade de obter imagens a 8000 frames por segundo, foi acoplada a um monitor controlador de vídeo e uma lente objetiva. Este trabalho buscou caracterizar visualmente as características de diferentes tipos de transferência. Foram feitos ensaios com dois gases de proteção com técnica FCAW. No primeiro ensaio foi utilizado gás de proteção composto de 75% de  $O_2$  e 25% de  $CO_2$  e feita uma variação de corrente na faixa de 175 à 296A. No segundo ensaio foi utilizado 100% de  $CO_2$  e a faixa de corrente variada foi de 220 à 252A. Com esses ensaios os autores foram capazes de identificar:

- Durante a transferência o metal fundido está misturado ao fluxo de arame;
- Devido a mistura do metal com o fluxo de arame foi difícil fazer diferenciação entre

os dois componentes;

- No ensaio com 25% de CO<sub>2</sub>, para valores mais baixos de corrente elétrica ocorreu uma redução do tamanho médio da gota;
- Já para valores maiores de corrente, o diâmetro médio da gota diminuiu e notou-se a formação de um pequeno filamento na ponta do eletrodo

Nesse mesmo segmento de trabalho, [115] analisa a dinâmica de transferência da gota e o comportamento dos sinais elétricos durante as diferentes fases de transferência metálica. Para desenvolver os testes foram utilizados uma câmera de alta velocidade de 10000 frames por segundo, uma fonte externa composta por uma lampada Xenon, além de um conjunto de lentes e filtros. Nesses testes foi utilizado o processo de soldagem GMAW e, a partir das mensurações das informações elétricas do processo, foram detectadas as diferenças de tensão durante o deslocamento da gota em diferentes modos de transferência metálica..

Já Baskoro *et al.*[76] utiliza uma câmera CCD para obter imagens da poça de fusão de um processo GMAW e foi feita a monitoração do processo soldagem de tubos através do uso de técnicas de visão computacional. No tratamento da imagem, foram aplicados filtros para transformar a imagem em escala de cinza seguida por processo de binarização (threshold). Estas imagens tratadas foram utilizadas para treinar uma rede neural com o algoritmo de *Levenberg-Marquardt*. O método de *Levenberg-Marquardt* é uma técnica utilizada para resolver problema de mínimos quadrados, esse tipo de problema surge quando deseja-se ajustar funções parametrizadas, dessa forma esse algoritmo minimiza a soma dos quadrados dos erros entre os pontos de dados e a função. [116]

A largura do cordão de solda utilizada por Baskoro *et al.* [76] variou entre 6,6 mm e 10,2 mm nos testes de processamento de imagens. O erro médio obtido no processo de detecção foi de 0,1 mm com desvio padrão de 1,3 mm. A seguir, esta rede neural treinada foi utilizada para a simulação da largura do cordão de solda. Os resultados experimentais mostram a eficácia do algoritmo de processamento de imagem e do processo de simulação.

No trabalho de [49] foram usados diferentes operadores de processamento de imagem para filtrar imagens da poça de fusão. Para obter as imagens foi utilizada uma câmera CCD com capacidade de aquisição de 30 frames por segundo. Um filtro ótico de banda estreita foi utilizado para reduzir a influência da luz do arco criada na transferência metálica. O método utilizado foi baseado em operadores de dilatação, erosão, abertura e fechamento. Também foi utilizado um controlador de largura da poça de fusão baseado em lógica fuzzy, através dessa técnica conseguiu-se manter o processo de soldagem mais estável principalmente no período inicial da soldagem, pois nessa fase o arco é mais instável. No trabalho de [117], foram realizadas medições com técnicas de visão

computacional no cordão de solda e com base nos resultados foram reconhecidos padrões de possíveis deformações na solda e padrões com boa qualidade do cordão de solda.

Com a revisão bibliográfica, foi possível perceber quais características, parâmetros e metodologias diferentes que estão sendo utilizadas para obter informações da região da poça de fusão com uma câmera de alta velocidade e técnicas de visão computacional.

## 5 PROJETO DE IMPLEMENTAÇÃO

Conforme apresentado na revisão do estado da arte, existem diversas pesquisas que buscam descobrir parâmetros da soldagem com técnicas de visão computacional e também análise dos sinais de tensão e corrente seguido de oscilogramas de forma a validar informações obtidas em imagens por uma câmera de alta velocidade nos modos da transferência metálica. Nesse trabalho são desenvolvidos algoritmos capazes de identificar padrões visuais em imagens de alta velocidade da transferência metálica na região da poça de fusão. São analisados os principais parâmetros do processo de soldagem com técnicas de visão computacional, de forma que essa pesquisa contribua com a criação de novos algoritmos que auxiliem na monitoração e otimização do processo de soldagem GMAW.

Inicialmente, procurou-se compreender quais as variáveis do processo de soldagem estão sendo utilizadas para a identificação das características do processo de soldagem e quais técnicas de visão computacional são frequentemente utilizadas para detecção de padrões nos processos de soldagem. Após realizado a revisão teórica e feito o levantamento dos trabalhos relacionados iniciou-se a implementação de algoritmos com o *software* MATLAB. Nesse trabalhos foram processados dois *datasets*, o primeiro foi fornecido pela universidade de Uberlândia e o segundo *dataset* foi gerado na FURG. No conjunto de dados fornecido pela universidade de Uberlândia foram analisados características e parâmetros da poça de fusão.

Depois que a câmera de alta velocidade Phantom Miro R311 e o laser Cavilux Smart chegaram na FURG, foi possível gerar novos conjuntos de imagens e o foco desse trabalho foi realizado com as imagens adquiridas na FURG, onde foi criado um programa capaz de inferir os modos de transferência goticular, globular e curto-circuito. Além disso, será avaliada a acurácia do programa desenvolvido, de forma a medir a eficiência do programa implementado em MATLAB. Como visto no trabalho de [118] a acurácia pode ser utilizada para indicar a qualidade de um parâmetro estimado.

## 5.1 Processamento do *dataset* cedido pela universidade de Uberlândia

Para processar as imagens cedidas pelo laboratório de soldagem de Uberlândia, foram utilizadas técnicas de visão computacional para segmentar e medir parâmetros do processo de soldagem, como por exemplo o raio da gota, na região da poça de fusão. Uma das técnicas mais utilizadas foi o *threshold*, que nos testes realizados com imagens de perfilografia teve a finalidade de isolar a gota dos demais objetos da imagem. Com a gota isolada, o próximo procedimento aplicado foi a segmentação da gota que se desprende da região do eletrodo e desloca-se até a região da poça. Para apresentar com mais detalhes os procedimentos executados no algoritmo foi criado um fluxograma na Figura 10, com uma sequência de técnicas de processamento de imagem. A finalidade principal do algoritmo proposto nesse trabalho é identificar e anotar possíveis padrões de diferentes modos da transferência metálica com uso da visão computacional.

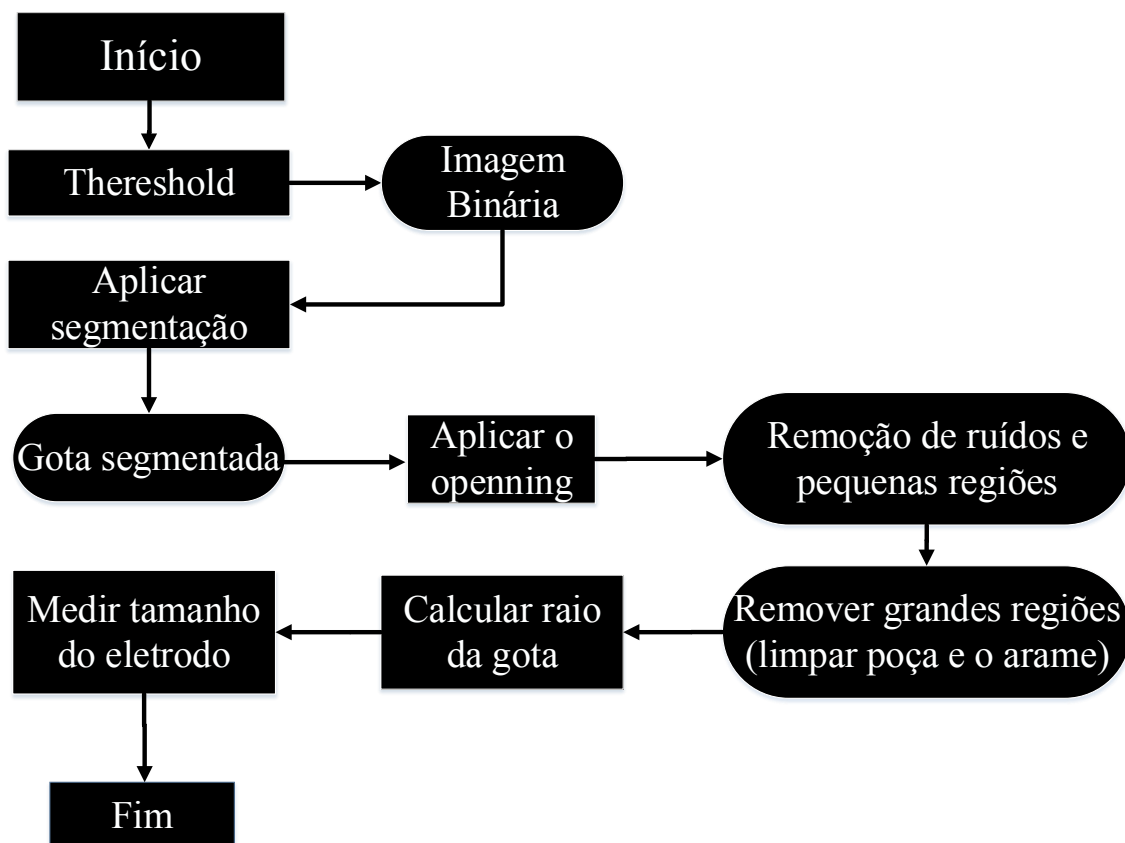


Figura 10: Fluxograma das técnicas de processamento de imagem utilizadas

O fluxograma da Figura 10 apresenta a sequência de procedimentos utilizados para realizar o processamento dos conjuntos de imagens.



## 5.2 Metodologia utilizada na geração de um novo *dataset*

Com a chegada da câmera de alta velocidade e do laser foi possível iniciar a etapa de geração das imagens da poça de fusão. A seguir é apresentado a metodologia utilizada nesse trabalho para geração do conjunto de dados:

- Organização da bancada: A bancada foi montada com a câmera de alta velocidade, laser cavilux smart, proteção de vidro entre a câmera e a chapa de metal a ser soldada e um computador com *software* da câmera de alta velocidade, é possível visualizar a estrutura da bancada na figura 12 e 13;
- Aquisição das imagens: Foram realizados diversos testes, com a técnica da perfilografia e filmagem direta. Os melhores resultados foram obtidos com a lente Infinity CentriTel MX-2, que permitiu a geração de imagens com boa definição, é possível ver as imagens na figura 14. Foi utilizada a fonte Lincoln LF33 no processo de soldagem que pode ser visualizada na figura 11;
- Organização das imagens: Os conjuntos de imagens foram separados por pastas, que possuem imagens com os modos de transferência goticular, globular e curto-circuito. Também junto com cada conjunto de imagem foi colocado os resultados sincronizados dos sinais de tensão, corrente e velocidade de soldagem obtidos por um arduíno.

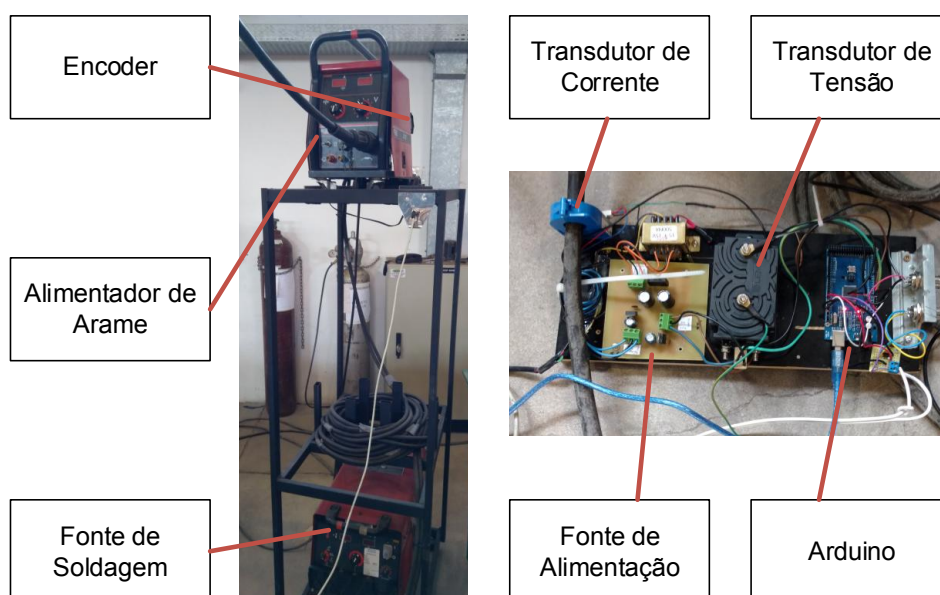


Figura 11: Estrutura dos equipamentos

### 5.3 Geração do *dataset*

Depois de definida a metodologia para geração dos novos conjuntos de imagens, iniciou-se a etapa de geração de um novo *dataset* de imagens da poça de fusão. Para gerar o *dataset* foi utilizada uma câmera de alta velocidade Phantom Miro R311 e um laser CAVILUX Smart através da técnica da perfilografia. Devido a necessidade de muitas configurações específicas da câmera e do laser o processo de geração do *dataset* foi mais demorado do que o esperado. Além disso, junto com a geração de um conjunto de imagens foi feita a sincronização dos sinais de corrente e tensão da fonte de soldagem. Para fazer a sincronização dos sinais de tensão e corrente foram usados o transdutor de corrente HTR500-SB [119], e o transdutor de tensão DVL 250 [120].

O transdutor de corrente fica conectado junto ao cabo da tocha de soldagem, assim é possível medir a corrente durante a soldagem. Já o transdutor de tensão também é montado em conjunto com o cabo da tocha de soldagem para medir a diferença de potencial entre o bico de contato da tocha e a poça de fusão. Para realizar a medição da velocidade do arame foi utilizado o encoder incremental E30. O encoder é um dispositivo eletromecânico capaz de obter informações de posição e velocidade de mecanismos rotativos ou lineares. Na Figura 11 foi apresentado um esquema da montagem dos equipamentos utilizados na sincronização dos sinais de tensão e corrente.

O arduino foi utilizado para executar o disparo sincronizado da câmera de alta velocidade e o sistema de medição de corrente, tensão e velocidade do arame. A câmera de alta velocidade fornece um sinal global que foi usado para sincronizar as informações coletadas pelo arduino com as imagens obtidas pela câmera [121].

Para a geração das imagens foram utilizadas as seguintes configurações:

- Lentes: Infinity CentriTel MX-2;
- FPS: 1000;
- Fonte de Solda: Lincoln LF33;
- Tipo: Arame Tubular;
- Gás de Proteção: Ar 98 %, O<sub>2</sub> 2% (Transferência Spray), CO<sub>2</sub> (Transferência Globular ou Curto Circuito)

A resolução das imagens foram de (832 x 800) o tempo total de gravação foi 6,4 segundos. O experimento foi realizado no laboratório Lapes na FURG. Foram adquiridas imagens com os modos de transferência: Goticular, globular e curto-circuito. Na figura 13 é possível ver uma imagem do laser CAVILUX Smart sendo utilizado em conjunto com a câmera de alta velocidade Phantom Miro R311 em uma bancada de soldagem.

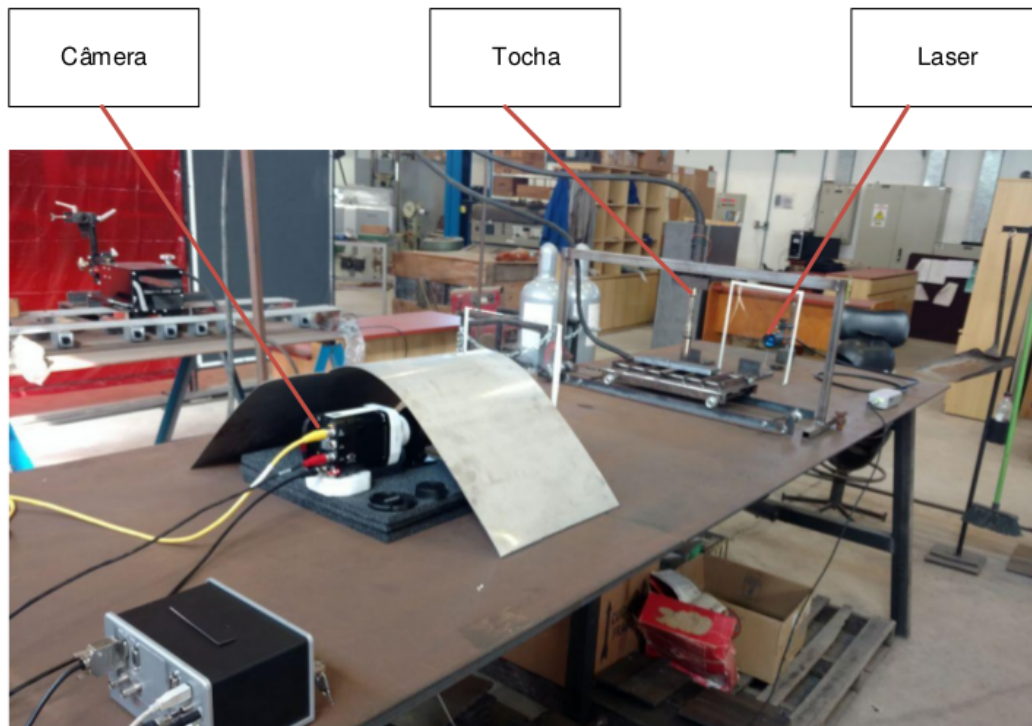


Figura 12: *Setup* para geração do *dataset*

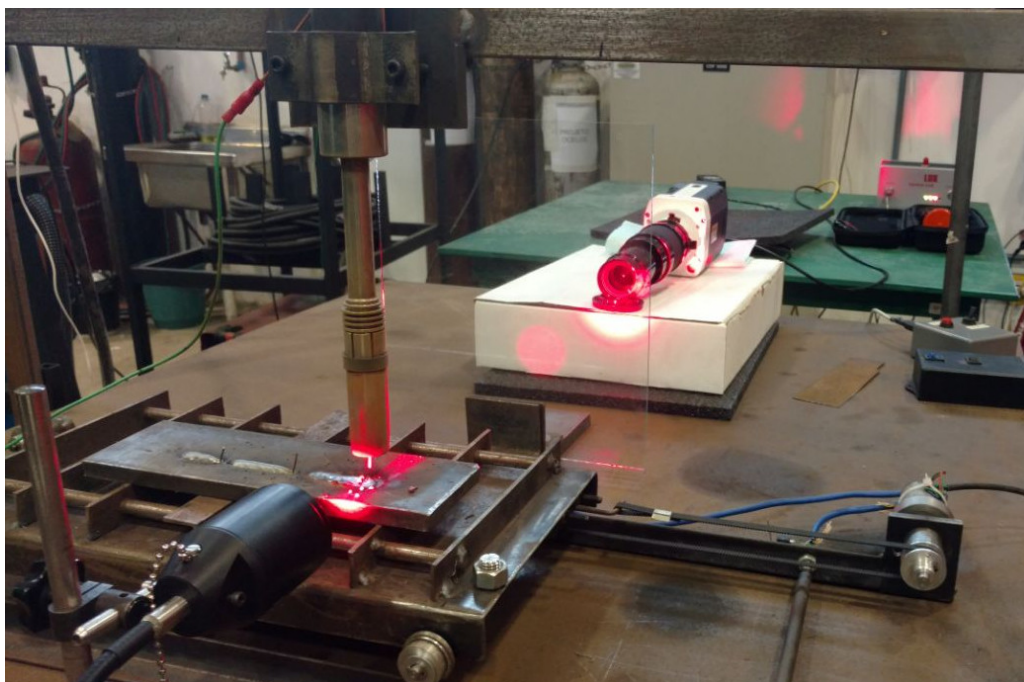


Figura 13: Laser CAVILUX Smart

### 5.3.1 Processamento das imagens

Após ser gerado o conjunto de imagens com a câmera de alta velocidade Phantom R311 e o laser Cavilux Smart, deu-se início ao processamento do conjunto de imagens para extração de parâmetros e análise das características da poça de fusão. Os primei-

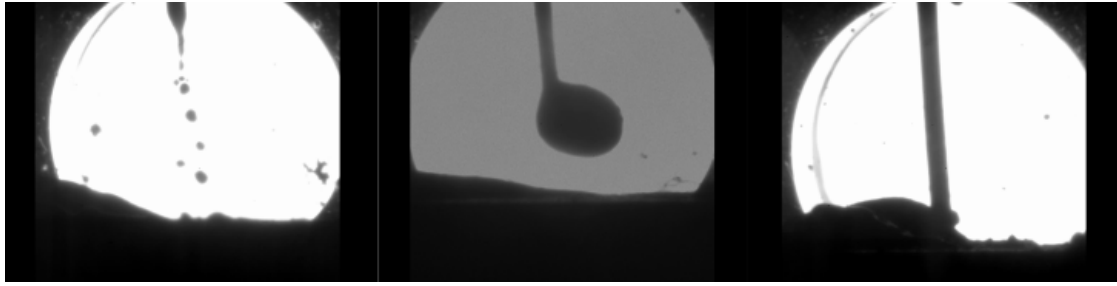


Figura 14: Imagens adquiridas (goticular, globular e curto-circuito)

ros parâmetros analisados foram, o raio das gotas destacadas e o tamanho do eletrodo. Através das técnicas de visão computacional e com sinais de tensão e corrente sincronizados foram analisados padrões do processo de deposição GMAW. Além disso, o programa desenvolvido, permitiu fazer inferências quanto as características e parâmetros dos diferentes modos da transferência metálica.

Foram processados os conjuntos de imagens nos modos de transferência goticular, globular e curto-circuito. Conforme visto anteriormente, o programa desenvolvido em MATLAB, foi implementado para extrair informações visuais das imagens obtidas com perfilografia. São realizadas sequências de execuções com técnicas de visão computacional.

As imagens geradas apresentaram variações da iluminação, assim foi necessário aplicar diferentes valores do nível de binarização para obter o melhor contraste possível entre o fundo das imagens e as gotas destacadas. Com a imagem de entrada do programa binarizada foi realizado filtro para remover ruídos das imagens, foi aplicado um operador morfológico chamado *imopen* [122], que faz uma erosão seguida de uma dilatação na imagem através do *software* MATLAB. Matematicamente o operador morfológico pode ser descrito pela seguinte equação:

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (1)$$

A equação acima corresponde a uma operação de erosão seguida de uma dilatação de um conjunto A por um elemento estruturante B [123].

A operação morfológica de erosão remove pixels de uma imagem que não seguem um certo padrão, já a operação de dilatação define uma área determinada e faz com que ela seja modificada por um determinado padrão. Por exemplo, esse método pode ser usado para o preenchimento de buracos, reconhecimento de padrões [124]. Além das filtrações realizadas com o pré-processamento das imagens, foi necessário remover objetos muito grandes e muito pequenos para que o programa consiga detectar as gotas de forma mais precisa. Com a imagem filtrada e após a remoção dos ruídos, foram realizadas as medições dos objetos desejados através de uma medição por área na imagem (*region-*

*props*) [125]. Basicamente a medição por área é realizada através da segmentação, que consiste em reconhecer a continuidade e similaridade de tons de cinza de uma imagem de forma a detectar partes isoladas de linhas e bordas de uma imagem [126].

Para melhor entendimento, é apresentado um fluxograma com a sequência de passos de execução do programa seguidas de explicações detalhadas da implementação do programa.

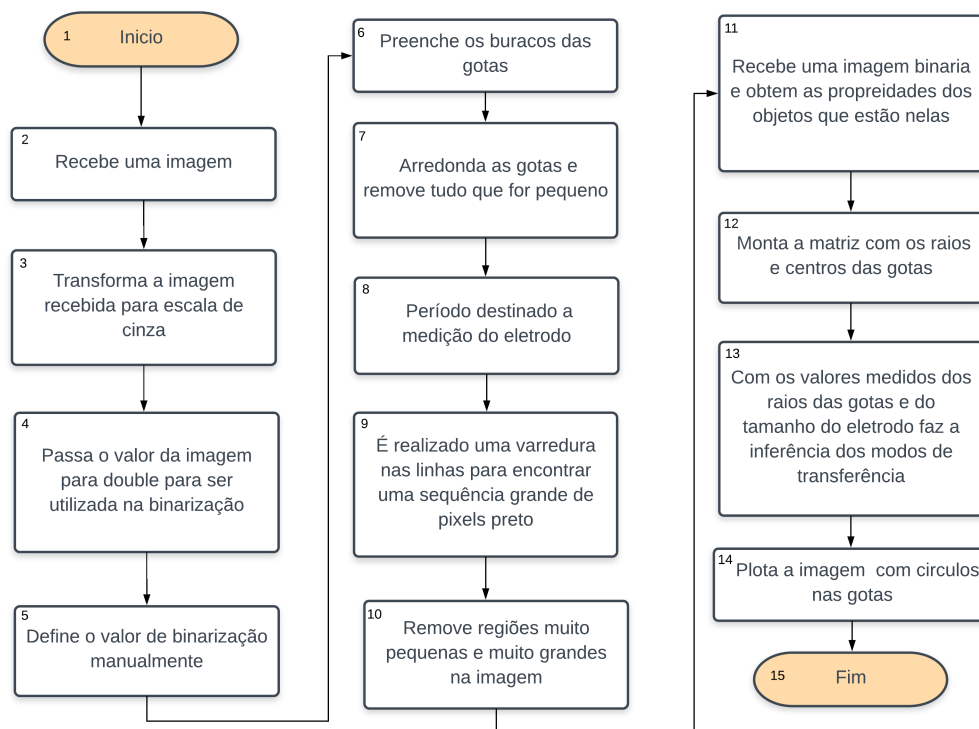


Figura 15: Fluxograma com a sequência de passos de execução do programa

1. Início do programa.
2. O programa recebe uma imagem ou um conjunto de imagens como entrada.
3. É realizado a transformação da imagem recebida pelo programa para escala de cinza. É utilizado o componente `rgb2gray` que pode ser descrito matematicamente por uma soma ponderada dos componentes R, G e B, conforme descrito na equação abaixo [127]:

$$0.2989 * R + 0.5870 * G + 0.1140 * B \quad (2)$$

4. Depois a imagem é convertida para *double* para ser utilizada na binarização, é utilizado a função `im2double` para realizar a transformação da imagem em *double* [128].

5. Para definir o melhor valor de binarização foi utilizado o método de *otsu* que pode ser definido pela soma ponderada de variância de duas classes:

$$\sigma_w^2(t) = \omega_0(t)\sigma_0^2(t) + \omega_1(t)\sigma_1^2(t) \quad (3)$$

Pesos  $\omega_0$  e  $\omega_1$  são as probabilidades das duas classes divididas por threshold  $t$  e  $\sigma_0^2$  e  $\sigma_1^2$  são as variâncias dessas classes [129, 130].

6. Para preencher os buracos que possam existir nas gotas foi utilizado um algoritmo de reconstrução morfológica, que realiza as seguintes operações: erosão e dilatação [131].
7. Com o operador morfológico *opening* foi possível arredondar mais as gotas e remover tudo o que for pequeno na imagem, foi utilizado um elemento estruturante em forma de disco com raio de 5 pixels. A descrição matemática dessa função foi apresentada na equação 1 [132].
- 8 e 9. Para realizar a medição do tamanho do eletrodo, foi realizado uma busca nas linhas das imagens através de um laço de repetição para encontrar uma sequência grande de *pixels* preto para obter as medidas do eletrodo. A busca com laço de repetição foi realizada já com as imagens em escala de cinza e após ser aplicado o *opening*.
10. Para remover as regiões muito pequenas e muito grandes da imagem foi utilizado o método de análise de componentes conexos na imagem. Seu funcionamento é uma aplicação de algoritmos baseados na teoria de grafos, de forma que subconjuntos de componentes conectados são rotulados conforme uma determinada heurística [133].
11. Para medir o tamanho das gotas foi utilizado a função *regionprops*, que recebe uma imagem binária e obtém as propriedades dos objetos que estão nela. O algoritmo busca objetos em regiões contíguas. Uma matriz com regiões contíguas tem a aparência semelhante a matriz no exemplo abaixo.

$$Matriz = \begin{bmatrix} 2 & 2 & 0 & 3 & 3 & 0 & 4 & 4 \\ 2 & 2 & 0 & 3 & 3 & 0 & 4 & 4 \end{bmatrix}$$

Os elementos com valor 2 correspondem a primeira região contígua ou com componentes conectados. Elementos com valor 3 representam o segundo componente conectado e assim por diante [134].

12. Com os dados obtidos dos raios e centros das gotas foi montado uma matriz para armazenar os dados das propriedades obtidas.

13. A inferência dos modos de transferência é realizada com a comparação do tamanho dos raios das gotas e do tamanho do eletrodo. Quando os raios das gotas são menores que o tamanho do eletrodo o programa infere como modo de transferência goticular. Quando os raios das gotas são maiores que o tamanho do eletrodo é inferido o modo de transferência globular. Quando não for detectado gotas foi inferido o modo de transferência em curto-circuito. Foi adicionado um valor de tolerância em torno de 5% na medição do tamanho do raio das gotas de forma a fornecer uma margem de definição dos modos de transferência.
14. Por último é realizado o *plot* das imagens processadas com círculos nas gotas detectadas.
15. Após realizar a medição do tamanho das gotas, tamanho do eletrodo, contar a quantidade de gotas destacadas e fazer a inferência dos modos de transferência o programa é finalizado.

Foram realizadas medições dos raios das gotas destacadas no processo, conforme apresentado na Figura 15 e foi obtido também o tamanho do eletrodo nas imagens. Por último foi aplicada também a medição por área para medir o comprimento do arco que é delimitado desde o centro do eletrodo até a região de deposição da poça de fusão, é possível visualizar as medições realizadas na Figura 19. O programa desenvolvido foi aplicado também nos conjuntos de imagens dos modos de transferência globular e curto-circuito.

Após aplicar as técnicas de processamento de imagens descritas anteriormente na Figura 15, o programa fez a avaliação dos tipos de transferência da seguinte forma:

- Com a medição do tamanho da gota e do tamanho do eletrodo, pode ser considerado como modo goticular, quando a gota for menor que o eletrodo.
- Se a gota for maior que o eletrodo então pode ser feita a inferência que o modo de transferência é globular. Visto que podem ter muitas variações e nos tamanhos das gotas detectadas foi adicionado uma tolerância de aproximadamente 5% na detecção entre os modos goticular e globular.
- Já quando o modo da transferência metálica está em curto-circuito não existe a presença da gota deslocando-se para a região da poça. Existe a formação de uma gota apenas no momento que antecede o curto-circuito, após o líquido metálico da gota entrar em contato com a poça de fusão inicia-se o curto-circuito em um ciclo de intervalos de tempo.

## 6 RESULTADOS

Devido as dificuldades na compra do produto, a etapa de implementação dos algoritmos iniciou-se com imagens cedidas pelo laboratório de solda da universidade de Uberlândia (Laprosolda/UFU/Brazil). Como apresentado na figura 10, o programa desenvolvido usa técnicas de processamento de imagem para isolar, segmentar e medir o tamanho dos raios das gotas destacadas no processo de soldagem. Depois de remover ruídos nas imagens também foi feita a medição do tamanho do eletrodo.

Ao todo foram processados 1469 *frames* e o algoritmo proposto obteve informações das características visuais das imagens da poça de fusão. Foram extraídos dados da medição do raio das gotas e do tamanho eletrodo nas imagens. Para processar as imagens foi utilizado também o aplicativo *image batch processor* do MATLAB para auxiliar no processamento do conjunto de imagens, é possível visualizar a tela com a implementação do algoritmo na Figura 18. O programa desenvolvido extraiu informações das gotas destacadas, do tamanho do eletrodo. Com os resultados obtidos, foi possível identificar alguns padrões quanto as formas da transferência metálica através da análise dos raios das gotas destacadas e do tamanho do eletrodo medido nas imagens. Abaixo é apresentado a execução do programa desenvolvido em MATLAB.

Na Figura 16 <sup>1</sup> é possível visualizar o processo da transferência metálica em curto-circuito e na Figura 17 o tipo de transferência goticular. Na Figura 16 foi medido o tamanho do eletrodo, que está delimitado em azul na Figura, no modo de transferência em curto-circuito. Na Figura 18, é possível ver a execução do aplicativo *image batch processor* do MATLAB aplicado nas imagens de perfilografia cedidas pelo laboratório de soldagem laprosolda da Universidade de Uberlândia.

---

<sup>1</sup>Figura 16, Imagem original, cedida por: Laprosolda/UFU/Brazil



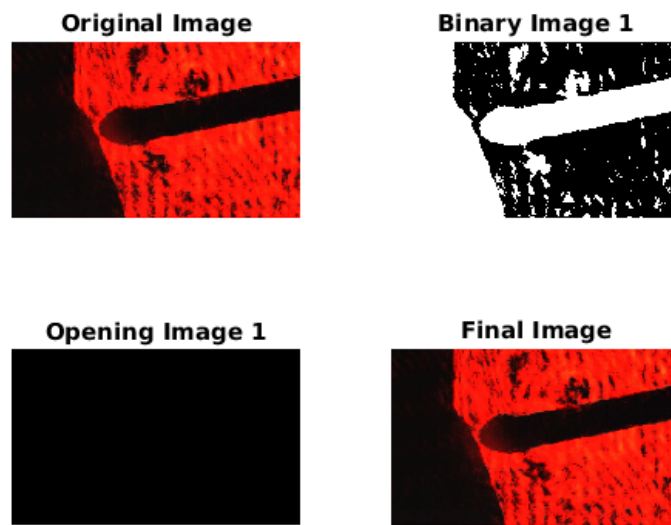


Figura 16: Medição do tamanho do eletrodo no modo de transferência em curto-circuito

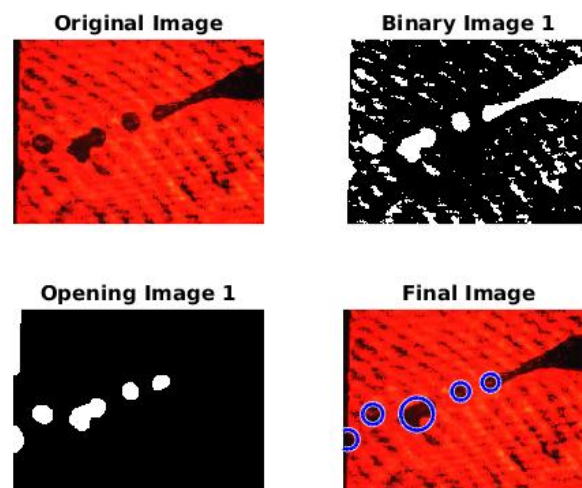


Figura 17: Segmentação da gota no modo de transferência goticular

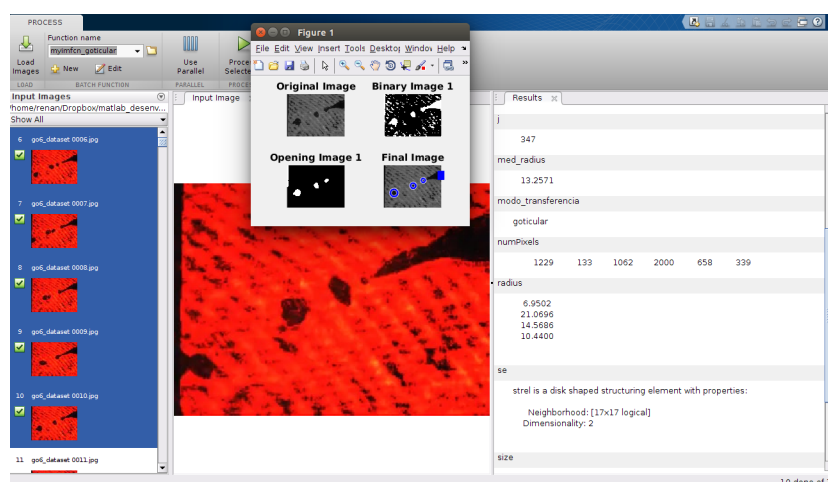


Figura 18: Processamento de imagens do dataset

## 6.1 Processamento do *dataset*

Nessa seção são apresentados os resultados obtidos com a aplicação das técnicas de processamento de imagem mencionadas anteriormente. Na Figura 19, é mostrado a execução do programa nas imagens do modo de transferência goticular geradas na FURG. Nas Figuras 20 e 21 também são apresentadas as saída do programa ao processar os conjuntos de imagens globular e curto-circuito respectivamente.

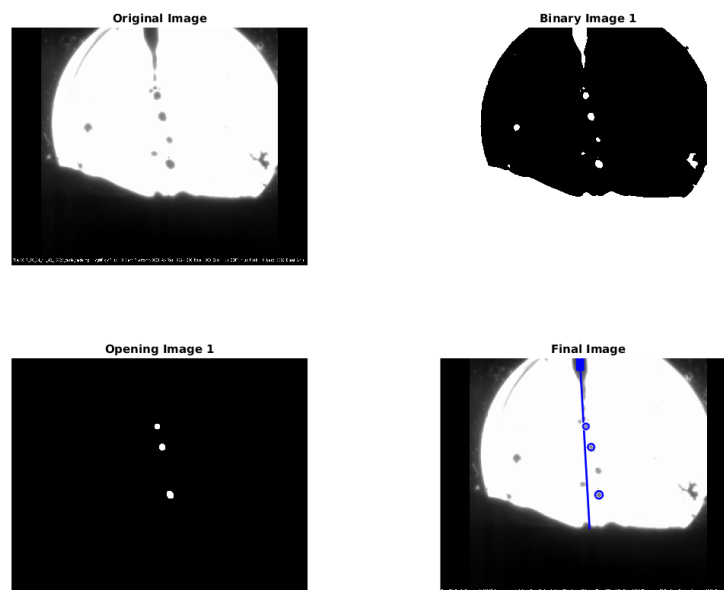


Figura 19: Processamento de imagem do conjunto de imagens do modo de transferência goticular

Foram apresentados os resultados do processamento dos conjuntos de imagem goticular, globular e curto-circuito. Dentre os dados processados, destacam-se: o raio das gotas, o tamanho do eletrodo e a quantidade de gotas transferidas. O programa foi capaz de receber diferentes imagens e definir qual modo de transferência pertence a imagem processada pelo programa implementado em MATLAB. Para apresentar um resumo do método, foi criado o diagrama presente na Figura 23.

Conforme apresentado no diagrama, o programa inicia seu funcionamento ao receber um conjunto de imagens dos modos de transferência goticular, globular e curto circuito e na sequência a imagem é transformada em escala de cinza. Em seguida é aplicada a binarização da imagem seguida da aplicação do *opening*, com isso é possível obter as gotas destacadas no processo de soldagem. Por fim, é aplicado a técnica de segmentação para realizar a medição do raio das gotas, centro das gotas detectadas, tamanho do eletrodo, e também foi contado o número de gotas destacadas por frame. Resumidamente o método funciona na comparação dos raios das gotas e do tamanho do eletrodo, como

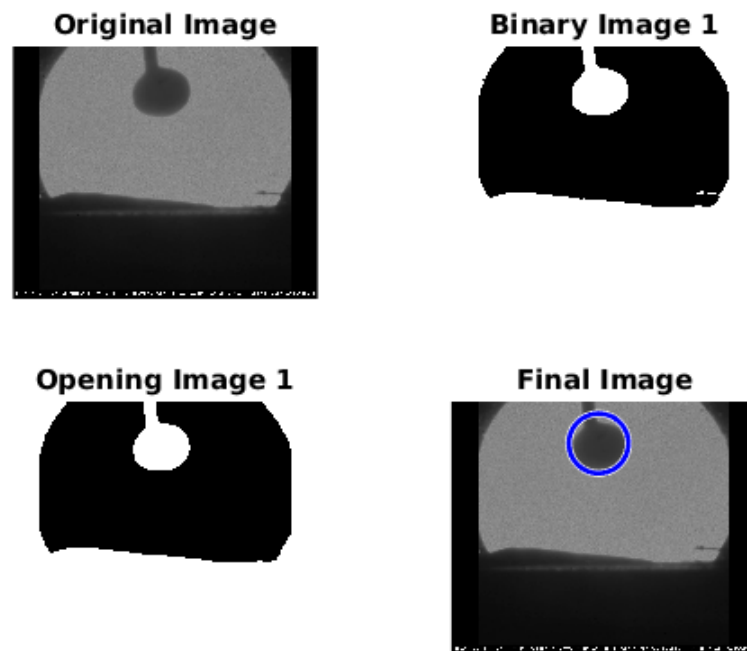


Figura 20: Processamento de imagem do conjunto de imagens do modo de transferência globular

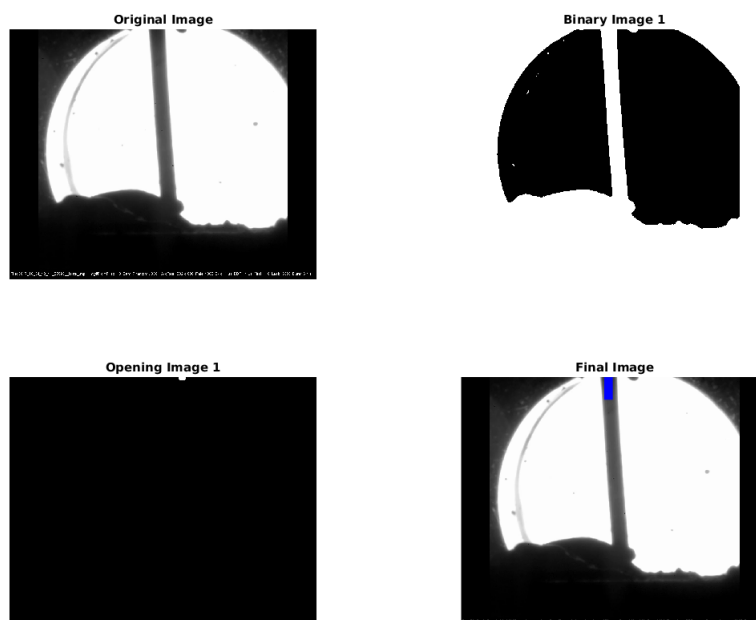


Figura 21: Processamento de imagem do conjunto de imagens do modo de transferência em curto-circuito

anteriormente já explicado seu princípio de funcionamento, assim é realizada a inferência dos modos de transferência goticular, globular e curto-circuito.

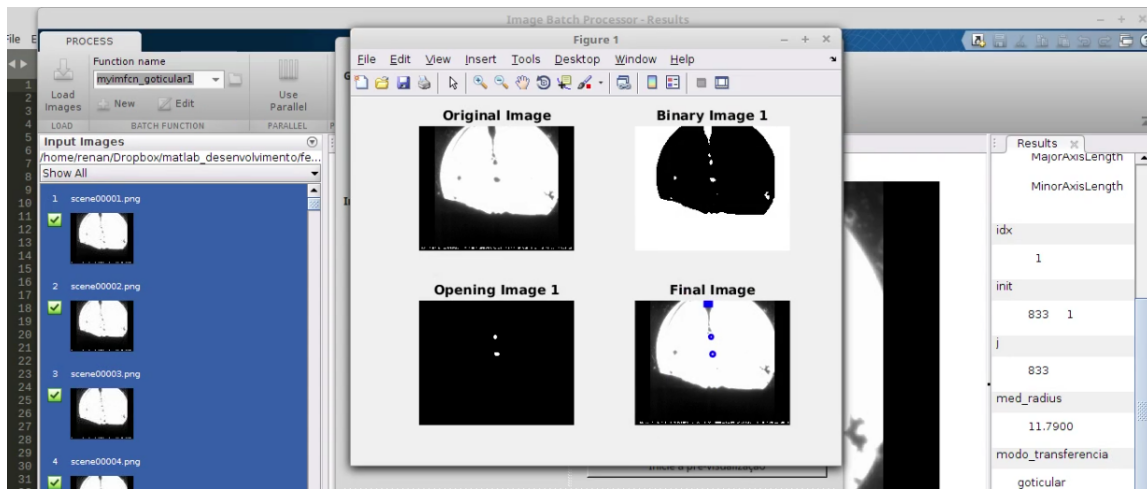


Figura 22: Processamento dos conjuntos de imagens com image batch processor

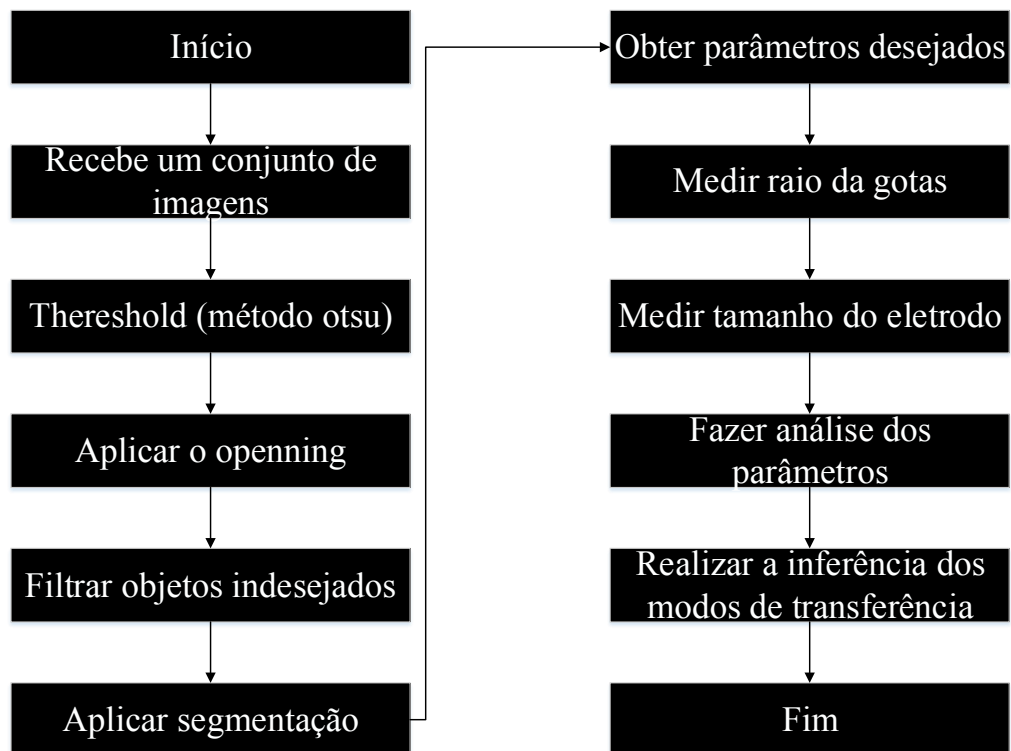


Figura 23: Diagrama explicativo do programa que faz a inferência dos modos de transferência com *software* MATLAB

## 6.2 Sincronização dos sinais de corrente, tensão e velocidade de alimentação do arame

Para validar os dados obtidos com processamento de imagem, foi realizada a sincronização dos sinais de tensão, corrente e velocidade do arame da fonte de solda junto com o uso de imagens obtidas por uma câmera de alta velocidade e o laser. Para obter os dados da fonte foi utilizada a plataforma arduino due que foi responsável pela sincronização da câmera e do sistema de medição de tensão, corrente e velocidade de alimentação do arame. Quando o disparo é feito pela serial do arduino, o mesmo aguarda um sinal de *clock* da câmera, posteriormente com a chegada do sinal os dados de tensão, corrente e velocidade de alimentação do arame são armazenados na memória do arduino. ver Figura 24, e foi sincronizada com as imagens aquisitadas pela câmera de alta velocidade.

A taxa de aquisição dos dados foi de 1kHz e foi utilizado um programa implementado no arduino para poder sincronizar os sinais da fonte de soldagem com o *trigger* da câmera de alta velocidade. Com a análise da visão computacional consegue-se visualizar o que acontece nos processos de soldagem, já com os dados dos oscilogramas pode-se apenas estimar o que acontece durante a soldagem. Portanto, os sinais de tensão, corrente e velocidade do arame são complementares na análise das características poça de fusão e dos modos de transferência.

Pode-se observar na Figura 29 que a corrente de soldagem é alta, o que é característico do modo de transferência goticular. Já na Figura 31 percebe-se a existência de picos de tensão e corrente, de forma que nos momentos de curto, o arco se extingue e a tensão cai e a corrente cresce rapidamente.

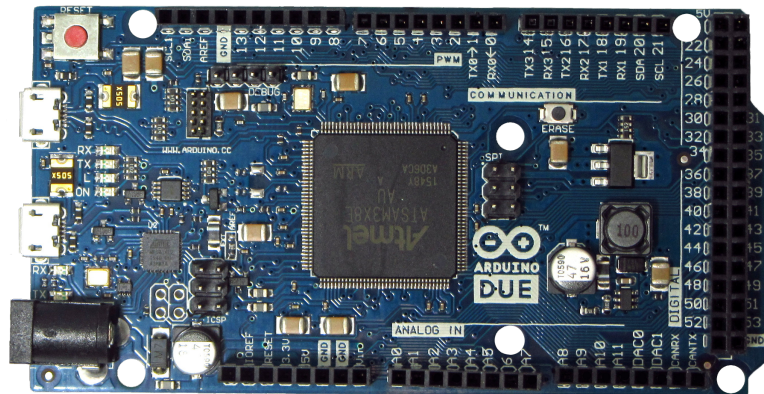


Figura 24: Arduíno Due

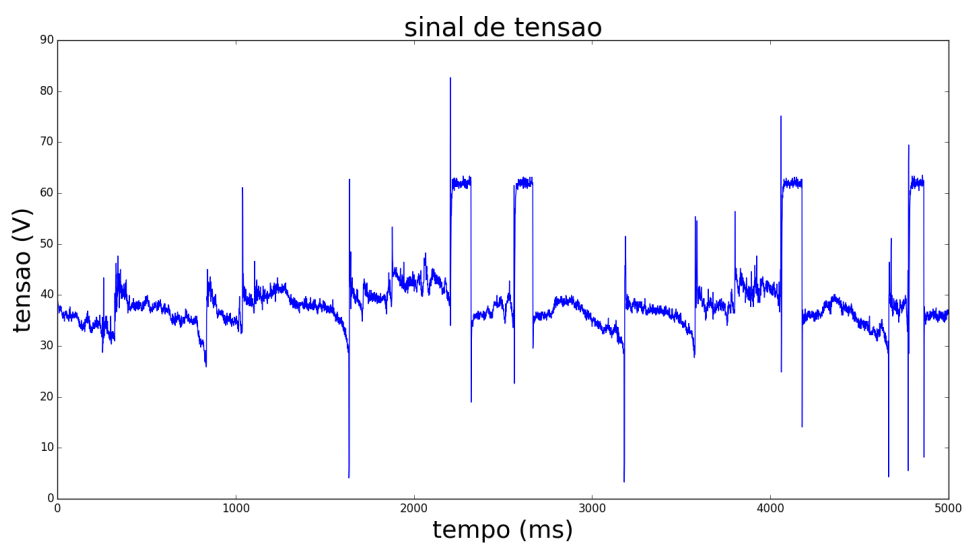


Figura 25: Sinais de tensão, no modo de transferência global

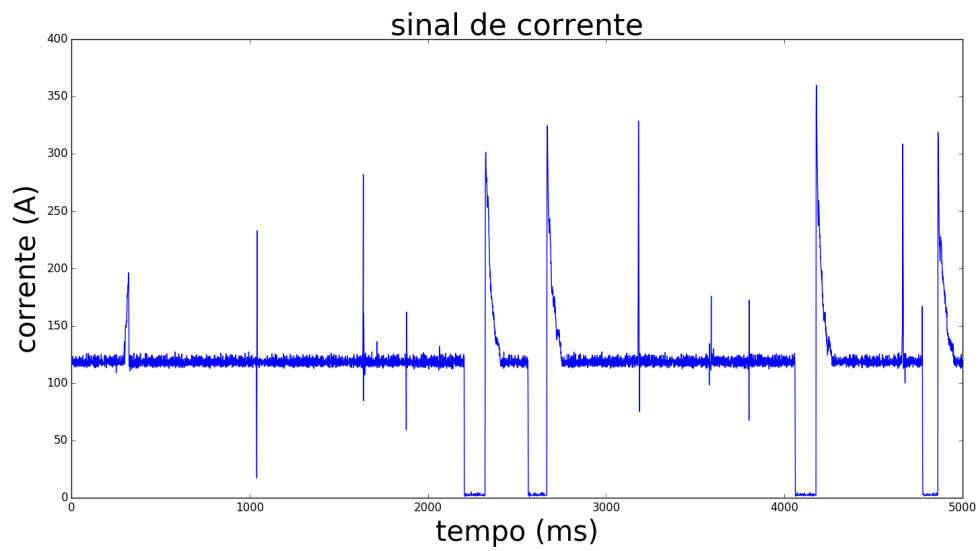


Figura 26: Sinais de corrente no modo de transferência globular

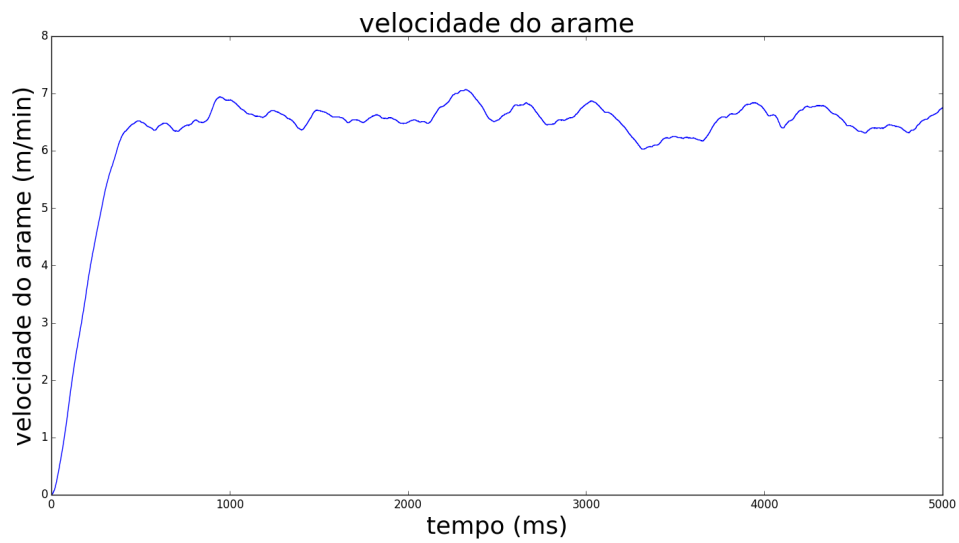


Figura 27: Velocidade de alimentação do arame no modo de transferência globular

As Figuras 25, 26 e 27 mostram os sinais obtidos pela fonte, correspondentes as imagens com modo de transferência globular

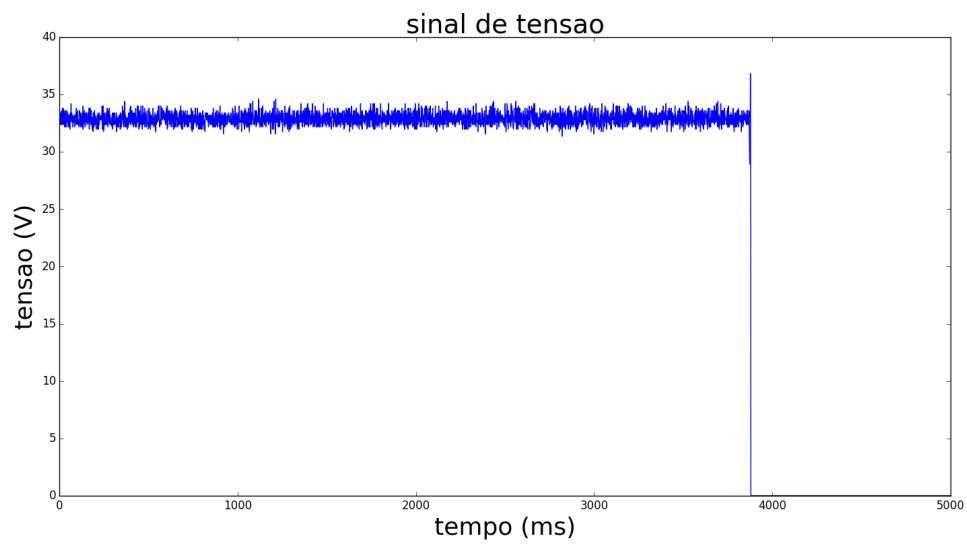


Figura 28: Sinais de tensão, no modo de transferência goticular

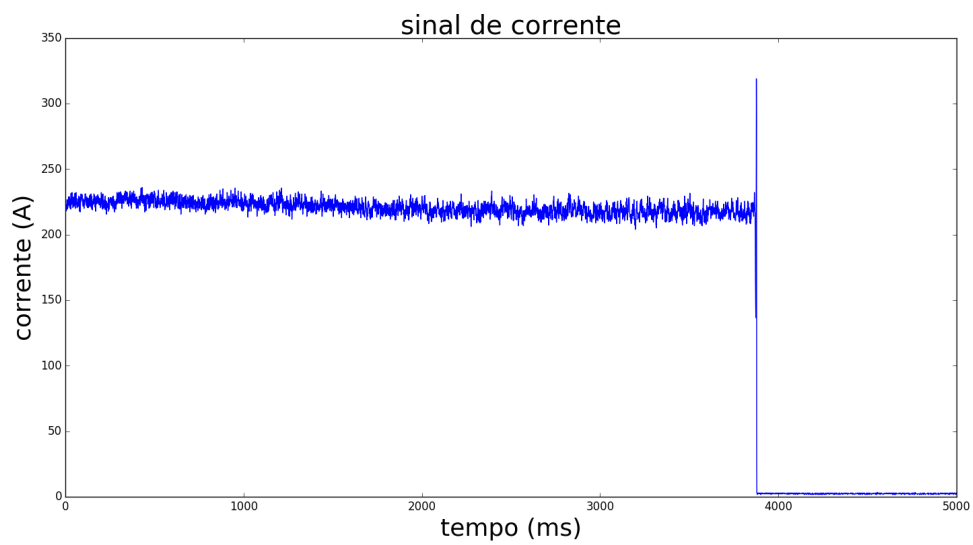


Figura 29: Sinais de corrente, no modo de transferência goticular

As Figuras 28, 29 e 30 mostram os sinais aqusitados no modo de transferência goticular.



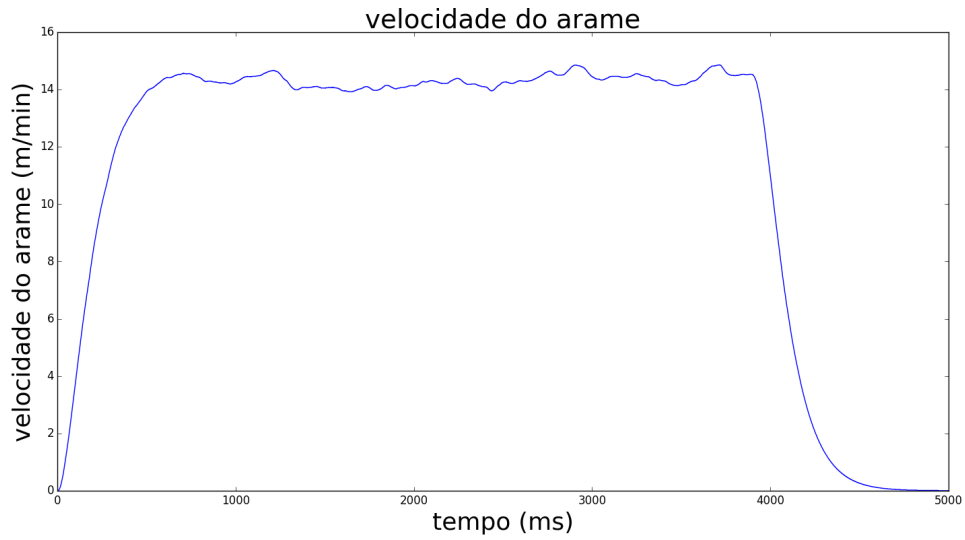


Figura 30: Velocidade de alimentação do arame, no modo de transferência goticular

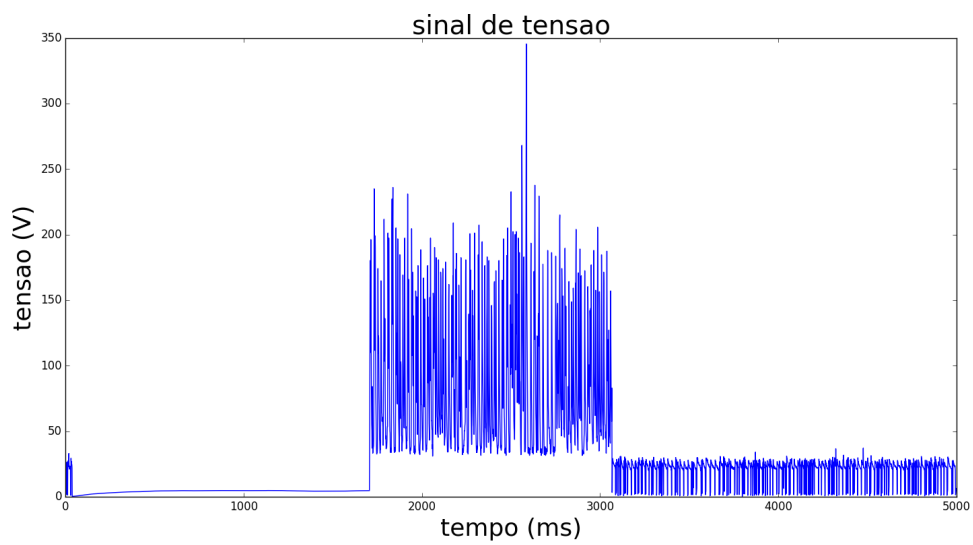


Figura 31: Sinais de tensão, no modo de transferência em curto-circuito

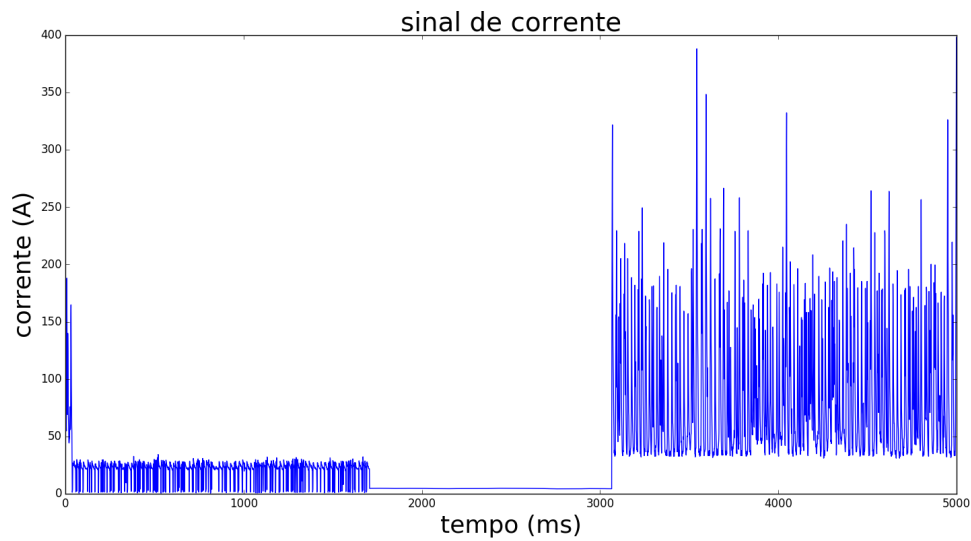


Figura 32: Sinais de corrente, no modo de transferência em curto-circuito

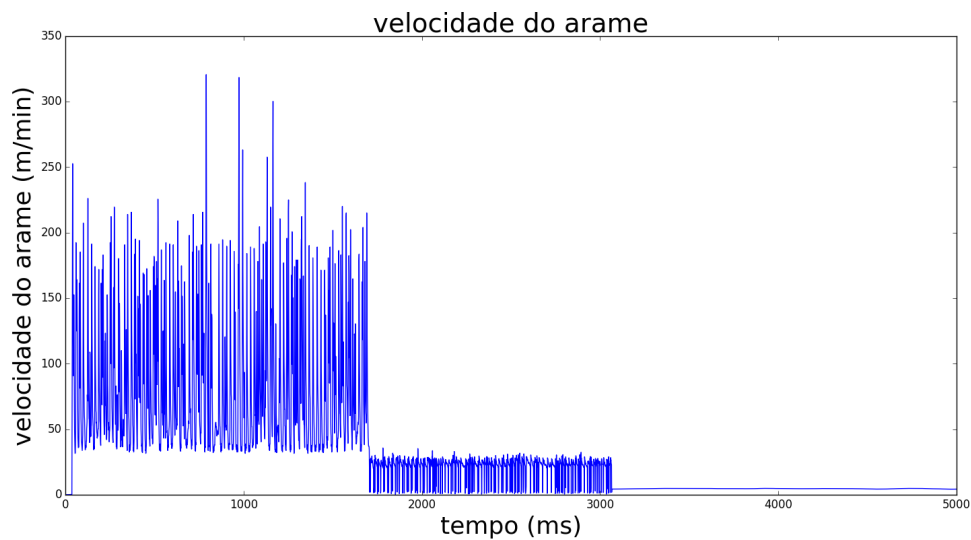


Figura 33: Velocidade de alimentação do arame, no modo de transferência em curto-circuito

Nas Figuras 31, 32 e 33 é possível visualizar os sinais sincronizados no modo transferência em curto-circuito. Os gráficos gerados tem a finalidade de apresentar o comportamento das grandezas de tensão, corrente e também das variações da velocidade do arame durante os testes realizados com perfilografia.

### 6.3 Interface de anotação

A interface de anotação, ver na Figura 34, é composta por botões de controle dos frames das imagens e oferece também a opção de fazer anotações textuais nas imagens.

Ela foi criada para facilitar o uso do programa para processar o conjunto de imagens e também para disponibilizar outras ferramentas capazes de realizarem medições manuais das imagens da poça de fusão. Para criação da interface foi utilizado um criador de interface gráfica disponível no MATLAB chamado de *GUIDE* (ambiente de desenvolvimento GUI) [135]. A interface apresenta as seguintes funcionalidades:

- Carregar vídeos e imagens.
- Carregar vídeos e também carregar imagens dos sinais de tensão, corrente e velocidade de alimentação do arame.
- Acesso ao programa criado para analisar os modos de transferência.
- Anotar manualmente dados textuais das imagens.



Figura 34: Interface de anotação, adaptado de [3]

## 6.4 Métricas de classificação

De forma a estimar a eficiência do programa desenvolvido foi realizada uma análise dos dados inferidos pelo programa. Como visto em [136], a confiabilidade de um sistema dá-se quando medidas repetidas forem bem executadas, portanto elas poderão ser

confiáveis em seus valores. Para medir a acurácia do programa, os 5019 frames com as imagens geradas na FURG, foram processados no programa desenvolvido em MATLAB, onde foram adicionados aleatoriamente imagens com os modos de transferência goticular, globular e curto-circuito. Foi analisado manualmente frame a frame para conseguir obter o valor do erro mais aproximado possível. Para auxiliar no processo os dados foram exportados para uma planilha de um arquivo com a extensão em forma de texto e foi feita análise dos dados. O programa teve dificuldade em detectar e filtrar as gotas em alguns frames, mas em geral o programa conseguiu analisar as características dos modos de transferência.

$$Acurácia = \frac{\sum Acertos}{\sum Total\ Imagens\ Processadas} \quad (4)$$

O programa recebeu como entrada 1562 imagens do modo de transferência em curto-circuito, 1748 imagens do modo de transferência globular e 1709 imagens do modo de transferência goticular, ao todo foram processados 5019 frames. O programa desenvolvido conseguiu inferir corretamente os modos de transferência em 4170 imagens. Para calcular a acurácia do programa foi utilizada a equação 4. O programa teve uma acurácia de 83,12%.

## 7 DISCUSSÃO

Conforme mencionado anteriormente as etapas de desenvolvimento desse trabalho foram: a introdução, a revisão bibliográfica, o início da implementação das técnicas de visão computacional na análise de imagens em alta velocidade, a geração de um novo conjunto de imagens com a técnica da perfilografia e a sincronização dos sinais de tensão, corrente e velocidade de soldagem da fonte de solda. Além da implementação do programa para análise visual das imagens, foi desenvolvida uma interface para abrir as imagens e os vídeos em alta velocidade e facilitar o processo de análise e anotação automática e manual dos dados extraídos das imagens. Por fim, foram implementadas as técnicas de processamento de imagem para extração de padrões e características do processo de soldagem com imagens obtidas pela câmera de alta velocidade Phantom Miro R311. Foram processados 5019 frames dos conjuntos de imagens dos modos de transferência goticular, globular e curto-circuito. O programa foi capaz de inferir o modo de transferência com uma acurácia de 83,12% ao receber como entrada conjuntos de imagens diferentes e através da comparação e análise dos parâmetros obtidos com processamento de imagem foi possível descobrir o modo de transferência de cada imagem processada.

Tendo em vista que é possível ter gotas de tamanhos muito diferentes e grandes variações do tamanho, foi considerado uma margem de cinco por cento de erro do programa para diferenciar um modo de transferência do outro. O programa apresentou dificuldade em processar os frames que não apresentavam o destacamento das gotas, mas nesses mesmos frames foi possível obter outras características das imagens, como por exemplo o tamanho do eletrodo. Todas as informações obtidas no processo foram guardadas no próprio *workspace* do MATLAB.

Com os resultados obtidos pelas técnicas de processamento de imagem, foram realizadas inferências de padrões e características da transferência metálica, como por exemplo, a identificação do modo de transferência através da análise das características geométricas das imagens em alta velocidade da poça de fusão. O primeiro atributo analisado foi o tamanho das gotas destacadas no processo e logo a seguir foi feita a medição do tamanho do eletrodo. Assim, foi possível fazer inferência do modo de transferência goticular nas imagens em alta velocidade, visto que o raio das gotas destacadas são menores que o

tamanho do eletrodo. Também foi possível fazer a dedução do modo de transferência globular, pois as gotas destacadas medidas são maiores que o tamanho do eletrodo. Além disso, também foi possível observar que a quantidade de gotas destacadas no modo de transferência globular foi menor que de destacamento das gotículas no modo de transferência gótica. Já a análise visual do modo de transferência em curto-circuito não foi detectado o destacamento de gotas, apenas foi feita a medição do tamanho do eletrodo.

Já a análise dos sinais de tensão e corrente e velocidade do arame permitiu auxiliar no entendimento do comportamento dos modos de transferência, pois para cada tipo de transferência existem variações nos parâmetros. Por exemplo, nas Figuras 25, 26 e 27 é possível ver as variações dos parâmetros de tensão, corrente e velocidade do arame no modo de transferência globular. Já nas Figuras 28, 29, 30 é apresentado as características dos parâmetros no modo gótico. Por último nas Figuras 31, 32 e 33 são apresentados os resultados da análise do sinais sincronizados com a fonte de soldagem no modo de transferência em curto-circuito.

Observa-se como esperado, que a quantidade de gotas destacadas por frame são maiores no modo gótico, o tamanho das gotas são maiores no modo de transferência globular e não foi encontrado a presença de destacamento de gotas no tipo de transferência em curto-circuito. Durante o processamento de imagens dos conjuntos dos modos de transferência foram realizadas algumas observações:

- Foi percebido que no modo de transferência gótica a poça de fusão estava mais estável e o processo de soldagem apresentou poucos respingos;
- Já nas imagens com modo globular, foi notado muitas oscilações do material líquido presente na poça de fusão e foi percebido a presença alta de respingos;
- No conjunto de imagens do modo de transferência em curto-circuito os resultados foram semelhantes ao gótico, visto que a poça apresentou poucas oscilações e mostrou poucos respingos. Não houve a deposição de gotas nesse modo de transferência.

Durante o desenvolvimento desse trabalho tiveram algumas dificuldades, devido ao tempo que demorou para a compra da câmera Phantom Miro R311 e o laser Cavilux Smart. Mesmo depois de comprado a câmera e o laser, foi necessário conseguir uma lente específica emprestada para realizar as filmagens, pois com as lentes adquiridas pela universidade não foi possível obter os conjuntos de imagens desejados.

A etapa de desenvolvimento do trabalho iniciou com imagens cedidas pelo laboratório de soldagem da universidade de Uberlândia (Laprosolda). No mês de outubro de 2017 foi possível realizar os experimentos desejados com todos os equipamento e a lente necessária emprestada para realizar os experimentos. Depois com as imagens obtidas foi

iniciado a implementação do programa que faz inferência dos modos de transferência em imagens geradas na FURG. Outra dificuldade encontrada foi a aquisição dos sinais de tensão e corrente que foram realizadas com um arduino, que possui limitação do *hardware* do equipamento quanto a frequência de aquisição dos dados.

## 8 CONCLUSÃO

Esse trabalho buscou analisar padrões e características da poça de fusão no processo de soldagem através da análise visual de conjuntos de imagem obtidos por perfilografia. Com base na revisão bibliográfica foram buscados os parâmetros e características mais procuradas na literatura, a partir das informações encontradas na revisão, foi iniciado a geração de um conjunto de imagens da poça de fusão com a técnica da perfilografia. Com a aplicação das técnicas de processamento de imagem foram extraídas as principais características como por exemplo, os raios das gotas destacadas no processo de soldagem, tamanho do eletrodo, frequência média de deposição. O programa desenvolvido conseguiu realizar a inferência dos modos de transferência goticular, globular e curto-circuito. Conhecendo os modos de transferência do processo de soldagem é possível saber a eficiência do processo que varia conforme o modo da transferência metálica. Além disso, complementar ao processo de geração e processamento dos conjuntos de imagem, foi feita a sincronização dos sinais de tensão, corrente e velocidade de alimentação do arame da fonte de soldagem. Por último foi criada uma interface para carregar os vídeos e poder acessar o aplicativo do MATLAB para processar os diferentes conjuntos de imagens. Em trabalhos futuros pode-se utilizar outras técnicas para fazer inferência dos modos de transferência, como por exemplo, redes neurais, técnicas de aprendizado de máquina e inteligência artificial para avaliar todos os parâmetros e características da poça de fusão.



## REFERÊNCIAS

- [1] Esdras Godinho Ramos. Análise da oscilação da poça de solda em gmaw por meio de processamento de imagens obtidas por perfilografia. 2012.
- [2] Jesús Emilio Pinto Lopera, Esdras Godinho Ramos, Guilherme Caribé de Carvalho, and S Alfaro. Uso da técnica de perfilografia para visualização dos modos de transferência metálica no processo de soldagem gmaw usando uma câmera cmos de alta velocidade. *6 CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO*, 2011.
- [3] Sk sahariyaz zaman, matlab video player with pause/play. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/51014-video-player-with-pause-play>, 2016. Accessed: 2016-11-29.
- [4] Paulo José Modenesi, Paulo Villani Marques, and Alexandre Queiroz Bracarense. *Soldagem-fundamentos e tecnologia*. Editora UFMG, 2005.
- [5] Paulo J Modenesi. Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais. *Belo Horizonte*, 2007.
- [6] Guohong Ma, Xiaolan Liu, and Bingqian Zhou. An image process way of globular transfer in mig welding. In *Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC), 2011 2nd International Conference on*, pages 3740–3742. IEEE, 2011.
- [7] Laboratório de pesquisa em engenharia da soldagem (lapes). <http://www.lapes.furg.br>, 2018. Accessed: 2018-01-10.
- [8] Grupo de automação e robótica inteligente (nautec). <http://www.nautec.furg.br/>, 2018. Accessed: 2018-01-10.
- [9] Dana H Ballard. *Computer vision*. NY: Prentice Hill, 1982.
- [10] Richard Szeliski. *Computer vision: algorithms and applications*. Springer Science & Business Media, 2010.

- [11] Ioannis Pitas. *Digital image processing algorithms and applications*. John Wiley & Sons, 2000.
- [12] A De and D Parle. Real time seam tracking system for automated fusion arc welding. *Science and Technology of Welding & Joining*, 2013.
- [13] CHARLES Umeagukwu, BENIGN Maqueira, and RUSSELL Lambert. Robotic acoustic seam tracking: system development and application. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 36(3):338–348, 1989.
- [14] Olagunju Oyeleye and E Amine Lehtihet. A classification algorithm and optimal feature selection methodology for automated solder joint defect inspection. *Journal of Manufacturing Systems*, 17(4):251–262, 1998.
- [15] Elias N Malamas, Euripides GM Petrakis, Michalis Zervakis, Laurent Petit, and Jean-Didier Legat. A survey on industrial vision systems, applications and tools. *Image and vision computing*, 21(2):171–188, 2003.
- [16] Paulo SS Bálamo, LO Vilarinho, M Vilela, and A Scotti. Development of an experimental technique for studying metal transfer in welding: synchronized shadowgraphy. *International Journal for the Joining of Materials(Denmark)*, 12(2):48–59, 2000.
- [17] Phantom high speed cameras super slow motion cameras. <http://www.phantomhighspeed.com/Products/Phantom-Camera-Products>, 2016. Accessed: 2016-11-30.
- [18] Mahmud S Alkoffash, Mohammed J Bawaneh, Hasan Muaidi, Shihadeh Alqrainy, and Muath Alzghool. A survey of digital image processing techniques in character recognition. *International Journal of Computer Science and Network Security (IJCSNS)*, 14(3):65, 2014.
- [19] G Saeed and YM Zhang. Mathematical formulation and simulation of specular reflection based measurement system for gas tungsten arc weld pool surface. *Measurement Science and Technology*, 14(9):1671, 2003.
- [20] Chiung-Hsin Tsai, Kuang-Hua Hou, and Han-Tung Chuang. Fuzzy control of pulsed gta welds by using real-time root bead image feedback. *Journal of Materials Processing Technology*, 176(1):158–167, 2006.
- [21] Rafael C Gonzalez and Richard E Woods. *Pocessamento digital de imagens*. Pearson Prentice Hall, 2010.

- [22] Jawad Muhammad, Halis Altun, and Essam Abo-Serie. Welding seam profiling techniques based on active vision sensing for intelligent robotic welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pages 1–19, 2016.
- [23] BM Abdullah, JS Smith, W Lucas, J Lucas, and F Malek. Monitoring of tig welding using laser and diode illumination sources: A comparison study. In *Electronic Design, 2008. ICED 2008. International Conference on*, pages 1–4. IEEE, 2008.
- [24] K Hang and Gunter Pritschow. Reducing distortions caused by the welding arc in a laser stripe sensor system for automated seam tracking. In *Industrial Electronics, 1999. ISIE'99. Proceedings of the IEEE International Symposium on*, volume 2, pages 919–924. IEEE, 1999.
- [25] K Sung, H Lee, YS Choi, and S Rhee. Development of a multiline laser vision sensor for joint tracking in welding. *The Welding Journal*, 4:79–85, 2009.
- [26] Maurício Marengoni and Stringhini Stringhini. Tutorial: Introdução à visão computacional usando opencv. *Revista de Informática Teórica e Aplicada*, 16(1):125–160, 2009.
- [27] Filipe Fraga Paula Silva. Desenvolvimento de um sensor de visão para monitoramento dos parâmetros geométricos da poça de solda no processo gtaw pulsado. 2017.
- [28] H Golnabi and A Asadpour. Design and application of industrial machine vision systems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23(6):630–637, 2007.
- [29] Eduardo J Bayro-Corrochano. Review of automated visual inspection 1983-1993, part i: conventional approaches. In *Intelligent Robots and Computer Vision XII: Algorithms and Techniques*, volume 2055, pages 128–159. International Society for Optics and Photonics, 1993.
- [30] Eduardo J Bayro-Corrochano. Review of automated visual inspection 1983-1993, part ii: approaches to intelligent systems. In *Intelligent Robots and Computer Vision XII: Algorithms and Techniques*, volume 2055, pages 159–173. International Society for Optics and Photonics, 1993.
- [31] AWS A3.0M/A3.0:2010. *Standard Welding Terms and Definitions*. American Welding Society (AWS), 2010.
- [32] Sadek C Absi Alfaro, Wolfgang Trier, and Paul Drews. Sistema de visão computacional inteligente para robôs de soldagem. *3 Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, 1997.

- [33] Paulo J Modenesi, PV MARQUES, and DB SANTOS. Fontes de energia para a soldagem a arco. *Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais–UFMG*, 2005.
- [34] Shervin Shirmohammadi and Alessandro Ferrero. Camera as the instrument: the rising trend of vision based measurement. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 17(3):41–47, 2014.
- [35] M St Wêglowski, Y Huang, and YM Zhang. Effect of welding current on metal transfer in gmaw. *Archives of Materials Science and Engineering*, 33(1):49–56, 2008.
- [36] Alexandre Queiroz Bracarense. Gas metal arc welding. *Disponível no site*, 2003.
- [37] Welding Handbook AWS. Vol 1. *Welding Technology*, 1987.
- [38] Enedina Beatriz Gomes. *Análise do comportamento da soldagem por Curto-Circuito aplicado ao processo Eletrodo Tubular através da Metodologia Taguchi*. PhD thesis, Universidade Federal de Itajubá, 2006.
- [39] Regina Paula Garcia Santos. *Uma avaliação comparativa dos processos MIG/MAG e eletrodo tubular em termos de capacidade produtiva, geração de fumos e de respingos*. PhD thesis, Universidade Federal de Uberlândia, 2010.
- [40] WR ARAÚJO. *Comparação entre a Soldagem Robotizada com Arame Sólido e Metal Cored- A ocorrência do Finger*. PhD thesis, Dissertação (Mestrado)-Curso de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
- [41] Alexandre Queiroz Bracarense and Belo Horizonte. Processo de soldagem tig-taw. *Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais-Escola de Engenharia. Pós-Graduação Engenharia Mecânica*, 2000.
- [42] Paulo J Modenesi and Paulo Villani Marques. Soldagem i introdução aos processos de soldagem. *Belo Horizonte*, 2000.
- [43] Olga Liskevych et al. Estudo da influência do teor de co<sub>2</sub> na regularidade da transferência de metal e estabilidade do processo mig/mag. 2010.
- [44] Américo Scotti, Vladimir Ponomarev, and William Lucas. A scientific application oriented classification for metal transfer modes in gma welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(6):1406–1413, 2012.

- [45] Bagnus YB Yudodibroto, Marcel JM Hermans, Gert den Ouden, and Ian M Richardson. Observations on droplet and arc behaviour during pulsed gmaw. *Welding in the World*, 53(7-8):R171–R180, 2009.
- [46] Chuan-song Wu, De-gang Zou, and Jin-qiang Gao. Determining the critical transition current for metal transfer in gas metal arc welding (gmaw). *Frontiers of Materials Science in China*, 2(4):397–401, 2008.
- [47] WM Robert and J Messler. Principles of welding, 1999.
- [48] V Ponomarev, HC Miranda, and V Ferraresi. Optimisation of mag-co 2 welding short-circuiting metal transfer. *International Journal for the Joining of Materials*, 16(2):43–48, 2004.
- [49] Shi Yu, Xue Cheng, Fan Ding, and Chen Jianhong. Visual-based intelligent control system for robotic gas metal arc welding. In *2009 WRI Global Congress on Intelligent Systems*, volume 2, pages 253–257. IEEE, 2009.
- [50] Eduardo Bidese Puhl, Jair Carlos Dutra, Nelso Gauze Bonacorso, and Florianópolis Mecânica. Estudo da aplicabilidade do mig/mag com polaridade negativa para soldagens de alta velocidade em peças da indústria automotiva. In *Anais do XXXVII CONSOLDA-Congresso Nacional de Soldagem. Natal:[sn]*, 2011.
- [51] Carla Cavalcante Koike, MHIL Barros, GC Carvalho, and SC Alfaro. Monitoração da poça de fusão no processo de soldagem gmaw. In *Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica COBEM*, volume 99, 1999.
- [52] Gustavo Alves Pinheiro, Alexandre Queiroz Bracarense, Paulo Villani Marques, Axel Meyer, Jorge Fernandez dos Santos, and Gordon R Blakemore. Costura por fricção: Fundamentos e aplicações. *1º Cobef*, 2001.
- [53] Gary Dean. Optimization of metal transfer and fusion using current control in dip transfer gmaw. 2003.
- [54] Stephan J Bless. Drop transfer in short-circuit welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 7(4):526, 1974.
- [55] Yoshiaki Arata, Nobuyuki Abe, and Tatsuharu Oda. Fundamental phenomena in high power co<sub>2</sub> laser welding (report i): Atmospheric laser welding. *Welding Physics, Process & Instrument*, 1985.
- [56] Ingemar Eriksson, Per Gren, John Powell, and Alexander FH Kaplan. New high-speed photography technique for observation of fluid flow in laser welding. *Optical Engineering*, 49(10):100503–100503, 2010.

- [57] MC Schmidt and GS Settles. Alignment and application of the conical shadow-graph flow visualization technique. *Experiments in fluids*, 4(2):93–96, 1986.
- [58] Hugo Weichel. *Laser beam propagation in the atmosphere*, volume 3. SPIE press, 1990.
- [59] WM Steen. Laser material processing—an overview. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 5(4):S3, 2003.
- [60] R Kovacevic, YM Zhang, and L Li. Monitoring of weld joint penetrations based on weld pool geometrical appearance. *Welding Journal-Including Welding Research Supplement*, 75(10):317–329, 1996.
- [61] TG Lim and HS Cho. Estimation of weld pool sizes in gma welding process using neural networks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 207(1):15–26, 1993.
- [62] R Kovacevic, YM Zhang, and S Ruan. Sensing and control of weld pool geometry for automated gta welding. *Journal of Engineering for Industry*, 117(2):210–222, 1995.
- [63] IEEE. About ieeexplore digital library, jan 2017.
- [64] Science Direct. Explore scientific, fev 2017.
- [65] SciELO. Scielo - a model for cooperative electronic publishing in developing countries, jan 2017.
- [66] Zhenzhou Wang. A laser back-lighting based metal transfer monitoring system for robotic gas metal arc welding. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 38:52–66, 2016.
- [67] Yoke-Rung Wong and Shih-Fu Ling. An investigation of dynamical metal transfer in gmaw—effects of argon shielding gas. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(1):106–111, 2014.
- [68] Lin Wang, Ji Chen, Chuansong Wu, and Jinqiang Gao. Backward flowing molten metal in weld pool and its influence on humping bead in high-speed gmaw. *Journal of Materials Processing Technology*, 237:342–350, 2016.
- [69] Jesús Emilio Pinto Lopera, Sadek C Absi Alfaro, and JMST MOTTA. Modelagem empírica da transferência goticular projetada em processos de soldagem gmaw. *Soldagem e Inspeção*, 17(4):335–346, 2012.

- [70] Carlos Eduardo Aguiar Lima Rodrigues and Américo Scotti. Levantamento e avaliação do movimento de gotas em transferência na soldagem mig/mag. 2004.
- [71] Wen Yuan-mei, Huang Shi-sheng, Xue Jia-xiang, and Liu Xiao. Key techniques on design of laser high-speed video system for recording metal transfer in arc welding. In *Electronic Measurement and Instruments, 2007. ICEMI'07. 8th International Conference on*, pages 4–900. IEEE, 2007.
- [72] Yan Shao, ZhenZhou Wang, and YuMing Zhang. Monitoring of liquid droplets in laser-enhanced gmaw. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 57(1-4):203–214, 2011.
- [73] Zhenzhou Wang and YuMing Zhang. Processing of low resolution metal transfer images. In *Industrial Electronics Society, 2007. IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE*, pages 2434–2439. IEEE, 2007.
- [74] Luciano Duarte Nascimento Franco. Sincronização, captura e análise de imagens da poça de soldagem no processo gmaw convencional, no modo de transferência metálica por curto-circuito. 2007.
- [75] Ke Li, Zhisheng Wu, and Cuirong Liu. Measurement and calculation of plasma drag force in arc welding based on high-speed photography technology and particle dynamics. *Materials & Design*, 85:97–101, 2015.
- [76] Ario Sunar Baskoro et al. Monitoring of molten pool image during pipe welding in gas metal arc welding (gmaw) using machine vision. In *Advanced Computer Science and Information System (ICACSIS), 2011 International Conference on*, pages 381–384. IEEE, 2011.
- [77] LH Sharif, S Yamane, Y Hino, K Eguchi, T Kubota, and K Oshima. Sensing and digital control of weld pool with visual welding robot. In *Industrial Electronics Society, 2000. IECON 2000. 26th Annual Conference of the IEEE*, volume 3, pages 1521–1526. IEEE, 2000.
- [78] Ruoyang Li, Tianjiao Wang, Chunming Wang, Fei Yan, Xinyu Shao, Xiyuan Hu, and Jianmin Li. A study of narrow gap laser welding for thick plates using the multi-layer and multi-pass method. *Optics & Laser Technology*, 64:172–183, 2014.
- [79] JIN Zeshi, LI Haichao, JIA Guoqing, and GAO Hongming. Dynamic nonlinear modeling of 3d weld pool surface in gtaw. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 39:1–8, 2016.

- [80] ZhenZhou Wang. Monitoring of gma weld pool from the reflected laser lines for real-time control. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(4):2073–2083, 2014.
- [81] Yanling Xu, Gu Fang, Shanben Chen, Ju Jia Zou, and Zhen Ye. Real-time image processing for vision-based weld seam tracking in robotic gmaw. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(9-12):1413–1425, 2014.
- [82] Carolina Pimenta Mota. Sistema de visão por infravermelho próximo para monitoramento de processos de soldagem a arco. *CONSOLDA*, 2011.
- [83] Jinchao Liu, Zhun Fan, Kim Hardam Christensen, Jens Klæstrup Kristensen, et al. A real-time passive vision system for robotic arc welding. In *2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, pages 389–394. IEEE, 2015.
- [84] Xiao Ji Ma, Yu Ming Zhang, Amber M Gay, and Alan T Male. Image processing for measurement of three-dimensional gas metal arc weld pool surface: Algorithms are explored for processing the image of a grid laser pattern reflected from the dynamic gma weld pool surface. In *Computer Science and Automation Engineering (CSAE), 2012 IEEE International Conference on*, volume 2, pages 243–249. IEEE, 2012.
- [85] Yong Zou, Yunhua Li, Lipei Jiang, and Long Xue. Weld pool image processing algorithm for seam tracking of welding robot. In *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2011 6th IEEE Conference on*, pages 161–165. IEEE, 2011.
- [86] Benkai Xie, Qiang Zhou, and Liang Yu. A real-time welding training system base on virtual reality. In *2015 IEEE Virtual Reality (VR)*, pages 309–310. IEEE, 2015.
- [87] Cícero Murta Diniz Starling, Paulo J Modenesi, Tadeu Messias Donizete Borba, and Belo Horizonte. Caracterização do cordão na soldagem fcaw com um arame tubular rutílico. 2011.
- [88] ALECSANDER PEREIRA MARTINS and JOSÉ CARLOS PIZOLATO JUNIOR. Inspeção de solda utilizando visão computacional. *Anais do 10o Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente–X SBAI, São João Del Rey, Minas gerais*, pages 444–449, 2011.
- [89] Cícero Murta Diniz Starling, Paulo José Modenesi, and Tadeu Messias Donizete Borba. Caracterização do cordão na soldagem fcaw com um arame tubular “metal cored”. *Soldagem & Inspeção, São Paulo*, 16:285–300, 2011.



- [90] Yanling Xu, Gu Fang, Na Lv, Shanben Chen, and Ju Jia Zou. Computer vision technology for seam tracking in robotic gtaw and gmaw. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 32:25–36, 2015.
- [91] Marine Stadler, Mathieu Masquère, Jonathan Mougnot, Pierre Freton, and Jean-Jacques Gonzalez. High-speed camera on molten pool in transferred arc configuration. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 42(10):3403–3404, 2014.
- [92] Xiangmeng Meng, Guoliang Qin, Yuqi Zhang, Banglong Fu, and Zengda Zou. High speed tig–mag hybrid arc welding of mild steel plate. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(11):2417–2424, 2014.
- [93] Sumonmart Deenin, Nirut Naksuk, Chowarit Mitsantisuk, Jiradech Naknguentong, Waravut Printrakoon, and Taweerush Maruaysap. Investigation on gta weld repairs for gas turbine blades. In *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2015 12th International Conference on*, pages 1–4. IEEE, 2015.
- [94] Zuo Shiwei, He Jianping, Wang Fuxin, and Xiang Feng. Modeling and simulating of short-circuiting transferring in gmaw. In *Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring (CDCIEM), 2011 International Conference on*, pages 463–466. IEEE, 2011.
- [95] JS Rudas, JS Restrepo, and LM Gómez. Prediction of metal transfer modes in the gmaw process. In *Automatic Control (CCAC), 2015 IEEE 2nd Colombian Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2015.
- [96] Irwin Sobel and Gary Feldman. A 3x3 isotropic gradient operator for image processing. *a talk at the Stanford Artificial Project in*, pages 271–272, 1968.
- [97] Judith MS Prewitt. Object enhancement and extraction. *Picture processing and Psychopictorics*, 10(1):15–19, 1970.
- [98] Lawrence Gilman Roberts. *Machine perception of three-dimensional soups*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1963.
- [99] John Canny. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, (6):679–698, 1986.
- [100] Paul VC Hough. Method and means for recognizing complex patterns. Technical report, 1962.

- [101] Jinle Zeng, Baohua Chang, Dong Du, Yuxiang Hong, Yirong Zou, and Shuhe Chang. A visual weld edge recognition method based on light and shadow feature construction using directional lighting. *Journal of Manufacturing Processes*, 24:19–30, 2016.
- [102] Yanling Xu, Huanwei Yu, Jiyong Zhong, Tao Lin, and Shanben Chen. Real-time image capturing and processing of seam and pool during robotic welding process. *Industrial Robot: An International Journal*, 39(5):513–523, 2012.
- [103] Jun Xiong, Guangjun Zhang, Zhilong Qiu, and Yongzhe Li. Vision-sensing and bead width control of a single-bead multi-layer part: material and energy savings in gmaw-based rapid manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 41:82–88, 2013.
- [104] Sang-Min Yang, Man-Ho Cho, Ho-Young Lee, and Taik-Dong Cho. Weld line detection and process control for welding automation. *Measurement Science and Technology*, 18(3):819, 2007.
- [105] Nobuyuki Otsu. A threshold selection method from gray-level histograms. *Automatica*, 11(285-296):23–27, 1975.
- [106] Mohammad Mousavi Anzehae, Mohammad Haeri, and Ali Reza Doodman Tipi. Gas metal arc welding process control based on arc length and arc voltage. In *Control Automation and Systems (ICCAS), 2010 International Conference on*, pages 280–285. IEEE, 2010.
- [107] Rudolph Emil Kalman et al. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of basic Engineering*, 82(1):35–45, 1960.
- [108] Deyong You, Xiangdong Gao, and Seiji Katayama. Monitoring of high-power laser welding using high-speed photographing and image processing. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 49(1):39–52, 2014.
- [109] Carolina Pimenta Mota, Marcus Vinícius Ribeiro Machado, Diandro Bailoni Fernandes, and Louriel Oliveira Vilarinho. Estudo da emissão de raios infravermelho próximo em processos de soldagem a arco. *Soldagem e Inspeção*, 16(1):044–052, 2011.
- [110] BYB Yudodibroto. *Liquid metal oscillation and arc behaviour during welding*. PhD thesis, TU Delft, Delft University of Technology, 2010.
- [111] Leonardo Nicolosi, Ronald Tetzlaff, Felix Abt, Andreas Blug, and Heinrich Hofler. A camera based closed loop control system for keyhole welding processes: Algo-

- rithm comparison. In *Circuits and Systems (ISCAS), Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on*, pages 2043–2046. IEEE, 2010.
- [112] JJ Wang, Tao Lin, and SB Chen. Obtaining weld pool vision information during aluminium alloy tig welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26(3):219–227, 2005.
- [113] Kléber Mendes de Figueiredo et al. Mapeamento dos modos de transferência metálica na soldagem mig de alumínio. 2002.
- [114] Cícero Murta Diniz Starling and Paulo José Modenesi. Estudo da transferência de metal de um arame tubular “metal cored”. *UFMG*, 2004.
- [115] P Praveen, Mun-Jin Kang, and PKDV Yarlagadda. Arc voltage behavior in gmaw-p under different drop transfer modes. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 32(2):196–202, 2009.
- [116] Henri Gavin. The levenberg-marquardt method for nonlinear least squares curve-fitting problems, 2011.
- [117] Reyes Rios-Cabrera, America B Morales-Diaz, Jaime F Aviles-Viñas, and Ismael Lopez-Juarez. Robotic gmaw online learning: issues and experiments. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pages 1–22, 2016.
- [118] Joao Francisco Galera Monico, Aluir Porfírio Dal Poz, Maurício Galo, MARCELO CARVALHO DOS SANTOS, and LEONARDO CASTRO DE OLIVEIRA. Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 15(3), 2009.
- [119] Lem, current transducer htr 500-sb. [http://www.lem.com/docs/products/htr\\_50\\_500-sb.pdf](http://www.lem.com/docs/products/htr_50_500-sb.pdf), 2018. Accessed: 2018-04-08.
- [120] Lem, voltage transducer dvl 250. [http://www.lem.com/docs/products/dvl\\_250.pdf](http://www.lem.com/docs/products/dvl_250.pdf), 2018. Accessed: 2018-04-08.
- [121] Jusoan. Lang Mór and Débora. de Paula. Sistema de acionamento de uma câmera de alta velocidade e sincronização com o sistema de multi-sensoriamento em processos de soldagem linear robotizada. In *XXVI Congresso de Iniciação Científica*, pages 1–4, Pelotas, Brasil, 2017.
- [122] Documentação do matlab - operador morfológico de uma imagem (*imopen*). <https://www.mathworks.com/help/images/ref/imopen.html>, 2017. Accessed: 2017-12-27.
- [123] Rafael C Gonzalez and Richard E Woods. Digital image processing, 2012.

- [124] José Eustáquio Rangel de Queiroz and Herman Martins Gomes. Introdução ao processamento digital de imagens. *RITA*, 13(2):11–42, 2006.
- [125] Documentação do matlab - medição de propriedade de regiões de uma imagem (*regionprops*). <https://www.mathworks.com/help/images/ref/regionprops.html>, 2017. Accessed: 2017-12-27.
- [126] Rafael C Gonzalez, Richard E Woods, et al. Digital image processing, 2002.
- [127] Documentação do matlab - convertendo imagens para escala de cinza. <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/rgb2gray.html>, 2018. Accessed: 2018-04-08.
- [128] Documentação do matlab - convertendo imagens para double.
- [129] Nobuyuki Otsu. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 9(1):62–66, 1979.
- [130] Mehmet Sezgin and Bülent Sankur. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation. *Journal of Electronic imaging*, 13(1):146–166, 2004.
- [131] Pierre Soille. *Morphological image analysis: principles and applications*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [132] Rolf Adams. Radial decomposition of disks and spheres. *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, 55(5):325–332, 1993.
- [133] Hanan Samet and Markku Tamminen. Efficient component labeling of images of arbitrary dimension represented by linear bintrees. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 10(4):579–586, 1988.
- [134] Documentação do matlab - obtendo valores das propriedades de um objeto.
- [135] Documentação do matlab - criar aplicativos com interface gráfica do usuário - guide. <https://www.mathworks.com/discovery/matlab-gui.html>, 2017. Accessed: 2018-01-09.
- [136] Joseph F Hair, William C Black, Barry J Babin, Rolph E Anderson, and Ronald L Tatham. *Análise multivariada de dados*. Bookman Editora, 2009.