



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA BASEADO EM
AQUISIÇÃO DE IMAGENS PARA A PARAMETRIZAÇÃO DO
PROCESSO GMAW-P EM MANUFATURA ADITIVA

FAGNER GUILHERME FERREIRA COELHO

Belo Horizonte, 13 de agosto de 2021.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

FAGNER GUILHERME FERREIRA COELHO

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA BASEADO EM
AQUISIÇÃO DE IMAGENS PARA A PARAMETRIZAÇÃO DO
PROCESSO GMAW-P EM MANUFATURA ADITIVA

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Engenharia de Manufatura e Materiais

Linha de Pesquisa: Manufatura Aditiva – Processos de Soldagem

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Queiroz Bracarense, PhD
Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC), UFMG

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2021

C672d

Coelho, Fagner Guilherme Ferreira.

Desenvolvimento de um sistema baseado em aquisição de imagens para a parametrização do processo GMAW-P em manufatura aditiva [recurso eletrônico] / Fagner Guilherme Ferreira Coelho. - 2021.
1 recurso online (188 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Alexandre Queiroz Bracarense.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 157-188.

Bibliografia: f. 132-156.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Robótica - Teses. 2. Visão por computador - Teses. 3. Soldagem - Teses. 4. Predição (Lógica) - Teses.
I. Bracarense, Alexandre Queiroz. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
FOLHA DE APROVAÇÃO

"DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA BASEADO EM AQUISIÇÃO DE IMAGENS PARA PARAMETRIZAÇÃO DO PROCESSO GMAW-P EM MANUFATURA ADITIVA"

FAGNER GUILHERME FERREIRA COELHO

Colegiado Programa

Engenharia

Gerais, constituída pelos

Alexandre Queiroz Bracarense (Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Jose Lima II (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Ariel Rodriguez Arias (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Guilherme Caribe de Carvalho (Universidade de Brasília/UnB), Dr. Mario Fernando Montenegro Campos (Departamento de Ciência da Computação/UFMG) e Dr. Louriel Oliveira Vilarinho (Universidade Federal de Uberlândia/UFU), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de **"Doutor em Engenharia Mecânica"**, na área de concentração de "Projeto e Sistemas".

Tese aprovada no dia 13 de agosto de 2021.



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Queiroz Bracarense, Professor do Magistério Superior**, em 23/08/2021, às 11:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Jose Lima II, Professor do Magistério Superior**, em 23/08/2021, às 17:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ariel Rodriguez Arias, Professor do Magistério Superior**, em 26/08/2021, às 07:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Louriel Oliveira Vilarinho, Usuário Externo**, em 01/09/2021, às 08:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Guilherme Caribé de Carvalho, Usuário Externo**, em 31/08/2021, às 12:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mario Fernando Montenegro Campos, Pró-reitor(a)**, em 02/09/2021, às 09:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?

[acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0](#), informando o código verificador **0909874** e o código CRC **0B50C833**.

Agradecimentos

*Agradeço primeiramente a Deus, por te me concedido saúde, sabedoria e determinação nos meus objetivos. A minha querida família, peço desculpas pelas ausências e faltas em alguns momentos, pois sempre estiveram ao meu lado com um apoio incondicional. Gratidão aos professores Alexandre Queiroz Bracarense e Eduardo José Lima II, que acreditaram nesta proposta e contribuíram com seus conhecimentos para o desenvolvimento deste trabalho. Estendo os meus agradecimentos ao Dr. Raul Gohr da IMC-Soldagem, pelas informações necessárias para o desenvolvimento da interface com a fonte de soldagem e ao Sr. Laurindo Almeida e a todos os colaboradores da DVPRO pelas dicas quanto ao uso da câmera de alta velocidade. O meu muito obrigado as agências de fomento que direta ou indiretamente contribuíram com a realização deste. Aos meus ex-chefes e todos os colegas e funcionários da COMAU do Brasil que, direta ou indiretamente, ajudaram e apoiaram a realização deste trabalho. Ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, especialmente a toda equipe do **Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação** deixo o meu abraço fraterno.*

"Bem-aventurado o homem que acha sabedoria e o homem que adquire conhecimento."

(Provérbios 3:13)

"Superação é ter a humildade de aprender com o passado, não se conformar com o presente e desafiar o futuro."

(Hugo Bethlem)

"Ninguém é tão grande que não possa aprender, nem tão pequeno que não possa ensinar."

(Píndaro)

Dedicatória



*Dedico este trabalho ao meu querido e amado pai, que nos deixou em março de 2020, mas sei que onde quer que ele esteja, está muito orgulhoso desta conquista.
Te amo PAI.*

Resumo

Nos últimos anos, um elevado número de pesquisas baseadas em processos de Manufatura Aditiva, vem sendo desenvolvidas nas mais diversas áreas com o uso de diferentes técnicas e materiais. A aplicação do processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco apresenta elevada taxa de deposição e tem se mostrado uma tecnologia bastante promissora para atender as exigências atuais por um rápido desenvolvimento e produção de novos produtos. A qualidade final da peça produzida pode ser acompanhada pelo comportamento da superfície da poça de fusão, que contém diversas informações tais como penetração, largura e reforço, que determinam a geometria da camada depositada. Esta tese descreve uma técnica para auxiliar na predição e controle dos parâmetros do processo por deposição a arco e que serão utilizados para aplicações de deposições de camadas baseado na Manufatura Aditiva com auxílio de sistema de visão, para otimizar a homogeneidade do perfil da parede. A geometria e o comportamento da poça de fusão foram analisados a partir das imagens obtidas por uma câmera de alta velocidade e por meio de processamento em MATLAB[®]. Foi mostrado que o comportamento da poça de fusão é fortemente afetado pela velocidade de alimentação do arame, taxa de desprendimento e volume da gota quando este ocorre por corrente pulsada, na condição em que a corrente e tempo de pico são mantidos constantes. Com os resultados obtidos a partir das imagens extraídas para avaliar o comportamento do metal fundido, de modo a entender as mudanças da geometria da camada depositada, é possível identificar a capacidade de se predizer os parâmetros a serem utilizados no processo garantindo a geometria da camada mais constante. Com isso, ao alterar os valores de aporte térmico e forças que atuam na transferência metálica e na poça de fusão durante as deposições de material, reduzindo o calor aplicado em uma região que ainda esteja em resfriamento, minimiza dessa forma a refusão de uma camada já solidificada. As análises dos modelos preditivos foram desenvolvidas por meio do método de regressão linear múltipla e afirmaram a forte influência do tempo de base e tensão elétrica na formação da gota e comportamento do processo na deposição das camadas.

Palavras-chave: Robótica, Visão Computacional, Manufatura Aditiva por Deposição a Arco, Soldagem, Predição.

Abstract

In recent years, a large number of researches based on rapid prototyping processes in Additive Manufacturing have been developed in the most diverse areas and using different techniques and materials. The application of Wire and Arc Additive Manufacturing by Arc Process presents a high deposition rate and has been shown to be a very promising technology to meet current requirements for a rapid development and production of new products. The final quality of the produced part can be followed by the behavior of the weld pool, which contains various information such as penetration, width and reinforcement, which determine the geometry of the solidified layer. This thesis describes a technique to assist in the prediction and control of process parameters, which will be used for layer deposition based on Additive Manufacturing with the aid of a vision system, to optimize the homogeneity of the wall profile. The geometry and behavior of the weld pool were analyzed from the images obtained by a high-speed camera and through MATLAB[®] processing. It has been shown that the behavior of the weld pool is strongly affected by wire feed speed, droplet transfer rate and drop volume when it occurs by pulsed current, in the condition where the current and peak time are kept constant. With the results obtained from the images extracted to evaluate the behavior of the molten metal, in order to understand the changes in the geometry of the deposited layer, it is possible to identify the ability to predict the parameters to be used in the process, ensuring a more constant layer geometry. Thus, by changing the heat input values, and the forces that act on the metal transfer and the weld pool during metal deposition, and consequently reducing the heat applied in a region that is still cooling, it is possible to minimize the reflow of a layer already solidified. The analyzes of the predictive models were developed using the multiple linear regression method, and confirmed the strong influence of base time and electrical voltage on drop formation and behavior of the process during the deposition of the layers.

Keywords: *Robotic, Computer Vision, Wire Arc Additive Manufacturing, Welding, Prediction.*

Lista de Figuras

Figura 1.1: Deposição em parede multicamadas de passe único.....	20
Figura 2.1: Classificação da tecnologia para a Manufatura Aditiva Metálica.....	24
Figura 2.2: Seção transversal da parede fabricada.	26
Figura 2.3: Entrada de calor na peça <i>versus</i> densidade de energia da fonte.....	28
Figura 2.4: Variação da altura das camadas depositadas com diferentes correntes.	28
Figura 2.5: Irregularidade geométrica.	29
Figura 2.6: Esquema do processo de deposição a arco GMAW.	30
Figura 2.7: Eficiências dos processos de soldagem a arco.	31
Figura 2.8: Formato da poça de fusão em relação a velocidade de soldagem.....	32
Figura 2.9: Efeito da densidade de energia no formato da solda.....	33
Figura 2.10: Condições de corrente e tensão para as transferências metálicas.	34
Figura 2.11: Esquemático do formato de onda no modo de transferência a arco pulsado.	35
Figura 2.12: Forças que atuam na poça de fusão.....	39
Figura 2.13: Transferência metálica no processo GMAW.....	40
Figura 2.14: Sistema de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco.....	42
Figura 2.15: Sistema de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco por quase imersão.	42
Figura 2.16: Técnicas de iluminação.....	44
Figura 2.17: Natureza especular da poça de fusão.	47
Figura 2.18: Comportamento bidirecional da poça de fusão.....	48
Figura 2.19: Filtragem do espectro.....	49
Figura 2.20: Uso do EDR.	50
Figura 2.21: Monitoramento do processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco.	50
Figura 2.22: Vista da seção dos perfis das camadas.....	52
Figura 2.23: Poça líquida bidimensional.	54
Figura 2.24: Parâmetros geométricos do cordão de solda.	56
Figura 3.1: Representação da estruturação do trabalho.....	60
Figura 3.2: Configuração experimental da célula com robôs cooperativos.	61
Figura 3.3: Arquitetura de controle do manipulador ASEA com Arduino® Uno.	62
Figura 3.4: Modelo proposto para o controle do processo.	63
Figura 3.5: Diagrama dos sinais elétricos da fonte de soldagem.....	64
Figura 3.6: Interface com a Inversal 300.....	66
Figura 3.7: Câmera utilizada e o detalhe da lente <i>Infinity</i>	68

Figura 3.8: Parede sendo confeccionada com o ASEA.	71
Figura 3.9: Conversão do CAD para STL.	72
Figura 3.10: Interpretação modelo CAD no <i>MATLAB</i> [®]	73
Figura 3.11: Representação esquemática do sistema.	74
Figura 3.12: Fluxograma para confecção da peça.	75
Figura 3.13: Interligação da unidade de refrigeração.	76
Figura 3.14: Detalhe da base de cobre refrigerada.	77
Figura 3.15: Realizando a trajetória.	77
Figura 3.16: Visão geral do sistema.	78
Figura 3.17: Alterando a orientação para a deposição das camadas.	79
Figura 3.18: Medição da largura e altura das camadas depositadas.	80
Figura 3.19: Posicionamentos da câmera.	82
Figura 3.20: <i>Chessboard</i> para calibração da câmera.	83
Figura 3.21: Calibração câmera-cena.	84
Figura 3.22: Visualização do processo.	85
Figura 4.1: Sistema de controle do manipulador ASEA com Arduino [®] Uno.	88
Figura 4.2: Modelamento do processo.	89
Figura 4.3: Comportamento dos motores.	91
Figura 4.4: Modos de operação do processo pulsado.	92
Figura 4.5: Calibração DAQ.	93
Figura 4.6: Comparativos dos dados lidos do processo.	95
Figura 4.7: Integração <i>MATLAB</i> [®] com a DAQ.	97
Figura 4.8: Perfis de alguns cordões.	98
Figura 4.9: Variação da molhabilidade de acordo com o ângulo de contato.	100
Figura 4.10: Relação frequência de destacamento com a velocidade de alimentação.	100
Figura 4.11: Influência dos fatores no IC.	101
Figura 4.12: Interferência dos fatores na Não-Molhabilidade.	102
Figura 4.13: Relação da largura poça/camada com os parâmetros do processo.	103
Figura 4.14: Relação da altura da camada com os parâmetros do processo.	104
Figura 4.15: Relação da frequência de destacamento-tempo de base-tensão de referência. ...	105
Figura 4.16: Perfil das camadas produzidas.	106
Figura 4.17: Efeito do aporte térmico e corrente média na largura da camada.	108
Figura 4.18: Comparativo entre as paredes.	109

Figura 4.19: Relação reforço e largura com o número de camadas.	110
Figura 4.20: Transferência Metálica.....	111
Figura 4.21: Transição dos níveis de corrente.....	113
Figura 4.22: Espectro de frequência da tensão.....	114
Figura 4.23: Perfil da poça de fusão.....	115
Figura 4.24: Perfil da poça de fusão.....	116
Figura 4.25: Imagem especular da poça de fusão.....	118
Figura 4.26: Comportamento do metal fundido.....	119
Figura 4.27: Formato da poça de fusão.....	120
Figura 4.28: Trajetória desenvolvida pela gota.....	122
Figura 4.29: Mosaico de imagens obtidas durante o processo pulsado.....	123
Figura 4.30: Comportamento do arco elétrico.....	124
Figura 4.31: Análise do comprimento do arco.....	124
Figura 4.32: Imagem do arco elétrico.....	126
Figura 4.33: Atuação do arco elétrico de acordo com o perfil.....	127
Figura 4.34: Modelo baseado nas imagens do arco elétrico sobre os perfis das camadas.....	128
Figura 4.35: Fatores que influenciam na geometria da camada.....	130

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Rendimento térmico dos processos a arco elétrico.....	31
Tabela 2.2: Potência específica dos processos de deposição.....	33
Tabela 2.3: Parâmetros de destacamento.....	37
Tabela 2.4: Publicações recentes com uso de robôs na Manufatura Aditiva.	43
Tabela 3.1: Variáveis dos processos de deposição das camadas.	68
Tabela 3.2: Níveis inferiores e superiores dos fatores.....	69
Tabela 3.3: Parâmetros utilizados nos procedimentos experimentais.	70
Tabela 4.1: Dados obtidos com os testes.....	99
Tabela 4.2: Morfologia de acordo com a seção transversal.	107

Lista de Abreviações e Termos

2D – Duas Dimensões

3D – Três Dimensões

ABB – *Asea Brown Boverly*

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AM – *Additive Manufacturing*

Ar - Argônio

AWS – *American Welding Society*

CCD - *Charge Coupled Device*

CMOS - *Complementary Metal Oxide Semiconductor*

CAD - *Computer Aided Design*

CAM - *Computer Aided Manufacturing*

CO₂ – Dióxido de Carbono

CPS – *Cyber Physical System*

CMT – *Cold Metal Transfer*

CNN – *Convolutional Neural Networks*

CNC – Controle Numérico Computadorizado

D/A – Conversão de Digital para Analógico

DAQ – *Data Acquisition*

DB-25 – Conector do tipo D com 25 pinos

DBCP - Distância Bico de Contato Peça

DC - *Direct Current*

DED - *Direct Energy Deposition*

DEMEC - Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais

Duty Cycle – Tempo de ciclo ativo

EBF³ – *Electron Beam FreeForm Fabrication*

EBM – *Electron Beam Meltinng*

EBW – *Electron Beam Welding*

ED – Eficiência de Deposição

EDR – *Extreme Dynamic Range*

End Effector - Dispositivo ou ferramenta montada na última junta de um manipulador robótico

FPS – *Frames Per Seconds*

G-Code – Código usado para programação de máquinas ferramentas

GMAW – *Gas Metal Arc Welding*

GMAW-P – *Gas Metal Arc Welding - Pulsed*

Gpx/s – *Giga Pixels* por segundo

GTAW – *Gas Tungsten Arc Welding*

Hardware - Parte física do computador, ou que são utilizados para agregar a um sistema

IC – Índice de Convexidade

IV – Infravermelho

LASER – *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*

LBW – *LASER Beam Welding*

LPBF – *LASER Powder Bed Fusion*

LEP – Largura Efetiva da Parede

LRSS - Laboratório de Robótica Soldagem e Simulação

LTP – Largura Total da Parede

MA – Manufatura Aditiva

MADA – Manufatura Aditiva por Deposição a Arco

MATLAB[®] – *Matrix Laboratory (Software para análise numérica)*

SK-6 – Manipulador Robótico da Yaskawa/Motoman com seis graus de liberdade

mm – milímetro

nm – manômetro

NM – Não-Molhabilidade

O₂ – Oxigênio

OS – Ondulação da Superfície

PAW – *Plasma Arc Welding*

Pixel – Menor elemento que compõe uma imagem

RNA – Redes Neurais Artificiais

SDM – *Shape Deposition Manufacturing*

Seam Tracking – Rastreador de junta

SLS – *Selective LASER Sintering*

SPI – *Serial Peripheral Interface*

Software - Conjunto de instruções e componentes lógicos de um sistema processador de dados

STL – *Standard Triangle Language*

TCP - *Tool Center Point*

Threshold - Processo de limiarização onde ocorre a conversão da imagem digital em binária

TIG – *Tungsten Inert Gas*

Toolbox - Pacote de ferramentas adicionais do *MATLAB*[®]

TTL – *Transistor Transistor Logic*

UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais

UGPP – Uma Gota Por Pulso

USA – *United States of America*

USB - *Universal Serial Bus* (Barramento Serial Universal)

UV – Ultravioleta

WAAM – *Wire and Arc Additive Manufacturing*

WBAM – *Wire Based Additive Manufacturing*

ZTA - Zona Termicamente Afetada

Sumário

1	Introdução	18
1.1	Objetivo	21
1.1.1	Objetivos específicos	21
2	Revisão Bibliográfica	23
2.1	Manufatura Aditiva Metálica.....	23
2.2	Manufatura Aditiva por Deposição a Arco	24
2.3	Estado da Arte.....	40
2.3.1	Robôs na Manufatura Aditiva	41
2.3.2	Visão Computacional	44
2.3.3	Predição Geométrica.....	52
2.4	Considerações Sobre a Revisão Bibliográfica	58
3	Metodologia.....	60
3.1	Desenvolvimento do Sistema.....	60
3.1.1	Manipuladores Robóticos	61
3.1.2	Interface com a Fonte de Soldagem	63
3.1.3	Sistema de visão	67
3.2	Confecção das Peças	68
3.3	Avaliação das Peças Produzidas	80
3.4	Obtenção de Imagens do Processo.....	81
4	Resultados	87
4.1	Manipulador Robótico	87
4.2	Parametrização	92
4.3	Análise das Imagens Obtidas	111
5	Conclusões	131
6	Sugestões de Trabalhos Futuros	133
7	Referências Bibliográficas	134
	APÊNDICE A – Código fonte: “ControladorMaster.ino”	151
	APÊNDICE B – Código fonte: “ServoControlador.ino”	160
	APÊNDICE C – Código I/O: DAQ.....	173
	APÊNDICE D – <i>Script Excel</i>[®]	177
	ANEXO A – Funções Cinemáticas Inversa e Direta (Lima II, 2005).....	179

ANEXO B – Programa Arduino® (Zinato, 2019).....	181
ANEXO C – Rotina <i>Matlab</i>® (Zinato, 2019).....	184

1 Introdução

O processo de soldagem é um dos modos de fabricação mais utilizados na indústria metal mecânica, para promover principalmente a união de peças, o que engloba as atividades mais simples até projetos inovadores e de alto grau de responsabilidade e grande confiabilidade como no caso das indústrias naval e aeroespacial (Alberti, Silva & d'Oliveira, 2014).

Em um mundo cada vez mais competitivo, a busca pela inovação com a preocupação na sustentabilidade reflete diretamente na redução de desperdícios de insumos necessários no processo produtivo. Com isso, a busca pelo aperfeiçoamento de produtos e a forma de produção visam respeitar os protocolos determinados contra a redução de resíduos e de poluentes. A Manufatura Aditiva (MA) é uma tecnologia revolucionária que ao contrário de outros processos de fabricação convencionais, apresenta uma proposta em que realiza a deposição de material durante a fabricação, portanto, a quantidade de resíduos gerados tende a ser menor.

O crescente estudo sobre a Manufatura Aditiva para uso em construções metálicas recebe novos adeptos a cada ano, para isso, necessita de um dispositivo mecânico ou autônomo que permita sucessivos deslocamentos de forma precisa, gera-se uma trajetória necessária para a deposição do material e conferir a ele suas características desejadas (Santos, Pertence, & Cetlin, 2005).

Sendo a Manufatura Aditiva uma tecnologia de adição de material, assim como pode ser obtido com uso da soldagem a arco elétrico, então esta última não poderia de deixar de ser utilizada para o processamento e isso eleva o número de pesquisas desenvolvidas a respeito de deposições de camadas.

Automatizar processos tende a reduzir ou eliminar a interferência do ser humano, com isso, uso de sistemas de controle na deposição de material pode mitigar ajustes baseados em tentativa e erro, ou considerações subjetivas para especificar os parâmetros adequados do processo para determinado projeto, além de garantir sua repetibilidade (Scotti, 1991). A normalização da deposição e a qualificação dos operadores são fundamentais para a realização de uma “camada solda”, para que seja adequada e atenda às especificações de sua aplicação.

Robotizar o processo com o objetivo de garantir precisão da movimentação da ferramenta por um caminho pré-definido, visa garantir uma maior repetibilidade, auxiliada com parâmetros corretos, tende a obter qualidade e eficiência. A soldagem robotizada é definida pela AWS,

(2004) (*American Welding Society*) como um processo de união que utiliza um equipamento (robô, manipulador etc.) que executa operações de soldagem, após programação, sem ajuste ou controle por parte do operador de solda (Bracarense, Filho, Felizardo, & Rogana, 2002).

Modelamentos matemáticos utilizados para análise dos processos de soldagem são baseados em dados experimentais que relacionam os parâmetros do processo (tensão, corrente, velocidade de alimentação do arame, etc.) com os resultados obtidos (largura, reforço, penetração da camada depositada) utilizam técnicas de regressões lineares e não-lineares, redes neurais artificiais, ou outros algoritmos de aproximação de funções (Henriques, Lima II, Castro, & Bracarense, 2006), permitem prever, a partir de uma dada geometria da camada depositada, os melhores parâmetros do processo. Para isso, os procedimentos experimentais consistem em fazer diversas camadas, com a variação dos parâmetros do processo, porém, devido ao grande número de variáveis envolvidas, somente algumas são escolhidas para a análise, de modo a reduzir sua complexidade e custos experimentais e em cada modelo desenvolvido, podem ser encontrados diferentes relações entre os parâmetros de entrada e saída.

A Manufatura Aditiva metálica baseada no processo a arco elétrico (Alberti, Silva & d'Oliveira, 2014) proporciona elevada produtividade de acordo com a eficiência energética e ampla abrangência em relação à quantidade de material depositado (Uziel, 2016), como é o caso do GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) e PAW (*Plasma Arc Welding*) e estes são facilmente aplicados com manipuladores robóticos que garantem a precisão exigida na fabricação e que apresenta crescente contribuição nos estudos das diversas técnicas nos campos da engenharia. A metodologia proposta pela MA, que possibilita otimizar o tempo e custo de produção, aliado à redução de desperdício de material, torna-se interesse para o meio científico e industrial. Porém, para um melhor controle do resultado esperado, estudos exaustivos devem ser realizados com o objetivo de obter a melhor parametrização que influencia principalmente a geometria da camada depositada, que é também uma das principais e mais importantes características do produto obtido pela adição de material.

Neste trabalho é realizado um estudo sobre a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco com a variação dos parâmetros do processo por corrente pulsada, para as sucessivas camadas. Como existem diversas variáveis envolvidas, estas foram limitadas para a modelagem do perfil das camadas, de modo a reduzir sua complexidade. Ao analisar o comportamento da poça de fusão com uso de um sistema de visão, é possível correlacionar os dados de entrada e, obter uma relação matemática capaz de prever o formato da camada.

Para a consolidação da Manufatura Aditiva metálica a arco elétrico, é necessária a análise de alguns pontos importantes e resolução de problemas pertinentes ao processo de modo que o torne mais eficiente, reduzindo o nível de material removido nas etapas de pós-processamento, como a usinagem para obter a geometria final projetada.

Quase 100% de todo o consumível utilizado em soldagem a arco elétrico pode ser aproveitado no processo. Com isso, a Manufatura Aditiva por Deposição Arco é mais prontamente disponível do que outros processos utilizados na Manufatura Aditiva metálica (Li, Chen, Zhao, & Tian, 2018). A vantagem de se adotar esta técnica é devida à combinação de vantagens, tais como: taxa de deposição, eficiência energética e de uso do material. Porém, com as deposições das camadas a parede ganha altura e a dissipação de calor para o substrato é retardada gradualmente devido ao aumento da resistência térmica condutora até o metal de base, de modo que uma quantidade crescente de calor é dissipada para o ambiente por convecção natural, sendo este mecanismo menos eficaz que a condução direta, que reduz a velocidade de solidificação da poça de fusão e resulta em uma variação da geometria da camada.

De acordo com a proposta apresentada por Corradi, (2020) e que está representada na Figura 1.1, a medida que a parede aumenta sua altura, a camada tende a ficar mais larga, devido ao comportamento da poça de fusão, daí a necessidade de um estudo sobre a mesma com o uso de um sistema de visão que auxilia no processo de Manufatura Aditiva.

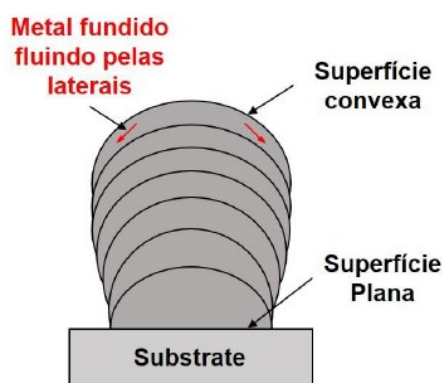


Figura 1.1: Deposição em parede multicamadas de passe único.
Fonte: Adaptado de (Corradi, 2020).

As características da poça de fusão implicam diretamente na camada, enquanto que o fenômeno de transbordamento que está associado ao escoamento lateral do metal fundido (Corradi, 2020), devido sobretudo a ação da gravidade, calor acumulado, refusão de camadas anteriores e a pressão do arco (Xiong, Zhang, & Zhang, 2015).

A avaliação do comportamento da poça de fusão durante a deposição de material em sucessivas camadas pode apresentar informações sobre a qualidade geométrica da camada sob o efeito dos parâmetros utilizados no processo. Esta avaliação ocorre com o uso de uma câmera de alta velocidade e um sistema de aquisição de dados que permite obter informações instantâneas e médio/eficazes da tensão e corrente elétrica, vazão do gás, velocidade de alimentação do arame, quantidade de arame consumido e a potência despendida. Para a avaliação da qualidade e geometria, adotou-se analisar informações obtidas por macrografias, a partir do seccionamento das seções transversais das camadas. Os resultados apresentam a viabilidade do estudo quanto a predição dos parâmetros para aperfeiçoar o processo de deposição multicamadas, com objetivo de maximizar a eficiência e obtenção de perfis da parede mais regulares.

O estudo sobre a poça de fusão apresenta a influência dos parâmetros do processo a arco elétrico, tais como a tensão, a corrente e a velocidade de alimentação, que contribuem diretamente com as geometrias das camadas depositadas e estes são considerados fatores importantes para o monitoramento e controle do processo afim de obter uma melhora na qualidade da camada depositada.

1.1 Objetivo

A proposta é avaliar o comportamento dinâmico da poça de fusão, com uso de um sistema de visão e assim contribuir no entendimento do efeito do transbordamento, analisando a influência dos parâmetros do processo neste fenômeno e promover melhoria na eficiência do processo quanto ao uso da técnica corrente pulsada (Nixon & Norrish, 1992), de modo a produzir menor volume das gotas e da poça de fusão, que por fim irá inferir menor potência transferida que minimiza os efeitos térmicos, promove uma distribuição mais homogênea de material nas camadas.

1.1.1 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo do trabalho, fez-se necessário desenvolver um sistema para auxiliar no processo GMAW-P, que é composto por dois manipuladores robóticos que manipulam a tocha e a peça, além da interface para controlar os parâmetros do processo. Os objetivos específicos para se alcançar o resultado esperado são:

1. Operacionalizar um manipulador robótico remanufaturado, com um sistema de controle que permita interação com o processo;

2. Desenvolver um modelo geométrico CAD, transformar este em coordenadas e criar as trajetórias a serem realizadas pelo robô remanufaturado;
3. Desenvolver uma célula de manufatura com uso de robôs cooperativos para produção de corpos de prova;
4. Desenvolver um sistema de controle que permita integração com a fonte de soldagem, de modo a parametrizar o processo durante a deposição das camadas;
5. Avaliar com o sistema de visão o comportamento da poça de fusão e associar com o perfil da camada depositada;
6. Extrair das imagens informações que possam relacionar e determinar parâmetros do processo.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Manufatura Aditiva Metálica

Na década de 60, Hebert Bernhardt Voelcker Jr., um professor de engenharia da Universidade de Rochester – U.S.A., buscou solução para realizar o controle de máquinas por meio de um computador, sendo que 10 anos mais tarde, ele desenvolve ferramentas básicas da matemática que descrevem aspectos tridimensionais de problemas, o que o tornou precursor da modelagem dos sólidos (Melkanoff, *et al.*, 1982). Ainda na década de 70, Matsubara, da Mitsubishi Motors, utilizou de resina fotopolimerizável coberta de partículas refratárias que era curada com a projeção de luz. Sendo que em 1987, surgiu comercialmente o processo de prototipagem chamado de estereolitografia, o qual consiste na solidificação de camadas de resina fotossensível com uso de *LASER* como fonte térmica para cura da resina, (polimerização) permitindo desde então a evolução das técnicas de prototipagem rápida (Munhoz, *et al.*, 2017).

No início dos anos 2000, as técnicas de prototipagem rápida ganharam a atenção pelo mundo e atualmente diversos são os estudos de forma a melhorar e abranger suas aplicações, sendo o motivador a grande importância desta técnica quando em uso industrial, como: aeroespacial, automotiva e próteses médicas (Majcher, 2014). Entre as categorias desenvolvidas utilizadas para fabricar componentes de metal são destacadas as seguintes: jateamento de aglutinante, fusão por leito de pó, laminação por folha e deposição por energia direta. A Figura 2.1 apresenta diferentes tecnologias para a deposição direta do material.

Atualmente, o processo de prototipagem rápida comercial de maior sucesso é baseado em materiais poliméricos, como resinas fotocuráveis ou plásticos, porém, as propriedades desses materiais estão longe das exigidas nos produtos metálicos (Gomes & Wiltgen, 2020). A exigência por produtos de alta tecnologia e com qualidade tem como consequência a otimização dos lucros e resultados. Para isso, o uso de protótipos torna-se necessário para a validação de um componente quando submetido às condições reais de uso e, de uma forma que venha a minimizar os custos em sua confecção, o uso da prototipagem rápida apresenta-se como uma solução adequada (Gibson, Rosen, Stucker, 2010).

Fabricação de peças metálicas a partir de materiais aditivos à base de arame metálico têm sido estudados para superar as limitações das técnicas à base de pó, como por exemplo, trabalhar exclusivamente na posição plana. A Manufatura Aditiva à base de arame (*Wire-Based*

Additive Manufacturing - WBAM) recentemente vem sendo estudada extensivamente devido ao seu alto potencial para uso em impressão 3D de metal. WBAM tem vantagens em termos de eficiência e quantidade de material depositado para confecção das peças, uma vez que esta técnica pode ser baseada em *LASER*, ou feixe de elétrons que apresentam taxas de deposição de 2 a 10 g/min (Li, *et al.*, 2019), enquanto que energias baseadas a arco elétrico têm maior eficiência e podem chegar de 50 a 130 g/min (Taberner, Paskual, Alvarez, & Suarez, 2018).

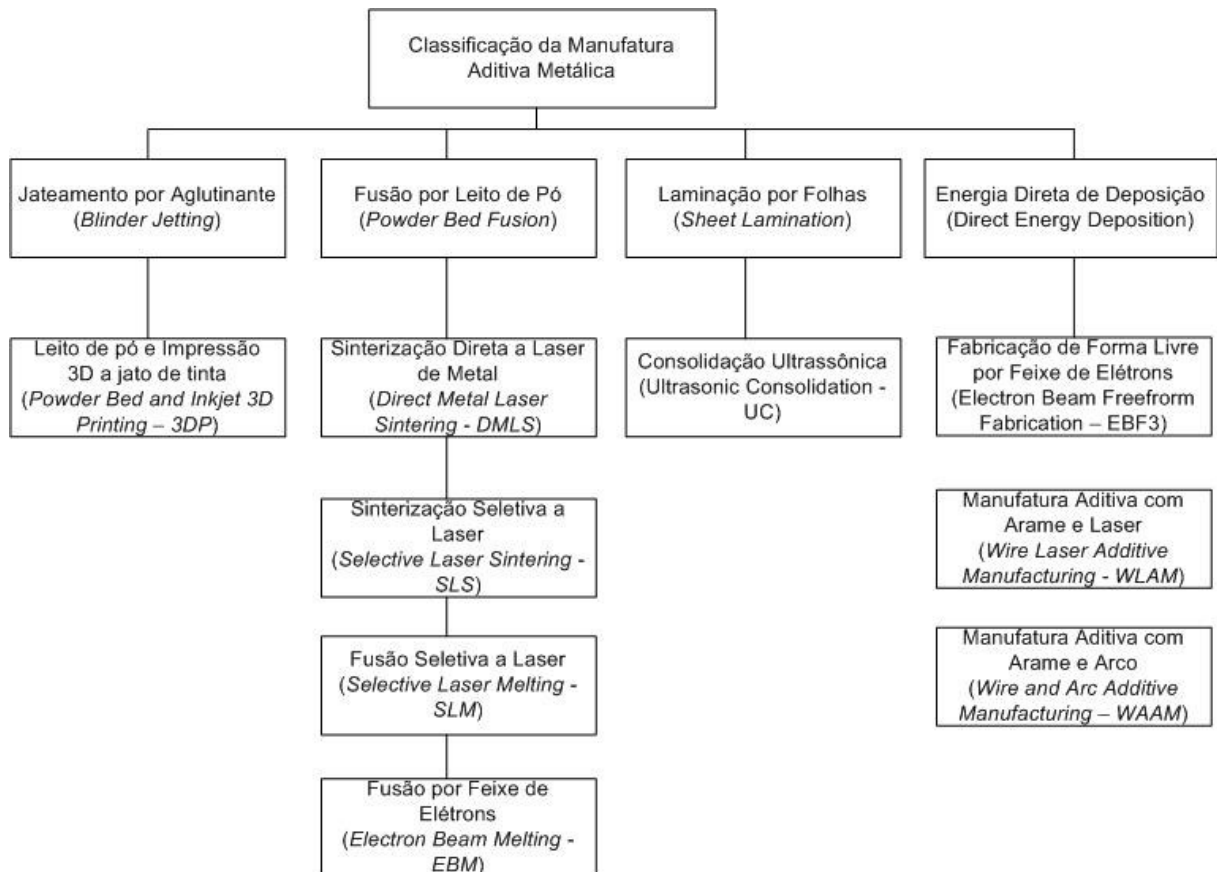


Figura 2.1: Classificação da tecnologia para a Manufatura Aditiva Metálica.

Fonte: o autor, 2020.

2.2 Manufatura Aditiva por Deposição a Arco

Manufatura Aditiva é uma das tecnologias de fabricação mais promissoras dos últimos trinta anos (Thompson, *et al.*, 2016), quando se compara a confecção de peças complexas que apresentavam elevados custos e desperdícios de materiais, produzidas por processos que subtraem a matéria-prima, enquanto que a prototipagem rápida utiliza a fabricação por deposição de material em camadas sucessivas, que também é conhecida pelo nome de tecnologia aditiva.

A fabricação de peças baseada na adição de material com o uso do arco elétrico, tem atraído a atenção de muitos pesquisadores devido as vantagens de baixo custo relacionado ao equipamento, alta produtividade, alta densidade de material depositado (Mughal, Fawad, & Mufti, 2006) e o método preliminar de construção de objetos pode ser comparado ao processo de revestimento.

Atualmente várias técnicas são utilizadas na Manufatura Aditiva metálica, tais como a Sinterização Seletiva por *LASER SLS (Selective LASER Sintering)*, fabricação por Feixe de Elétrons de Forma Livre *EBF³ (Electron Beam Freeform Fabrication)*, Manufatura de Deposição por Camadas *SDM (Shape Deposition Manufacturing)* e *WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing)*, que no Brasil é conhecida como MADA: Manufatura Aditiva por Deposição a Arco, referenciada pela Energia Direta de Deposição (DED) como é utilizada a partir dos processos *GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)*, *PAW (Plasma Arc Welding)* e *GMAW (Gas Metal Arc Welding)*. A escolha de qual processo a ser utilizado, depende da geometria e dimensão da peça a ser fabricada, sendo que quanto menor o dimensional, mais baixas devem ser as taxas de deposição e aporte térmico (Alberti, Silva & d'Oliveira, 2014).

Como primícias do processo de Manufatura Aditiva, o aumento da altura da geometria devido as deposições sucessivas das camadas, o efeito relacionado a transferência de calor é comprometido, o que causa uma redução da taxa de resfriamento, como consequência o tempo de solidificação da peça aumenta (Xiong, Li, Lei & Chen, 2018). Além disso, os múltiplos ciclos térmicos proporcionados pelo processo a arco promovem a heterogeneidade estrutural ao longo das camadas que repercute em diferentes propriedades mecânicas e influenciam a geometria do sólido e o acabamento superficial (Zhang, Li, Chen, & Male, 2002), com a formação de uma geometria convexa à medida que a parede cresce, resulta no efeito de transbordamento (Zhao, Zhang, Yin, & Wu, 2011). Para evitar este fenômeno é de extrema importância a definição dos parâmetros, bem como o uso da manufatura híbrida que integra processos aditivos e subtrativos em uma única configuração.

A geometria obtida pela deposição das camadas é uma característica de grande importância principalmente quando se utiliza da Manufatura Aditiva e torna-se necessário ajustar os parâmetros de fabricação, de acordo com a quantidade de passes e posição de cada camada. Segundo Martina, *et al.*, (2012), as geometrias obtidas por deposição com arco elétrico apresentam superfícies irregulares, de modo a necessitar o pós processamento por usinagem e a quantidade de material que deve ser removido a fim de se obter um acabamento satisfatório é

representado por O.S. (Ondulação da Superfície) e E.D. (Eficiência de Deposição), cujas fórmulas para os cálculos, são apresentadas pela Eq. (2.1) e Eq. (2.2) (Martina, Mehnen, Williams, Colegrove, & Wang, 2012), (Jhavar, Jain, & Paul, 2014) e (Yang, He, & Zhang, 2016).

$$O.S. = \frac{LTP - LEP}{2} \text{ (mm)} \quad (2.1)$$

$$E.D. = \frac{\text{Área } A}{\text{Área } A + \text{Área } B + \text{Área } C} \times 100\% \quad (2.2)$$

A Figura 2.2 apresentada por Jhavar, *et al.*, (2014) mostra as larguras antes e depois do processo de usinagem, de uma parede produzida por Manufatura Aditiva a arco. Sendo denominada de LTP a Largura Total da Parede e LEP de Largura Efetiva da Parede, obtida no processo de acabamento por usinagem, respectivamente. A área *A* é a da seção transversal cercada pela LEP, enquanto que as áreas *B* e *C* são da seção transversal do material que precisa ser removido.

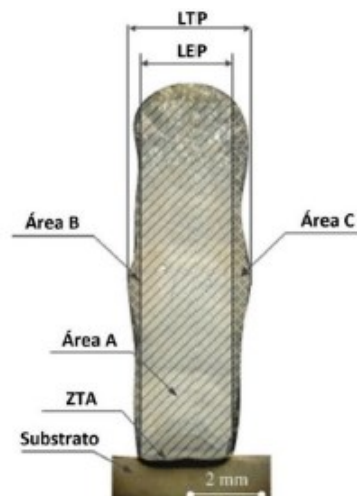


Figura 2.2: Seção transversal da parede fabricada.
Fonte: Adaptado de (Jhavar, Jain, & Paul, 2014).

Durante as deposições sucessivas de camadas pelo processo a arco elétrico, o aumento da distância até o substrato, e não adotar sistema de refrigeração, o acúmulo de calor tem sua taxa de transferência reduzida. Com isso, a última camada depositada apresenta velocidade de resfriamento menor (Wu, *et al.*, 2017). Esse fenômeno causa o problema de transbordamento da poça, que foram investigados por Zhao, *et al.*, (2011), Yang, *et al.*, (2017) e Xiong, *et al.*, (2018), além do efeito da curvatura no perfil do cordão avaliado por Nguyen, *et al.*, (2005), Wu, *et al.*, (2012), e verificaram que o gradiente de temperatura máximo vertical na poça de

fusão da camada depositada diminui com o aumento da altura da parede, reduzindo a dissipação do calor por condução a cada camada depositada.

Há um grande número de pesquisas apresentadas na literatura que tratam sobre o efeito do calor no acabamento superficial, tensões residuais e propriedades mecânicas de produção de peças em GMAW (Modenesi & Nixon, 1994), (Spencer, Dickens, & Wykes, 1998) eles estudaram o efeito da temperatura nas propriedades do metal em termos de acabamento superficial e as tensões remanescentes provenientes da deposição do metal. Para auxiliar na resolução deste problema, Su & Chen (2019) adotaram um método não convencional e utilizaram o CMT[®] (*Cold Metal Transfer*), tecnologia desenvolvida pela Fronius, para melhorar as propriedades da superfície. O uso do processo convencional em curto-circuito proporciona um acabamento superficial bastante irregular. Com a corrente pulsada é possível operar com um menor aporte térmico, o que promove uma melhora dimensional da camada final (Ramos, Carvalho, & Alfaro, 2013).

A evolução térmica está relacionada aos parâmetros do processo a arco elétrico, desta forma, este crescimento envolve tanto a distribuição quanto o ciclo de calor do processo e estas variáveis influenciam diretamente a camada depositada e torna-se necessário conhecer o efeito de cada variável e seu domínio sobre a qualidade da geometria obtida. Podem-se classificar estes parâmetros de deposição em três categorias (Kim & Eagar, 1993), (Kim, 1995):

- ✓ Parâmetros pré-selecionados → não são alterados com facilidade e são desfavoráveis para um controle. Cita-se: tipo e diâmetro do arame, tipo de gás de proteção, a polaridade, composição e espessura do material de base.
- ✓ Parâmetros ajustáveis primários → controlam e podem ser alterados durante o processo. Influenciam a estabilidade do arco, a geometria obtida, a velocidade de deposição e a qualidade da camada. Estas variáveis são: a tensão do arco, a corrente e a velocidade do processo.
- ✓ Parâmetros ajustáveis secundários → podem ser alteradas e atuam nos parâmetros primários. Sendo variáveis como o *stickout* e a inclinação da tocha.

A definição do processo a ser utilizado diante de várias outras características, na Manufatura Aditiva, deve-se levar em conta a intensidade de energia proveniente, pois relaciona-se diretamente com o dano térmico a que a peça será submetida. A Figura 2.3 apresenta a relação

inversa entre a densidade de energia da fonte e a quantidade de calor necessária de acordo com o processo a arco.

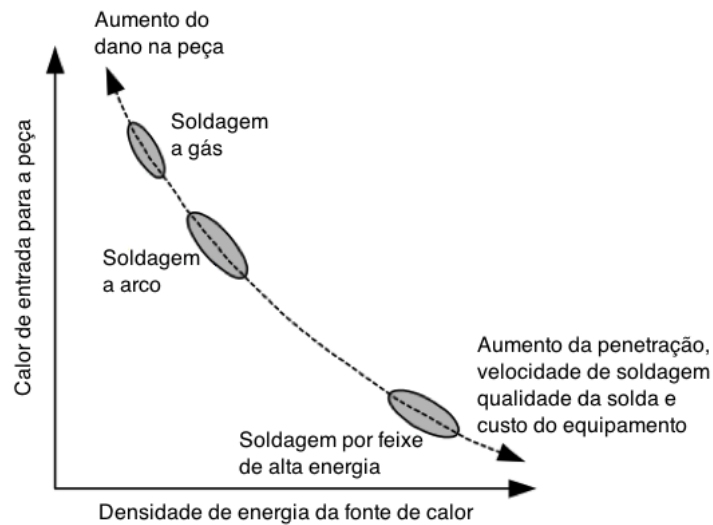


Figura 2.3: Entrada de calor na peça *versus* densidade de energia da fonte.
Fonte: Adaptado de (Kou & Le, 1983).

A Figura 2.4 apresenta a relação do valor da corrente elétrica em relação à altura das camadas depositadas, no processo de Manufatura Aditiva a Arco (Yang, He, & Zhang, 2016). Com os demais parâmetros do sistema constantes, os autores sugerem aumento da altura devido ao acréscimo na taxa de deposição de material, associado a uma redução da largura.

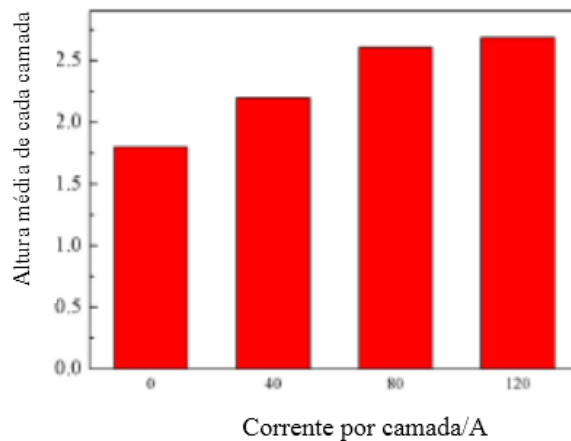


Figura 2.4: Variação da altura das camadas depositadas com diferentes correntes.
Fonte: Adaptado de (Yang, He, & Zhang, 2016).

Comparativamente, Li, *et al.*, (2018) propuseram uma relação entre a largura e a altura das camadas depositadas e indicaram que a variação da geometria destes pode ser indicado pela razão entre estes dois parâmetros, uma vez que a área da seção transversal é um valor constante. Os resultados experimentais apresentaram erros consideráveis e que segundo os pesquisadores,

esta discrepância pode ser causada pela incerteza da solidificação da poça de fusão. Estudaram também que variação nos parâmetros de processo, tal como, redução da velocidade de alimentação do arame, um menor aporte térmico ocorre e o volume da poça de fusão não tem tempo suficiente para se espalhar antes da solidificação, do contrário, para um aumento da velocidade de alimentação de arame, a viscosidade do material é reduzida e a poça de fusão é muito mais fácil de espalhar, o que se conclui que o ajuste do aporte térmico é uma possibilidade de controlar a geometria da camada durante deposições sucessivas, o que também vai de encontro à proposta deste trabalho.

Couto, *et al.*, (2020) consideram que a altura da camada tem um impacto direto sobre a precisão da geometria da peça. Quanto mais fina a camada, maior a precisão será alcançada, mas o tempo de produção tende a aumentar.

A irregularidade geométrica obtida no perfil da seção transversal de uma parede multicamadas de único passe produzida por processo a arco, como apresentado na Figura 2.5, pode promover acúmulo excessivo de material nas camadas superiores e promover o transbordamento deste. Este fenômeno tem como causa a redução da taxa de transferência de calor por condução durante o processo, o que promove um acervo de calor na região superior da parede, então esta porção de metal fundido tem um tempo de solidificação maior.



Figura 2.5: Irregularidade geométrica.
Fonte: o autor, 2019.

O jato de plasma é uma fonte de calor e de pressão e de acordo com a força de impacto da transferência metálica (Miranda & Ferraresi, 2003), esta eleva a potência do arco elétrico, comprometendo o comportamento do metal fundido (Luo, *et al.*, 2018). Com a refusão das camadas inferiores, há um aumento do volume de metal fundido, que ocorre em uma superfície convexa, que favorece a ocorrência do transbordamento, e consequente a irregularidade geométrica (Bai, *et al.*, 2018).

A Figura 2.5, representa o perfil de uma peça que foi produzida por meio do processo a arco baseado em GMAW, o mais aplicado nas indústrias de manufatura (Cary, 2002). Sendo hoje em dia considerado como um dos mais econômicos, eficientes e versáteis processos para a união permanentemente. A Figura 2.6 ilustra esquematicamente o processo.

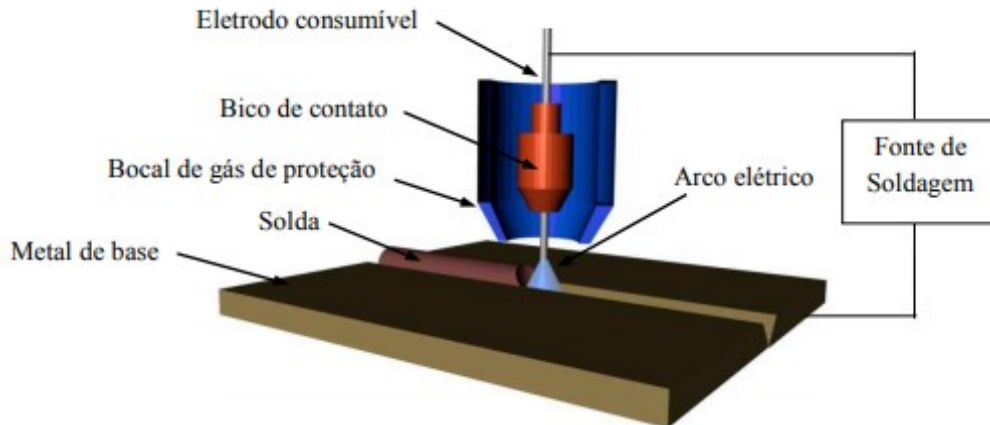


Figura 2.6: Esquema do processo de deposição a arco GMAW.
Fonte: (Fischer, 2011).

Este tipo de processo é realizado de forma semiautomática e a alimentação do consumível ocorre de forma contínua, sendo o operador ou o mecanismo de movimentação responsável pelo posicionamento da tocha e controlar o processo. A fonte de energia opera com tensão constante, tende em manter invariável os valores da tensão elétrica e a velocidade de alimentação do arame e, conseqüentemente, o comprimento do arco, mantendo o processo estável e, durante possíveis variações do processo, refletem nas alterações na corrente de soldagem. As principais vantagens do processo GMAW que o tornaram o de maior aplicação na indústria, são: elevadas velocidade de soldagem, deposição e produtividade, bem como a fácil robotização, entre outras características (Kalpakjian & Schmid, 2001).

A elevada taxa de deposição é desejada para uma produção mais efetiva, porém, é necessário considerar o maior aproveitamento dos consumíveis. A eficiência do processo por deposição a arco também é um parâmetro importante e a Figura 2.7 apresenta uma comparação entre os três utilizados.

Contudo, o uso do processo GMAW requer alguns cuidados para aproveitamento de sua boa eficiência, como: polaridade, modo de transferência, vazão do gás, que influenciam na estabilidade do arco elétrico, na penetração, largura e reforço da camada depositada (Mills & Keene, 1990), (Miranda, 2002).

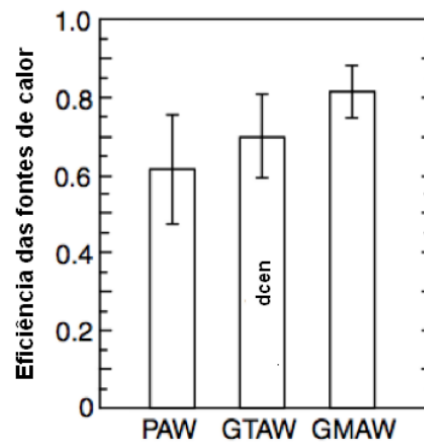


Figura 2.7: Eficiências dos processos de soldagem a arco.
Fonte: Adaptado de (Kou & Le, 1983).

A quantidade de energia por unidade de comprimento de solda (H), conhecida por energia de deposição, ou aporte térmico, é um importante parâmetro considerado no processo convencional, pois relaciona a energia introduzida no metal de base por unidade de comprimento do cordão de solda e é representado pela Eq. (2.3).

$$H = \eta \frac{E \cdot I}{v} \quad (2.3)$$

Considere H – aporte térmico (J/mm), E – tensão elétrica (V), I – corrente elétrica (A), v – velocidade de soldagem (mm/s), η – eficiência do processo (%), que é a relação entre a energia efetivamente absorvida para promover as fusões e a gerada no arco elétrico e seus valores estão apresentados na Tabela 2.1. Valores de η no processo MIG/MAG ocorrem para a transferência por curto-circuito com média de 0,85, enquanto que para a transferência goticular diminui consideravelmente e se considera 0,69 e para o pulsado o valor é de 0,77 (Kusch & Thurner, 2011).

Tabela 2.1: Rendimento térmico dos processos a arco elétrico.

Processos de Soldagem	Rendimento térmico (η)
MIG/MAG (GMAW)	0,75 – 0,95
TIG (GTAW)	0,50 – 0,80
Plasma (PAW)	0,50 – 0,80

Fonte: (EN1011-1, 2009).

As variações na geometria das camadas depositadas estão relacionadas com as mudanças do regime de fluxo de calor, que podem ter como causas: 1 - variações na intensidade da fonte de calor (alterações do comprimento do arco elétrico ou no aporte térmico); 2 - mudanças

geométricas que promovem bordas ou espessuras irregulares e perturbam o estado quase-estático do fluxo de calor; 3 - presença de outros elementos secundários na poça de fusão (Marya & Marya, 1998).

A velocidade de deslocamento da fonte de calor, além de afetar a taxa de distribuição altera a forma da poça de fusão. Quando se utiliza altas velocidades de deslocamento da tocha, atribui-se a poça de fusão um formato alongado, semelhante a uma gota e os grãos crescem em linha reta, perpendicularmente à fronteira da poça de fusão, como representado na Figura 2.8(a). Em baixas velocidades, o formato predominante passa a ser elíptico e o crescimento de seus grãos tende a ser colunares, os quais crescem e se curvam em direção ao gradiente máximo de temperatura, como apresentado na Figura 2.8(b). Diversos estudos descrevem por aproximação matemática o perfil da poça de fusão, alguns resultados demonstram o formato elíptico o que considera a tensão superficial constante sobre toda a superfície e produzem equações para a largura, reforço e volume do metal líquido em função do ângulo de contato do cordão de solda com a superfície (Matsunawa & Ohji, 1982).

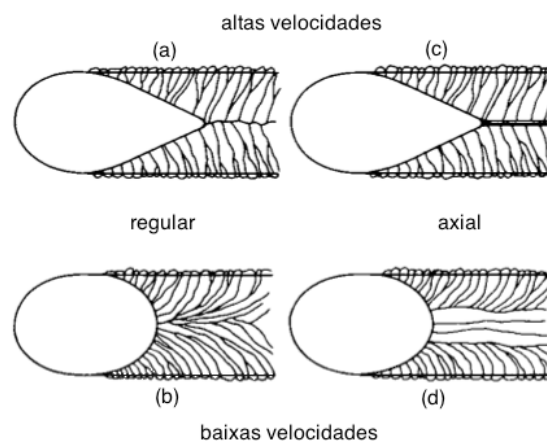


Figura 2.8: Formato da poça de fusão em relação a velocidade de soldagem. (a, c) estrutura de grãos colunares. (b, d) formato elíptico com estrutura axial. Fonte: Adaptado de (Kou & Le, 1983).

A Figura 2.9 mostra o efeito da densidade de energia no formato da camada depositada, sendo o calor transmitido da poça de fusão para o substrato por condução, porém, com o aumento do número de camadas a condução do fluxo de calor diminui, devido ao aumento da resistência térmica, o que aumenta o tamanho da poça e da temperatura (Bai, Zhang, & Wang, 2013).

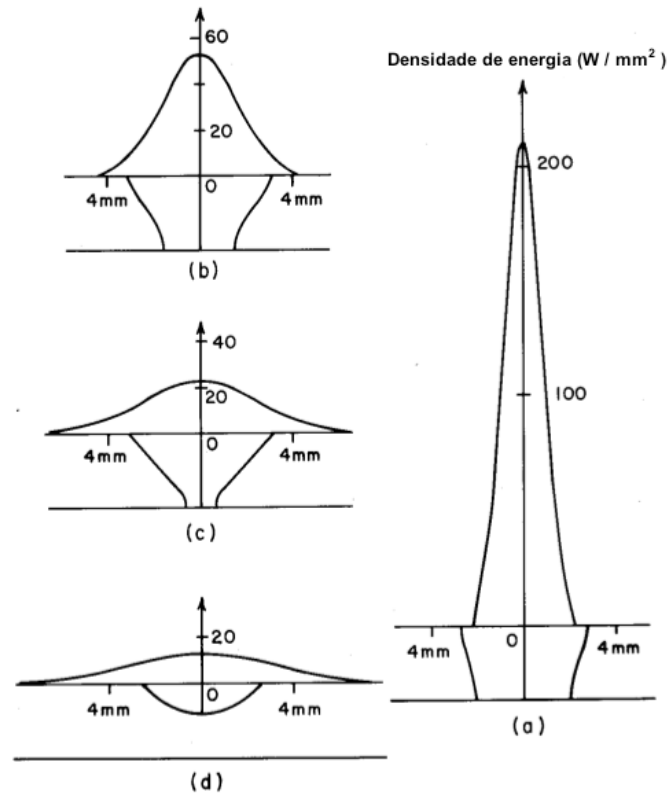


Figura 2.9: Efeito da densidade de energia no formato da solda.
 (a) $E > 200 \text{ W/mm}^2$. (b) $E < 60 \text{ W/mm}^2$. (c) $E > 20 \text{ W/mm}^2$. (d) $E < 20 \text{ W/mm}^2$.
 Fonte: Adaptado de (Kou & Le, 1983).

O processo a arco precisa gerar uma quantidade de calor que seja suficiente para garantir a qualidade da deposição. Uma intensidade térmica muito acima ou abaixo do necessário pode promover problemas mecânicos e metalúrgicos. Marques, *et al.*, (2011) informam que a faixa de temperatura da fonte está entre 2.000 e 20.000°C e a potência específica baseada na Eq. (2.4) atinge cerca de $50 \times 10^9 \text{ W/m}^2$, conforme a Tabela 2.2.

$$P_{esp} = \frac{E/t}{A_0} \quad (2.4)$$

Onde E é a energia do processo (J), t é o tempo de duração (s) e A_0 é a área (m^2) onde está incidindo a energia.

Tabela 2.2: Potência específica dos processos de deposição.

Processos de Soldagem	Intensidade (GW/m^2)
Eletrodo Revestido (SMAW)	0,005 – 0,5
MIG/MAG (GMAW)	0,005 – 0,5
Plasma (PAW)	0,005 – 50
Feixe de Elétrons (EBW) /LASER (LBW)	50 – 5000

Fonte: (Marques, Modenesi, & Bracarense, 2011).

O modo como ocorre a transferência do metal também influencia na estabilidade do processo e no formato final da peça (Greene, 1960), (Eagar, 1993). A forma como ocorre a transferência do metal fundido da ponta do eletrodo para a poça de fusão se dá, basicamente por três mecanismos: goticular, globular e curto-circuito, conforme apresentado na Figura 2.10, que apresenta as diferentes condições de corrente e tensão na soldagem GMAW com gás de proteção a base de Argônio (Ponomarev, Scotti, Silvinskiy, & Al-Erhayem, 2003).

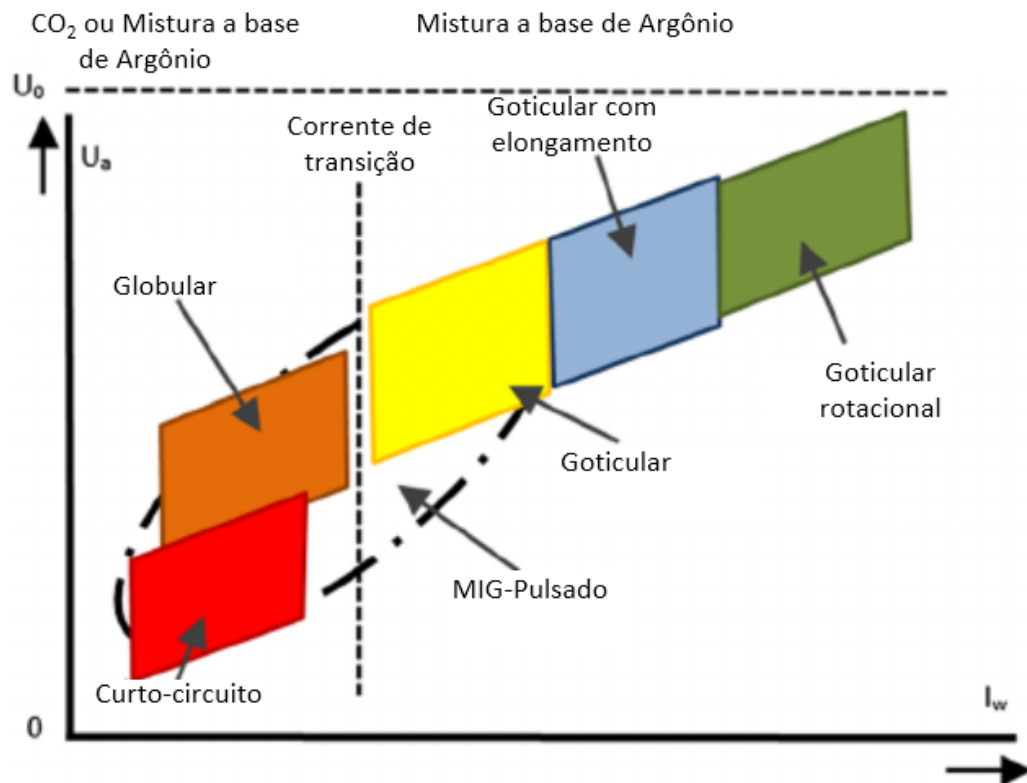


Figura 2.10: Condições de corrente e tensão para as transferências metálicas.
Fonte: Adaptado de (Ponomarev, Scotti, Silvinskiy, & Al-Erhayem, 2003).

Para a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco, o processo necessita ser controlado para minimizar os níveis de respingo, bem como o calor imposto, com isso, o uso da transferência pulsada se fundamenta na metodologia da antecipação de picos de corrente para transferir as gotas antes que estas toquem a peça e promovam o curto-circuito. Com isso, evita-se intensos surtos de corrente e tende a manter o arco com uma pressão razoavelmente homogênea sobre a poça de metal líquido, o que permite um processo mais estável obtido pelo comportamento regular da corrente em dois patamares, um inferior ao valor da corrente de transição e outro superior. Durante o tempo em que a corrente se mantém em nível baixo o arco elétrico é mantido e na transição para a corrente mais alta uma gota começa a se formar e cresce na ponta do arame fundido e esta é transferida quando o valor da corrente é reduzido. No entanto, é necessário que os níveis de corrente sejam ajustados para que possa obter um valor médio dentro dos níveis

necessários e se apresentar abaixo da corrente normal de transição, como na soldagem convencional, produzindo baixos níveis de aporte térmico (IMC-Soldagem, 2019).

O processo GMAW-P (*Gas Metal Arc Welding - Pulsed*) apresenta boa aplicabilidade, devido a possibilidade de controle da transferência metálica (Nixon & Norrish, 1988), (Rhee & Kannatey-Asibu, 1992) e (Pereira, 1995) uma vez que a correta seleção das variáveis visa obter a estabilidade do arco elétrico e assim proporcionar que seja transferida uma única gota a cada ciclo, processo esse conhecido como UGPP (Uma Gota Por Pulso), além de tentar garantir que a gota tenha o diâmetro menor ou igual ao do eletrodo e evita que o aumento do volume promova uma mudança da transferência metálica para globular. A Figura 2.11 ilustra esquematicamente o processo UGPP composto por tempos, em milissegundos (ms) e correntes em ampères (A), ambos para base e pico.

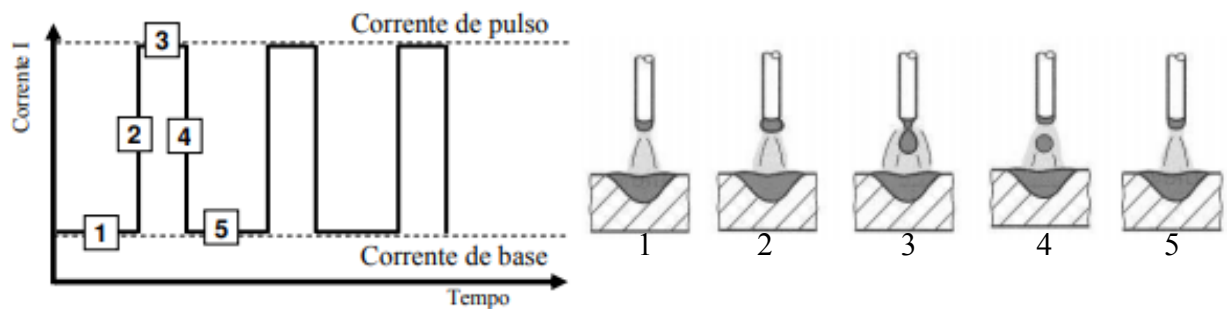


Figura 2.11: Esquemático do formato de onda no modo de transferência a arco pulsado.

Fonte: Adaptado de (Kou & Le, 1983).

A Figura 2.11 apresenta as etapas que ocorrem no processo, sendo que em 1: a corrente de base mantém o arco aberto e conserva o efeito de aquecimento; 2: a corrente é elevada para o nível de pulso; 3: ocorre o estrangulamento do material fundido na ponta de eletrodo; 4: a redução da corrente é caracterizada pela separação da gota do eletrodo; e por fim, em 5: a gota se transfere para a poça de fusão. O destacamento ocorre devido a transição rápida da corrente de pico para base, o que intensifica a ação da força eletromagnética, que causa a constrição do filamento que sustenta a gota na extremidade do arame durante a fusão. A transferência ocorre com o período de pulsação T , que relaciona os tempos de base (t_b) e de pico (t_p) que é expresso pela Eq. (2.5).

$$T = t_p + t_b \quad (2.5)$$

Para o cálculo do valor da corrente média (I_m), é utilizada a Eq. (2.6).

$$I_m = \frac{I_p \cdot t_p + I_b \cdot t_b}{t_p + t_b} \quad (2.6)$$

Em que I_p e I_b são respectivamente a corrente de pico e de base e entre os parâmetros derivados do pulso de desprendimento da gota, destaca-se também o *Duty Cycle*, que descreve a relação entre os tempos de pulso e de um ciclo do pulso e é calculado pela Eq. (2.7), permite obter informações da proporção de tempo ativo em relação ao tempo total.

$$DC = \left(\frac{t_p}{t_b + t_p} \right) * 100\% \quad (2.7)$$

O diâmetro da gota d_g , depende do diâmetro do arame d_e , da velocidade com a qual este é alimentado v_a e o tempo do ciclo $T = t_p + t_b$ conforme expressa a Eq. (2.8).

$$d_g = \sqrt[3]{1,5 \cdot T \cdot (d_e)^2 \cdot v_a} \quad (2.8)$$

A condição de UGPP, para uma determinada combinação de materiais e gás de proteção, estão associados aos picos, para o tamanho de gota, a ser destacada da ponta do arame, verifica-se por intermédio da Eq. (2.9) uma relação de corrente e tempo de destacamento, que permite estimar o tempo de pulso t_p e a corrente de pulso I_p , sendo o fundamento para a determinação das variáveis da corrente pulsada.

$$I_p^n * t_p = D \quad (2.9)$$

Onde n é um valor próximo de 2, t_p é o tempo de duração da corrente de pico e I_p é o valor da corrente de pico, D é o parâmetro de destacamento, que depende do diâmetro do arame, tipo de material e gás de proteção (Allum, 1984). A metodologia apresentada na Tabela 2.3 para a determinação do parâmetro de destacamento não fornece precisão com relação à determinação de parâmetros e variáveis aplicadas à corrente pulsada, sendo uma orientação básica, com a necessidade de ajustes para adequação às condições reais de soldagem com corrente pulsada. Os parâmetros de base (I_b e t_b) têm um pequeno efeito sobre o destacamento da gota, mas influenciam diretamente no seu tamanho (Nixon & Norrish, 1988). Já os valores dos parâmetros de pico (I_p e t_p) possuem significativo domínio sob o modo de transferência metálica.

A taxa de variação da corrente no tempo (dl/dt), como característica da fonte, afeta a seleção dos parâmetros de pulso. Quanto maior a diferença entre I_p e I_b , ou quanto mais lenta for a taxa de resposta da fonte (menor dl/dt), menor será a taxa de fusão do eletrodo (Richardson, Bucknall, & Stares, 1994).

Tabela 2.3: Parâmetros de destacamento.

Material do arame	Aço Baixo Carbono			
Gás de proteção	95%Ar + 5%CO ₂			
Diâmetro do arame (mm)	0,8	1,0	1,2	1,6
Fator de Destacamento D (A ² s)	160	310	430	640
Relação Frequência/Corrente F/I (Hz/100A)	--	60	50-60	40
Corrente de Pico I _p (A)	200	280	350	400
Tempo de Pico t _p (ms)	4,0	4,0	3,5	4,0

Fonte: Adaptado de (Allum C. J., 1985).

A partir do valor do parâmetro de destacamento D e, com um valor fixo para o tempo de duração da corrente de pulso, é possível obter o valor da corrente de pulso, desde que definido o valor da velocidade de alimentação do arame. O período T, indica o tempo necessário para que ocorra o destacamento da gota pode ser calculado a partir da manipulação da Eq. (2.6). Por fim, o valor da corrente de base é calculado a partir da manipulação matemática da equação da corrente média, conforme a Eq. (2.10).

$$I_b = \frac{I_m(t_p + t_b) - I_p \cdot t_p}{t_b} \quad (2.10)$$

As forças que atuam no destacamento da gota são: peso, ou gravidade Eq. (2.11), eletromagnética Eq. (2.12), evaporação ou vapor metálico Eq. (2.13), arraste Eq. (2.14), tensão superficial Eq. (2.15).

A força peso vem da massa da gota e ação da gravidade promove seu destacamento quando o processo ocorre na posição plana e para uma geometria esférica é considerada a Eq. (2.11).

$$F_g = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho g \quad (2.11)$$

Sendo r representa o raio da gota (m), ρ é a densidade da gota de metal fundido (kg/m^3) e g é a constante da gravidade (m/s^2).

A ação eletromagnética, associada a força de Lorentz, é resultante da corrente que passa no condutor e na região da gota ocorre uma deformação da superfície líquida e reverte em um estrangulamento na direção axial (Lancaster, 1986).

$$F_{em} = \ln\left(\frac{r_a}{R}\right) \left(\frac{\mu_0 I^2}{4\pi}\right) \quad (2.12)$$

Em que I é a corrente (A), μ_0 é a permeabilidade magnética ($T \cdot m/A$) e $\ln\left(\frac{r_a}{R}\right)$ é o fator de forma do arco elétrico.

A força de vapor metálico age na extremidade do arame-eletrodo na formação da gota no sentido contrário ao de destacamento da gota, em que a ação dos gases provenientes de reações químicas tende a atrasar a transferência (Scotti & Ponomarev, 2008).

$$F_v = \frac{Q_o^2 I^2}{8\pi\rho R_a^2} \quad (2.13)$$

Considere Q_o é a taxa de vaporização ($kg/A.s$), I é a corrente de soldagem (A), ρ é a densidade de vapor (kg/m^3), R_a é a área de contato entre a gota e o arco elétrico (m^2).

A força de arraste ocorre devido ao atrito do gás de proteção com a gota e depende da velocidade do jato de plasma, composição do gás e tamanho da gota e seu cálculo é baseado em uma esfera imersa em um fluido em movimento, (Waszink & Graat, 1983).

$$F_a = C_d A_p \left(\frac{\rho_f v_f^2}{2} \right) \quad (2.14)$$

No que C_d é o coeficiente de arrasto, A_p é a área projetada da gota (m), ρ_f densidade do fluido (kg/m^3) e v_f é a velocidade do fluido (m/s) (Lancaster, 1986).

A força que tende a reter a gota no ponta do eletrodo é a tensão superficial, que depende da composição química, formato, homogeneidade, gradiente de temperatura da superfície da gota.

$$F_\gamma = 2\pi\gamma R \quad (2.15)$$

Sendo R é o raio do eletrodo (m) e γ é a tensão superficial do metal líquido (N/m).

A frequência de destacamento, em que se considere uma gota por pulso, pode ser calculada pelas forças de acordo com a Eq. (2.16).

$$f_d = (F_{em} + F_g + F_a - F_v) / [(WR) / (2\gamma v)] \quad (2.16)$$

Considere R o raio do eletrodo (m), γ é a tensão superficial do metal líquido (N/m) e v é o volume (m^3) da gota destacada que é obtida pela Eq. (2.17).

$$v = (W\pi R^2) / (nf) \quad (2.17)$$

Onde W é a velocidade de alimentação do arame (m/min), f é a frequência de pulsação da corrente (Hz) e n é o quociente entre a frequência de destacamento e pulsação da corrente.

A teoria de Equilíbrio Estático descreve o balanço das forças atuantes sobre a gota formada na extremidade do eletrodo e pode ser definida como a soma vetorial destas que retêm e as que querem expulsar, conforme a Eq. (2.18) (Lancaster, 1987).

$$F_{em} + F_g + F_a > F_\gamma + F_v \quad (2.18)$$

A Figura 2.12 apresenta as forças que atuam na poça de fusão (Matsunawa & Ohji, 1982), a pressão do jato de plasma agindo sobre a superfície da poça, gera uma força de arraste, induzindo um fluxo externo ao longo desta, cuja tendência é alargar a camada de material depositado. Assim como a ação de termocapilaridade depende da variação na tensão superficial do fluido, quando este é maior na borda da poça, o efeito Marangoni tende a alargar a camada, do contrário irá aprofundar e assim, afiná-lo.

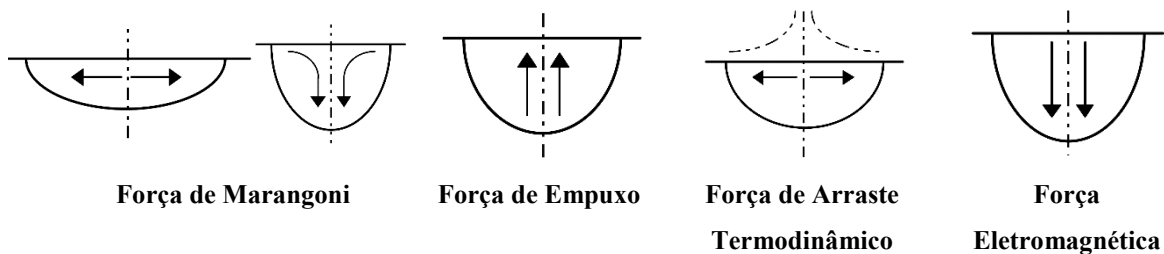


Figura 2.12: Forças que atuam na poça de fusão.
Fonte: Adaptado de (Marya & Marya, 1998).

O empuxo é causado pela diferença de densidade do fluido devido aos gradientes de temperatura, o metal líquido da região mais quente sobre o da região mais fria penetra na poça e causa o afinamento da camada depositada. A ação eletromagnética tende a aprofundar a poça de fusão, dessa forma, quanto a maior a intensidade da corrente elétrica, maior é a possibilidade de afinamento e maior penetração.

Uma representação esquemática de um modo de transferência que ocorre no processo GMAW, incluindo seus efeitos térmicos está definida na Figura 2.13 (Nunes, 1982), (Kou & Sun, 1985), (Jönsson, Szekely, Choo, & Quinn, 1994), (Jönsson, Murphy, Szekel, 1995). O fluxo de evaporação, aparentemente, depende diretamente do campo de temperatura na superfície da poça de fusão.

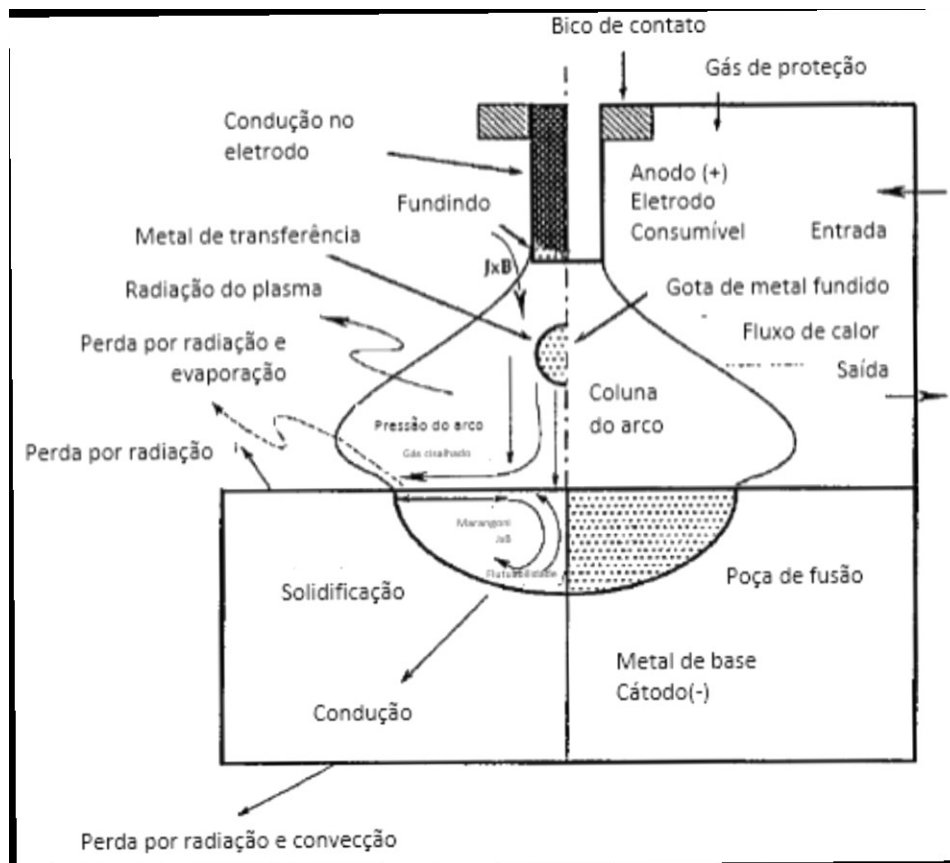


Figura 2.13: Transferência metálica no processo GMAW.
 Fonte: Adaptado de (Jönsson, Szekely, Choo, & Quinn, 1994).

Todas essas forças podem agir de forma isolada ou combinada, o que influencia diretamente na transferência metálica, na forma da poça de fusão e no arco elétrico, definindo assim as características da camada depositada.

2.3 Estado da Arte

A necessidade de selecionar corretamente as variáveis do processo, monitorar e controlar a deposição e geometria das camadas tem como finalidade aumentar a qualidade e garantir a eficiência do processo. Com isso, surge a necessidade de correlacionar as variáveis do processo e as características geométricas da camada obtida, permitindo assim otimizar o processo. A Manufatura Aditiva Metálica, recentemente tem se mostrado como uma opção para fabricação de peças para uso em aplicações industriais, principalmente itens que apresentam complexidade de produção. Porém, a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco necessita de maiores contribuições quanto a definição de parâmetros e sensoriamento do processo, a fim de alcançar o controle do mesmo e obter perfis mais homogêneos das sucessivas camadas depositadas, o que visa minimizar desperdício de matéria-prima em possíveis etapas de pós-processamento por usinagem.

2.3.1 Robôs na Manufatura Aditiva

O processo de produção de peças na Manufatura Aditiva é dotado de componentes e dispositivos mecanizados/eletrônicos além de sensores para monitorar parâmetros do processo e, a partir deles, controlar todo o procedimento, de modo a garantir a qualidade da peça a ser produzida.

Na Manufatura Aditiva por Deposição a Arco, além do uso de uma fonte de soldagem convencional, alimentador de arame e demais acessórios, utiliza-se um sistema de posicionamento de até três graus de liberdade, cujo sistema mais comumente utilizado para geração de trajetória e controle de deposição do material é por meio de CNC (*Computer Numeric Control*), uma vez que os códigos quando são gerados na etapa CAM (*Computer Aided Manufacturing*), são baseados no *G-Code* (Xiong, Zhang, & Zhang, 2015). A WAAM apresenta custos de equipamento relativamente baixos, uma vez que normalmente faz uso de robôs industriais preparados para serem aplicados em processos de soldagem a arco (Xia, *et al.*, 2020).

O robô é uma poderosa ferramenta de trabalho que auxilia na realização de atividades e vêm sendo utilizados em processos industriais devido seu elevado grau de precisão, repetibilidade, qualidade, sendo uma excelente opção para tarefas programadas e até mesmo em ambientes estruturados, que comprometam a saúde e o bem-estar dos operadores (Bastos, 1999).

A redução do custo de produção e o aumento da produtividade e confiabilidade, são objetivos da automação dos processos industriais e os manipuladores robóticos apresentam-se mais flexíveis. Estudos de aplicações de robôs, ganham atenção com o passar dos anos devido aos impactos da fabricação avançada alavancada por novas tecnologias, que também incluem Manufatura Aditiva (conhecida como impressão 3-D), sendo este um dos pilares da Indústria 4.0. Haleem & Javaid (2019) propuseram que a Manufatura Aditiva e os robôs são partes essenciais da fabricação baseada em CPS *Cyber Physical System*, integrantes da quarta revolução industrial.

Xiong, *et al.*, (2018) consideram que o uso de um manipulador robótico facilita o controle de deposição do material, bem como a modificação de trajetórias durante o processo. Rafieazad, *et al.*, (2019) consideram que a WAAM é uma tecnologia que geralmente se beneficia pelo uso de um robô que manipula a fonte de energia para fabricar peças metálicas na forma por camadas sobrepostas.

Liu, *et al.*, (2020) apresentam uma abordagem de ajuste adaptativo da posição do robô ou plano de trajetória a ser percorrida, a fim de encontrar o ponto de controle para a produção de geometria uniforme. Os autores consideram que processo WAAM concentra-se principalmente na viabilidade do processo, microestrutura e propriedades mecânicas das peças produzidas e que há poucos estudos sobre a estabilidade do processo e a tecnologia de monitoramento.

Couto, *et al.*, (2020) utilizaram um robô com seis graus de liberdade, máquina de soldagem, além de uma câmera conectada no elemento final do robô. A trajetória é desenvolvida com uma velocidade constante e percorre o caminho projetado, conforme a Figura 2.14.

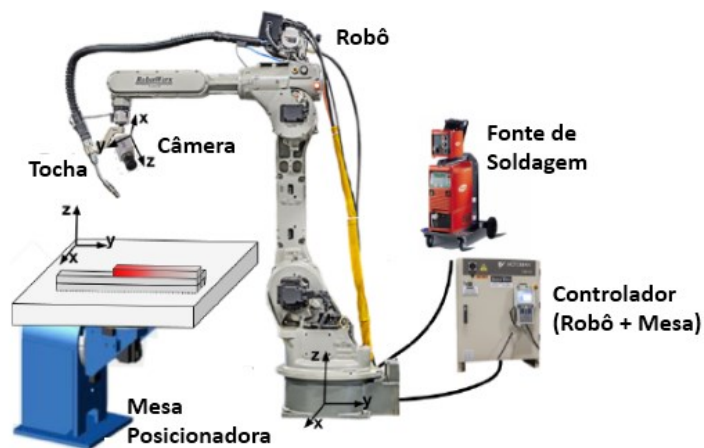


Figura 2.14: Sistema de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco.
Fonte: Adaptado de (Couto, *et al.*, 2020).

O sistema robotizado apresentado na Figura 2.15 é utilizado para um deslocamento no plano XZ para a construção da peça que permanece imersa, garantindo precisão e repetibilidade com os graus de liberdade presentes na configuração.

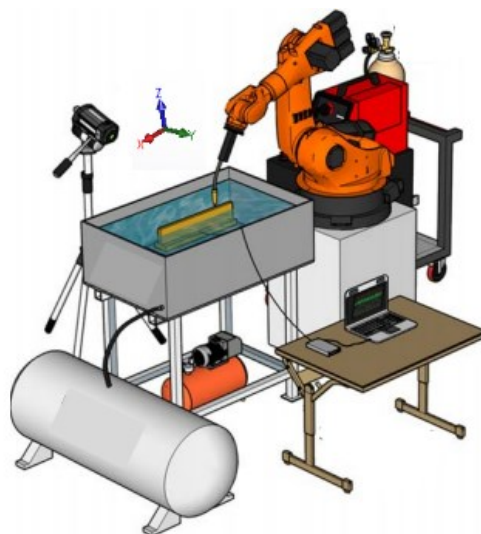


Figura 2.15: Sistema de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco por quase imersão.
Fonte: Adaptado de (da Silva, Souza, Araújo, Reis, & Scotti, 2020).

A Tabela 2.4 apresenta a classificação das publicações recentes relacionadas ao uso de robôs em Manufatura Aditiva, com base no tipo de processo, o que chama a atenção é a baixa quantidade de trabalhos que utilizam manipuladores robóticos para materiais metálicos.

Tabela 2.4: Publicações recentes com uso de robôs na Manufatura Aditiva.

Autor	Graus de liberdade	Material
(Bonaccorso, Cantelli, & Muscato, 2011)	6	Aço inoxidável
(Ding D. , Pan, Cuiuri, & Li, 2014)	6	Metal
(Ding, Pan, Cuiuri, & Li, 2015)	6	Metal
(Williams, <i>et al.</i> , 2015)	6	Metal
(Ding D. , Pan, Li, Larkin, & van Duin, 2015)	6+3	Metal
(Ding, Pan, & Cuiuri, 2015)	6	Metal
(Ding, Pan, & Larkin, 2016)	6	Metal
(Ishak, Fisher, & Larochele, 2016)	6	PLA
(Ding, <i>et al.</i> , 2016)	6	Alumínio
(Zhang, <i>et al.</i> , 2016)	6	ABS
(Ding D. , Pan, Cuiuri, Li, & van Duin, 2016)	6+3	Metal
(Alsharhan, Centea, & Gupta, 2017)	6	PLA
(Ishak & Larochele, 2017)	6	PLA
(Ding, Dwivedi, & Kovacevic, 2017)	6+2	Metal
(Wu, Dai, Fang, Liu, & Wang, 2017)	6	PLA
(Zheng, Cong, Dong, Liu, & Liu, 2017)	6	Metal
(Evjemo, <i>et al.</i> , 2017)	6	Cola
(Brooks, Arif, Dirven, & Potgieter, 2017)	6	Biopolíester
(Bhatt, Peralta, Bruck, & Gupta, 2018)	6	Polímero
(Shembekar, Yoon, Kanyuck, & Gupta, 2018)	6	PLA
(Li, Haghghi, & Yang, 2018)	6	PLA/ABS
(Zhao, Ma, Feng, & Xiao, 2018)	6	PLA
(Kutzer, DeVries, & Blas, 2018)	6	PLA
(Bhatt, Kabir, Peralta, Bruck, & Gupta, 2019)	7	Polímero
(Shembekar, Yoon, Kanyuch, & Gupta, 2019)	6	PLA
(Bhatt, <i>et al.</i> , 2019)	6+6	PLA
(Bhatt, Malhan, & Gupta, 2019)	6+6	PLA
(Couto, <i>et al.</i> , 2020)	6	Metal
(da Silva, Souza, Araújo, Reis, & Scotti, 2020)	6	Metal

Fonte: o autor, 2020.

2.3.2 Visão Computacional

O uso da visão computacional passou a ser um grande aliado para o desenvolvimento de pesquisas voltadas para a área de automação de processos, de modo que estes sistemas tenham a capacidade de tomar decisões com uso das informações extraídas do ambiente, garantindo uma maior autonomia (Coelho, 2016). De acordo com Feliciano, *et al.*, (2005), não há um único método que seja capaz de resolver todos os desafios, estes são específicos e configurados para cada aplicação, por isso, o desenvolvimento de sistemas de visão sólido em ambientes industriais com a necessária exatidão torna-se, portanto, um desafio. Enquanto que sensores de pressão, proximidade, torque entre outros são importantes na melhoria do desempenho de sistemas, a visão de máquina contribui com o sensoriamento para medição e extração de informações (Fu, Gonzalez, & Lee, 1987).

Visão computacional é uma área que se dedica a estudar teorias e métodos para a extração de informações contidas em imagens e estas são capturadas atualmente por dispositivos digitais: câmeras CCD ou CMOS, que convertem o sinal de uma representação contínua para discreta, ou seja, a digitalização, sendo uma função $f(x,y)$, forma-se uma matriz de duas ou três dimensões que contém dados sobre a cor do *pixel* em cada posição da imagem, o que permite investigar a cena e identificar e classificar objetos.

A iluminação adotada para uma cena tem a finalidade de permitir a redução da complexidade de obter informações sobre a mesma, o que facilita a visualização dos objetos de interesse. A Figura 2.16 mostra os cinco principais modos de obter imagens de um ambiente, onde Figura 2.16(a) representa a projeção direta da luz que é considerada como a mais simples e utilizada. Quando se necessita observar objetos que apresentam superfície lisa e regular é adotada a técnica representada na Figura 2.16(b).

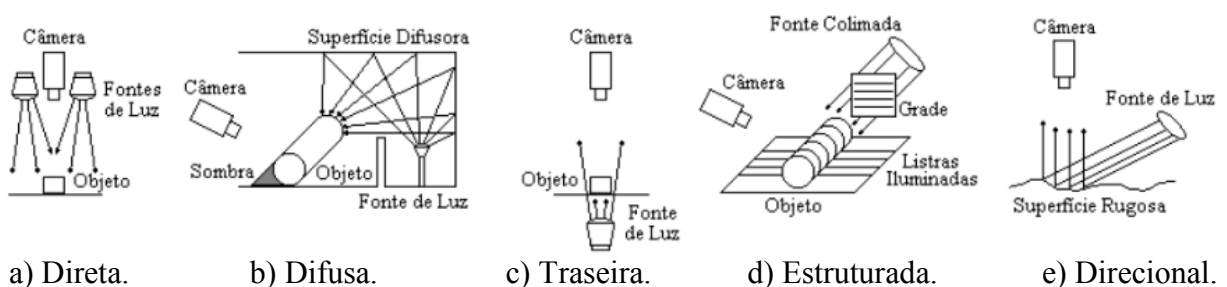


Figura 2.16: Técnicas de iluminação.

Fonte: Adaptado de (Grassi, 2005).

Para se obterem informações quanto a forma de transferência metálica, o uso da iluminação traseira, como representado na Figura 2.16(c). O uso de fonte colimada, como o da Figura

2.16(d), visa obter pontos, listras ou grades da superfície do objeto em análise, torna paralelo a trajetória do feixe de luz. Por fim, a forma de iluminação direcionada, Figura 2.16(e) torna-se ideal com uso de feixes de *LASER* para obter características superficiais, tais como depressões, riscos, entre outros.

Para se obter informações da poça de fusão, os sistemas de visão sem iluminação externa são utilizados, e o processamento das imagens adquiridas ocorre por segmentação, além da análise de descontinuidades para detecção de bordas e similaridades dos valores de níveis de cinza por limiarização (Lopera, 2016).

O uso de sensores de imagens que captam informações em alta velocidade, podem ser utilizados em processos por deposição a arco elétrico, com o objetivo de permitir visualizar fenômenos, tais como distinguir os modos de transferência metálica, que ocorrem em um tempo muito curto e que possuem efeitos que não são visíveis aos olhos humanos, uma vez que são capazes de registrar milhares de quadros por segundo. Porém, na reprodução é possível transformar poucos segundos de gravação em um vídeo com a duração de tempo maior do que a capturada. Técnicas de medição com sistemas de visão torna-se uma ferramenta adequada no campo de deposição a arco devido às características de não contato e o elevado grau de informações obtidos de todo o processo (Mnich, *et al.*, 2004). Com velocidade de aquisição de 100 *frames* por segundo, ou mais, é possível avaliar a dinâmica do comportamento das gotas que se transferem da ponta do eletrodo em direção à poça de fusão (Waszink & Graat, 1983), (Waszink & Piena, 1986).

O monitoramento é dividido basicamente em *on-line* e *off-line*, sendo os primeiros amplamente aplicados em *Seam Tracking*, (Yang, Cho, Lee, & Cho, 2007) e (Fang, Xu, & Tan, 2010) e também reconstrução da poça de fusão, proposto por (Saeed, Lou, & Zhang, 2004), com esta técnica é possível atuar no processo. Já em sistemas que não são realimentados pelas informações dos sensores, ou seja, estes apenas extraem informações, vem sendo utilizados para obter características da poça de fusão tais como a geometria, como proposto por (Heralic, Christiansson, Ottosson, & Lennartson, 2010), medição do cordão de solda, do tamanho da poça de fusão (Saeed & Zhang, 2003), análise das gotas geradas no processo da transferência metálica e segmentação da poça de fusão para identificar sua altura (Chen, M., & Wu, 2015), supervisão do processo conforme proposto por Shen, *et al.*, (2008), Zou, *et al.*, (2011) e Xiong, *et al.*, (2013).

Como a radiação emitida no processo de deposição a arco elétrico é intenso e apresenta um espectro de luz amplo e difícil de ser filtrado, uma opção para se obterem informações durante o processo com uso de sensores ópticos é descrita por Franco (2007), que adotou o sincronismo entre a captura de imagem e o momento em que o arco elétrico é extinto por um curto período de tempo, o que possibilita a obtenção de uma imagem com melhor qualidade.

Mota, *et al.*, (2011), avaliaram que o arco elétrico emite radiação luminosa visível, (U.V) e (I.V.), em praticamente todos os comprimentos de onda que chegam a ser superiores a 850nm. Com isso, o uso de filtros passa faixa podem reduzir a luminosidade do arco, porém, não é suficiente para permitir visualizar além do arco.

Vários métodos experimentais têm sido empregados em estudos para analisar a formação da gota, seu destacamento, sua projeção até a poça de fusão e o comportamento dinâmico do metal fundido, no processo de deposição a arco (Norrish, 2003). Sendo empregado além de sensores ópticos, o monitoramento dos sinais de tensão e corrente elétrica, assim como medições acústicas, em que (Manz, 1981) estudou o som de um arco elétrico e investigou sua relação com o modo de transferência de metal, porém, um problema desta técnica é a sua confiabilidade, porque os sinais acústicos podem facilmente ser corrompido por outro ruído de fundo.

Um dos primeiros trabalhos desenvolvidos com o objetivo de observar a poça de fusão foi realizado na *Ohio State University* por (Rokhlin & Guu, 1990), com uso de radiografia, onde o raio-X recebido aumenta com a profundidade de depressão conforme o comportamento do metal fundido. No entanto, o princípio por trás deste método é medir a espessura do material e penetração total da poça após ocorrer deformação da superfície, porém, os autores não conseguiram extrair o seu formato de forma satisfatória.

Rhee, *et al.*, (1992) desenvolveram um sistema para controlar a largura da poça de fusão do processo GMAW a partir de observações das imagens obtidas por meio de uma câmera CCD. A técnica proposta foi aplicada para uma única deposição de camada e apresenta uma possibilidade de evolução para uso na Manufatura Aditiva se apresenta como auxílio para o estado da arte.

Um método proposto para se obter informações da superfície da poça de fusão foi desenvolvido no *Welding Research Laboratory* da Universidade de *Kentucky* (Reino Unido) com base em dois grandes avanços (Kovacevic & Zhang, 1997). Primeiro foi eliminar a

influência da luz do arco elétrico, por meio da curta duração da pulsação do *LASER* que foi projetado na poça de fusão, com o sincronismo do obturador da câmera e o pulso no processo GTAW. Em segundo lugar, uma técnica especial, foi proposta a fim de adquirir informações da superfície especular, conforme a Figura 2.17, apresenta o sistema proposto e o resultado para diversos valores de corrente. Porém, a dimensão do metal fundido não possui quantidade substancial de luz estruturada para ser refletida difusamente.

O *LASER* projeta através de um vidro fosco um feixe luminoso e a câmera vê o reflexo da superfície da poça de fusão por meio das fendas (aberturas de grade). Para o sucesso da aplicação da técnica, deve-se reduzir/eliminar as distorções na captura das imagens e isso se dá baseado em calibrações. No entanto para obter informações estruturais corretas da cena que permitam identificar o tamanho de objeto, tornam-se necessários os parâmetros intrínsecos da câmera (Bouguet, 2004).

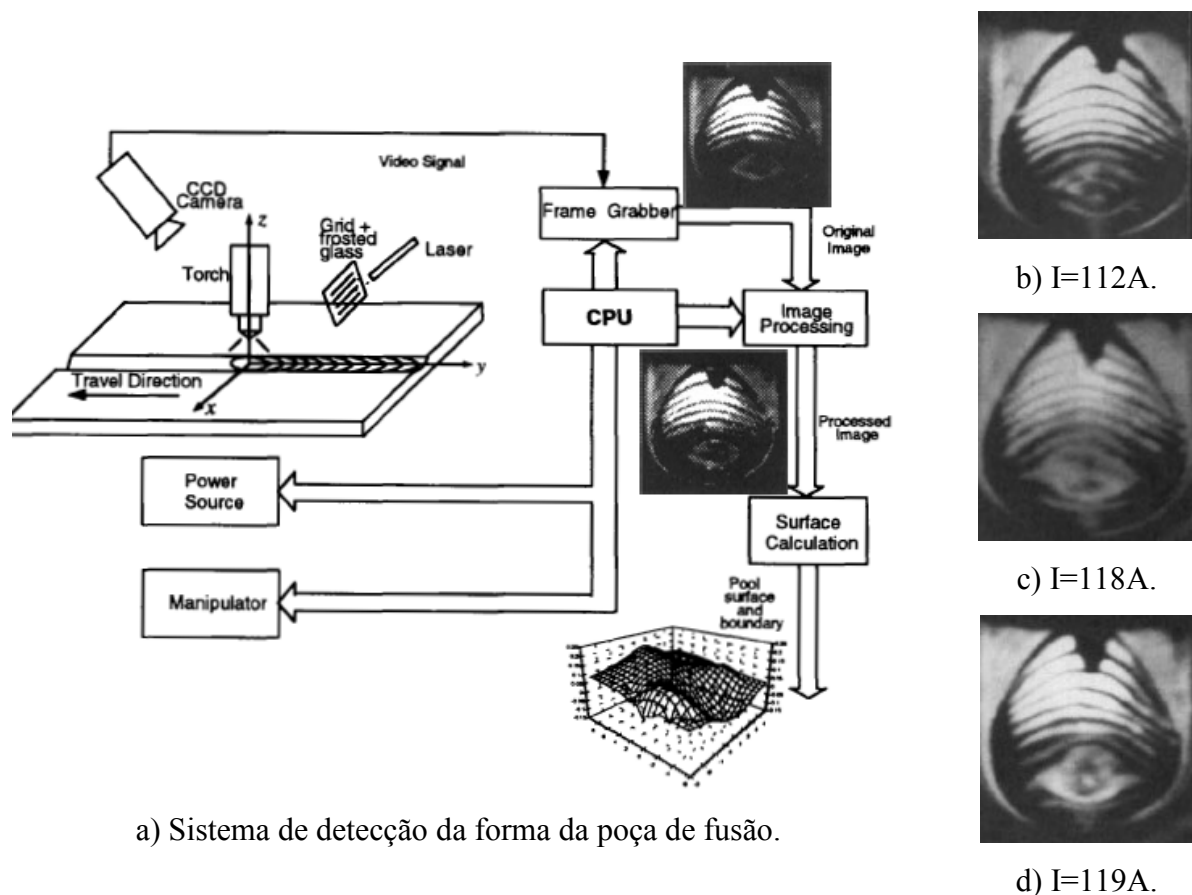


Figura 2.17: Natureza especular da poça de fusão.
Fonte: (Kovacevic & Zhang, 1997).

Ma, *et al.*, (2012) propuseram um sistema capaz de captar a rápida mudança da superfície da poça de fusão normal em ambas as direções (longitudinal e transversal), no processo

GMAW-P, bem como ponto-ponto associado com um padrão *LASER* baseado na reflexão capturada, como apresentado na Figura 2.18.

A informação do comportamento da poça de fusão pode então ser extraída da deformação da luz estruturada. No entanto, a superfície do metal fundido é suave como um espelho e nenhuma quantidade substancial da luz pode ser refletida difusamente e esta é formada a partir da projeção de um *LASER* através de uma grade, que tem como função formar as listras. No caso de reflexão especular, a cena observada é uma imagem virtual do objeto original (Pedrotti & Pedrotti, 1993).

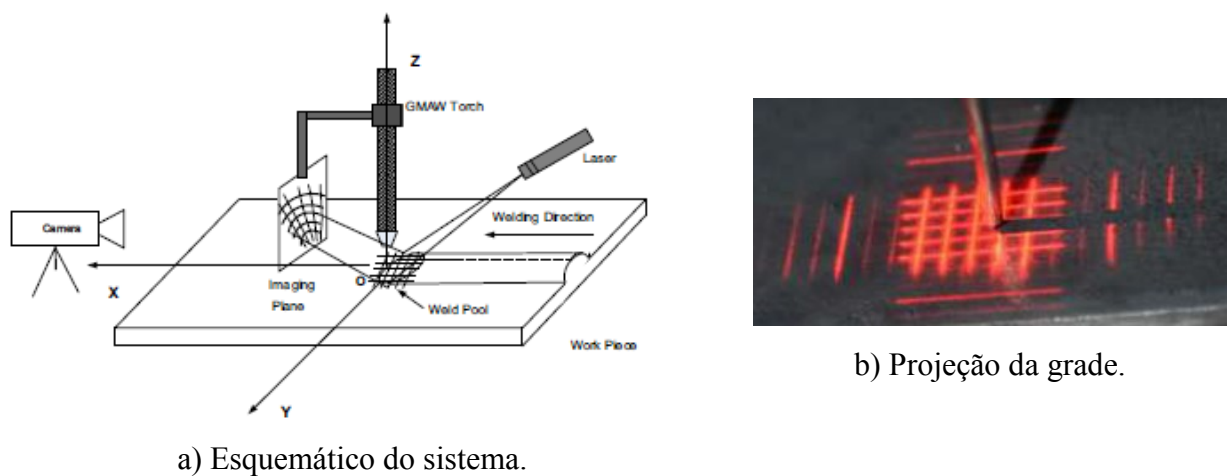


Figura 2.18: Comportamento bidirecional da poça de fusão.
Fonte: (Ma, Zhang, Gay, & Male, 2012).

Para visualizar a poça de fusão normalmente utiliza-se iluminação *LASER* e uma câmera dotada de um filtro óptico passa-banda com centro no comprimento de onda da fonte luminosa que captura a imagem da cena (Johnson, Carlson, Smartt, & Clark, 1991). Uma outra forma de minimizar a intensidade luminosa do arco voltaico é com o uso de filtro passa alta com frequência de corte próximo do infravermelho (Chen & Chin, 1990).

Houghton, *et al.*, (2007) propôs a técnica de iluminação a *LASER* com filtragem de espectro, com o objetivo de reduzir ou eliminar totalmente a luz do arco que alcança os sensores da câmera, ilumina a região da poça de fusão. Conforme apresentado na Figura 2.19, o princípio de filtragem espectral mostra o efeito do filtro passa-banda com a fonte de luz *LASER* e o resultado dessa combinação é uma intensidade luminosa do arco muito atenuada, com uma iluminação dominante na poça de fusão e seus arredores.

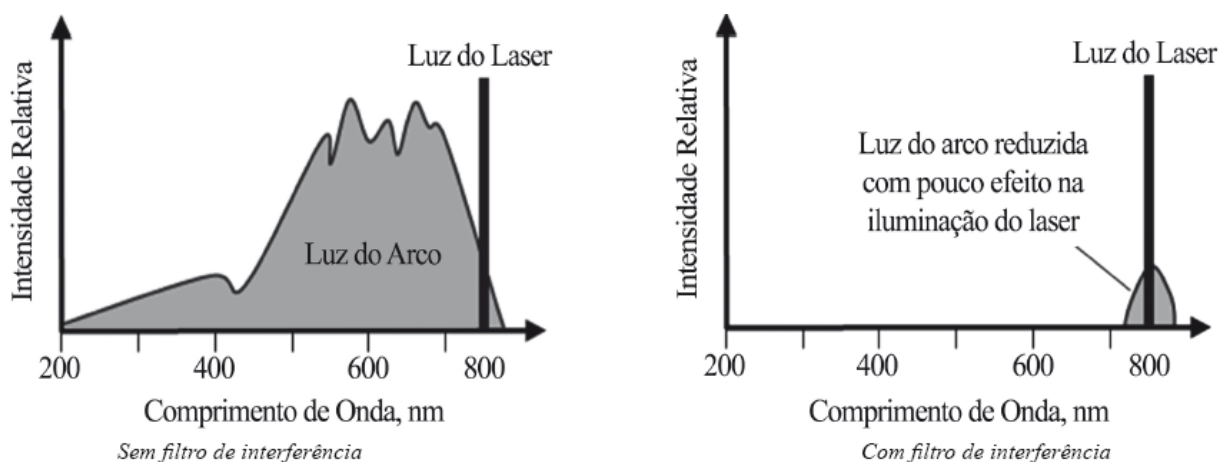


Figura 2.19: Filtragem do espectro.

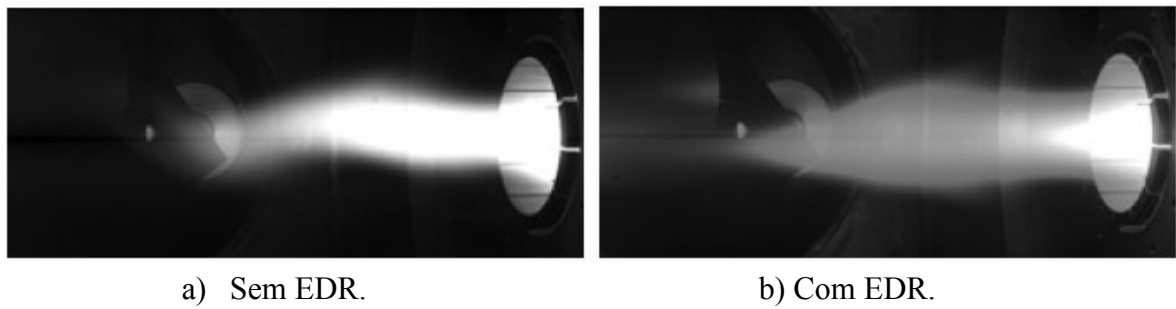
Fonte: Adaptado de (Houghton, Lucas, & Lucas, 2007).

Mota, *et al.*, (2011), afirmaram ainda que os parâmetros do processo de deposição por arco elétrico interferem na intensidade luminosa, sendo comprovado que quando ocorre o aumento da corrente, com os demais parâmetros constantes, houve uma maior emissão de radiação infravermelha, pois proporciona maior energia ao arco e aumenta a agitação dos átomos presentes e, portanto, aumenta o número de partículas ionizadas, maior é a energia luminosa emitida.

Uma tecnologia desenvolvida em 2012 pela *Vision Research*[®] utilizada nas câmeras de alta velocidade é a função EDR (*Extreme Dynamic Range*) que é especialmente eficaz sobre os “pontos quentes” da imagem. Baseado na metade do tempo de exposição global, ocorre a redução do número de *pixels* saturados na cena, isso extrai informações que seriam perdidas devido à superexposição. Esta aplicabilidade se torna interessante e ideal para processos de deposição a arco, que utiliza a própria radiação do arco e da poça de fusão como fonte de iluminação, onde a intensidade reduz o contraste da imagem (VisionResearch, 2019).

A Figura 2.20 exemplifica a atuação do EDR, sendo que a Figura 2.20(a) é composta entre claro e escuro como a maioria das aplicações que apresentam alto contraste e nenhum EDR é usado. Já a Figura 2.20(b) a função está ativada, é possível observar as informações visíveis aumentadas na área da chama e do plasma, enquanto os detalhes nas partes mais escuras da cena foram mantidos. Nas imagens de resolução total, maiores detalhes podem ser observados nos segmentos do bocal no lado externo da área de combustão.

Técnicas empregadas para o monitoramento dos parâmetros geométricos dos perfis das estruturas obtidas baseiam-se nas informações obtidas a partir de imagens adquiridas da camada depositada, bem como, da poça de fusão.



a) Sem EDR.

b) Com EDR.

Figura 2.20: Uso do EDR.
 Fonte: (VisionResearch, 2019).

Análises de imagens obtidas da poça de fusão do processo GMAW-P utilizando câmera de alta velocidade foram realizadas por (Chen, *et al.*, 2008), (Yan, Zhang, & Wun, 2011) e (Xiong, *et al.*, 2013), e esta detecção passiva auxiliou na detecção da altura e largura da camada depositada, adotaram diversos algoritmos de processamento de imagem. Os experimentos de validação confirmaram a eficácia do sistema de medição para a geometria do cordão na manufatura aditiva em camadas.

A largura e a altura do reforço são as principais características geométricas das camadas depositadas na Manufatura Aditiva. Diferentes sistemas de processamento da imagem da poça de fusão foram desenvolvidos para auxiliar e monitorar sua geometria, assim como o apresentado na Figura 2.21, que utiliza o processo GMAW proposto por Xiong, *et al.*, (2016).

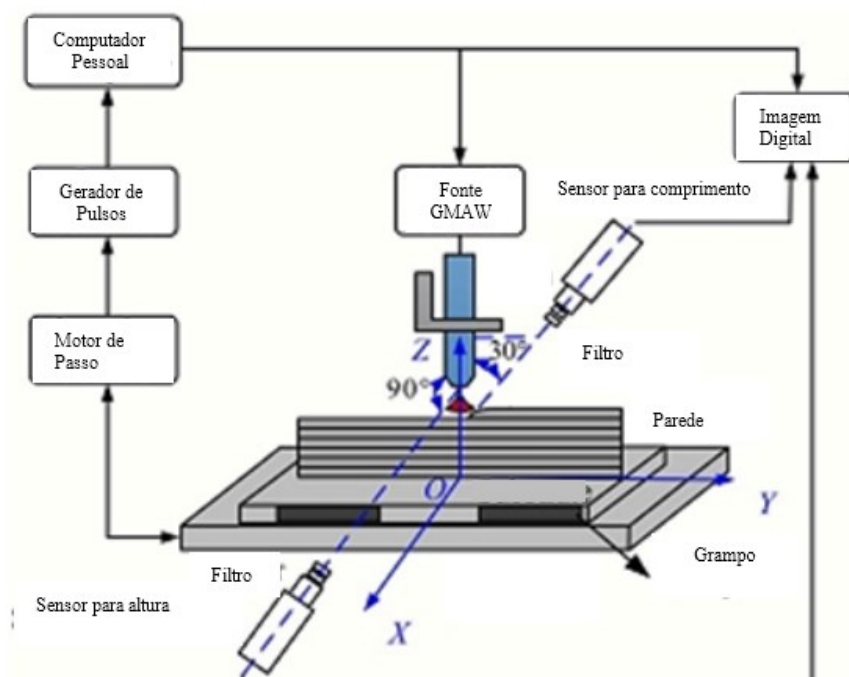


Figura 2.21: Monitoramento do processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco.
 Fonte: Adaptado de (Xiong, Yin, & Zhang, 2016).

A avaliação da qualidade de uma peça depende da inspeção visual do operador, exigindo experiência e esta avaliação é utilizada para detectar defeitos externos após o processamento (Chu & Wang, 2016).

Lopera, Motta, & Alfaro (2016) utilizaram uma câmera e um *scanner* 3D para adquirir informações da altura e largura da camada, sendo a segunda foi feita indiretamente pela medição da poça de fusão.

Font comas, *et al.*, (2017) estudaram um sistema de visão passiva para o sistema para rastreamento da largura da camada depositada, obtendo imagens superiores. Os autores também apontaram a possibilidade de adquirir mais informações do processo com variação do ângulo do arame.

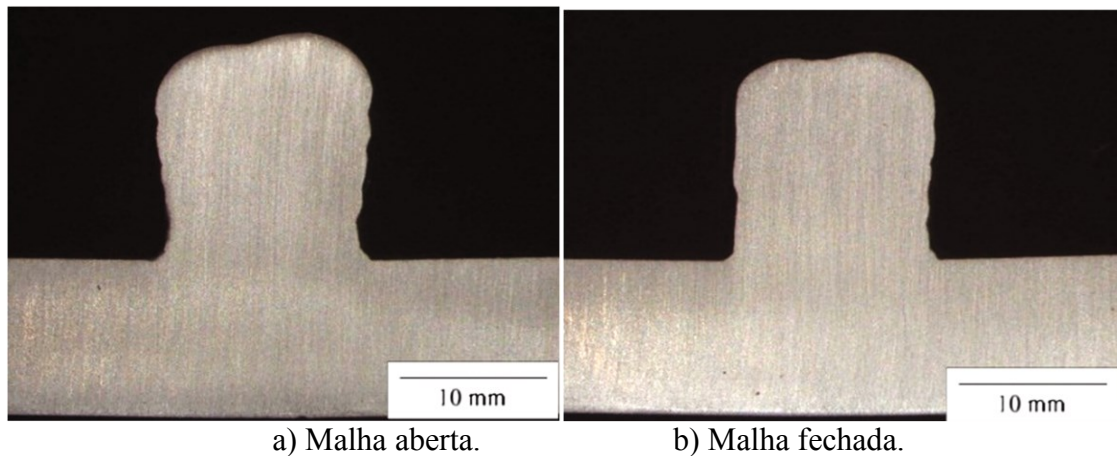
Repossini, Laguzza, & Grasso (2017) utilizaram uma câmera de alta velocidade para capturar o imagem de respingos por meio da extração de recursos e abordagem de mineração de dados para imagens, o que permitiu que várias condições de fusão pudessem ser diagnosticadas durante os processos LPBF (*LASER Powder Bed Fusion*).

A geometria da poça de fusão indica o formato da camada solidificada e seu monitoramento auxilia na predição da fabricação. Pan, *et al.*, (2018) mostraram que a qualidade final dos componentes fabricados pela Manufatura Aditiva por Deposição a Arco está relacionada com efeitos dinâmicos na poça de fusão. Com isso, a detecção visual oferece um método para adquirir essas propriedades dinâmicas e, portanto, oferecer outro nível de controle sobre o processo de deposição. Pretende-se então identificar na literatura alguma técnica que possa contribuir para o estudo do fenômeno do transbordamento utilizando sensores de visão.

Xiong, *et al.*, (2013), Xiong, *et al.*, (2014), Xiong *et al.*, (2016) e recentemente Han, *et al.*, (2018) aplicaram visão computacional em um controle em malha fechada, utilizando a geometria da camada depositada solidificada é a variável de saída, enquanto que a velocidade de deposição foi considerada como entrada.

Han, *et al.* (2018), demonstraram os efeitos quando se utiliza um sistema em malha aberta e fechada, sendo que o primeiro apresenta um desvio de largura de até 1,24 mm (9,5% da largura da camada), enquanto que na segunda condição o resultado foi de 0,52 mm (4% da largura da camada), além disso, o acabamento superficial se apresenta com menos variação dimensional, conforme a Figura 2.22.

Zhang, *et al.*, (2018) estabeleceram um sistema de monitoramento visual com um câmera de alta velocidade para capturar a imagem da poça de metal fundido e utilizou o treinamento de uma CNN (*Convolutional Neural Networks*), para que o sistema possa detectar três tipos de características de formação, ou seja, poça derretida, fumos e respingo e a precisão do reconhecimento atingiu 92,7%. O método baseado em CNN pode aprender o recurso automaticamente, reduzindo o trabalho artificial e melhora a eficiência, porém, o número de parâmetros a serem treinados é muito grande. O que aumenta o tempo de processamento, bem como o número de experimentos de deposição de camadas.



a) Malha aberta.

b) Malha fechada.

Figura 2.22: Vista da seção dos perfis das camadas.

Fonte: (Han, Li, & Zhang, 2018).

Na pesquisa desenvolvida por Gobert, *et al.*, (2018), várias imagens de superfície da poça de fusão foram coletadas em cada camada no processo a *LASER*. Para cada pilha de imagens da camada, os recursos visuais multidimensionais foram extraídos e avaliados por meio de técnicas de classificação binária, em que foram categorizados como uma falha, ou seja, uma interrupção indesejável na estrutura típica do material, ou uma construção defeituosa.

Yeung, *et al.*, (2018) utilizaram uma câmera de alta velocidade para monitoramento da poça de fusão, sugerem que milhares de imagens podem ser obtidas durante a deposição por camada, mas também identificaram a necessidade de desenvolver um método de processamento rápido de imagem para caracterizar geometria formada pelo metal fundido.

2.3.3 Predição Geométrica

Recentemente trabalhos vem sendo desenvolvidos por pesquisadores que utilizam diversos métodos para identificar a relação entre os parâmetros do processo a arco e as geometrias obtidas, dentre os modelos matemáticos que utilizam variáveis mensuráveis, tem-se: projeto

fatorial, regressão linear, regressão em segunda ordem, Método Taguchi, Redes Neurais Artificiais e lógica Fuzzy (Haykin, 2008), (Suryakumar *et al.*, 2011).

Uma geometria obtida através deposições de camadas pode ser considerada como inaceitável, uma vez que não apresenta uniformidade das propriedades mecânicas, metalúrgicas e dimensionais ao longo de seu comprimento, sendo que variações no aporte térmico pode ser a causa dessa heterogeneidade (Marya & Marya, 1998). A partir dos parâmetros de entrada, que consistem geralmente dos valores de corrente, tensão, velocidade de deslocamento da tocha, velocidade de alimentação do arame, dentre outros e das variáveis de saída, que decorre no comportamento do processo e na geometria da camada, são utilizadas técnicas que buscam relacionar matematicamente, desenvolver um modelo capaz de simular um processo de deposição real (Lee & Um, 2000).

Os modelos de regressão aplicados no processo de deposição a arco apresentam precisão razoável visto a simplicidade das equações que relacionam os parâmetros de entrada com os resultados obtidos. Uma vez que, é possível avaliar a ação de cada variável de entrada com as saídas (Henriques, Lima II, Castro, & Bracarense, 2006).

Lima II, *et al.*, (2005), utilizaram aproximação por funções quadráticas para relacionar as principais variáveis do processo com os parâmetros definidos como de qualidade da camada (penetração, reforço, largura do cordão e zona termicamente afetada) produzida pelo processo GMAW. Desta forma, é possível determinar a geometria da camada de maneira precisa e sem a utilização de ensaios destrutivos. As variáveis medidas foram: tensão, corrente, velocidade de deslocamento da tocha e largura da poça de fusão, sendo esta última obtida com o uso de uma câmera de alta velocidade, que capturou as imagens durante o período de curto-circuito e o seu dimensional foi extraído por meio do algoritmo de Canny sob a informação digitalizada (Canny, 1986). O modelo logrado foi numericamente com boa precisão para cada um dos parâmetros de qualidade.

Segundo Henriques, *et al.*, (2006), afirmam que a partir dos coeficientes das equações polinomiais é possível verificar a sensibilidade dos parâmetros. Uma maior precisão das relações entre os parâmetros do processo e as dimensões da camada depositada podem ser alcançadas com uso de modelos físicos, que consideram as forças envolvidas, como também a distribuição de calor e seus efeitos durante o processo, exatamente o que ocorre com a força de Marangoni e sua dependência com a temperatura, que buscam associar o modelo de fluxo de

calor atuante durante a deposição com as variações da tensão superficial do metal fundido, de modo a prever a geometria final da camada (Essers & Walter, 1981), (Matsunawa & Ohji, 1982) e (Marya & Marya, 1998). Uma análise em relação ao fluxo de calor e sua intervenção na tensão superficial da poça fundida, foi realizada para prever instabilidades na penetração da camada. Parâmetros como a tensão superficial e densidade do metal fundido, tem forte dependência com a temperatura e não são facilmente mensuráveis durante o processo. Com isso, estes modelos apresentam elevada complexidade matemática e exigem um alto custo computacional, o que corresponde a baixa aplicação (Pinto, 2011).

Os fenômenos físicos que ocorrem na poça de fusão são muito complexos e os métodos analíticos em geral não podem descrevê-los adequadamente. Análise numérica tem sido uma ferramenta poderosa na modelagem desses eventos, no entanto, os produtos obtidos devem ser comparados com os dados experimentais (Saeed, Lou, & Zhang, 2004).

Estudos foram realizados para desenvolver uma aproximação matemática para determinar o perfil da poça líquida com base nos conceitos de tensão superficial e assim aplicá-la nas camadas depositadas, ao considerar a forma bidimensional elíptica, como mostrado na Figura 2.23, assumindo a tensão superficial constante sobre toda a superfície, foram correlacionados a largura, reforço e volume do metal líquido em função do ângulo de contato da poça líquida com a superfície (Matsunawa & Ohji, 1982).

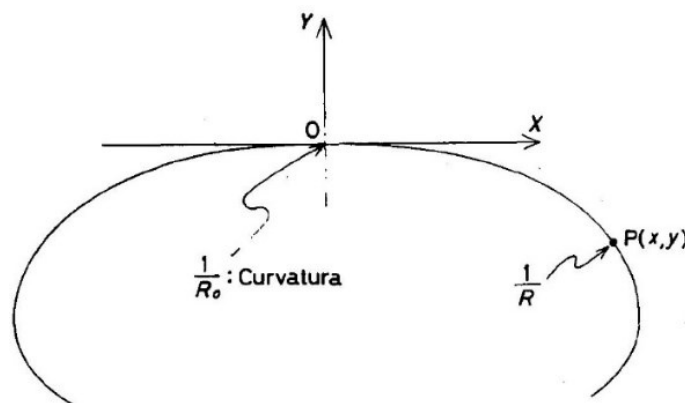


Figura 2.23: Poça líquida bidimensional.
Fonte: Adaptado de (Matsunawa & Ohji, 1982).

Os autores constataram que a superfície da camada reflete o perfil do metal líquido para uma ampla faixa de condições de deposição, exceto para condições de corrente e velocidade de deslocamento alta, onde a camada pode não assumir o formato geométrico proposto.

A análise de regressão é uma técnica estatística para modelar e investigar a relação entre duas ou mais variáveis (Montgomery & Runger, 2009). O desenvolvimento do modelo é baseado nos dados obtidos de forma experimental e, pode ser entendido como empírico. Há situações em que um determinado parâmetro (Y) depende de duas ou mais variáveis independentes (n) ou regressoras (x), conforme representado pela Eq. (2.19).

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + \epsilon \quad (2.19)$$

Onde ϵ indica o erro aleatório e os parâmetros a_i , $i=0,1,\dots,n$ são os coeficientes de regressão e normalmente são estimados pelo método dos mínimos quadrados, que tem como principal objetivo determinar a curva que melhor se ajusta a um determinado conjunto de pontos medidos de tal modo que o somatório do erro quadrático seja mínimo. No caso em que não há um comportamento linear, adota-se a regressão polinomial, em que os modelos podem ser representados, por exemplo, por um polinômio de segundo grau e pode ser expressa conforme a Eq. (2.20).

$$Y = a_0 + a_1x + a_{11}x^2 + \epsilon \quad (2.20)$$

Quando se tem uma relação polinomial com duas variáveis utiliza-se a Eq. (2.21).

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{12}x_1x_2 + \epsilon \quad (2.21)$$

A técnica de regressão linear múltipla foi utilizada para determinar uma relação matemática entre os parâmetros do processo e a geometria da camada depositada por GMAW (Kim, Kwon, & Siores, 1996). Os autores representam a geometria da camada como uma função resposta dependente do diâmetro do arame, tensão, corrente e velocidade de deslocamento da tocha e consideraram que o modelo desenvolvido é adequado para uso na predição.

Na pesquisa realizada por Chan, *et al.*, (1999), na qual consideraram a tensão, a corrente e velocidade de soldagem como os parâmetros de entrada e para a saída avaliaram a penetração, reforço e largura, o que permitiu prever a largura da camada com mais precisão que a altura e isso foi justificado pelos autores, que consideraram o reforço do cordão fica sujeito a maiores variações devido a tensão superficial e interações do metal como a molhabilidade.

Kim, *et al.*, (2005) utilizaram os mesmos dados de Chan, *et al.*, (1999) como dado de entrada e desenvolveram um sistema para avaliar o predomínio destes parâmetros na largura, altura do reforço, penetração, áreas fundida e depositada, comprimentos do contorno da penetração, do contorno do reforço (B_R) da camada depositada, conforme esquematizado na Figura 2.24. O

modelo foi capaz de prever com maior precisão a geometria do cordão de solda, segundo os autores, devido a representação das relações não-lineares.

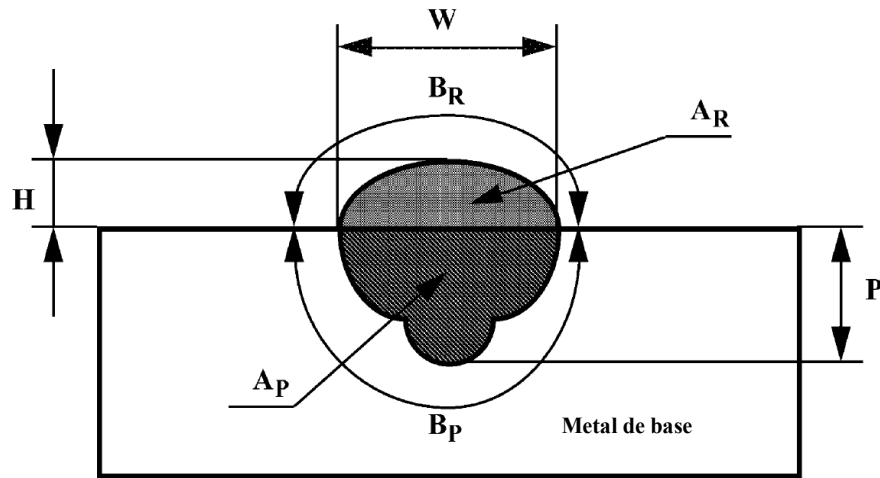


Figura 2.24: Parâmetros geométricos do cordão de solda.
Fonte: Adaptado de (Kim, Son, Park, Kim, & Kim, 2005).

Manikya Kanti & Srinivasa Rao, (2008) consideraram o processo GMAW-P e utilizaram com entrada a espessura da chapa, frequência de pulso, taxa de alimentação do arame, razão desta com a velocidade de deslocamento da tocha e corrente de pico, enquanto os dados analisados foram penetração e o índice de convexidade. Os resultados do modelo desenvolvido possuem a capacidade de prever a penetração e o índice de convexidade dentro de uma faixa de erro aceitável, conforme estabelecido pelos autores.

Outro modelo baseado na técnica de regressão múltipla utiliza os mesmos parâmetros de entrada, além da largura da poça de fusão foi desenvolvido (Lima II, Castro, Bracarense, & Campos, 2005), (Lima II, Castro, Bracarense, & Campos, 2010). Como variáveis de saída, os autores consideraram a penetração, reforço, largura do cordão e tamanho da zona termicamente afetada. Definiram também um vetor para mensurar a qualidade dos cordões obtidos.

Na pesquisa realizada por Pinto, (2011), os parâmetros de entrada considerados foram: tensão, velocidades de alimentação do arame e de deslocamento da tocha, enquanto que as informações de saída que foram avaliadas eram: largura, reforço e a não-molhabilidade (NM) da camada, que ajudou a modelar a geometria obtida de uma fórmula matemática parabólica ou equações de 4º grau.

A geometria das camadas é uma das principais e mais importantes características do processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco, uma vez que a peça final é construída

por deposições sucessivas e sobrepostas. Desta forma, a largura e o reforço de cada camada determinam a mudança na geometria da peça construída a cada passe realizado. No entanto, devido à alta complexidade do processo, ainda há uma grande variância nas propriedades e qualidades de peças produzidas. Além disto, devido aos ciclos térmicos complexos, há a necessidade de entendimento da correlação entre a microestrutura, propriedades e o processo de fabricação das peças produzidas pela Manufatura Aditiva. Há, então, uma grande demanda pela implementação de sistemas de controle e ajuste dos parâmetros do processo capazes de atuar em tempo real e o desenvolvimento de um mapeamento melhor entre as variáveis e as características do produto final (Frazier, 2014).

Alguns dos principais parâmetros que afetam a geometria da camada solidificada são a corrente, tensão e velocidade de deslocamento da tocha. Porém, o modelamento físico-matemático do fenômeno é limitado devido a complexidade da associação dos parâmetros de entrada com o resultado final da deposição, comprovado pela inexistência de um equacionamento analítico que consiga relacionar a geometria da camada com os parâmetros de entrada usados para gerá-lo (Las Casas, 2012), (Las Casas, Ávila, Bracarense, & Lima II, 2018).

Jin, Li & Gao, (2019) utilizaram um sistema de detecção de visão em tempo real com uma estratégia para detectar e extrair a largura da poça de fusão de controle de solda inteligente baseada na abordagem de aprendizado de reforço para controlar a largura da poça de fusão. Para a análise, os autores realizaram experimentos com controle em malha aberta e fechada compararam os resultados para verificar a confiabilidade do controlador.

Cadiou, *et al.*, (2020) avaliaram a transferência de calor e o fluxo de fluido no plasma e na poça de fusão, baseado em um modelo transiente 2D para simular um processo WAAM, para análise computacional. A geração de gotículas, sua transferência e impacto na poça de fusão, bem como a dinâmica da poça de fusão foram calculadas. Cada camada era composta por cerca de sessenta gotas. O modelo mostrou que a largura do depósito foi principalmente devido à queda das primeiras gotas, enquanto a altura da poça de fusão aumentou continuamente durante a queda das demais gotas. Além disso, o modelo também confirmou que, antes do desprendimento da gota do arame, as forças de tensão superficial eram dominantes. Porém, durante o pulso, as forças eletromagnéticas aumentaram fortemente ao longo da ponte líquida, causa o desprendimento da gota.

Halisch, Radel, Tyralla, & Seefeld, (2020) propuseram uma comparação entre o uso de câmera termográfica e comum, para medir a largura e comprimento da poça de fusão. Concluíram que os resultados obtidos são próximos, e identificaram que na primeira camada, a dimensão da poça de fusão aumenta de forma constante até que se nivele em um platô, enquanto nas camadas posteriores, a fusão do tamanho da poça diminui lentamente.

Zhang, Wang & Liu (2021) analisam e identificam os desafios da soldagem robotizada e a adaptação necessária para fazer correções dos parâmetros para tornar o sistema adaptativo. Para isso, os autores citam a importância na extração das informações com uso de sensores, de modo a prever as respostas do processo aos ajustes e otimização, baseado em inteligência artificial e aprendizado de máquina. Para a tomada de decisões, torna-se necessário compreensão da dinâmica do processo de soldagem e as respostas às mudanças.

Várias técnicas de otimização para a predição das camadas funcionam de modo *off-line* usando dados treinados estáticos, sendo que a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco ocorre de forma dinâmica, o que necessita desenvolver um monitoramento e avaliação das informações provindas do processo, tais como: temperatura, corrente, tensão, dados geométricos da largura e comprimento do cordão, todos estes obtidos e processados em tempo real (Liberini *et al.*, 2016).

2.4 Considerações Sobre a Revisão Bibliográfica

O estado da arte apresentou os estudos realizados sobre o tema desta tese, com a finalidade de monitorar os parâmetros geométricos e a dinâmica da poça de fusão. Pesquisas utilizando o processo GMAW-P, na deposição de sucessivas camadas ainda são iniciais quando comparadas aos trabalhos desenvolvidos com GTAW, o que motivou o desenvolvimento deste trabalho.

A dificuldade de se automatizar o processo de deposição por camadas está em monitorar e controlar o comportamento dinâmico da poça de fusão, assim como os parâmetros geométricos como largura e altura. A qualidade da camada depositada está relacionada com os vários parâmetros. O comportamento dinâmico apresenta-se como não-linear e composto por múltiplas variáveis e um grande número de fatores estocásticos.

O processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco ainda está em desenvolvimento tecnológico e enfrenta diversos problemas como a deformação geométrica causada pelo excesso de calor imposto durante a fabricação. O ciclo térmico que ocorre a cada camada depositada promove contração e expansão não uniformes, levando a problemas micro e macroestruturais.

Além deste, ainda há pontos que precisam ser mais estudados, tais como o planejamento do caminho ideal da tocha, minimização de tensões residuais no componente, evolução controlada da microestrutura.

Durante a deposição de camadas pelo processo de arco elétrico, a poça de fusão pode apresentar irregularidades na sua forma o que resulta em uma falta de homogeneidade do perfil depositado. O uso de um sistema de visão na obtenção de imagens da poça de fusão e com auxílio de algoritmos dedicados podem contribuir para a aproximação dos limites geométricos das camadas solidificadas por meio de ajuste dos parâmetros do processo de modo a minimizar ou eliminar o efeito de transbordamento. Além disso, a possibilidade de alterar os parâmetros durante as deposições das camadas apresenta uma possibilidade de controlar a microestrutura e consequente propriedades mecânicas das paredes produzidas.

Em resumo, a entrada de calor ideal pode resultar em melhores propriedades microestruturais e mecânicas da peça, assim como a precisão geométrica das camadas. A poça de fusão obtém tempo mínimo para se espalhar e, portanto, a proporção entre largura e altura pode ser menor com redução do aporte térmico.

A literatura cita que a deposição em camadas sucessivas quando ocorrem em um único sentido, tende a resultar em uma curvatura, além de contribuir para o efeito do transbordamento, porém, de todas as técnicas apresentadas para minimizar os efeitos, nenhuma trata em utilizar um sistema de visão computacional, manipuladores robóticos e o processo por corrente pulsada, com a variação dos parâmetros de modo a reduzir a energia térmica à medida que as camadas são depositadas.

3 Metodologia

Este trabalho está dividido nas seguintes etapas principais:

1°. Desenvolvimento de sistema composto por manipuladores robóticos, fonte de soldagem baseada em GMAW-P e uma câmera para monitorar o comportamento do processo durante a fabricação de paredes.

2°. Parametrizar as variáveis do processo pulsado de acordo com os resultados obtidos pelas paredes construídas;

3°. Com o uso da câmera de visão, analisar o comportamento da transferência metálica, poça de fusão e arco elétrico à medida que as camadas são depositadas.

3.1 Desenvolvimento do Sistema

A metodologia proposta visa determinar as influências dos parâmetros do processo nas características geométricas das camadas obtidas durante o processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco e informações podem ser obtidas para uma tomada de decisão e correção. O trabalho foi estruturado para ser desenvolvido conforme representado na Figura 3.1.

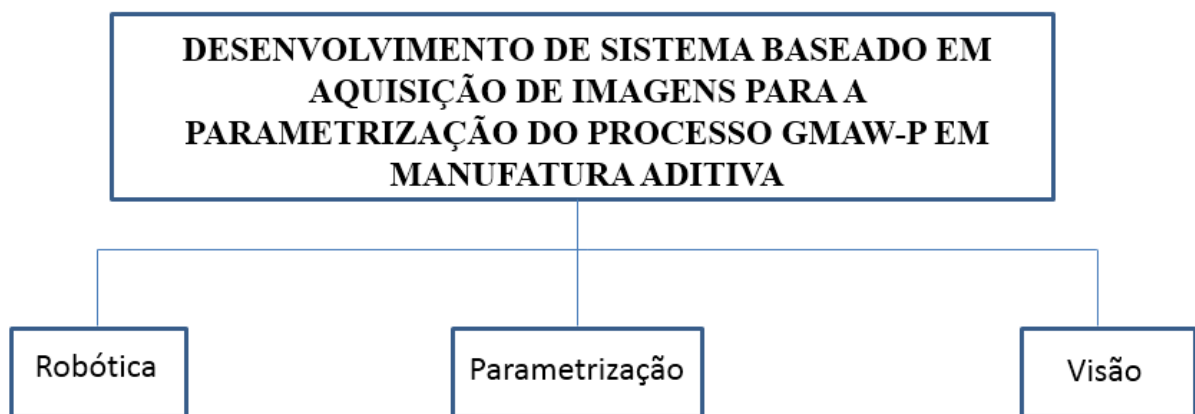


Figura 3.1: Representação da estruturação do trabalho.
Fonte: o autor, 2018.

A Figura 3.1 é composta por três partes principais as quais necessitam de um computador que é o núcleo de todo sistema e que gerencia os dados desde o modelamento da peça a ser produzida, quanto o controle do manipulador robótico, assim como os parâmetros do processo de deposição e processamento das informações visuais.

3.1.1 Manipuladores Robóticos

Com uso de dois manipuladores robóticos antropomórficos disponíveis no Laboratório de Robótica Soldagem e Simulação (**LRSS**) da Universidade Federal de Minas Gerais, foi possível promover um estudo da viabilidade do processo no desenvolvimento de peças baseadas na Manufatura Aditiva por Deposição a Arco por GMAW-P. Com isso, devido a possibilidade de construção de geometrias complexas apresentada pela Manufatura Aditiva, o uso da robótica cooperativa, vem como uma opção para facilitar o manuseio da tocha e substrato. A Figura 3.2 apresenta a célula desenvolvida para uso nos experimentos.

Para a manipulação do metal de base, foi utilizado o robô industrial SK-6 da Yaskawa Motoman, com seis graus de liberdade, enquanto que a tocha e a câmera de alta velocidade foram montadas no robô também industrial IRB6 da ASEA, porém, este apresenta um grau de liberdade a menos que o primeiro e seu sistema de controle utiliza linguagem não-proprietária. A montagem da câmera e tocha no *end effector* do mesmo robô, se justifica para que sempre se tenha a mesma imagem da poça de fusão, independente da geometria a ser construída, além de deixar a calibração menos complexa, pois tocha e sensor de visão se mantem na mesma posição. A programação da trajetória dos movimentos dos manipuladores robóticos ocorreu de forma *off-line*.

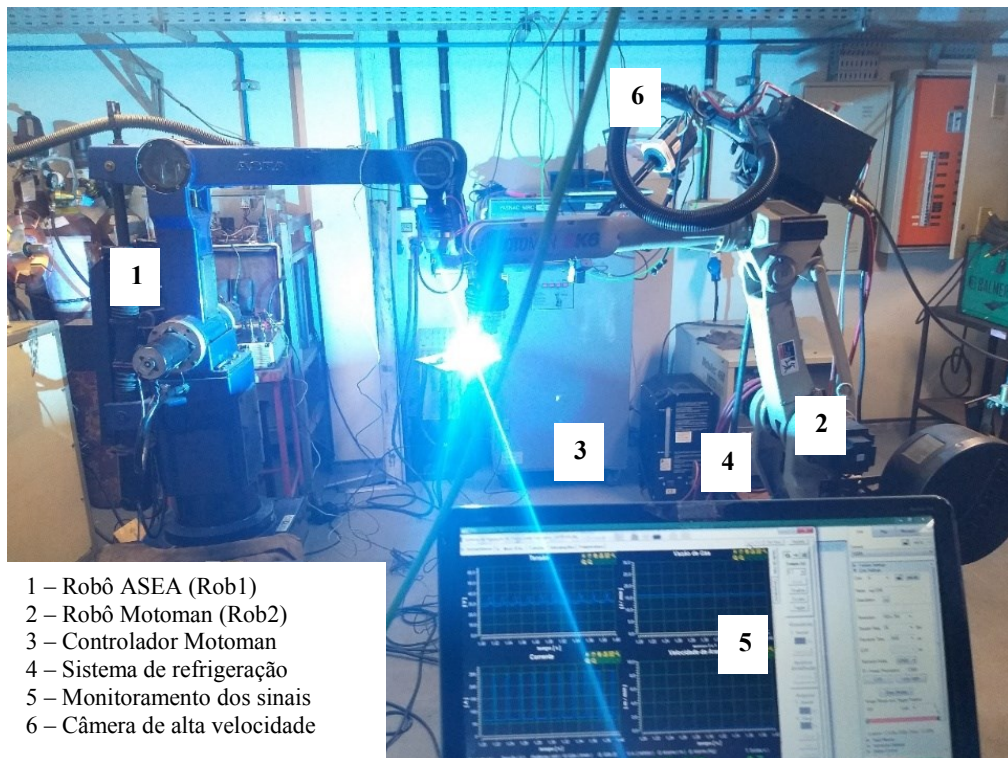


Figura 3.2: Configuração experimental da célula com robôs cooperativos.

Fonte: o autor, 2020.

O uso dos dois robôs se justifica por aumentar a área de trabalho para construção de peças, diferente de diversos equipamentos comerciais, além de criar um sistema com mais graus de liberdade em relação aos convencionais. Essa configuração permite que seja controlado: sentido, direção e orientação de deslocamento da tocha; velocidade de deslocamento da fonte térmica; controle de altura à medida que as camadas são depositadas.

A escolha do Arduino[®] para o sistema de controle e comando de acionamento dos motores do robô ASEA se deve, por atender aos requisitos de tensão e potência dos motores e a frequência de comutação, bem como a integração com todo o restante do sistema. O uso de *drivers* e motores de baixa potência, foi permitido devido ao tipo de acionamento mecânico do robô, que ocorre através de alavancas que transmitem o movimento de um ponto a outro e à redução elíptica que potencializa o torque do motor.

Após o *MATLAB*[®] realizar o processamento do modelo 3D, envia uma matriz de dados com as coordenadas para Arduino[®] Uno “*Master*” que distribui os pacotes para cada um dos escravos que controlam cada uma das juntas, conforme a Figura 3.3. As informações são transmitidas através de um barramento SPI (*Serial Peripheral Interface*) que contém comandos de operação e correção dos parâmetros cinemáticos de uma estrutura multi-eixos de forma sincronizada pois compartilham o mesmo sinal de *clock* (Arduino, 2019). Devido à potência necessária para acionamento dos motores, foi necessário utilizar duas fontes de alimentação externa, sendo uma para os *drivers* e outra para os micro-controladores.

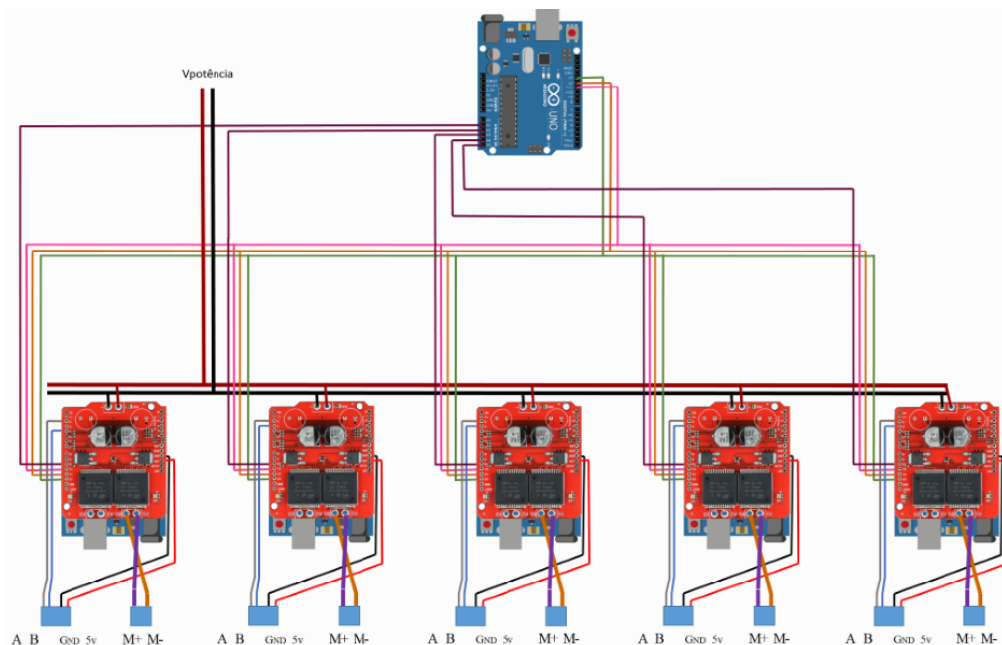


Figura 3.3: Arquitetura de controle do manipulador ASEA com Arduino[®] Uno.

Fonte: o autor, 2018.

O programa do Arduino® tem basicamente duas funções: receber do *MATLAB*® as informações de posição a cada intervalo de tempo definido; e gerar os pulsos para o pino *step* na frequência correspondente à velocidade da junta. Esses comandos definem o novo valor de *set-point* de posição de cada motor a partir da posição atual. A frequência de pulsos é então calculada a partir da posição atual e desejada, de acordo com o intervalo de tempo a ser cumprido que corresponde a interpolação. Caso novas informações sejam enviadas antes do término da execução, estes serão armazenados em um *buffer* na memória do micro-controlador.

Os códigos desenvolvidos e que estão carregados nos controladores Arduino, estão apresentados nos Apêndices A e B. O código “ControladorMaster.ino” é carregado no Arduino que tem a função de gerenciar os dados a serem enviados aos escravos. Enquanto que o código “Servocontrolador.ino” é utilizado nos outros cinco que estão na arquitetura com a função de serem os escravos e controlar os eixos do manipulador robótico.

3.1.2 Interface com a Fonte de Soldagem

Esta seção visa apresentar a proposta de controle das variáveis da fonte de soldagem, ao utilizar a interface dos dados, para monitorar e avaliar a geração dos sinais pulsados do processo GMAW-P, de acordo com a necessidade de variação dos parâmetros do processo de modo a alterar os aportes térmicos (entrada) e obter características pré-definidas das geometrias das camadas depositadas (saída) e o arquétipo do controle está apresentado na Figura 3.4.

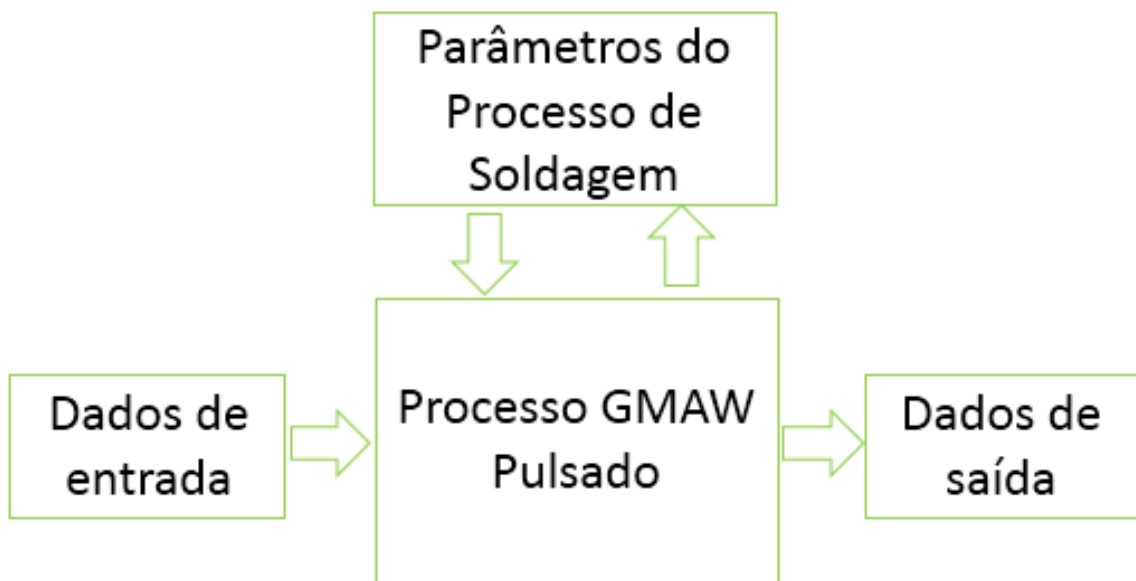


Figura 3.4: Modelo proposto para o controle do processo.
Fonte: o autor, 2020.

A fonte de soldagem utilizada é a Inversal 300 do fabricante IMC. O nome designa a função “inversora” e universal, por ser multiprocesso, enquanto que o 300 relaciona-se com o valor da corrente máxima que pode operar (Dutra, 1996).

A interface com a máquina é por uma porta de comunicação e é realizada com um computador, um sistema de aquisição de dados. A conexão entre os equipamentos permite iniciar e finalizar o processo, leitura e escrita dos parâmetros, o que garante um controle durante a deposição das camadas depositadas.

Uma técnica de controle dos sinais da máquina foi desenvolvida seguindo a estratégia para comandar o processo do tipo pulsado, de acordo com as informações representadas na Figura 3.5, são necessários 5 sinais analógicos, corrente de pico, corrente de base, tempo de pico, tempo de base e velocidade de arame, para inferir no processo.



Figura 3.5: Diagrama dos sinais elétricos da fonte de soldagem.
Fonte: (IMC-Soldagem, 2019).

A Figura 3.5 apresenta a interface com a máquina do processo de deposição a arco, onde é possível verificar que a entrada analógica referente a corrente tem seus pinos curto-circuitados devido ao controle seguidor de sinais, que é alimentado a forma de onda e a mesma é espelhada

para todos os canais, ou seja, envia o mesmo sinal do D/A à todas entradas das correntes quando se quer produzir a forma de onda ou fechar uma malha de controle.

Os sinais analógicos são de valores instantâneos, por isso no esquema é apresentado um filtro de ruído. Os sinais digitais podem ser usados para acionar o Gás (gás), avançar o arame (ar) e ligar a potência (ap) são usados quando se necessita um controle mais apurado de todo o processo. Porém, ao se utilizar a função de disparo da tocha (PCC), não é necessário usar os comandos anteriores.

A porta de comunicação da fonte é com um conector DB-25, porém a transmissão dos dados não ocorre de forma serial, mas sim com o padrão TTL, *Transistor-Transistor-Logic*, em que suas principais vantagens são baixo custo, se comparado ao serial, possui capacidade de operar à altas velocidades (tipicamente 20MHz), além de moderada imunidade a ruído.

A Figura 3.6 apresenta a configuração que promove o controle dos parâmetros, em que aguarda um sinal proveniente do Motoman que indica o início do processo de deposição assim que o manipulador robótico estiver nas posições que necessite a abertura do arco elétrico. Com as leituras e escritas dos sinais elétricos o controle do processo é possível, bem como sua interação.

Para a calibração a escala de tensão, foi conectada uma fonte DC em paralelo com os bornes da fonte e um resistor de 470 Ohms (para limitar a corrente). Ao aplicar 20 V, surge no *display* 4 V referente ao valor analógico eficaz da tensão V_{ae} , o que permitiu gerar uma tabela função de aferição dos valores. Para checar a escala de corrente, a saída da fonte ficou em curto com porta eletrodo e cabo obra, na opção eletrodo revestido e ao ajustar o valor de $I_3=I_4=150$ A, ao acionar a potência o visualizador digital indica 3 V referentes ao sinal analógico eficaz da corrente I_{ae} . Por fim, o alimentador de arame foi verificado de duas formas, primeiro, com o equipamento em modo remoto, foram enviados valores analógicos e seu valor proporcional foi lido no marcador digital da máquina. A segunda forma, foi com um medidor de arame e ao ajustar a rampa de aceleração para 1, foram realizados o disparo e a medição da quantidade de consumível por tempo.

O uso de uma interrupção em 10 kHz para malha de controle, ou mesmo, gerar formas de ondas, com resolução de 0.1 ms, então para produzir o sinal com $I_p = 240$ A $t_p = 4,1$ ms, $I_b = 40$ A, $t_b = 13,8$ ms, dentro do procedimento chamado pela interrupção de 10 kHz, a DAQ envia a saída analógica o valor de 4,68 V que correspondente a 240 A, mantidos durante 40

interrupções e então envia 0,78 V que representa 40 A, por 138 int, repetindo-se esse processo. Durante a interrupção, que depende da latência do computador, é lida a corrente e tensão de saída da fonte, os quais podem ser utilizados para modificar a forma de onda e as rotinas são executadas atualizando as variáveis de controle da fonte do processo.

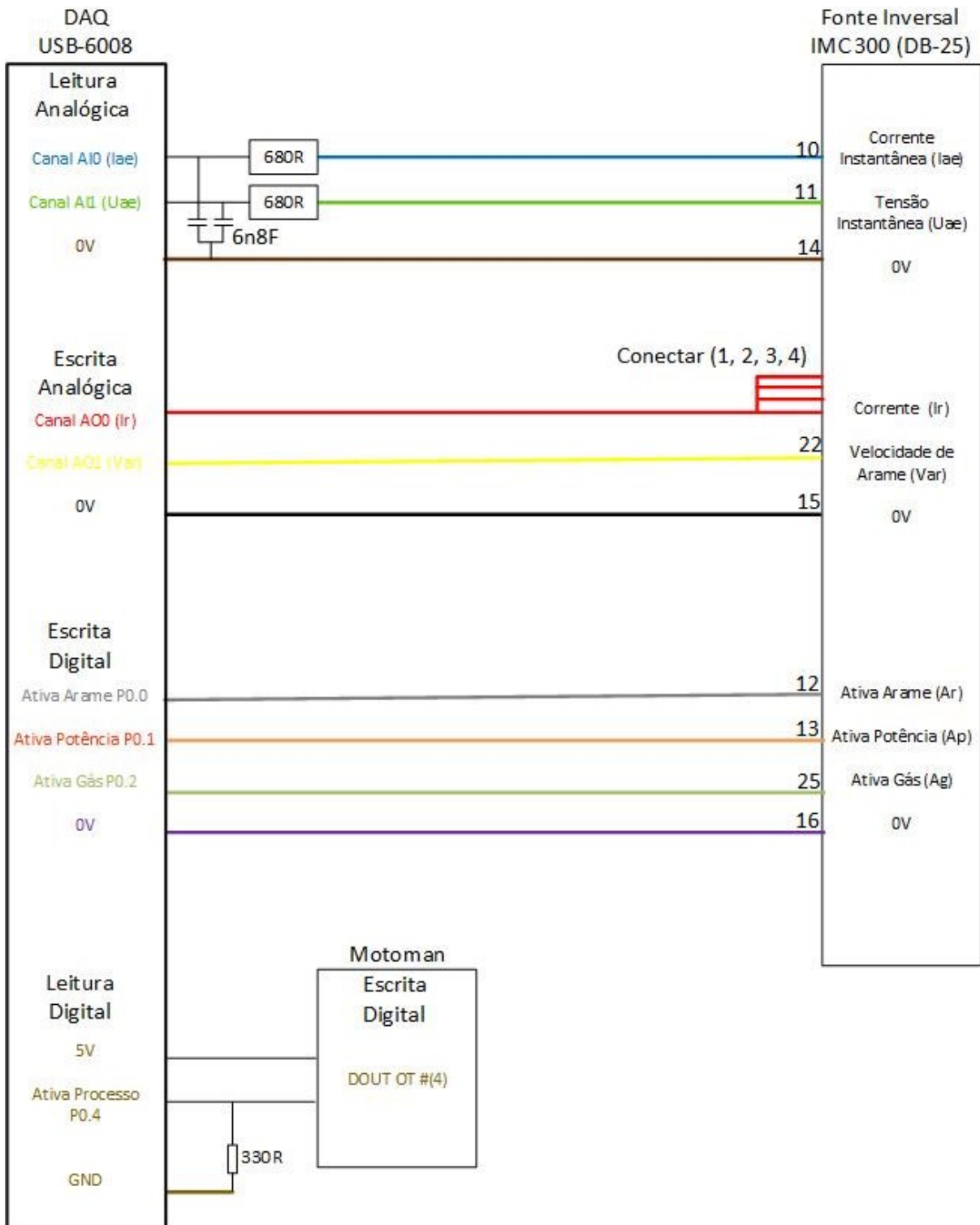


Figura 3.6: Interface com a Inversal 300.
Fonte: o autor, 2020.

3.1.3 Sistema de visão

O de uma câmera de alta velocidade foi adotada com o objetivo de avaliar e validar a transferência metálica, bem como o comportamento dinâmico da poça de fusão. Quanto ao arco elétrico, torna-se possível realizar o registro visual de sua geometria de acordo com a evolução da parede proporcionada pelas deposições sucessivas de camadas.

A câmera utilizada nesta configuração, é a Miro Lab-110 da *Vision Research*[®], com tecnologia CMOS, monocromática com 256 níveis de cinza, o que reduz o volume de dados a serem processados, pois necessita apenas de um componente para definir a cor do *pixel*. Além disso, este sensor de visão apresenta propriedades de detectar áreas claras e escuras na mesma imagem. Possui resolução máxima de 1 *MegaPixel* (1280 x 800), com uma captura de até 1600 frames por segundo, o que permite fazer um estudo mais detalhado dos fenômenos que ocorrem durante o processo. A taxa de transferência com o computador é de 1,6 Gpx/s, 2 μ s captura mínima da região de interesse. O tamanho do sensor é de 25,6 mm por 16 mm e com a limitação da área de interesse a ser avaliada, se reduz a resolução garantindo um ganho na taxa de aquisição. Além disso, este equipamento possui a função EDR, que permite obter informações de pontos da cena que sejam considerados como saturados devido a iluminação, sendo que tradicionalmente, os usuários tinham que escolher entre expor para as áreas claras e sub-expor o resto da cena, ou vice-versa. Com esta tecnologia, é possível obter uma boa exposição para ambas as situações simultaneamente dentro do quadro analisado.

A teleobjetiva utilizada com a câmera, é a de modelo KC da *Infinity*[®] (Infinity, 2019), conforme a Figura 3.7, montada em um tubo extensor possui como característica obter imagens de objetos e regiões que estejam a distâncias focais entre 50 e 200 mm, o que permite que a câmera seja montada a uma distância de segurança em relação ao alvo a ser observado, o que garante sua integridade quanto aos possíveis respingos provenientes do processo. Enquanto que as lentes macro necessitam estar bem próximas do alvo. Esta objetiva apresenta as características denominadas aqui como “macro-microscópica”, ou seja, permite obter imagens macro (captura mínimos detalhes da cena com nitidez) sem ter que se aproximar muito do objeto, com pequena abertura do ângulo de visão, o que reduz o cenário a ser observado, com menor profundidade de campo e com maior foco do objeto principal, sendo portando ideal para o processo a arco elétrico. A lente IF-1 garante valores máximos de profundidade de campo de 4,8 mm, magnificação de 0,3 e a distância de trabalho de 820 mm, adequados para o processo.



Figura 3.7: Câmera utilizada e o detalhe da lente *Infinity*.
Fonte: o autor, 2019.

3.2 Confeção das Peças

As etapas para fabricar peças utilizando a metodologia proposta, é semelhante a outros processos de manufatura aditiva, ou seja, os passos incluem o planejamento da trajetória e a deposição do material. Para levantamento dos dados e auxílio na parametrização das variáveis, inicialmente foram depositadas várias camadas, para ajustes na configuração da resolução da câmera, de modo a não exceder seu campo de visão e permitir visualizar a poça de fusão. A corrente, tempo de base e tensão de referência foram alterados, mantendo constante as demais variáveis, conforme a Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Variáveis dos processos de deposição das camadas.

Parâmetro	Valor ou descrição
Polaridade	Corrente contínua com polaridade reversa
Velocidade de soldagem	18 cm/min
Distância Bico de Contato Peça (DBCP)	16 mm
Orientação da tocha	90°
Posição da solda	Plana
Diâmetro do arame de adição	0,9 mm
Gás de proteção	90% Ar; 8% CO ₂ e 2% O ₂ com vazão de 16 L/min

Fonte: o autor, 2019.

O arame utilizado é o AWS A5.18 ER70S-6 com diâmetro de 0,8 mm baseado na espessura do metal de base, na posição de soldagem e nas limitações de aporte térmico e do tamanho da poça de fusão a ser capturada pela câmera, além de obter geometrias mais finas. O gás de proteção com a mistura ternária permite operar em regime de transferência metálica goticular, foi possível operar com uma faixa maior de tensão e avaliar as interferências deste na corrente pulsada. A distância entre o bico de contato e a peça foi de 16 mm, enquanto que a tocha foi mantida perpendicular em relação ao substrato de aço carbono ABNT 1020 com dimensões de 100 x 200 x 6,35 mm.

O planejamento experimental foi adotado para auxiliar nos testes, a partir de dois objetivos: obter o controle sobre as variáveis de respostas e determinar as condições ideais para a sua aplicação. Após definidos os fatores, seus níveis foram fixados e se encontram na Tabela 3.2, que apresentaram condições favoráveis para o processo. O tempo e a corrente de pico foram mantidos constantes em 4 ms e 240 A, respectivamente enquanto que o tempo de base oscilou entre valores de acordo com o *Duty Cycle* utilizado, para garantir o modo de transferência pulsada.

Tabela 3.2: Níveis inferiores e superiores dos fatores.

Fator	Unidade	Nível Inferior	Nível Superior
Corrente de base, I_b	(A)	55	89
Tempo de base, T_b	(ms)	10,0	39,8
Tensão de Referência, U_{ref}	(V)	20,5	26

Fonte: o autor, 2019.

Para definir os valores utilizados no experimento, o valor da tensão foi alterado progressivamente até atingir o modo de transferência metálica pulsada. A partir daí foi utilizada a câmera de alta velocidade em conjunto com o oscilograma para garantir tal condição. Os ajustes do valor da tensão remetem no aumento do comprimento do arco elétrico e uma vez que ocorre a manutenção deste valor, a velocidade do arame também é alterada, o que acarreta elevação da taxa de fusão do arame. Com um comprimento de arco grande, promove uma tensão média elevada, o que necessita de maior volume depositado por comprimento para que a camada permaneça homogênea.

O resultado do planejamento estabeleceu os parâmetros a serem utilizados, com base em camadas contínuas e homogêneas ao longo de suas extensões e estes estão apresentados na Tabela 3.3, o valor de tensão como referência ao comprimento do arco, uma vez que o equipamento possui característica dinâmica de ser uma fonte de tensão constante, utiliza a tensão de referência “ U_{ref} ” que tende controlar automaticamente a velocidade de alimentação do arame por meio de um circuito controlador de arame, de acordo com o desenvolvimento do processo, sendo que se o arco diminuir, ocorre uma redução na tensão do mesmo e com base na diferença entre as tensões, do arco e de referência “ U_{ref} ”, ocorre um aumento na frequência de pulsos e, conseqüentemente, o consumo da extensão livre do arame-eletrodo. Estas variações apontam para as características dinâmicas da máquina e sua capacidade em promover alterações em intervalos de tempo muito curtos, na ordem de 10^{-3} s. Com este procedimento, foram obtidas

as velocidades de alimentação do arame, que estão apresentadas na mesma tabela e que foram utilizadas para parametrizar a macro desenvolvida no Excel® e que será apresentada posteriormente.

Na segunda fase, paredes foram construídas sob as mesmas condições da primeira etapa, porém, agora com o objetivo de avaliar a geometria das paredes quando ocorre deposições sucessivas sobre superfície não plana, para isso foi adotado um acréscimo da altura da tocha de 2 mm após a deposição de cada camada, garantido pelo deslocamento do Motoman, o valor foi considerado devido a deposição interrompida, ou seja, aguardando o resfriamento após o término de cada camada. Devido ao comportamento transiente do processo e para garantir que o início e o fim da cada camada ocorram da mesma forma, o deslocamento da tocha aguarda a abertura do arco e o fechamento ocorre com 2 segundos da chegada na posição final.

Tabela 3.3: Parâmetros utilizados nos procedimentos experimentais.

Amostra	Ib (A)	Tb (ms)	Uref (V)	Im (A)	Va (m/min) Média
1	89,0	11,0	26,0	130,0	5,2
2	85,0	10,0	26,0	130,1	5,2
3	85,3	11,9	25,0	124,9	5,0
4	84,0	11,5	25,0	125,0	5,0
5	80,0	12,3	25,0	120,0	4,8
6	81,0	12,6	25,0	120,0	4,8
7	77,0	13,4	24,5	115,2	4,6
8	76,0	13,1	24,5	115,1	4,6
9	75,0	15,2	24,0	110,1	4,4
10	71,0	13,6	24,0	110,1	4,4
11	73,0	17,3	23,5	105,0	4,2
12	67,0	14,6	23,5	104,9	4,2
13	70,0	19,1	23,0	100,0	4,0
14	63,0	15,3	23,0	100,4	4,0
15	68,0	22,0	22,5	95,0	3,8
16	59,0	16,5	22,5	95,0	3,8
17	67,0	26,7	22,0	90,0	3,6
18	55,0	17,6	22,2	90,0	3,6
19	58,0	39,8	20,5	75,0	3,0
20	61,0	34,5	21,0	80,0	3,2
21	64,0	30,2	21,5	85,0	3,4

Fonte: o autor, 2019.

A implementação da geração dos movimentos planejados no espaço da tarefa facilita a trajetória pois são baseados em pulsos para comando de juntas do Rob1 (ASEA) proveniente do *MATLAB*[®], que após a conversão do modelo 3D gera as coordenadas que serão utilizadas na trajetória linear a ser realizada pelo manipulador remanufaturado. A Figura 3.8 apresenta imagem da deposição com a técnica proposta e o *link* direciona para o vídeo que apresenta a geometria inclinada sendo realizada.

Como o trajeto especificado deve ser seguido corretamente para garantir a qualidade da parede a ser fabricada, sendo nestes casos, melhor planejar toda a trajetória no espaço da tarefa do que aproximar o trajeto por interpolações entre os pontos no espaço das articulações e estes movimentos é necessário manter o elemento terminal com uma orientação constante. Assim, os pontos definidos no espaço da tarefa são convertidos em pontos correspondentes no espaço das coordenadas articulares utilizando o modelo cinemático inverso.

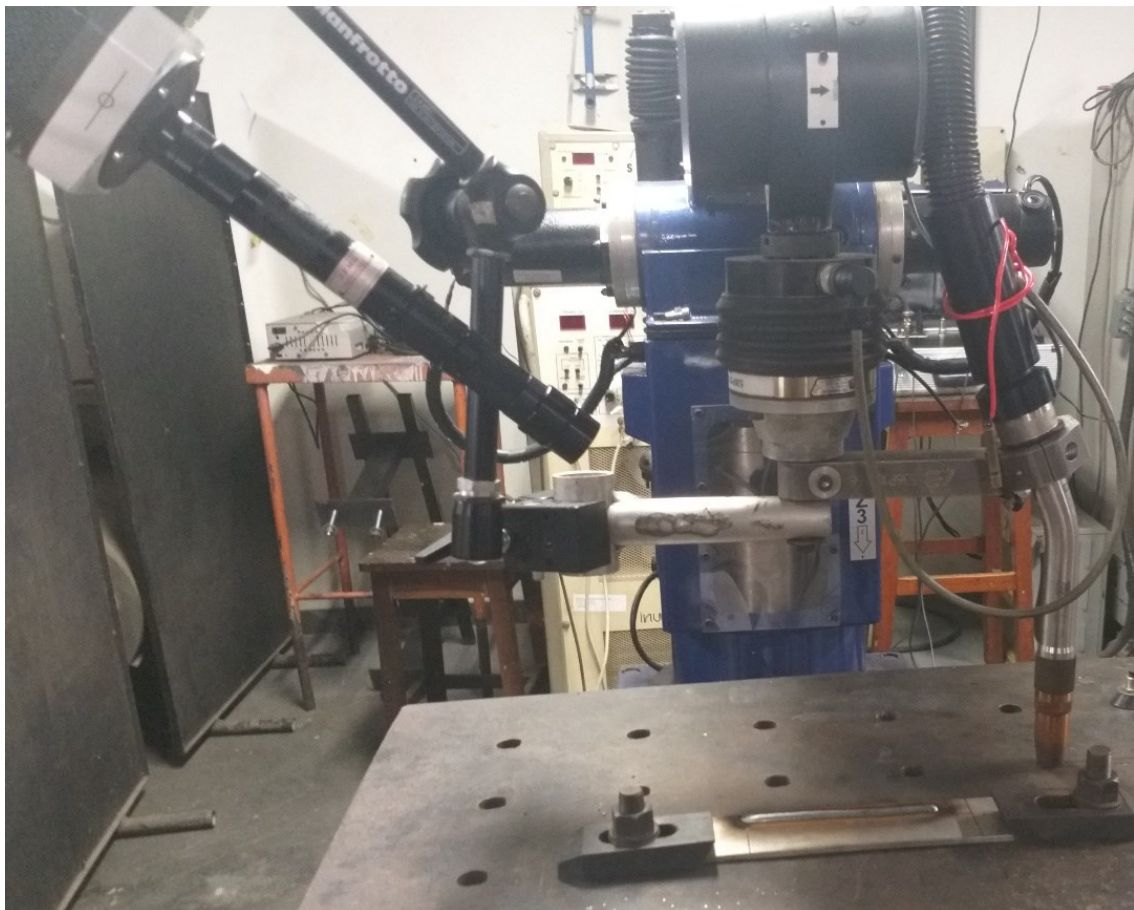
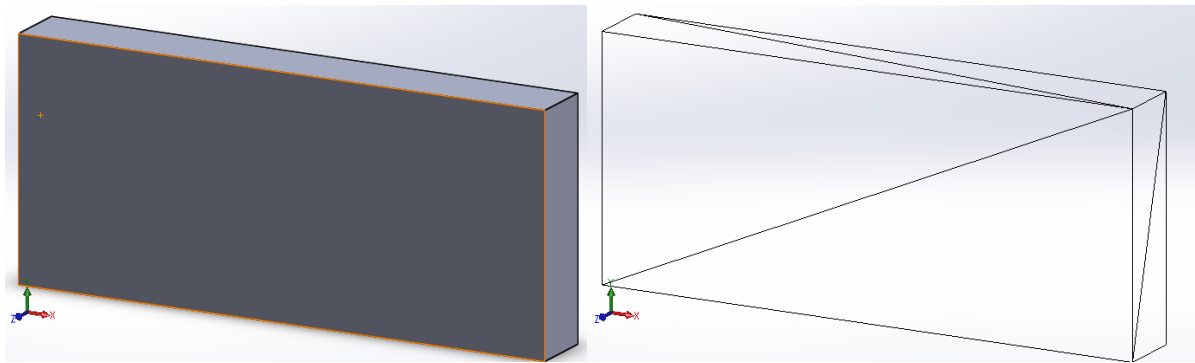


Figura 3.8: Parede sendo confeccionada com o ASEA.

<https://youtu.be/qi5POWHXeL0>

Fonte: o autor, 2019.

Para que a geração da trajetória da deposição das sucessivas camadas seja possível, um modelo simples 3D foi elaborado com uso de um *software* CAD, de modo a utilizar o manipulador robótico ASEA, uma vez que todo o controle cinemático e programação é realizada por meio de linguagem não proprietária desenvolvida em *MATLAB*[®] o que permite uma integração com outros programas. O *software* CAD cria e exporta o arquivo STL (*Standard Triangle Language*), formato este que se tornou o padrão de transmissão de dados do setor de prototipagem rápida, tem como característica aproximar as superfícies de um modelo sólido com triângulos. Para um modelo simples baseado em multicamadas de passe único, conforme apresentado na Figura 3.9(a) suas superfícies podem ser aproximadas com doze triângulos, como na Figura 3.9(b). Porém, quanto mais complexa for a superfície, mais triângulos são produzidos.



a) Modelo simples. b) Malha do modelo.

Figura 3.9: Conversão do CAD para STL.

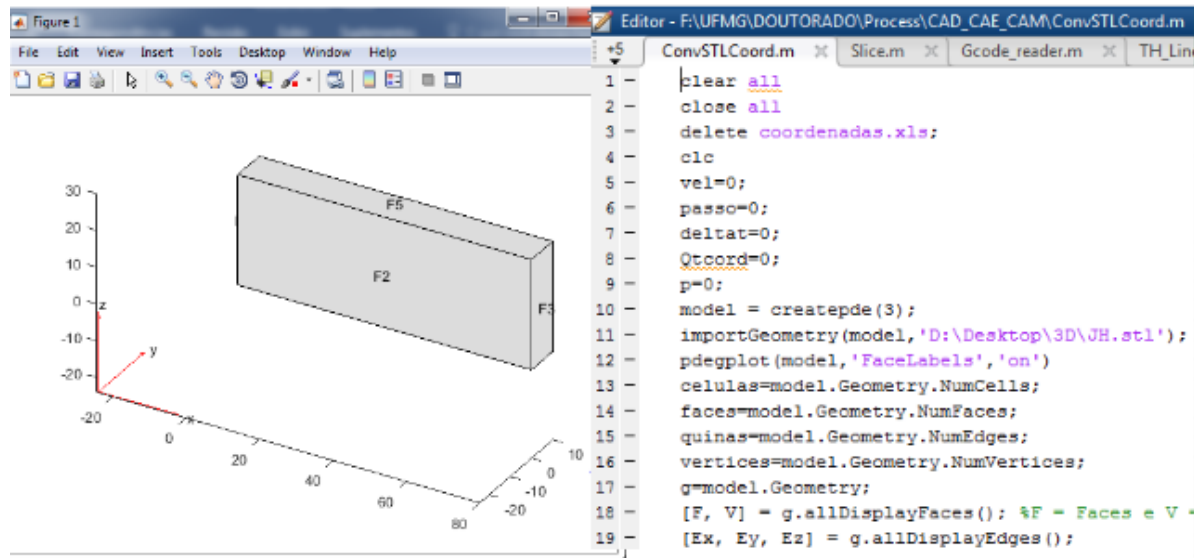
Fonte: O autor, 2019.

As trajetórias do manipulador robótico ocorrem por meio das informações provenientes de sistemas de coordenadas cartesianas extraídas de um modelo CAD-3D desenvolvido, o qual é convertido e interpretado pelo *MATLAB*[®], *software* de computação numérica desenvolvido pela *MathWorks*[®].

Todos os *softwares* de modelagem CAD atuais são capazes de produzir um arquivo STL, para isso, basta exportar como um arquivo binário, o que reduz o esforço computacional. A Figura 3.10 apresenta a imagem do modelo 3D interpretado pelo *MATLAB*[®].

O modo de fatiamento na confecção de peças por Manufatura Aditiva produz um conjunto de camadas para posteriormente determinar a trajetória da ferramenta, porém, para o algoritmo aqui desenvolvido, o objetivo não foi utilizar esta solução, apesar de estudos estarem sendo realizados para implementação, mas sim obter as coordenadas dimensionais da peça e importar

estes valores para uma planilha, onde estes dados são organizados e discretizados e indica a quantidade de camadas a serem depositadas para obter a altura da peça desenvolvida, uma vez que, a quantidade de material depositado varia do centro da camada para as bordas, mediante os parâmetros utilizados.



a) Modelo CAD no *MATLAB*®. b) Dados geométricos.

Figura 3.10: Interpretação modelo CAD no *MATLAB*®.

Fonte: o autor, 2019.

Por fim, na última fase, foram confeccionadas paredes com a variação dos parâmetros durante todo o processo, promovendo uma investigação com uso de um sensor de visão ao longo das camadas depositadas. Com o objetivo de proporcionar maior liberdade de movimentação e maior flexibilidade na confecção das peças, a arquitetura apresentada na Figura 3.11, apresenta adoção de dois manipuladores robóticos: um com seis e outro com cinco graus de liberdade, que faz a manipulação da tocha em trajetórias pré-definidas, além das correções necessárias e também os acréscimos nas alturas das camadas sucessivas. A interação entre os CAD/CAM garante a criação do modelo e a geração da trajetória a ser realizada para produção da peça. A parametrização do processo GMAW-P para a deposição das camadas possui controle das variáveis (correntes e tempos de pico e base e, tensão de referência), permite alterar a energia imposta durante a fabricação, uma vez que no processo de Manufatura Aditiva, há uma quantidade significativa de calor armazenado na peça. Por fim, a aquisição de imagens da poça de fusão com o uso de uma câmera para monitorar o comportamento do metal líquido durante a confecção da peça.

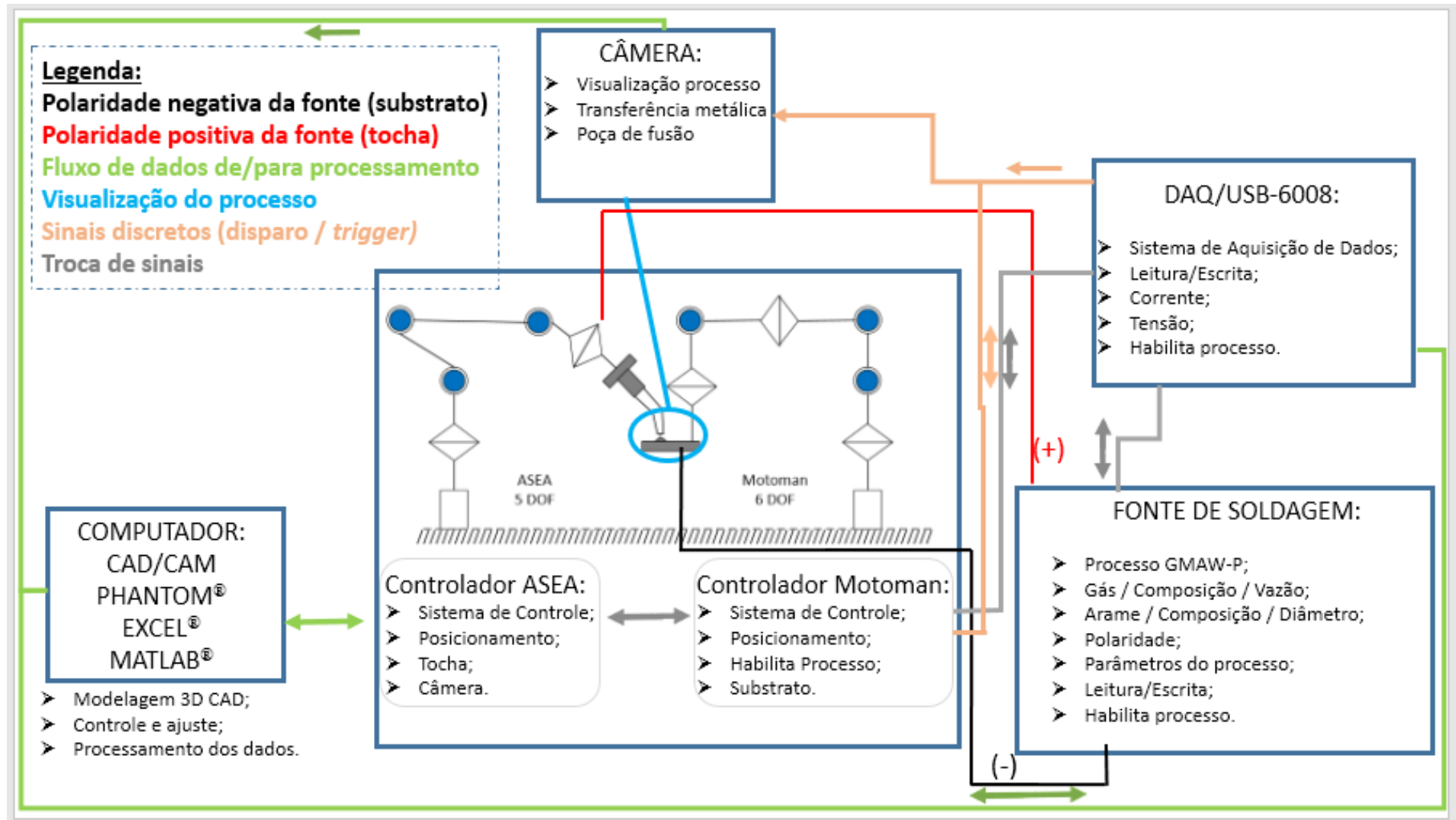


Figura 3.11: Representação esquemática do sistema.
 Fonte: o autor, 2020.

Para a construção da parede utilizando a arquitetura proposta, utiliza-se a sequência apresentada no fluxograma da Figura 3.12, em que um modelo 3D é convertido em 2D e por discretização define-se o número de camadas. Para as geometrias criadas, foi considerado para este trabalho a largura do modelo de acordo com a geometria da camada, baseado em testes prévios.

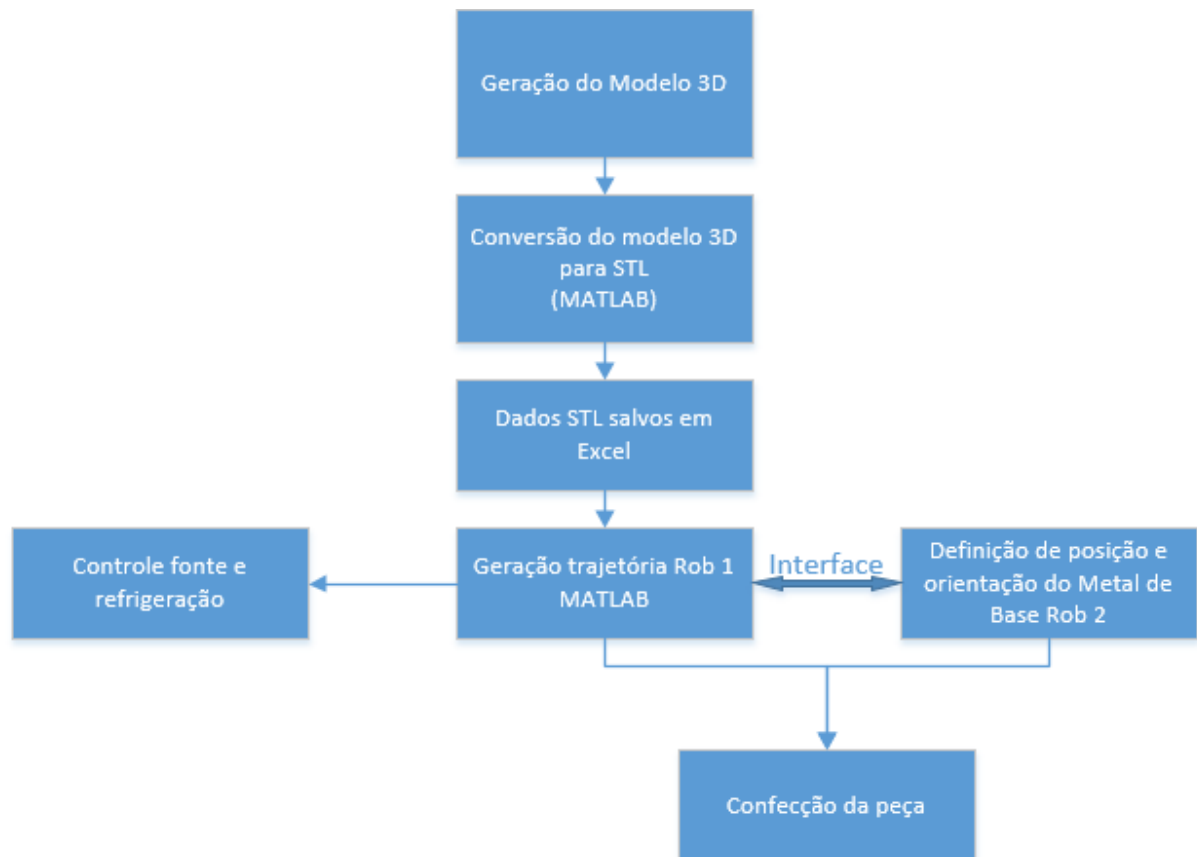


Figura 3.12: Fluxograma para confecção da peça.
Fonte: o autor, 2020.

A proposta da arquitetura para o manipulador ASEA tem como base o uso de comando discreto dos movimentos e após definir a trajetória, as informações são enviadas para um interpretador de comandos para geração de pulsos que serão controlados pelos *drivers*. Como vantagem, apesar de utilizar um sistema operacional menos estável e que não trabalha bem com aplicativos em tempo real, ou seja, o tempo do processo, o comando do robô conta com um *buffer* que armazena os dados de entrada de comando que variam dentro de um determinado limite e estes estão isolados dos *drivers*.

Para se obter uma superfície mais uniforme em geometrias mais complexas o uso de múltiplos passes é necessário, sendo que nestes casos estes podem ser depositados de modo que a falta de material seja compensada pela sobreposição das camadas. O modo utilizado para a

deposição do material foi o *raster*, ou seja, inicia a abertura do arco sempre no mesmo ponto e direciona ao final da geometria. Porém a difusão de calor da poça fundida piora à medida que a altura de depósito aumenta, sendo importante então alterar os parâmetros, de modo que, a condição térmica possa ser significativamente melhorada.

Uma unidade de refrigeração é aplicada para auxiliar na troca térmica da peça e garantir repetibilidade do processo, de modo que a transferência de calor não fica a cargo apenas da convecção natural. A deposição sucessiva de camadas promove ciclos térmicos que devem ser minimizados para que se obtenha a geometria desejada. Sendo este mesmo sistema aplicado à tocha devido ao fator de trabalho do processo, o circuito de acionamento é representado na Figura 3.13 e este se mantém habilitado durante a deposição e após 60 segundos do término.

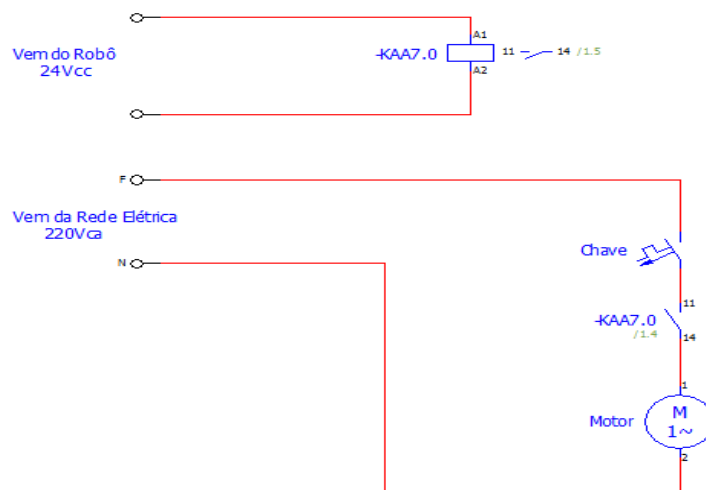


Figura 3.13: Interligação da unidade de refrigeração.
Fonte: o autor, 2020.

Inicialmente a chapa se encontra a temperatura ambiente, o que indica um resfriamento mais rápido do metal fundido, com o aquecimento proveniente com o acréscimo das camadas, o resfriamento do metal fundido torna-se mais lento. Um tempo de interpasso de 180 segundos foi adotado de modo a permitir um resfriamento parcial do material depositado, até uma temperatura média de 120 °C, determinado no ponto médio da camada superior, com uso de termopares, além de garantir a refrigeração da tocha, que pode atuar na qualidade da camada devido a evolução de calor do bico de contato. A Figura 3.14 apresenta um detalhe da forma de montagem da chapa de cobre refrigerada no Rob2, que tem o objetivo de trocar calor com o substrato e o posicionamento da tocha no Rob1, sempre perpendicular em relação ao metal de base, para realização do processo.

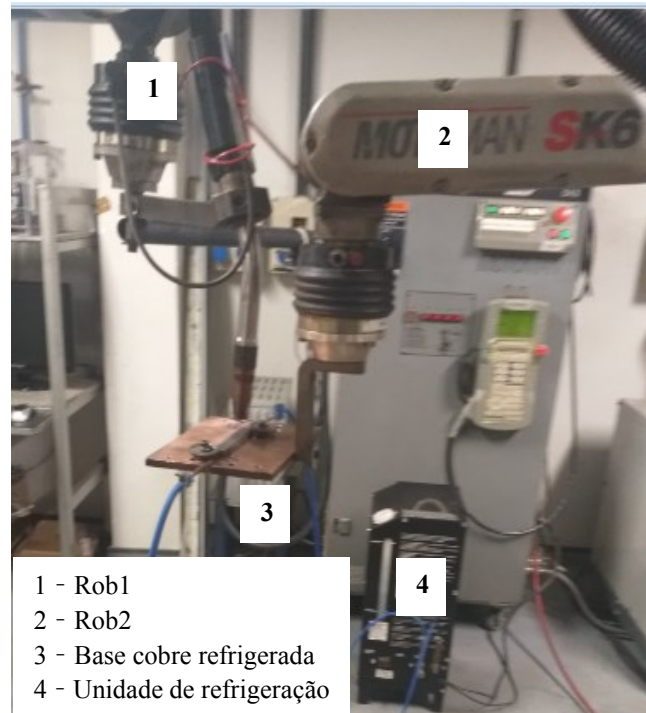


Figura 3.14: Detalhe da base de cobre refrigerada.
Fonte: o autor, 2020.

O desenvolvimento dos testes foi em uma posição plana entre a camada depositada e a tocha, além de coordenar os movimentos entre o robô que manipula a tocha e o que direciona a peça. Para isso é necessário garantir que a movimentação e ações durante o processo ocorram de maneira sincronizada e eficiente e os manipuladores devem trocar informações constantemente. O uso de manipuladores robóticos na configuração para operarem de forma cooperativa, aplicados na Manufatura Aditiva de peças metálicas se mostrou favorável frente ao desafio. A integração destes manipuladores com os equipamentos de soldagem possibilita a fabricação baseada na Manufatura Aditiva por Deposição a Arco e possibilita produzir, não só geometrias, mas também trajetórias diversas, conforme apresentado na Figura 3.15 e o *link* direciona para o vídeo que permite a visualizar os movimentos dos manipuladores.

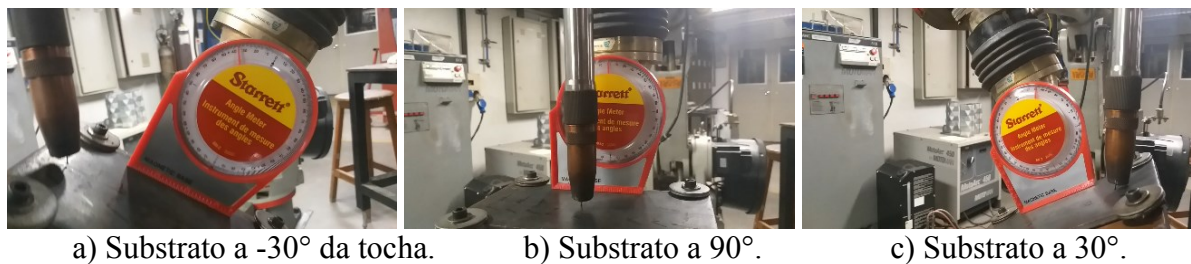


Figura 3.15: Realizando a trajetória.

<https://youtu.be/Tlw7uIW9ji0>

Fonte: o autor, 2020.

Além de controlar o posicionamento da peça em relação à tocha, também é necessário controlar a correção desse posicionamento e parâmetros de soldagem ao longo do processo de deposição. A Figura 3.16 apresenta a visão geral do sistema em sua versão final.

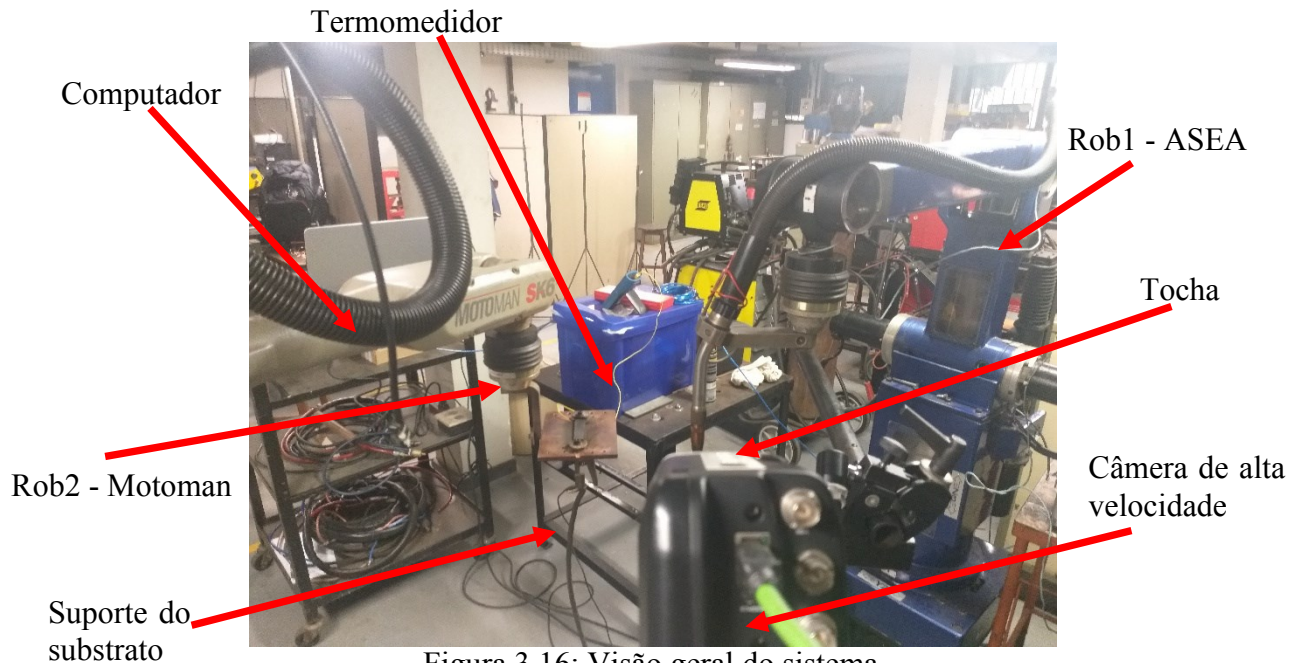


Figura 3.16: Visão geral do sistema.

Fonte: o autor, 2020.

O ambiente de integração entre os robôs deve estar completamente parametrizado, sendo que o esquema de controle é descentralizado, cada robô é controlado separadamente e a troca de informações entre os manipuladores ocorre através de sinais digitais de entrada e saída, tanto do ASEA que tem seu sistema de controle baseado em Arduino[®] quanto do controlador do Motoman, para indicar uma mudança de posicionamento previamente definido, bem como o início e término do processo. O controle da trajetória ocorre do início ao fim, tem o objetivo de garantir a espessura e largura constantes ao longo da camada depositada.

A configuração dos robôs cooperativos, torna possível manipular a posição e orientação tanto da peça quanto da tocha. A força do arco na direção X tende a manter o posicionamento da poça de fusão e evita que ela escorra devido à inclinação do substrato e permitindo que a tocha se mantenha perpendicular a peça. Como prova de conceito, a tocha foi mantida em um ângulo α maior que o do substrato, ambos em relação à vertical, para neutralizar os efeitos gravitacionais e facilitar a programação da trajetória, conforme mostra a Figura 3.17.

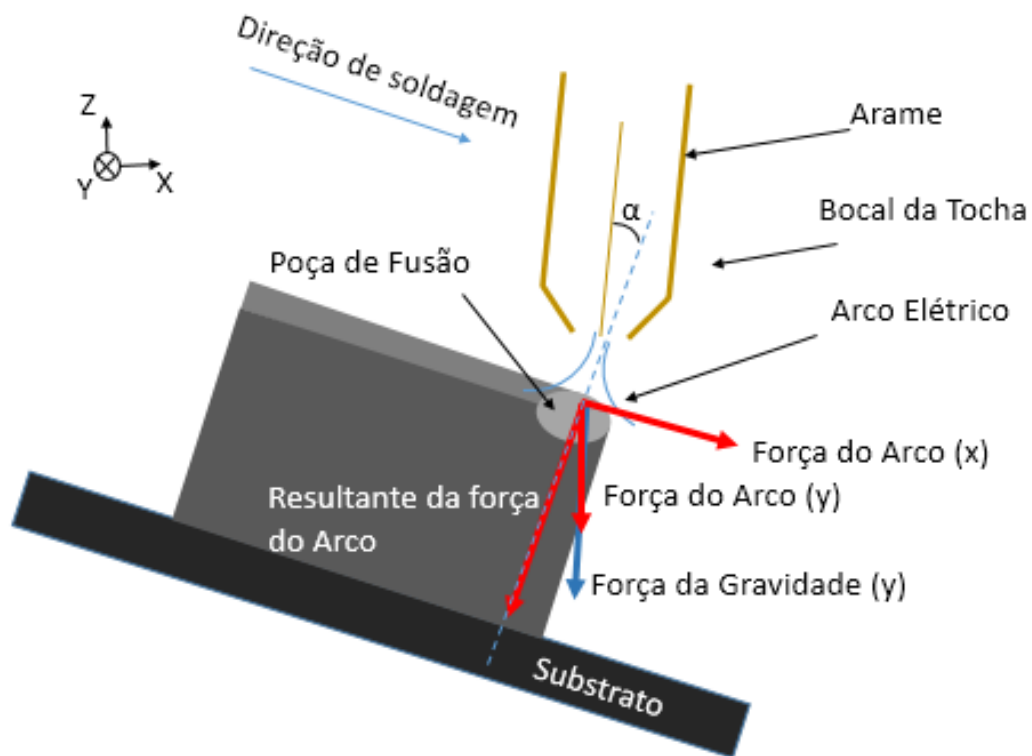


Figura 3.17: Alterando a orientação para a deposição das camadas.
Fonte: o autor, 2020.

Alterando a posição/orientação com o uso dos efetuadores para garantir a qualidade da peça a ser produzida, permite obter o balanço do material de adição. Para isso, os tempos para a mudança de posição foram monitoradas e ajustadas em ambos os manipuladores. Pesquisas futuras terão foco em avaliar o efeito das posições quanto a ação da gravidade na estrutura final de peças com geometrias inclinadas, no entanto, a princípio foi possível identificar uma melhora na estabilidade da poça adquirida com base na inclinação da tocha em relação a posição vertical, isso devido ao fato pela decomposição da força do arco elétrico.

Para a análise neste trabalho a razão entre as velocidades de alimentação e de deslocamento da tocha foi considerada constante, de modo a manter estável o equilíbrio dinâmico, o que evita malformação das camadas. O sucesso no uso da Manufatura Aditiva por Deposição a Arco, proposto para esta pesquisa necessita trabalhar com uma ampla faixa de valores dos parâmetros de modo que permita o controle da taxa de deposição de material e garanta a geometria desejada, a partir do tamanho e a forma da poça de fusão que são características essenciais para controle do processo.

3.3 Avaliação das Peças Produzidas

Para a medição das características geométricas, como largura e altura das camadas obtidas conforme a Figura 3.18, as mesmas foram retiradas amostras no sentido transversal na metade do comprimento de cada uma das peças, o que remete a um momento em que o processo se apresenta mais estável. Posteriormente foram embutidas, lixadas (até a lixa de 600 *mesh*), polidas e atacadas quimicamente com uma solução de Nital a 5%, para revelação dos perfis geométricos, tais como: largura, penetração e reforço. As imagens das macrografias tiveram auxílio de uma câmera Canon T3i, com lente 50 mm (f1.8), enquanto que a largura, reforço e molhabilidade foram medidas com o algoritmo para segmentação de Otsu no MATLAB®, para auxiliar na interpretação das informações.

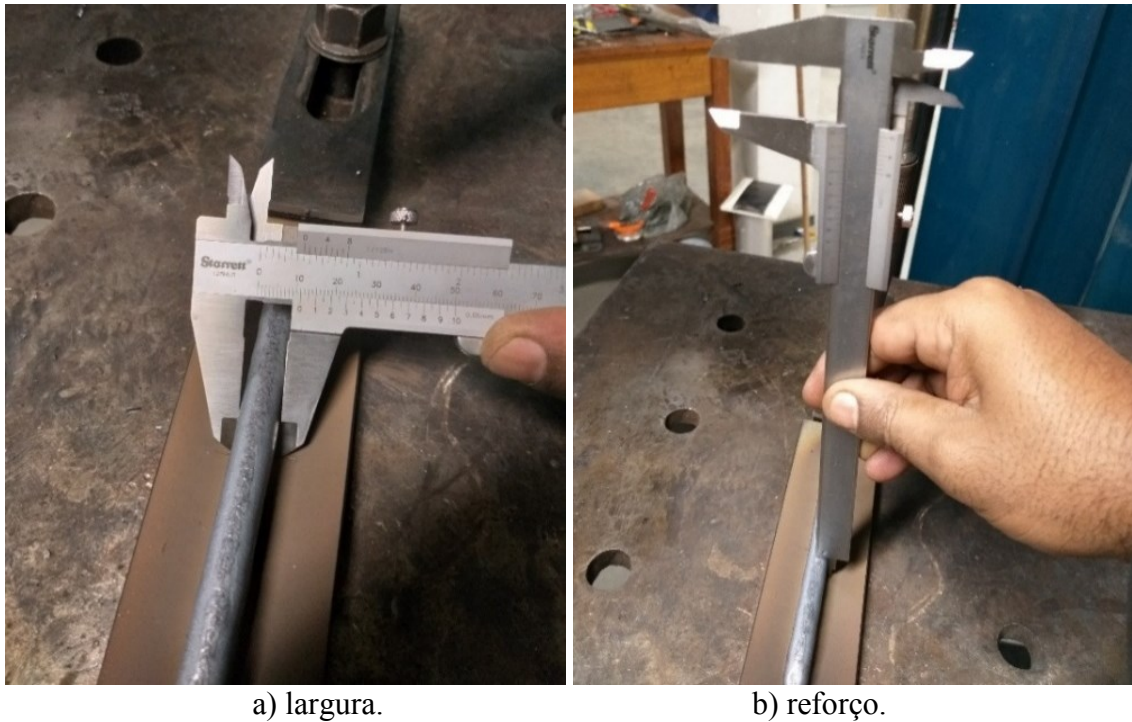


Figura 3.18: Medição da largura e altura das camadas depositadas.
Fonte: o autor, 2020.

Esta etapa visa analisar o cumprimento da tarefa, como também a robustez e a eficiência do sistema de controle desenvolvido frente as alterações dos parâmetros durante o processo. Para tanto trabalhou-se com o desenvolvimento de um sistema baseado em malha aberta para levantamento dos modelos.

3.4 Obtenção de Imagens do Processo

Os sinais coletados pelo sistema de aquisição são salvos em um banco de dados, assim como as imagens convertidas dos vídeos. As informações posteriormente podem ser acessadas e tratadas com sincronização de tempo, tanto *on-line* quanto *off-line*.

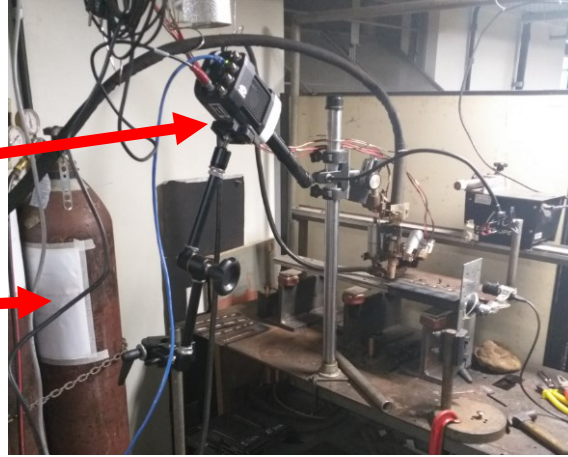
A câmera foi posicionada em diversas configurações para obter imagens frontais, traseiras, laterais e superiores da poça de fusão, além de obter informações da transferência metálica. Considerando que a câmera encontra-se imóvel, direcionada para a poça de fusão e não sofre influência do deslocamento da tocha, a Figura 3.19 apresenta as posições que foram avaliadas para obter as imagens durante a deposição.

O uso de uma única câmera, montada na frente da poça de fusão de modo que pareça estar se movendo em direção ao sensor, visualiza a região de interesse e o processamento é configurado para realizar a análise das imagens e gerar as medições necessárias para estimar sua largura, com uma taxa de processamento de vários quadros por segundo. O eixo óptico da câmera é de aproximadamente 30° em relação ao substrato. A configuração utilizada foi de $704 \times 704 \text{ pixels}$ e uma taxa de transmissão menor que 1 ms, o que permite obter até 1800 fps (*frames per seconds*). O sincronismo do sistema de visão foi considerado de modo que seja gerado um sinal pela máquina a cada transição dos valores elétricos e assim um *trigger* é ativado na câmera de alta velocidade que proporciona a captura da imagem durante o processo, o que é possível por meio da função *Continuous Recording*, que permite salvar as informações logo após o término da aquisição. O tempo de duração entre as imagens consecutivas é de aproximadamente 5,6 ms, o que garante visualizar os diferentes níveis de corrente do processo de deposição.

As imagens obtidas foram realizadas com a câmera e um filtro de densidade neutra nº 10, ou também conhecido como cristal inactínico DN10 que foi adicionado à configuração, conforme destacado na Figura 3.19(b), está colocado entre o arco elétrico e a câmera, de modo que somente o feixe de *LASER* e as respectivas sombras vão aparecer na imagem, suprimindo a luz produzida pelo arco que não esteja na região do filtro, mas os testes e os ajustes no software da câmera indicaram que não há a necessidade deste elemento. Já a Figura 3.19(c), apresenta a câmera na posição longitudinal a deposição da camada, que corresponde a condição de visualizar e obter informações dimensionais a respeito da largura da poça de fusão, bem como seu comportamento dinâmico de acordo com as deposições sucessivas de camadas.

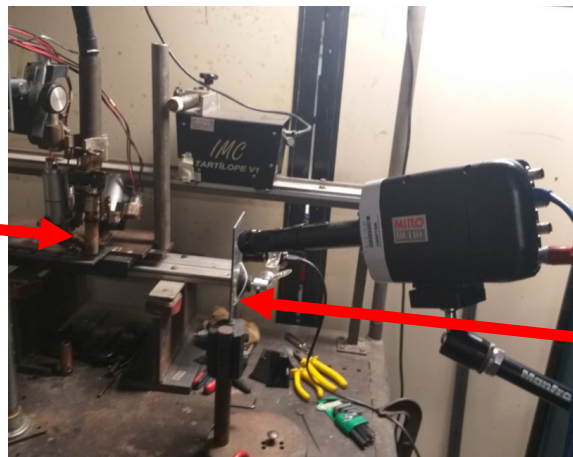
Câmera Alta Velocidade

Cilindro gás



a) Posição perpendicular ao deslocamento.

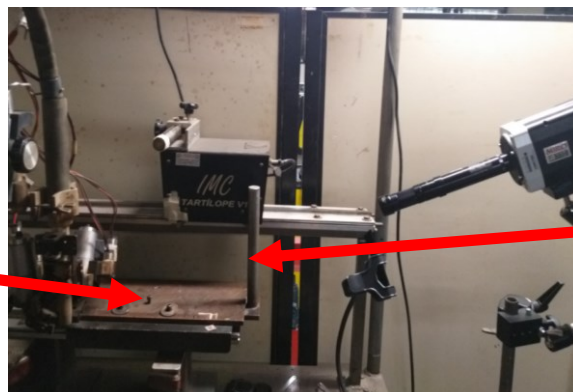
Tocha



Filtro DN 10

b) Diagonal.

Substrato



Deslocamento
do substrato

c) Longitudinal.

Figura 3.19: Posicionamentos da câmera.

Fonte: o autor, 2019.

O reconhecimento de informações estruturais da cena, como tamanho de objetos e medições, torna-se necessário obter informações quanto a distorção e os parâmetros intrínsecos da câmera para associar pontos da imagem a uma reta no espaço. A deformação existe inevitavelmente no sistema de coordenadas do plano de imagem, então a calibração é necessária antes de qualquer experimento. A calibração do sistema de visão é necessária para obtenção dos parâmetros geométricos e óticos para a construção da imagem o mais exato possível. Os parâmetros óticos da câmera podem ser divididos em intrínsecos e extrínsecos. Sendo os primeiros constituídos por: **Distorção** que modela a deformação das lentes (tangenciais e radiais) e permitem corrigir valores de coordenadas em pixel na imagem; **Comprimento focal (f)** fornece informação da relação entre milímetros e *pixels* na imagem; **Centro óptico** ponto por onde passa o eixo principal de projeção. Já os extrínsecos reportam-se à: **Orientação**: fornece a direção da câmera em relação ao objeto; **Translação**: informam a distância entre objeto e câmera.

Para os parâmetros extrínsecos, estes não se tornam necessários obter uma vez que estes dados são para situações em que utilizem mais de uma câmera, ou a aplicação desta seja expressa com um sistema de coordenadas específico e a distorção não foi considerada, uma vez que, a lente não apresenta característica de ser *fisheye* relevante, ou seja, as imagens obtidas não possuem grandes distorções e também não são esféricas, o que cria a impressão de uma elevada profundidade de campo. A Figura 3.20 apresenta o *chessboard* utilizado para obter os parâmetros intrínsecos da câmera mediante a lente utilizada. O uso do tabuleiro de xadrez, com a alteração de sua posição e orientação permite obter expressões matemáticas sobre a posição da câmera em relação ao sistema de calibração.

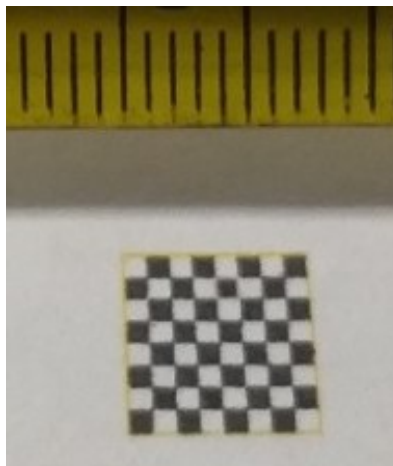


Figura 3.20: *Chessboard* para calibração da câmera.

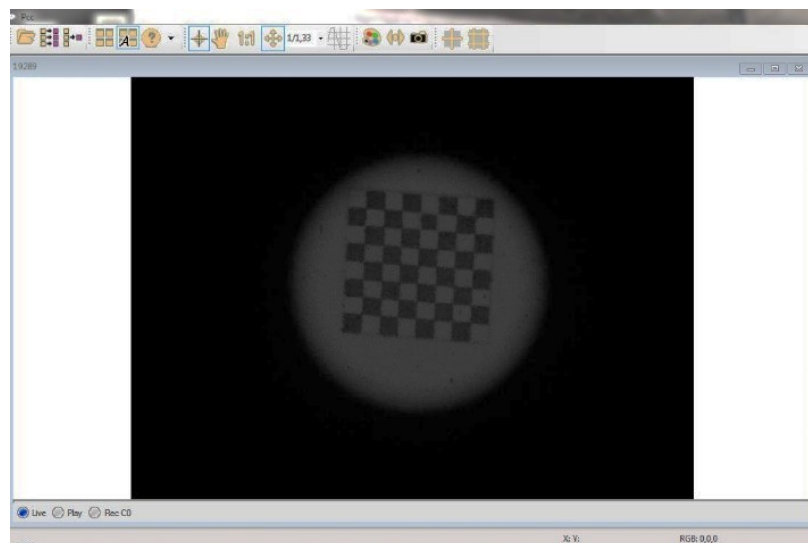
Fonte: o autor, 2019.

A Figura 3.21, mostra a etapa de calibração da câmera com uso do tabuleiro de damas para a extração dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera. A Figura 3.21(b) mostra a imagem obtida e de acordo com a montagem realizada a largura da camada fica limitado a 11 mm.

Durante as deposições, uma medição da geometria da poça de fusão permite ajustar os parâmetros do processo, de modo a obter uma regularidade na largura de cada camada. O uso do sistema de visão é baseado na proposta de aquisição de imagens e inferências dimensionais sobre as informações obtidas sobre o comportamento e a geometria da poça de fusão à medida que a borda livre aumenta devido ao acréscimo das camadas depositadas, bem como seu alinhamento em relação ao arame.



a) Calibração câmera.



b) Visualização do alvo.

Figura 3.21: Calibração câmera-cena.

Fonte: o autor, 2019.

Com o ajuste correto dos parâmetros da câmera, como tempo de exposição, velocidade do obturador, distância focal e o EDR, foram cuidadosamente testados para reduzir os reflexos do arco e dessa forma foi possível minimizar a excessiva luminosidade do arco elétrico e propor uma nova maneira de suprimir com o uso de filtro óptico passa-banda de 632 nm com centro no comprimento de onda do infravermelho próximo e com faixa de bloqueio de 200 a 1200 nm, foi possível obter informações do processo.

A Figura 3.22 mostra uma imagem frontal da poça de fusão, onde podem ser visualizados seus principais componentes, que auxiliam na medição da largura da poça de fusão, perfil convexo da camada solidificada, sendo: 1 - o arco que se encontra na parte mais luminosa; 2 - o arame nitidamente escuro na parte central da imagem; 3 - gota se forma na ponta do eletrodo; 4 - transferência em voo livre em direção da poça de fusão; 5 - camada em solidificação; e 6 - a poça em tons de cinza intermediários.

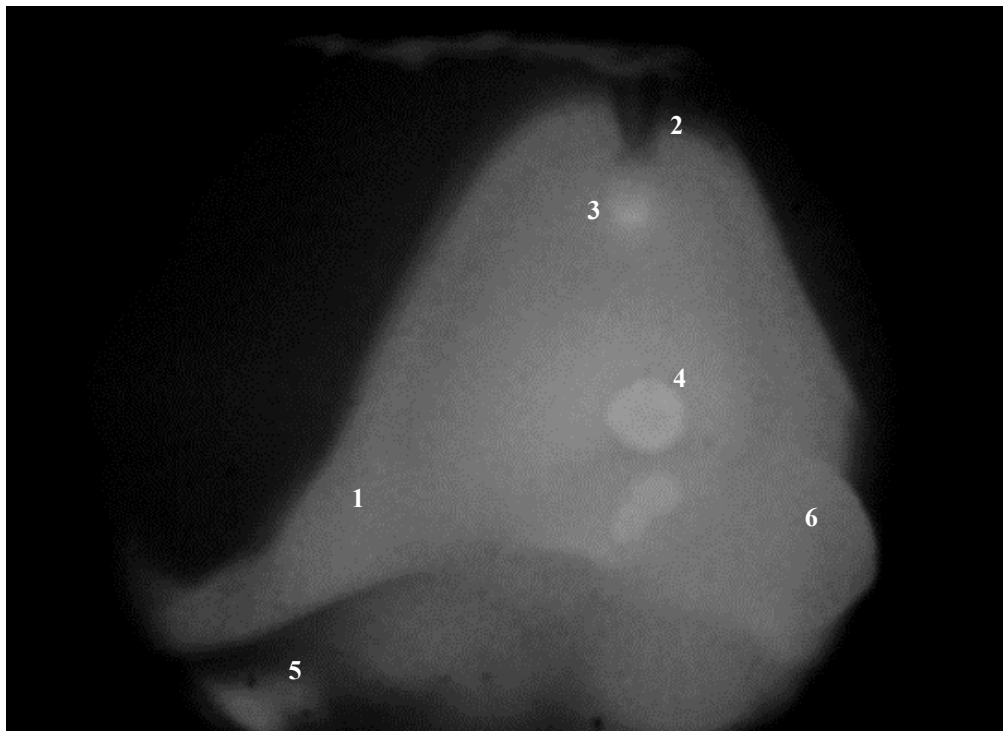


Figura 3.22: Visualização do processo.
Fonte: o autor, 2019.

A poça de fusão foi monitorada pela câmera de alta velocidade que está opticamente alinhada com o eixo da camada depositada, de modo que a imagem do metal fundido seja mantida estacionária e dentro do campo de visão da câmera.

Para obter medidas corretas da largura da poça de fusão, o tempo de exposição da câmera deve ser ajustado de modo a garantir a eficácia do algoritmo de processamento de imagens.

Para isso, testes foram realizados para definir o valor do tempo de exposição, a fim de evitar distorções devido a intensidade luminosa, camadas foram depositadas com os parâmetros desejados que produziam camadas com largura conhecida, enquanto o tempo de exposição foi ajustado até que a largura medida correta fosse obtida.

4 Resultados

4.1 Manipulador Robótico

Os sistemas mais comumente utilizados para geração de trajetória e controle de deposição do material para uso na Manufatura Aditiva é através de CNC (*Computer Numeric Control*), uma vez que os códigos quando são gerados na etapa CAM (*Computer Aided Manufacturing*), são baseados no *G-Code*, ou seja, linguagem de máquina ferramenta. Porém, manipuladores robóticos também vêm sendo utilizados no processo MADA, pois apresentam possibilidade de maior flexibilidade na produção de peças com as mais diversas geometrias. Este tópico trata dos manipuladores utilizados, com uma maior ênfase no Robô ASEA, o qual foi remanufaturado e seu sistema de comando foi atualizado para uso nesta pesquisa. O intuito de utilizar robôs em substituição a uma mesa cartesiana vem também da necessidade de correções de trajetórias ou posições da tocha que influencia diretamente no comportamento do processo.

Como a robotização permite um controle mais preciso do procedimento e garante sua repetibilidade e precisão dos movimentos com confiabilidade, o desenvolvimento de modelos que conseguem relacionar de forma eficaz e confiável os parâmetros e o resultado final se tornam relevantes, pois permitem que a técnica seja mais eficiente e econômica, além de previsível e controlável (Carvalho, 1997).

Com isso, propôs-se a adequação de um robô antropomórfico modelo IRB6 da marca ASEA – atual ABB (ASEA, 1984), conforme representado na Figura 4.1, que se encontra em perfeito estado mecânico. O sistema de controle vem sendo desenvolvido conforme Bomfim (2013), (Pinho, 2013), (Lopes, 2015), Coelho (2016) e atualizado atualmente com a parceria de Zinato (2019) por meio de uma arquitetura baseada em micro-controladores *open-source* Atmel®, na plataforma de desenvolvimento do Arduino®, em substituição à linguagem de máquina ferramenta, código G (*G-Code*), conforme o Anexo A, a qual dependia de um programa específico para interpretar estas informações e transformar em trajetória, o que consumia tempo e não era um sistema unificado. Porém para validar esta arquitetura torna-se necessário realizar a sintonia dos controladores.

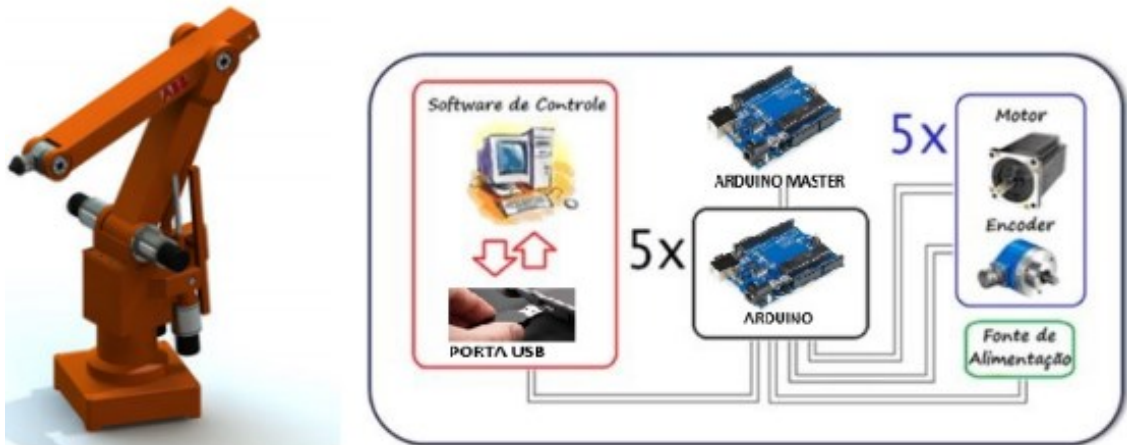


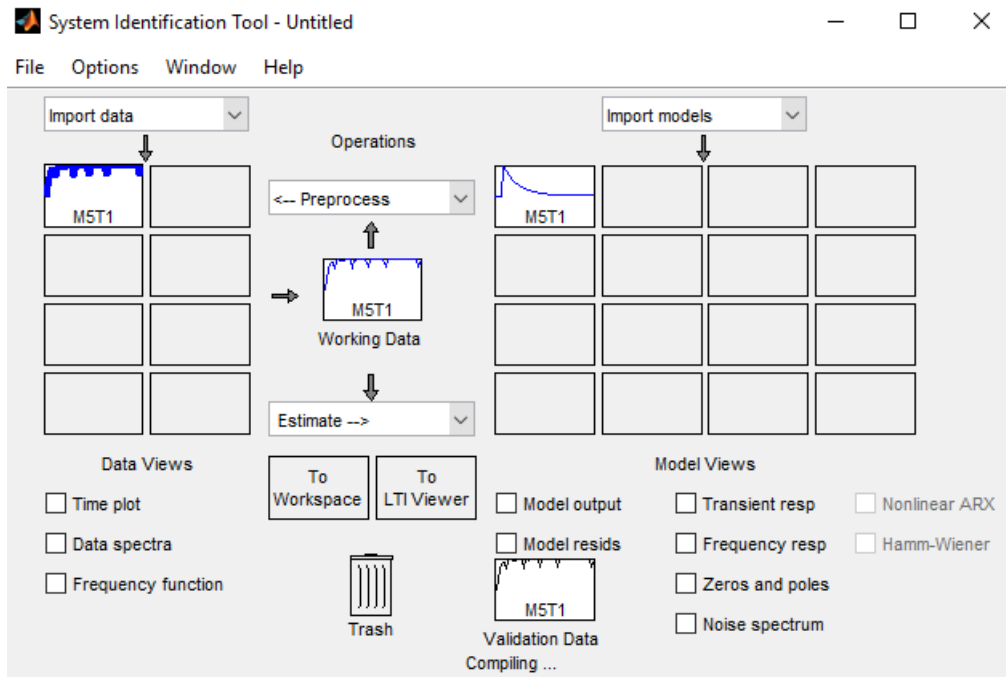
Figura 4.1: Sistema de controle do manipulador ASEA com Arduino[®] Uno.
Fonte: o autor, 2018.

A avaliação do comportamento dos motores está descrita por Zinato (2019), o Anexo B apresenta o código utilizado, enquanto que o Anexo C apresenta a rotina para o cálculo do ganho e da constante de tempo de cada motor.

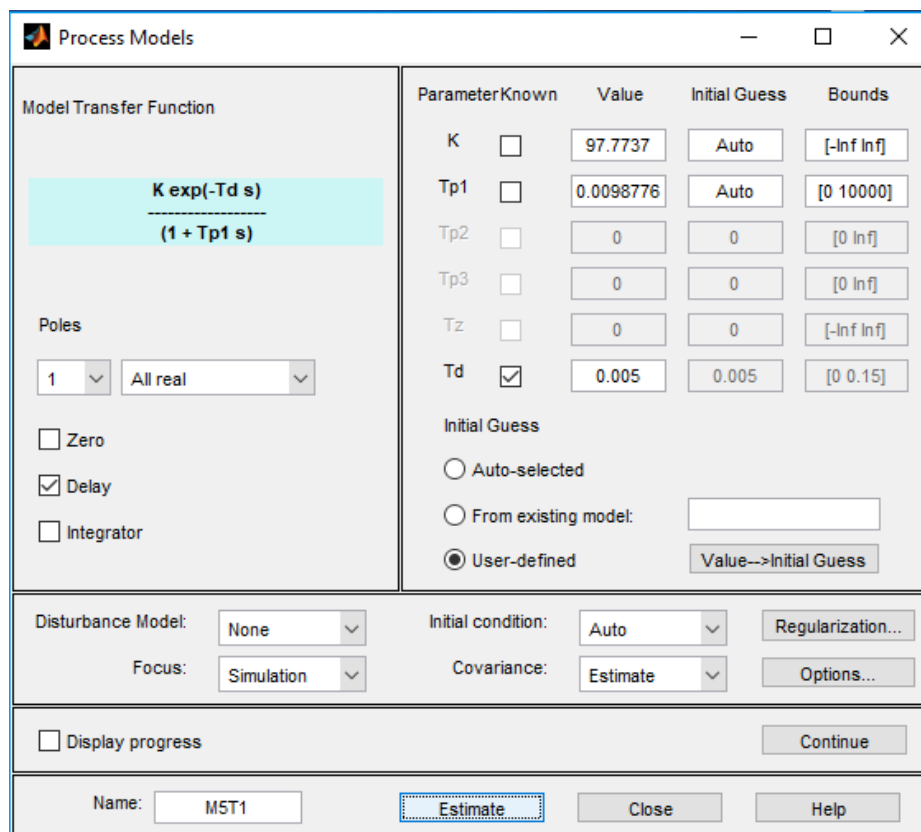
Com o *System Identification Tool* disponível no *MATLAB*[®] e que está representado na Figura 4.2, importam-se os dados obtidos do processo real e em seguida, escolhe-se o modelo que irá representar a relação entrada/saída, obtêm-se as constantes do motor e a resposta ao degrau da função de transferência obtida.

Utilizado um ganho estático do sistema (K) e a constante de tempo (τ) para calcular os ganhos proporcional, integral e derivativo e posteriormente é aplicada uma entrada degrau à função de transferência sintonizada e obtêm-se o comportamento.

Para garantir que a velocidade de cada junta ocorra de forma constante, o controle é feito em malha fechada e para isso, torna-se necessário obter uma relação desta com um tempo de operação e para isso, foi inicialmente considerado o motor sem carga.



a) Identificação do sistema.



b) Modelamento das variáveis.

Figura 4.2: Modelamento do processo.

Fonte: (Zinato, 2019).

Após obtidos os dados em regime permanente, foi considerado o transiente, em que foi feito com a aplicação de um sinal degrau de entrada, o que permitiu determinar os valores dos ganhos

e com todo o aparato montado no TCP do ASEA, a velocidade variou em torno de 0,03 mm/s. O procedimento mostrou-se adequado, uma vez que não houve variações significativas nos testes realizados em uma mesma junta e os parâmetros das funções de transferência apresentam coerência com a formulação teórica (ganho estático e constante de tempo).

A entrada em degrau foi utilizada de modo a enviar a máxima potência para os motores e avaliar o movimento em toda sua amplitude registrando assim as posições ao longo do acionamento. As funções de transferência obtidas para cada motor foram extraídas gerando gráficos de posição com unidade arbitrária *versus* tempo (ms), velocidade *versus* tempo, por fim uma resposta em degrau com amplitude por tempo, conforme a Figura 4.3. A leitura recebida é o número de pulsos por revolução do *encoder* com a resolução de 1024, o que está associado ao tempo gerando os gráficos apresentados em (a), (d), (g), (j), (m).

No caso do motor 1, que apresenta maior velocidade em relação aos demais, representa um maior ganho e o principal motivo para isso é que este motor não possui redução mecânica ou acoplamentos para a articulação.

O motor 2, com resultados apresentados na Figura 4.3(e), possui comportamento crescente da velocidade, devido à dinâmica do movimento da junta que possui maior atrito associado ao movimento, além do uso de fuso linear, que aciona uma haste para seu movimento.

O motor 3 também possui acionamento indireto, com redução diferente se comparada à do motor 2, o que é evidenciado pela maior velocidade de movimento, conforme a Figura 4.3(h).

O motor 4 apresenta a menor constante de tempo dentre todas as juntas, o que significa que ele possui a maior velocidade de resposta. Seu ganho estático é aproximadamente o mesmo do motor 3, o que indica menor atrito na junta. O motivo para a diferença pode estar relacionado com o acionamento, que ocorre por alavancas internas à estrutura do motor e sua curva está apresentada na Figura 4.3(k).

O motor 5 possui o menor ganho estático dentre todas as juntas do robô, assim como sua velocidade de movimento, sendo justificado pela forma de acionamento e seu resultado está indicado Figura 4.3(n).

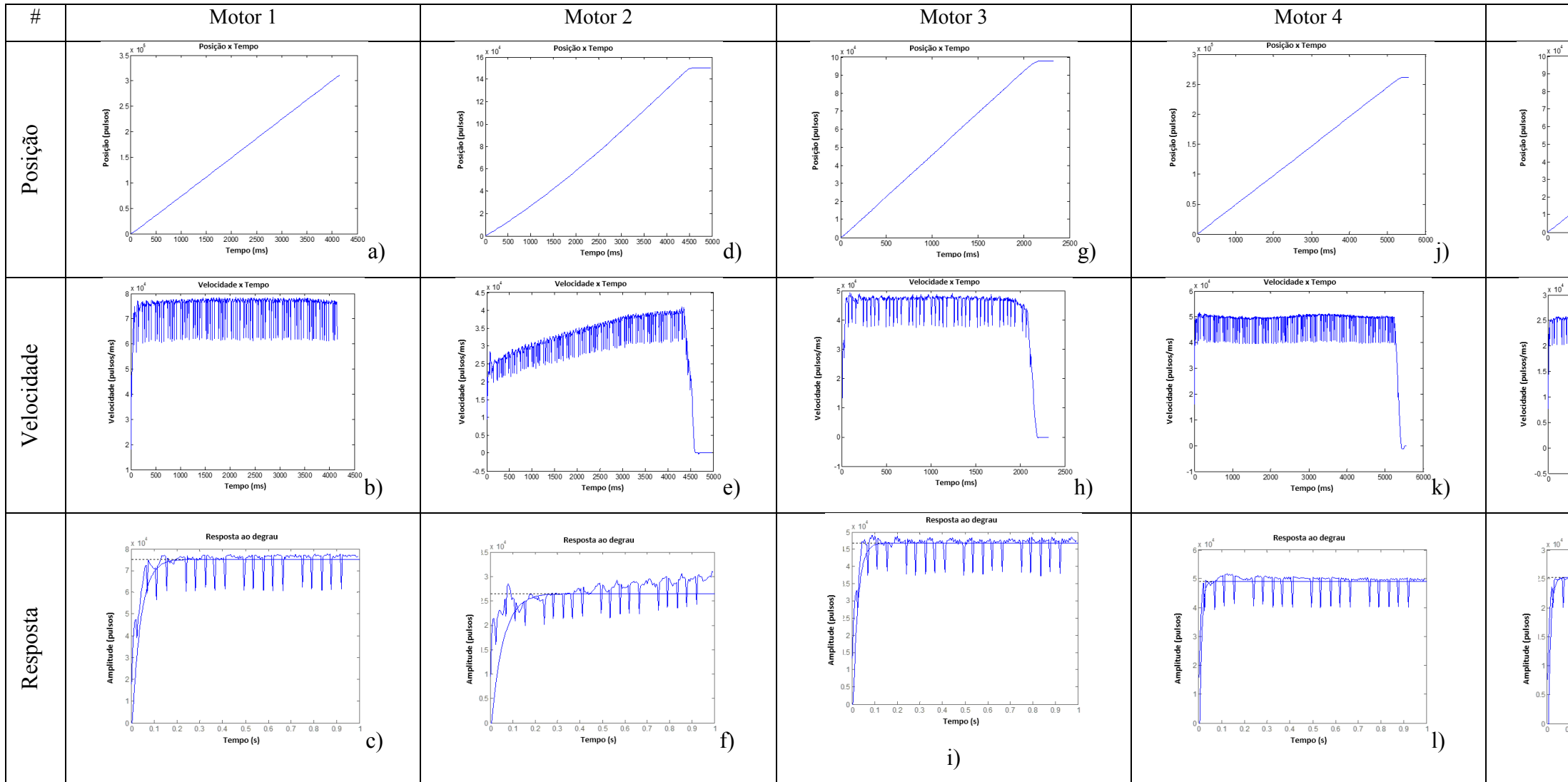


Figura 4.3: Comportamento dos motores.
 Fonte: Adaptado de (Zinato, 2019).

Com base na análise da posição e velocidade de movimento foi possível descrever o comportamento das juntas como uma FT (Função de Transferência) de 1ª ordem com atraso de transporte. A determinação dessas FT's de malha aberta possibilitou melhor compreensão da dinâmica do braço robótico e, determinar os ganhos do controlador para cada uma das juntas, o que garantiu que cada um dos motores conservou sua posição quando dotados de carga no efetuador do manipulador. Os valores PID obtidos nesta etapa foram introduzidos no código do Arduino®, de modo a reduzir os erros e permitir que o robô realize seus movimentos com maior precisão e resposta rápida.

4.2 Parametrização

Embora a corrente de pulso seja a variável que é diretamente relacionada ao parâmetro de destacamento de gota, o valor da tensão de pulso também mantém uma relação com a mesma. Isto significa que se pode controlar a transferência metálica tanto pela corrente, quanto pela tensão, conforme apresenta a Figura 4.4. Em função disso surgiram metodologias para comandar a transferência metálica em corrente pulsada (Nascimento, *et al.*, 2003), (Neto & Brandi, 1997), dentre elas os comandos nos modos de imposição de corrente pulsada em que os valores das correntes e tempos de base e de pico são ajustados, além da velocidade de alimentação do arame que se dá por meio de um sistema de realimentação interna da fonte, enquanto que o processo misto impõe a corrente na fase de base e comanda a tensão no momento do pulso, com isso, a transferência metálica pode ser controlada tanto pela corrente quanto pela tensão.

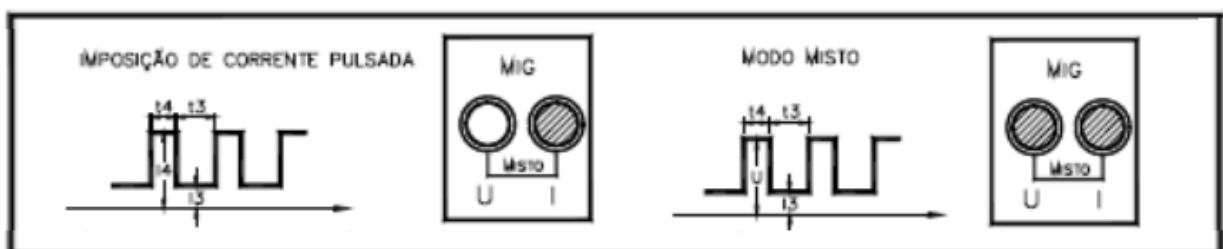


Figura 4.4: Modos de operação do processo pulsado.
Fonte: Adaptado de IMC-Soldagem, 2019.

No comando de imposição de corrente, tanto na base como no pulso, seus valores médios e eficazes garantem a velocidade de alimentação do arame, o que indica que uma redução do tamanho do arco, a tensão também diminuirá, reduzindo sua energia, conseqüentemente sua capacidade de fusão do eletrodo. Neste modo de operação é possível ao invés de ajustar o valor da velocidade de alimentação do arame, ajustar a tensão de referência. E esse comportamento

permite variar o comprimento do arco por variações da corrente de soldagem, como consequência, a taxa de fusão do arame.

Devido a necessidade de leitura e escrita dos sinais tanto analógicos quanto os digitais, foi utilizada uma interface composta por uma placa de controle do tipo DAQ USB-6008 da *National Instruments*[®], que é um sistema de aquisição de 12 bits a 10 kHz, com 8 AI (*Analog Input*), 2 AO (*Analog Output*), 12 DIO (*Digital Input-Output*) e uma porta configurável como *trigger* digital ou uma entrada de contador de eventos.

Para a correta calibração da placa, foi realizada uma instrumentação com um gerador de sinais, a DAQ, um osciloscópio, multímetro e o algoritmo, conforme Figura 4.5. Onde foram criadas funções para as corretas conversões dos valores analógicos tanto para as entradas quanto para as saídas. O fabricante da DAQ possui SDK (*Software Development kit*) para aplicação em *MATLAB*[®].

Desse modo é possível comunicar com a máquina de solda e obter variáveis do processo, além de unificar toda sua aplicação com base na programação com *MATLAB*[®], de modo a padronizar todo o algoritmo e *hardware* utilizado. A escolha deste permite desenvolver interrupções a altas frequências para a malha de controle e até mesmo gerar formas de ondas, com resoluções de 0,1 ms e os valores de corrente e tensão de saída da fonte são lidos e estes podem ser utilizados para modificar a forma de onda.

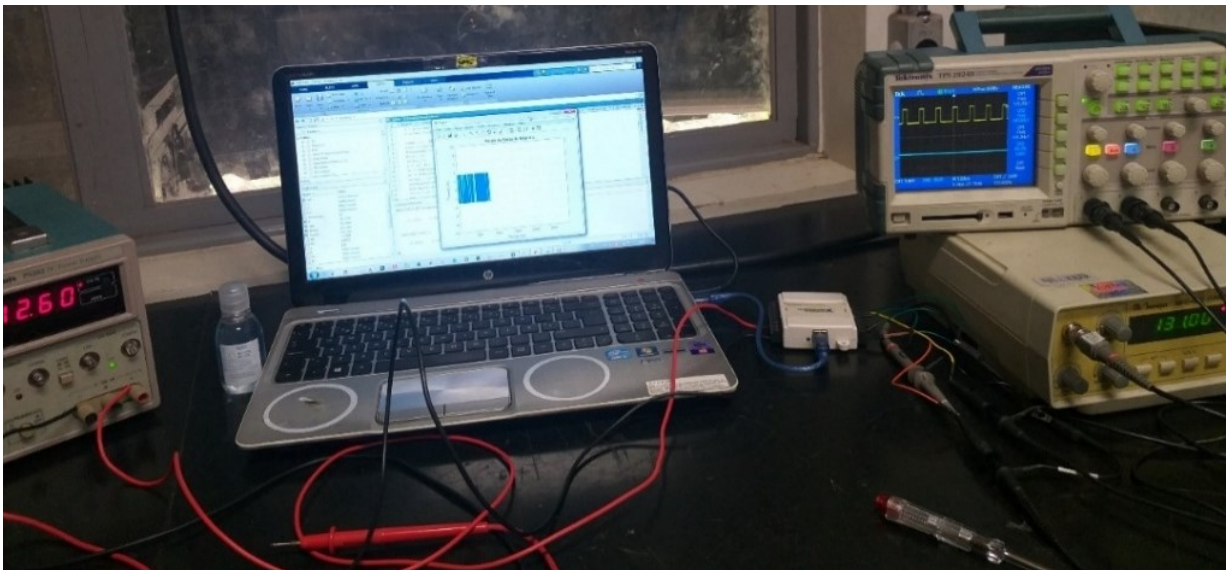


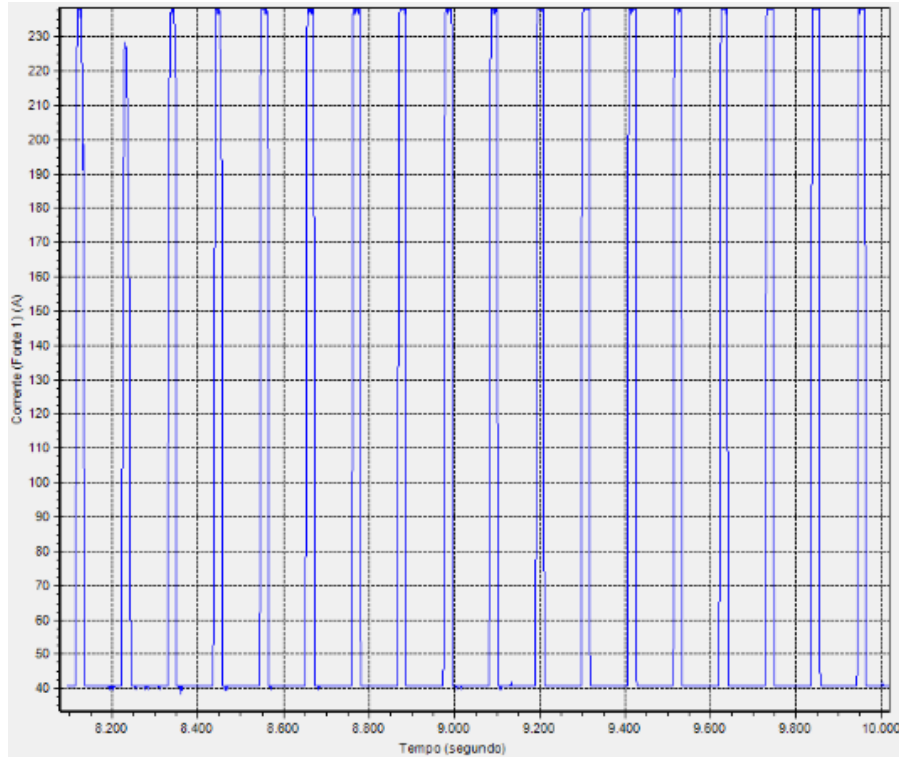
Figura 4.5: Calibração DAQ.
Fonte: o autor, 2020.

Para os testes em bancada, foi utilizado um gerador de função para produzir sinais nas entradas analógicas da DAQ e com um osciloscópio foi possível fazer a leitura destes dados. Após esta etapa, a DAQ e o sistema monitoramento SAP V4[®] da IMC, foram montados paralelamente na fonte de soldagem para validação quanto aos sinais instantâneos do processo, como: tensão, corrente, velocidade de alimentação do arame. Uma comparação entre as informações coletadas pela DAQ apresentou comportamento semelhante na análise dos dados, conforme apresentado na Figura 4.6.

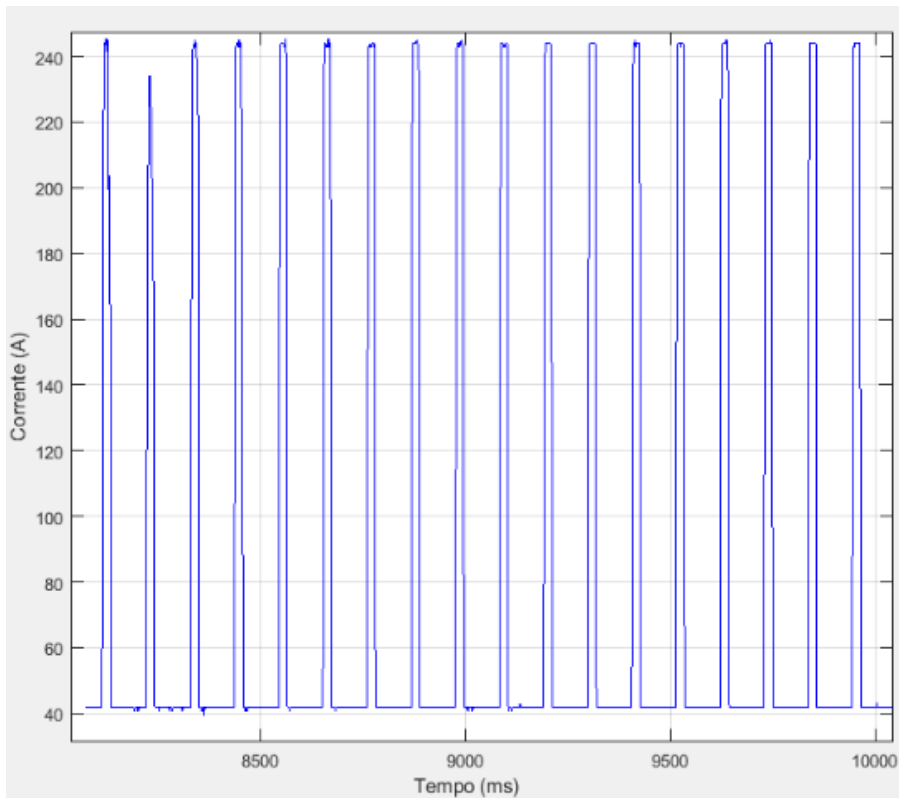
Para utilizar o algoritmo apresentado no Apêndice C, é necessário entender a necessidade de gerar a rotina com os parâmetros a serem alterados durante a soldagem. O *Microsoft Excel*[®] funciona como um gerador de matrizes e cada valor será atribuída uma função para enviar o sinal respectivo de tensão para as saídas analógicas da DAQ para o comando da corrente e velocidade de arame. Baseado em incrementos de tempos definidos para os valores de I_p , t_p , I_b , t_b , em determinados instantes, as sub-rotinas, que formam uma “palavra” que apresenta diferentes parâmetros do processo e um visualizador permite identificar o comportamento dos sinais antes de serem utilizados.

O algoritmo aguarda um sinal proveniente do Motoman que indica o início do processo de soldagem assim que o manipulador robótico estiver nas posições que necessite a abertura do arco elétrico. As sub-rotinas possuem um tempo de duração que deve ser informado, uma vez que, o período do processo pulsado pode se repetir n vezes, então a duração é um múltiplo da soma dos tempos de base e de pico.

Os valores obtidos pelo sistema de monitoramento SAP V4[®] são extraídos sinais através de sensor *hall* para a corrente e fios que estão conectados aos polos da máquina para a medição da tensão, enquanto que para a DAQ há uma interface direta com o circuito da máquina.



a) Sinais obtidos pelo SAP V4[®] e analisados por meio do Programa SINAL[®] V2.0.



b) Sinais adquiridos via DAQ e analisados pelo MATLAB[®].

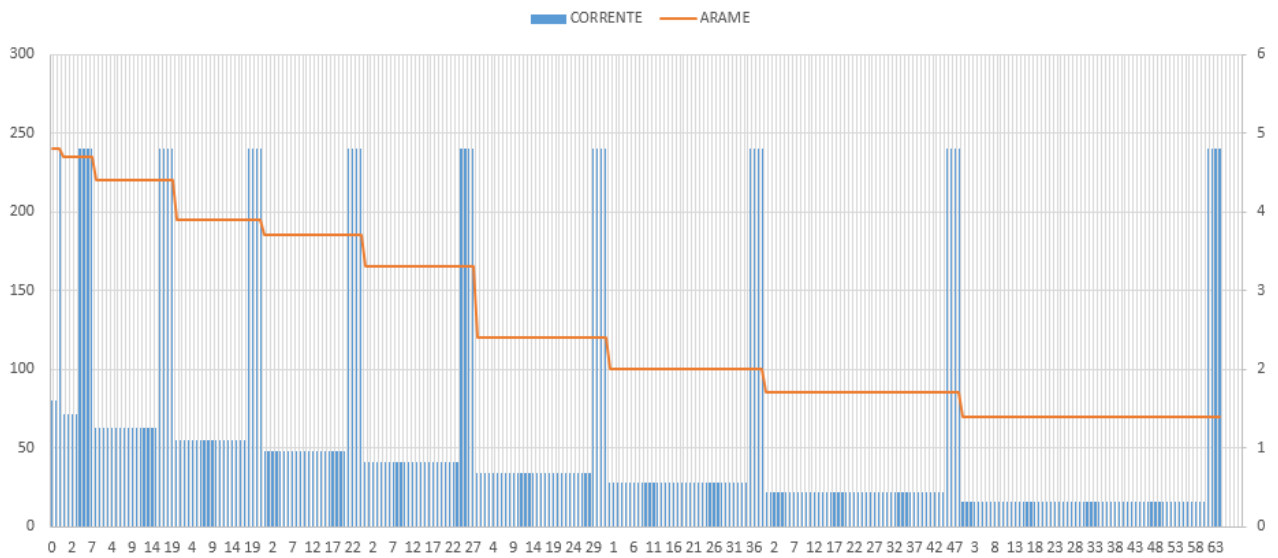
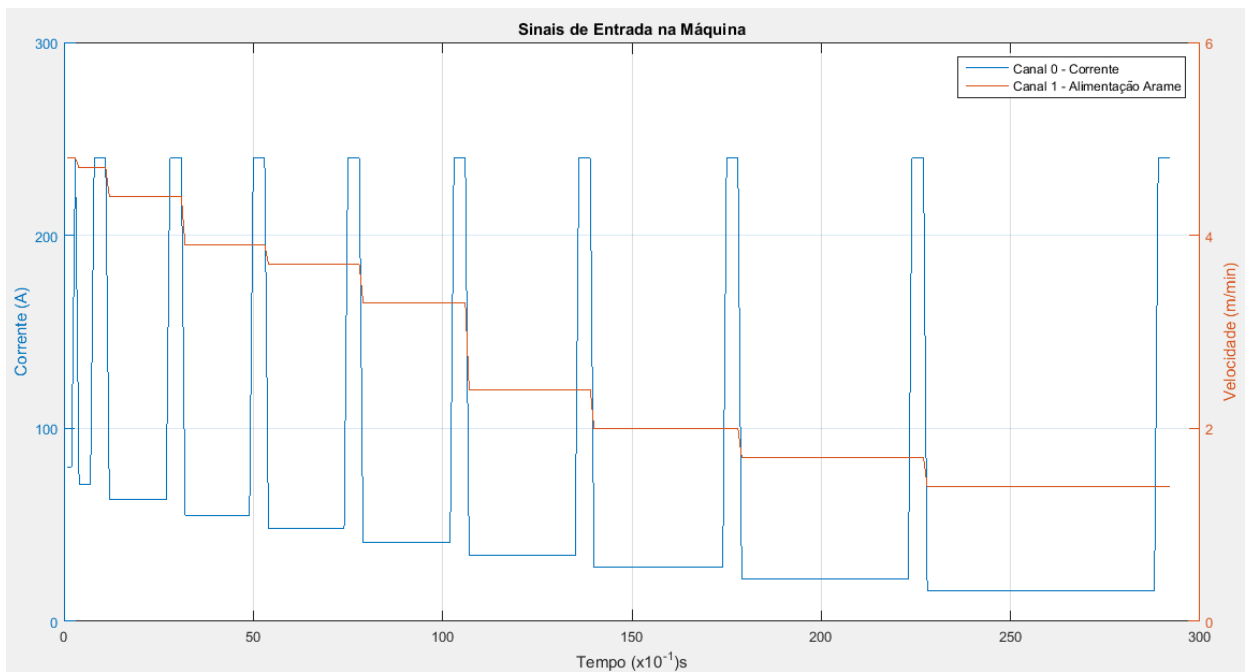
Figura 4.6: Comparativos dos dados lidos do processo.

Fonte: o autor, 2020.

Para o uso da DAQ foram considerados apenas a corrente e velocidade de arame, o qual foi implementado o algoritmo no *MATLAB*[®]. Como os sinais de processo interpretados pela máquina de soldagem ocorre por valores analógicos, o modelamento destes se fez necessário e este foi gerado por um *script* no *Microsoft Excel*[®], que criou sub-rotinas com dados dos parâmetros a serem utilizados e esta macro está representada no Apêndice D. O planilhamento dos valores e outras funções como exportação da rotina, que será utilizada pelo algoritmo desenvolvido no *MATLAB*[®], está representado na Figura 4.7(a), com isso, a leitura da matriz de dados, cria os respectivos vetores para valores de corrente pulsada e velocidade de alimentação do arame e envia seus valores para as respectivas saídas da DAQ, para que possa comandar o processo, com uso de uma função de tempo para que não houvesse perda de sinal. Uma funcionalidade complementar foi desenvolvida apesar de não ter sido utilizada neste trabalho é a possibilidade de pulsar o arame, com base na mesma metodologia da corrente. Para este trabalho os valores de pico e base da velocidade de arame se mantiveram iguais e as durações foram as mesmas utilizadas para corrente.

Para uma duração de deposição de 26,7 segundos, por camada, cada sub-rotina foi executada um determinado número de vezes como apresentado na coluna “Tduração”, conforme a Figura 4.7, ou seja, por exemplo, para a sub-rotina D que tem um período (T_p+T_b) de 22 ms, sua duração é de 2,2 segundos o que indica que esta será executada 100 vezes. Cada instrução possui um múltiplo inteiro da fase e a soma destas tem que resultar na extensão do processo. A escala de tempo apresentada na Figura 4.7 está associada a cada sub-rotina. Por fim, o que está representado na Figura 4.7(c) apresenta imagem dos sinais enviados para a máquina de solda durante o processo e diz respeito a realização de apenas um ciclo por subprograma, com o objetivo de facilitar aqui a visualização dos dados interpretados pelo *MATLAB*[®] e enviados para a DAQ e conseqüentemente para a fonte de soldagem. A saída analógica da placa de interface atualiza os valores de saída A/D (analógico/digital) corresponde ao valor da corrente. De modo que a interface possa atuar na fonte e esta interprete os sinais analógicos para o atuar na corrente, sendo assim necessário o envio de valores de tensão de 0 a 5 V que corresponde de 0 a 300 A, da mesma forma para o controle da velocidade de arame que vai de 0 a 5 V representam de 0 a 10 m/min.

SubRotina	ms	ms	ms	A	A	ms	ms	m/min	m/min
Tduracao	Tpico	Tbase	Cpico	Cbase	TP-Arame	TB-Arame	VP-Arame	VB-Arame	
A	450	1	2	240	80	1	2	4,8	4,8
B	800	4	4	240	71	4	4	4,7	4,7
C	1600	4	16	240	63	4	16	4,4	4,4
D	2200	4	18	240	55	4	18	3,9	3,9
E	2500	4	21	240	48	4	21	3,7	3,7
F	2800	4	24	240	41	4	24	3,3	3,3
G	3300	4	29	240	34	4	29	2,4	2,4
H	3900	4	35	240	28	4	35	2	2
I	4900	4	45	240	22	4	45	1,7	1,7
J	5200	4	61	240	16	4	61	1,4	1,4

a) Parametrização *Excel*[®].b) Visualizador *Excel*[®].

c) Visualizador saída DAQ.

Figura 4.7: Integração *MATLAB*[®] com a DAQ.

Fonte: o autor, 2020.

As camadas obtidas na primeira fase proposta em “Confecção das Peças” foram seccionadas, lixadas, polidas e atacadas quimicamente de modo a extrair suas características geométricas, tais como, largura, altura do reforço, molhabilidade e índice de convexidade. Para a análise da molhabilidade e convexidade foi utilizado um algoritmo de segmentação binária baseada em limiarização ou também de binarização, de modo que para a detecção automática das bordas, o *threshold* seleciona os níveis de *pixels* para preto ou branco, como pode ser observado na Figura 4.8, que representa o perfil de alguns cordões obtidos.



Figura 4.8: Perfis de alguns cordões.
Fonte: o autor, 2020.

Os valores do índice de convexidade (IC), que foram obtidos e estão apresentados na Tabela 4.1 indicam que pode gerar excessivo reforço com pequena penetração, o que pode ser favorável para a Manufatura Aditiva, para o ganho da altura da parede com menor número de camadas. Com aumento da corrente e da tensão, houve uma tendência de redução do índice de convexidade. A molhabilidade está associada ao acúmulo de calor, o que afeta diretamente o ângulo de contato, o volume de material e consequentemente a altura da parede, como está representado na Figura 4.9.

A não-molhabilidade (NM) da camada, é representada pela porcentagem da largura que não molha a superfície, sendo que quanto menor o ângulo de contato, melhor será a molhabilidade, quanto maior a molhabilidade da camada, maior será a largura e menor o reforço e vice-versa. Sendo este um fator importante a ser controlado na deposição sucessiva de camadas, pois quanto maior a temperatura envolvida mais a poça de fusão se espalhará sobre o substrato/camada e consequentemente mais larga será a parede, o que ocasiona o efeito de transbordamento.

Tabela 4.1: Dados obtidos com os testes.

Camada	Dg (mm)	Vg (mm ³)	Largura (mm)	Índice de Convexidade (%)	Não- Mollhabilidade (°)
1	1,1	0,7	9,56	29,19	112,44
2	1,1	0,6	10,39	27,46	122,11
3	1,1	0,7	9,5	30,16	112,38
4	1,1	0,7	9,79	27,37	125,84
5	1,1	0,7	8,59	32,05	112,97
6	1,1	0,7	9,11	30,30	110,56
7	1,1	0,7	8,56	31,62	112,29
8	1,1	0,7	8,56	34,73	111,70
9	1,1	0,7	8,76	29,42	116,57
10	1,1	0,7	8,88	30,70	118,41
11	1,1	0,8	8,34	26,08	105,40
12	1,1	0,7	8,11	31,29	101,83
13	1,1	0,8	7,78	33,59	104,86
14	1,1	0,7	7,87	31,03	106,79
15	1,2	0,8	7,69	31,61	104,57
16	1,1	0,6	7,64	35,70	107,72
17	1,2	0,9	7,11	38,17	105,26
18	1,1	0,7	7,59	33,41	105,02
19	1,3	1,1	6,81	34,61	114,06
20	1,3	1,0	6,83	31,12	115,94
21	1,2	1,0	7,51	32,17	113,86

Fonte: o autor, 2019.

A variação da frequência de pulsação influencia no diâmetro das gotas e para um valor do diâmetro da gota (Dg) maior que o do eletrodo alude a um fator de destacamento baixo, apesar de a corrente média estar abaixo do valor da corrente de transição, os parâmetros necessitam de um melhor ajuste para garantir a condição goticular. As medições foram realizadas quando a gota apresentava a forma mais esférica possível.

Com a variação da corrente média e a tensão de referência, foram obtidas diversas larguras da camada. O equilíbrio entre velocidade de alimentação e taxa de fusão do arame, determina a estabilidade do comprimento do arco, que não sendo mantida pode ocasionar variações consideráveis na fusão do arame-eletrodo, bem com danificar o bico de contato. Com o auxílio dos oscilogramas de tensão e corrente, foi possível determinar o comportamento da máquina quanto a frequência de pulso f , por meio de medições de tempo de período T. A Figura 4.10 mostra que conforme a velocidade de alimentação aumenta a frequência de pulso também aumenta, o que garante a estabilidade do processo.

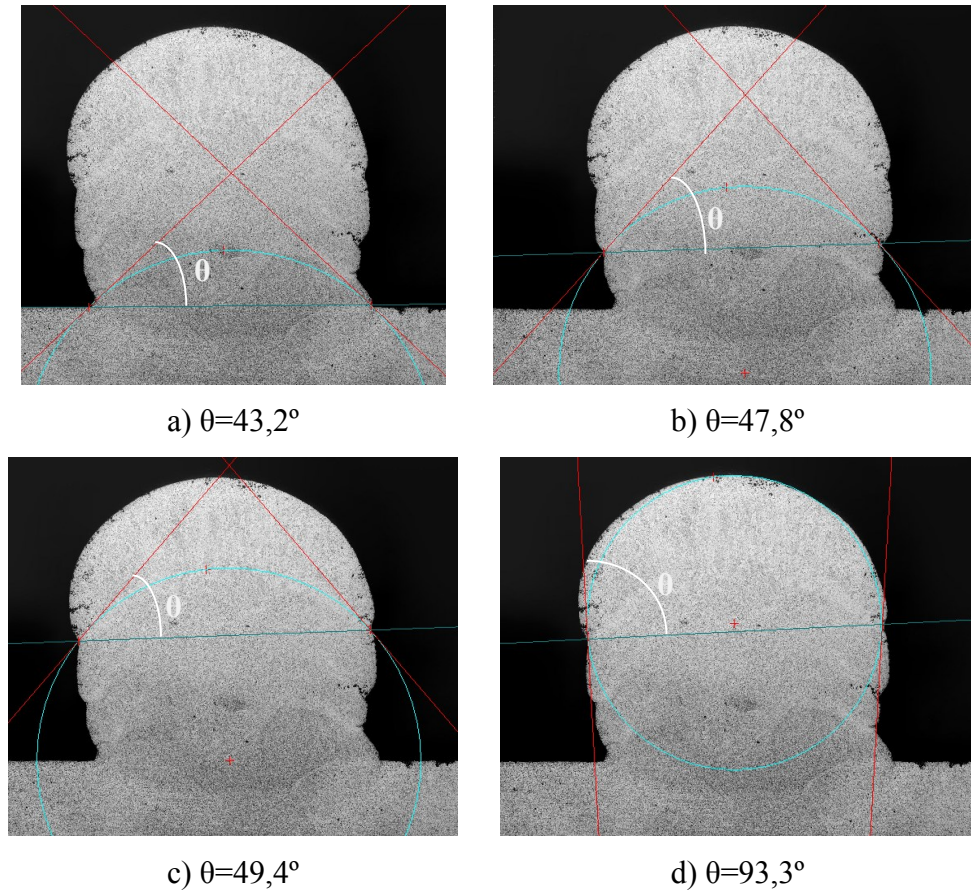


Figura 4.9: Variação da molhabilidade de acordo com o ângulo de contato.
Fonte: o autor, 2020.

Uma menor corrente indica menor ação dos campos magnéticos e menor pressão sobre a poça de fusão, assim como a velocidade de impacto das gotas é função do valor da corrente média. Essa redução do valor da corrente promoveu um aumento do volume da gota, bem como a frequência de transferência quanto a velocidade no decresceram, o que foi favorável pois, contribuiu para a diminuição do nível de penetração.

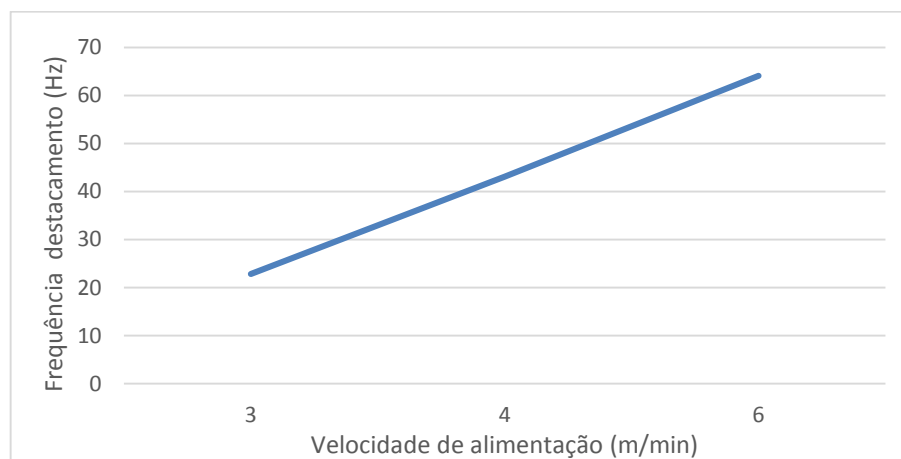


Figura 4.10: Relação frequência de destacamento com a velocidade de alimentação.
Fonte: o autor, 2020.

O índice de convexidade (IC) e a não-molhabilidade (NM) foram avaliados por meio da metodologia de análise de superfície (RSM), que permite estabelecer as relações quadráticas entre os parâmetros do processo. O pacote estatístico *MINITAB*[®] tem a capacidade de realizar análise de regressão e apresenta certa facilidade de programação, além de gerar gráficos que fornecem uma rápida interpretação. A análise estatística auxiliou no levantamento dos parâmetros a serem utilizados e o gráfico da Figura 4.11 indica que com o aumento da tensão de referência há uma tendência de reduzir o IC, enquanto que o aumento da associação dos valores de base (corrente e tempo) que ocasionam maior corrente média, tem ação de elevar o índice. Estes remetem a maior pressão do arco que resulta em acréscimo na largura e redução do reforço, o que pode indicar uma maior geração de calor.

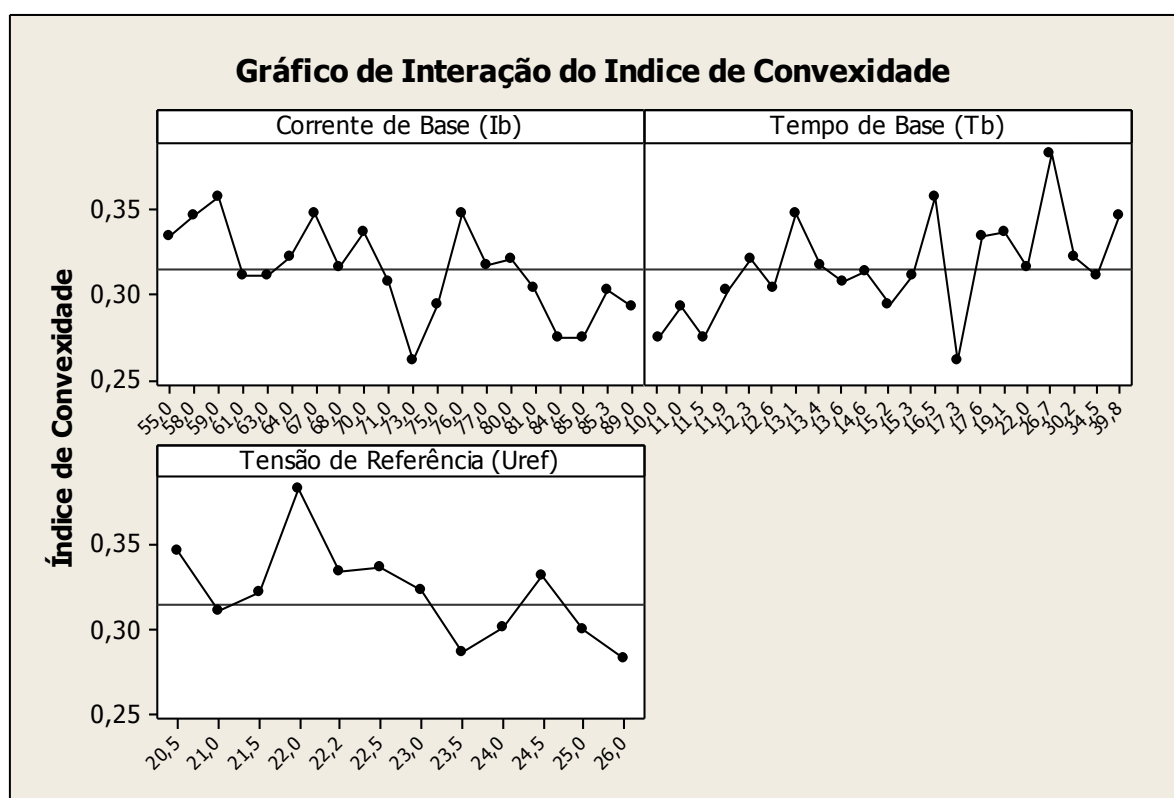


Figura 4.11: Influência dos fatores no IC.

Fonte: o autor, 2020.

Quanto ao tempo de base, apresenta uma predisposição contrária do comportamento do índice de convexidade, promovendo crescimento do reforço, o que pode estar relacionado com o crescimento do volume da gota.

Da Tabela 4.1, verifica-se que os ângulos obtidos indicam que as camadas apresentam baixa molhabilidade e com a análise da Figura 4.12, os resultados dos testes, indicam que a Não-

Molhabilidade é baseada por baixos valores de tempo de base e uma pequena faixa de corrente, ambos sofrem maior influência quando a tensão de referência é de 23,25 V.

Para verificar o influxo do comprimento do arco sobre a instabilidade da camada, alterou-se o seu comprimento em dois níveis, por meio da variação da velocidade de alimentação do arame (V_a), com os demais parâmetros constantes, isto é, menores velocidades de alimentação proporcionaram um maior comprimento do arco. Além da medição do comprimento do arco, o valor médio da tensão mostrou ter alguma influência sobre a instabilidade da camada, de acordo com as tensões de referências utilizadas, visto que para as mesmas condições do processo, houve uma relação direta entre o comprimento do arco e o volume da camada por comprimento depositado, isto é, comprimentos de arcos maiores (tensões médias maiores) necessitaram de um maior volume depositado por comprimento depositado para que a camada permanecesse estável.

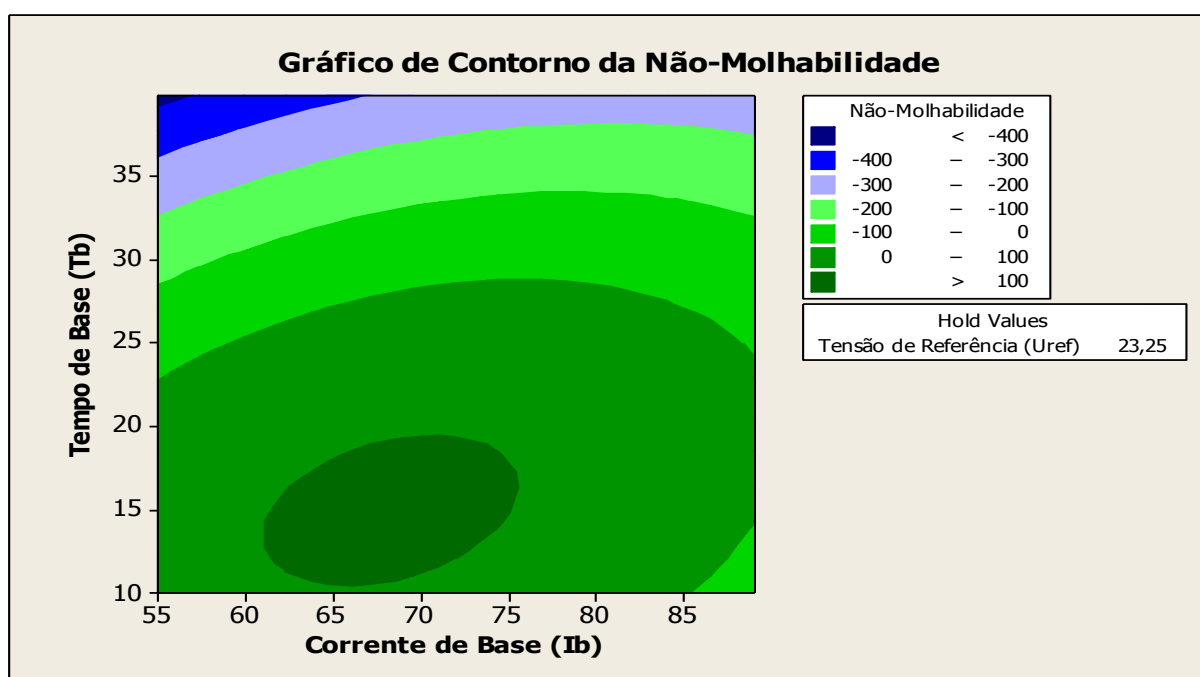


Figura 4.12: Interferência dos fatores na Não-Molhabilidade.

Fonte: o autor, 2020.

As variáveis que são controladas durante o processo GMAW são basicamente: a corrente, tensão, velocidade de deslocamento, para que se possa mantê-las constantes para permitir a repetibilidade. No processo GMAW pulsado, o número de parâmetros a se avaliar e identificar suas influências na geometria da camada depositada é elevado, o que torna ainda mais complexa uma análise completa da ação de todos estes no resultado.

Em relação aos parâmetros desejados, tais como o ângulo de reforço, este foi avaliado de acordo com a não-molhabilidade e o seu valor deveria estar acima de 90° . Uma vez correlacionado a área e o ângulo, é possível determinar a largura da parede. A análise de regressão é realizada para determinar um coeficiente que correlacione valores medidos e previstos. O modelo desenvolvido a partir de os dados experimentais pode ser empregado para controlar os parâmetros do processo a fim de alcançar a largura e altura para cada camada e produzir uma parede mais homogênea.

Como já apresentado, há uma relação da largura da poça de fusão que é motivada pela corrente e tempo de base, porém, a análise do modelo demonstra uma forte relação com tensão de referência (U_{ref}), que apresentou um valor significativo no processo, conforme a Figura 4.13.

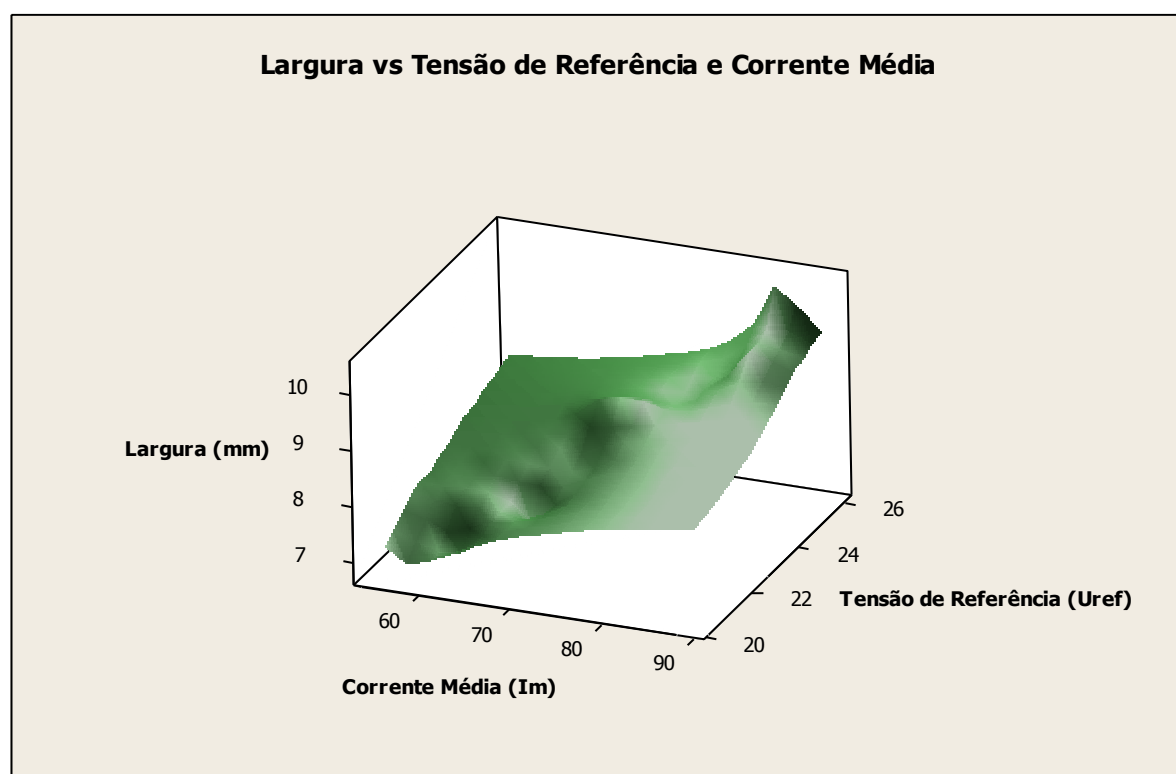


Figura 4.13: Relação da largura poça/camada com os parâmetros do processo.
Fonte: o autor, 2020.

A Figura 4.14 apresenta um modelo dependente da corrente média e que promove um aumento no volume de material fundido na ponta do eletrodo que é transferido para a poça de fusão, promove uma maior depressão no instante do impacto, o que promove um deslocamento de um maior volume de metal fundido.

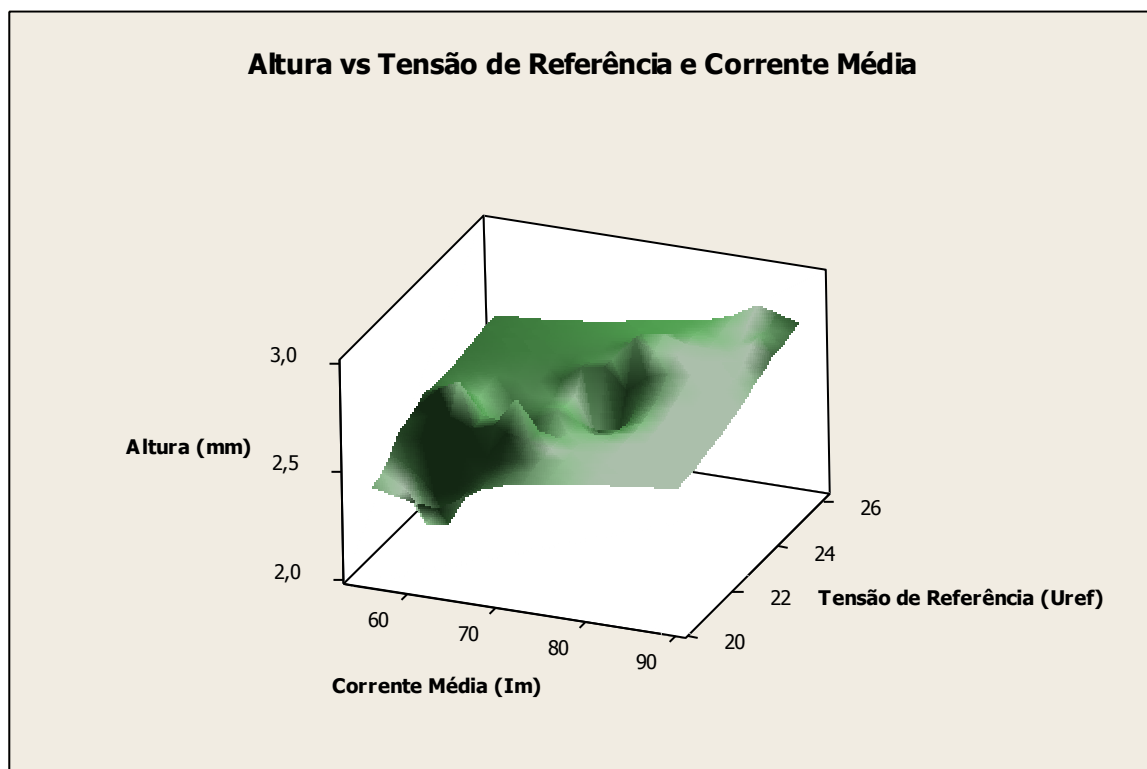


Figura 4.14: Relação da altura da camada com os parâmetros do processo.
Fonte: o autor, 2020.

Como a tensão de referência ajustada na máquina tem forte influência sobre a velocidade de alimentação do arame e com o aumento desta é possível identificar elevação do reforço da camada, estando este associado a uma maior agitação da poça devido a excessiva força do arco.

Baseado na análise da variância (ANOVA) para se analisar estatisticamente se o modelo matemático é adequado ou não, bem como a significância dos coeficientes dentro do mesmo, considera-se o valor do *P-value*. Este indica que o quadrado do tempo de base e da tensão de referência, apresentam influências significativas sobre a frequência de destacamento da gota e esta relação está apresentada na Figura 4.15, associado com a seguinte expressão:

$$f_{Hz} = 26,368 + 12,127Ib - 43,048tb - 29,090Uref + 6,844Ib^2 - 3,564tb^2 \\ + 9,173Uref^2 + 10,153Ib * tb - 17,272Ib * Uref - 32,671tb * Uref$$

A interação entre os fatores está associada a mudança de comportamento dos diferentes níveis entre os fatores, com relação a característica de interesse.

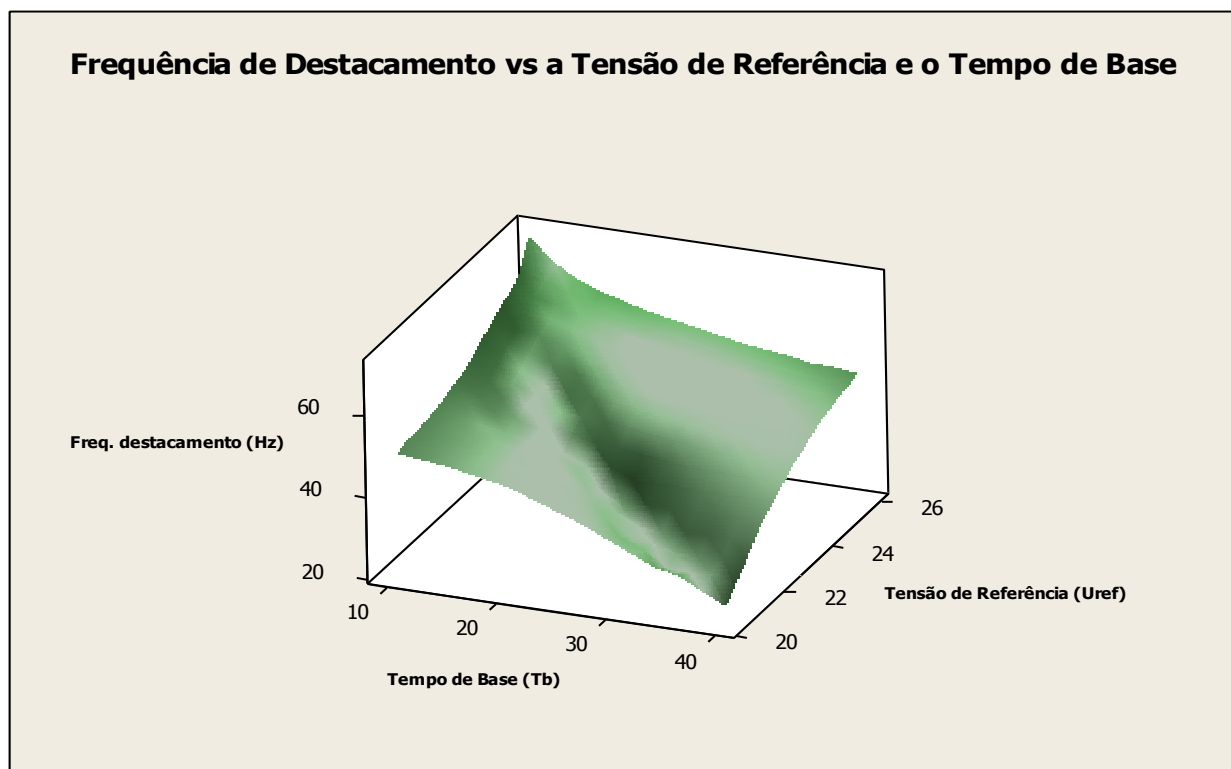


Figura 4.15: Relação da frequência de destacamento-tempo de base-tensão de referência.
Fonte: o autor, 2020.

O uso de rotinas para a parametrização também foi favorável quanto a abertura do arco, pois este é um dos instantes mais críticos no GMAW, sendo que os metais de base e de adição estão em temperaturas que possam dificultar a emissividade. Com isso, os níveis de corrente são superiores aos de regime permanente do processo, o que promove elevados aportes térmicos, *hot start*, resultando em condições desfavoráveis quanto a aparência e ao dimensional das camadas. Uso de sub-rotinas com baixos níveis de energia iniciais, permite uma ignição mais suave e com relativo controle, o que garantiu uma estabilidade mais rápida do processo.

Para a segunda fase e para compreender a variação abrangente nas dimensões dos perfis obtidos, camadas individuais e sequenciais são depositadas separadamente sobre o substrato conforme apresentado na Figura 4.16, onde foram realizadas deposições sucessivas até atingir 10 camadas e assim, avaliou-se a evolução da razão largura/altura com um acréscimo de 2mm entre as camadas. As macrografias correspondentes são mostradas na Tabela 4.2.

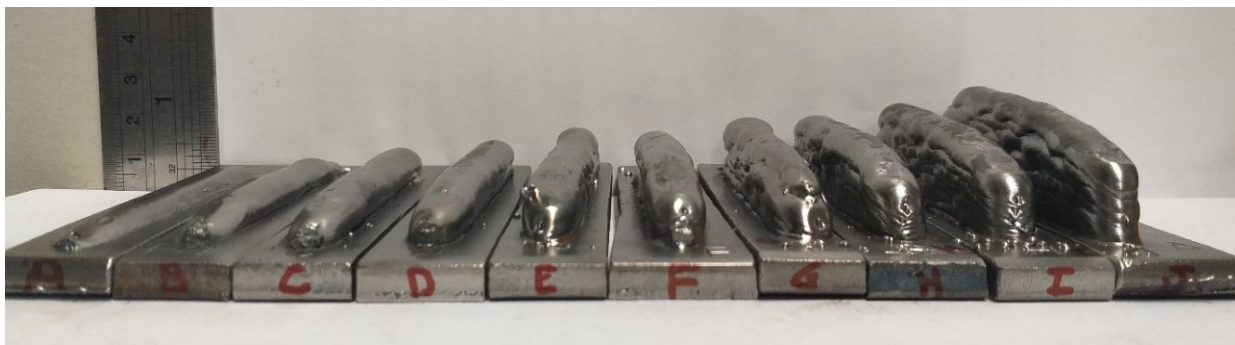


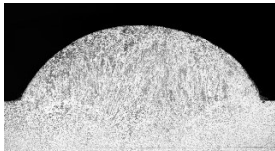
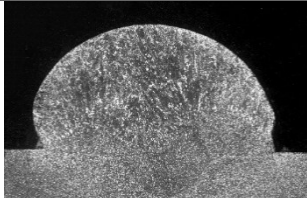
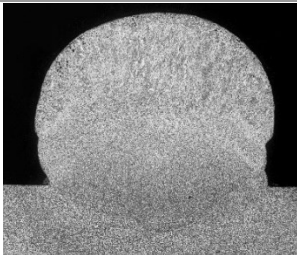
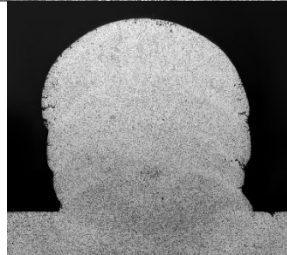
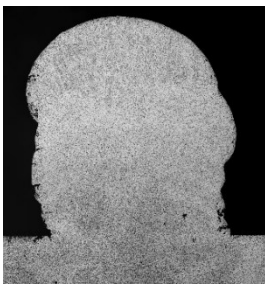


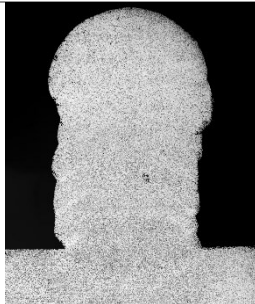
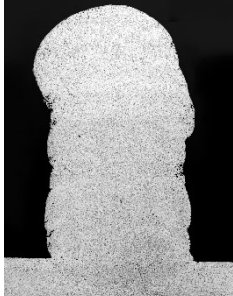
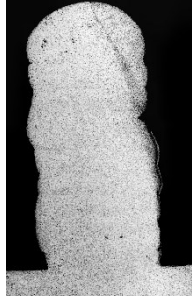
Figura 4.16: Perfil das camadas produzidas.

Fonte: o autor, 2020.

O efeito de curvatura, também conhecido como rampa na confecção de uma parede, ocorre quando a altura e largura são maiores no início em relação ao término da camada depositada, este fenômeno ocorre quando a deposição é em sentido único. Com a deposição de 10 camadas em uma única direção *Raster*, o efeito de curvatura ao final foi minimizado com o uso da técnica de controle do aporte térmico e com paradas para atingir equilíbrio térmico da parede.

A cada início de deposição utilizando o modo de sentido único, ocorre em uma região mais fria, em que a pressão do arco elétrico empurra a poça de fusão para trás, deixando promovendo uma maior largura, à medida que o comprimento da camada vai aumentando e se aproximando do final, há uma tendência de se ter um acúmulo de calor, o que causa uma solidificação mais lenta e o volume de material fundido promove o transbordamento, resultando em uma redução da altura. Com as deposições das camadas e o aumento da altura da parede, a dissipação de calor passa a ser menos eficaz do que a condução direta para o substrato, o que reduz a taxa de resfriamento, o que produz uma camada com menor reforço, porém, mais largo, o que pode implicar na condição de transbordamento e maior a quantidade de material a ser removido. Esses efeitos foram minimizados com o uso da metodologia proposta de alterar os parâmetros ao longo das deposições das camadas.

Tabela 4.2: Morfologia de acordo com a seção transversal.

#	Quantidade de camadas	Imagem	#	Quantidade de camadas	Imagem
A	1		B	2	
C	3		D	4	
E	5		F	6	
G	7		H	8	
I	9		J	10	

Fonte: o autor, 2020.

Se os comprimentos dos passes forem curtos, o material não resfria completamente até o início da próxima deposição, ou seja, a temperatura não é homogênea em toda a extensão do perfil, o que pode ser obtido uma condição melhor em passes longos; com um intervalo de tempo elevado entre as deposições, ou de forma a controlar a distribuição da temperatura ao

longo da camada. Baseado no acúmulo de calor proveniente do processo a arco, se apresenta como um sério problema para a Manufatura Aditiva. Portanto, quanto menor for a entrada de calor, menor a largura das camadas conforme apresentado na Figura 4.17. De acordo com cada aporte térmico aplicado, os corpos de prova foram seccionados e medidos a largura, reforço e penetração, o que auxiliou na avaliação do efeito e em replicar no controle do processo, com a construção do banco de dados.

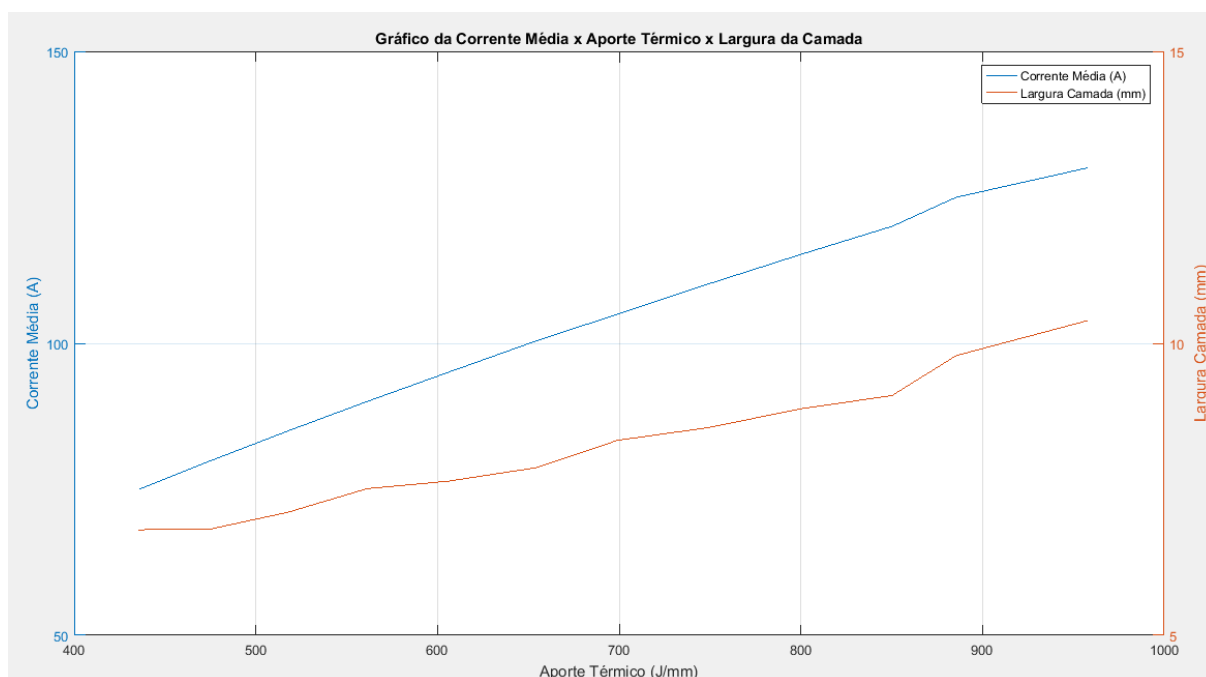
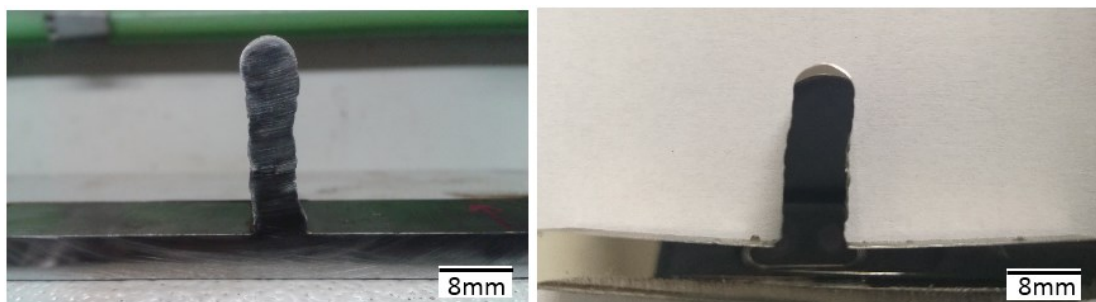


Figura 4.17: Efeito do aporte térmico e corrente média na largura da camada.

Fonte: o autor, 2020.

Por fim, para a terceira etapa, em que foram depositadas 20 camadas com um acréscimo por camada de 2 mm, mantendo a distância de 16 mm entre o bico de contato e a superfície de trabalho, variando os parâmetros do processo reduzindo a entrada de calor na peça. A técnica de alterar os parâmetros para se obterem aportes térmicos menores com o aumento do número de camadas, proverá em uma menor taxa de deposição de material, uma vez que, a taxa de alimentação do arame está diretamente associada com a entrada de calor. Na Figura 4.18 apresenta-se um comparativo entre os métodos, como resultado da fase 3 proposta na Metodologia.



a) Sem variação dos parâmetros.

b) Com variação dos parâmetros.

Figura 4.18: Comparativo entre as paredes.

Fonte: o autor, 2020.

A Figura 4.18(a) tem uma geometria menos regular ao longo de sua altura, quando comparado com a Figura 4.18(b), que é mais homogênea, porém, com uma ligeira redução na altura, sendo que ambas as condições do processo foram as mesmas.

Os valores de corrente e tempo de pico foram mantidos constantes para que estes não atuem na força do arco elétrico no momento do desprendimento da gota e não corresponder a uma maior profundidade de penetração da camada. Além disso, à medida que a frequência de pulsação aumenta, a taxa de entrada de calor aumenta na poça de fusão, bem como a penetração, o que não é favorável para o processo multicamadas, devido aos graus de refusão das camadas anteriores.

Quanto ao aumento da velocidade de alimentação do arame implica na maior intensidade de corrente necessária para fundir o metal e aumenta a taxa de deposição. Não se pode negligenciar a distância bico de contato peça, que também afeta a taxa de fusão do arame devido ao aquecimento por efeito Joule do comprimento livre de consumível para fora do bico de contato. A Figura 4.19 apresenta os valores médios de reforço e largura obtidos na parede com a técnica de alterar os parâmetros e é possível verificar que a camada solidificada apresentou uma constância quanto ao comprimento de sua seção transversal.

Como pode ser visto em (a) e (b) da Figura 4.19, a largura da camada aumenta ao longo da deposição, exceto entre a 4 e 6 deposição, o motivo disso é que o perfil da seção da camada 4 pode ter assumido uma geometria com convexidade acentuada, com isso, a quinta camada precisa depositar mais material.

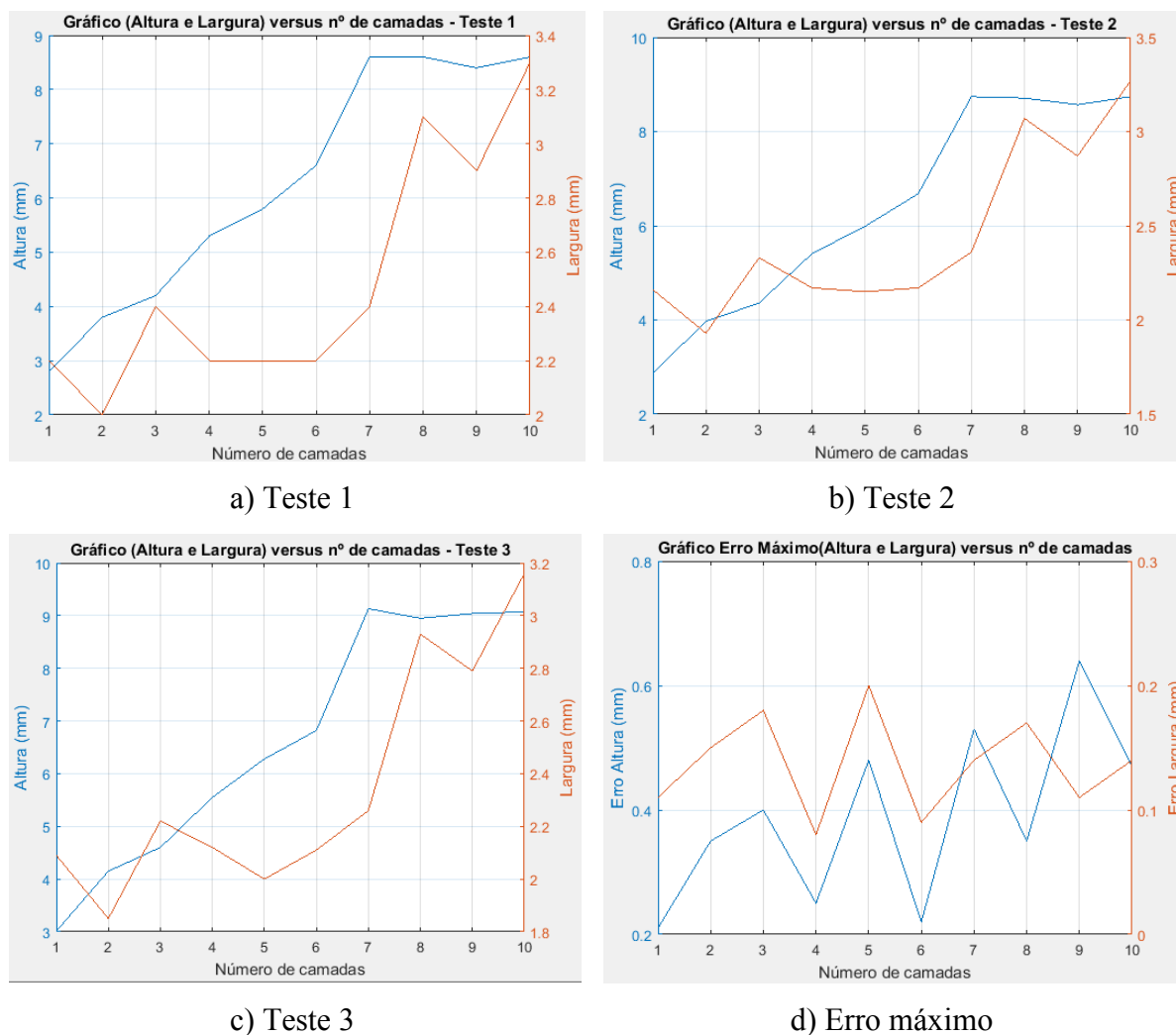


Figura 4.19: Relação reforço e largura com o número de camadas.

Fonte: o autor, 2020.

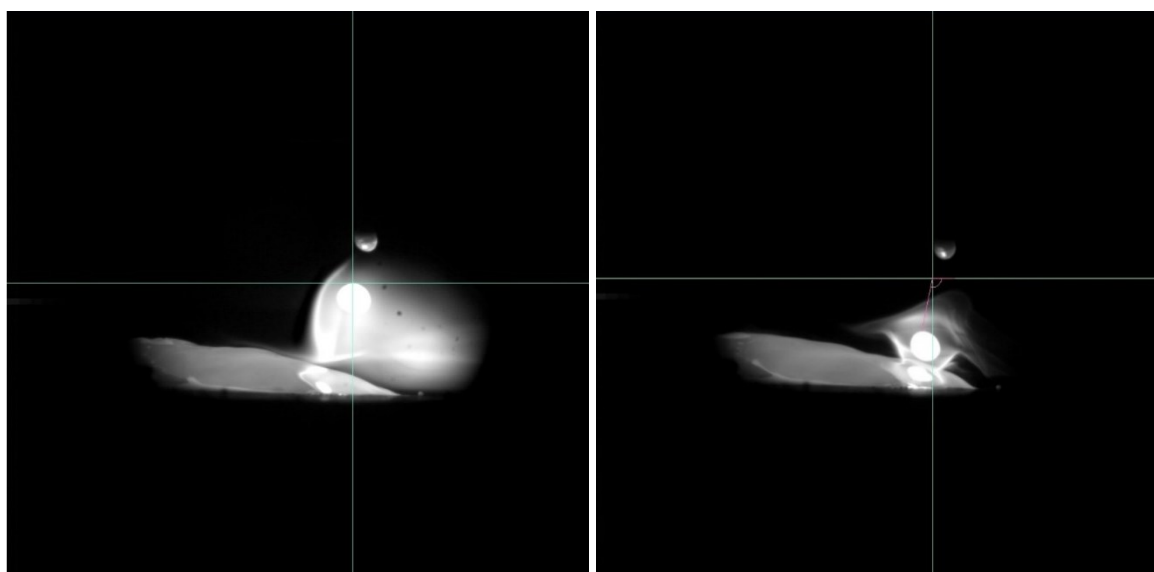
A Figura 4.19(a), (b) e (c) demonstram que a relação entre a largura e altura se manteve linear e esse crescimento apresenta a tendência da parede ser fina na base e larga no topo. Os três experimentos mostram um erro máximo de 0,64 mm na largura e 0,20 mm na altura da camada. A discrepância pode ser causada pela incerteza da solidificação da poça de fusão. A modulação do processo pulsado com a tensão de referência mostrou ter um efeito de autocorreção eficiente para manter o comprimento do arco constante durante a deposição. Isso garante que a corrente de pico realmente provoca um estrangulamento uniforme garantindo o destacamento da gota periodicamente.

4.3 Análise das Imagens Obtidas

Com o monitoramento da porção do metal fundido, baseado em um grande número de imagens obtidas em um intervalo curto de tempo, torna-se capaz de compreender, mapear e controlar os parâmetros do processo, com base na redução do aporte térmico para uso no processo da Manufatura Aditiva por Deposição a Arco.

Com a câmera de alta velocidade, foi possível realizar as medições do tamanho da gota e a sua taxa de transferência para a poça de fusão e acompanhar a evolução da geometria das camadas. Assim também um sistema de aquisição de dados, sincronizado com o sensor de imagem, foi utilizado para coletar os sinais elétricos de tensão e corrente, a uma taxa de amostragem de 10 kHz. Na série de experimentos relatados aqui, foi possível confirmar a instabilidade que ocorre no início do processo e que não será discutido.

A Figura 4.20, apresenta informações da transferência metálica com o deslocamento da gota desde seu desprendimento do eletrodo até o instante antes do impacto com a poça de fusão. Esta percorreu aproximadamente 2,76 mm a uma velocidade de 322 mm/s e se deslocou $11,31^\circ$ em relação ao ponto inicial de medição. A trajetória da gota é induzida neste caso apenas pelas forças eletromagnéticas e deflexão do arco e quando este se encontra no período de pulso da corrente, apresenta uma intensidade de luz e de pressão mais fortes. Quanto ao perfil da camada, este se justifica a partir da extinção do arco, há uma redução repentina de entrada de calor e o movimento de refluxo é interrompido.



a) Desprendimento da gota.

b) Instante antes do impacto.

Figura 4.20: Transferência Metálica.

Fonte: o autor, 2020.

Com o uso do *software* *Cine Viewer* da Vision Research® foi possível determinar a velocidade e acompanhar a trajetória desenvolvida pelas gotas e visualizar que os impactos periódicos destas promovem flutuações dinâmicas na poça de fusão e o período da onda medido nas imagens é de aproximadamente 7,5 milissegundos. A frente da poça de fusão é pressionada para baixo pelo arco e a ação da gota, o que faz o metal fundido fluir em direção da cauda durante o tempo de pico. Quando na corrente de base, a onda trás o líquido para frente devido à redução da força do jato de plasma. Com a frequência utilizada, o ciclo completo de oscilação da poça de fusão pode ser observado, uma vez que houve tempo suficiente para formação e “salto” da onda antes da próxima gota. Na análise do oscilograma com as imagens, comprovou-se que a gota destaca na transição da corrente de pico para de base, isso está relacionado à força de aceleração que está submetida durante o maior valor de corrente, em que acelera a gota e a pressão do arco é capaz de promover o destacamento.

Ao avaliar os diâmetros efetivos das gotas, em que o limite de cada uma foi determinado a partir das áreas transversais paralelas à direção de deposição, não determina necessariamente o volume, no entanto foi considerada seu formato como esférica. O crescimento e o destacamento das gotas dão origem a flutuações nos sinais elétricos. Em particular, para gotas grandes e para um arco estável, as flutuações dão origem a picos bem definidos nos espectros de potência dos sinais e da frequência de desprendimento da gota. Existe uma relação entre o volume da gota do metal depositado e a área superficial da camada solidificada, de modo que, quanto maior a área da camada, maior será a energia utilizada no processo. O benefício de se de garantir a transferência de uma gota por pulso permitiu correlacionar a taxa de deposição com a frequência, o que garante um melhor resultado na aparência do depósito e penetração em comparação a mais ou menos de uma gota por pulso.

Com a câmera posicionada a 90° em relação a tocha, é possível identificar a parte já solidificada da camada conforme a Figura 4.21, a qual apresenta ainda a interação do sistema de aquisição de dados e as imagens da transição da corrente, sendo que a menor luminosidade do arco ocorre durante a corrente de base.

O impacto de gotículas de metal fundido na poça de fusão contribui com troca de energia, aumento no volume e comportamento dinâmico, o que afeta a forma da superfície e impacta no comprimento e o perfil da camada. O comprimento do arco apresenta variação a partir dos valores médios de corrente e tensão e com o aumento da I_m , ocorre uma oscilação no comprimento do arco, porém, com ampliação dos diâmetros do sino formado pelo arco.

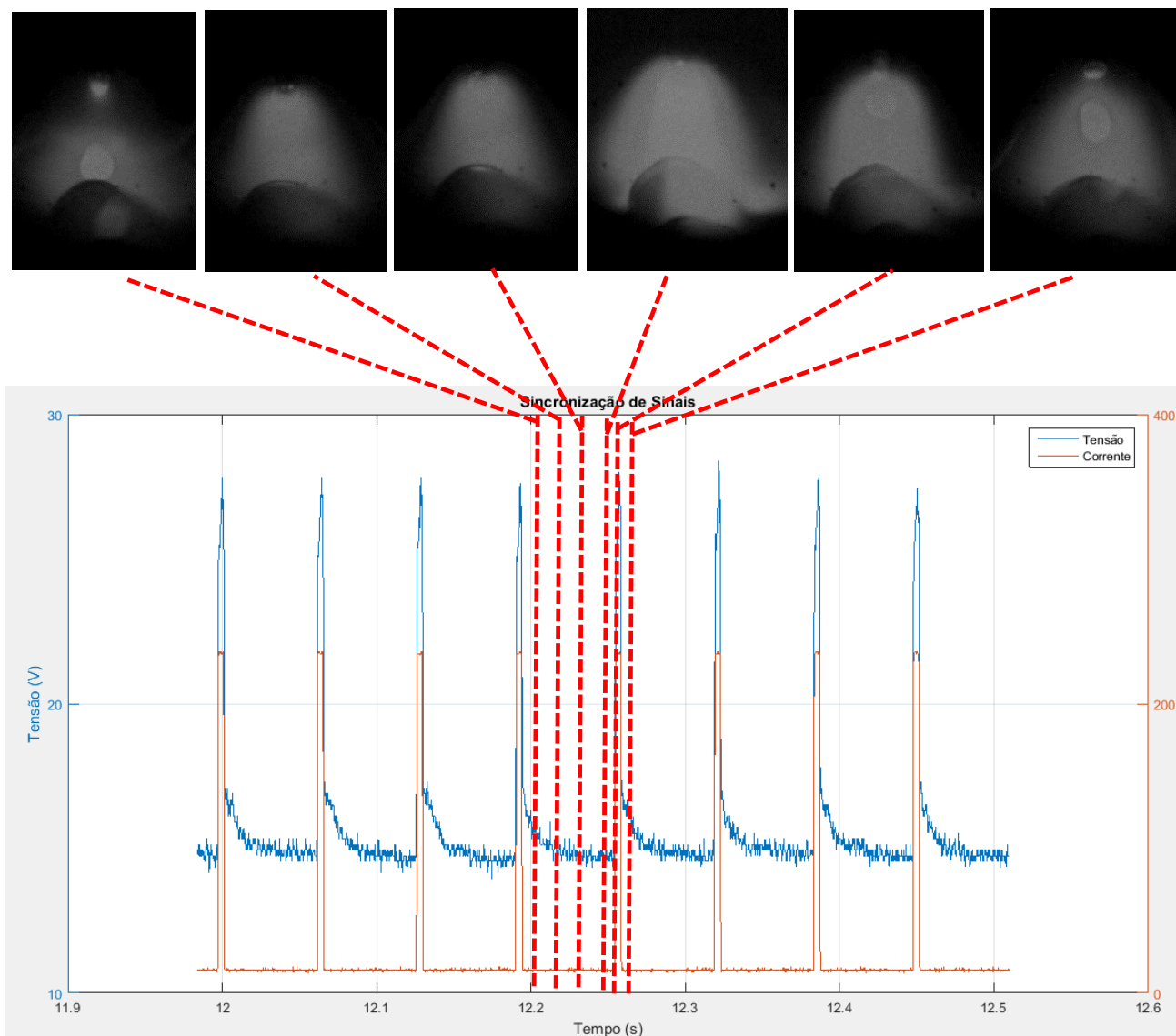
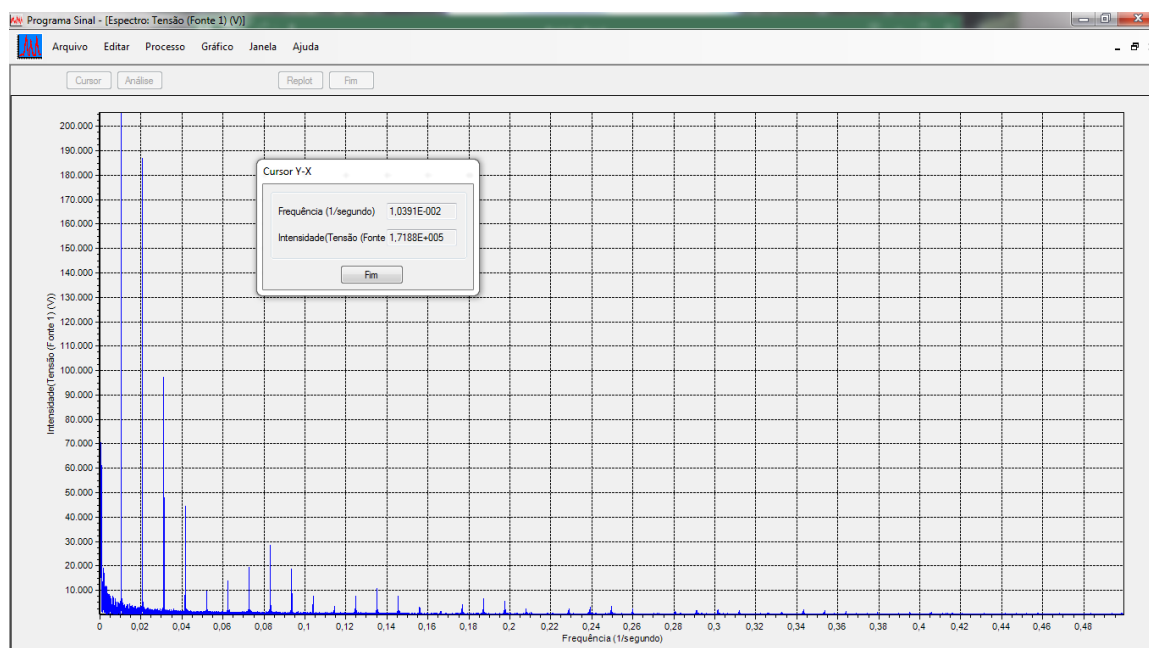


Figura 4.21: Transição dos níveis de corrente.

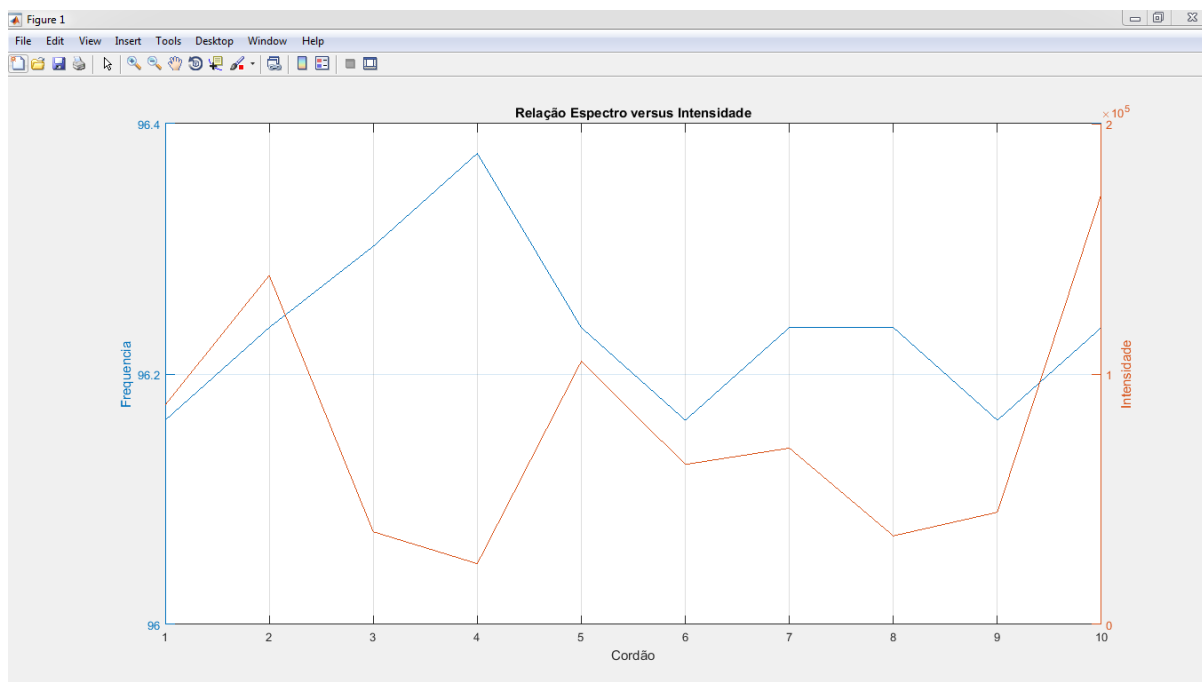
Fonte: o autor, 2020.

A corrente de pico seguida de uma elevação imediata da tensão, altera diretamente a pressão do arco, baseada na força eletromagnética, que aumenta ao quadrado da corrente e promove uma pressão e deformação da poça. Ocorre uma pequena e rápida variação do comprimento do arco elétrico, o que promove uma variação de pressão e a quantidade de calor sobre a poça, devido a densidade de potência sofre alteração assim como a temperatura média do metal fundido. Por fim, a intensidade luminosa aumenta significativamente, imediatamente após o destacamento, origina-se da elevação do comprimento do arco. Com o aumento da extensão livre do eletrodo a resistência ôhmica na passagem da corrente também se eleva, que promove a diminuição da corrente e provoca uma redução mais considerável na luminosidade quando comparada ao efeito do ciclo de transferência, como pode ser visto pela modificação da luminosidade do pulso para base.

Com os sinais elétricos de tensão obtidos com o uso da DAQ, foi possível gerar o espectro de Fourier, conforme a Figura 4.22(a).



a) Espectro de tensão e intensidade.



b) Relação entre Espectro, Intensidade e Camadas.

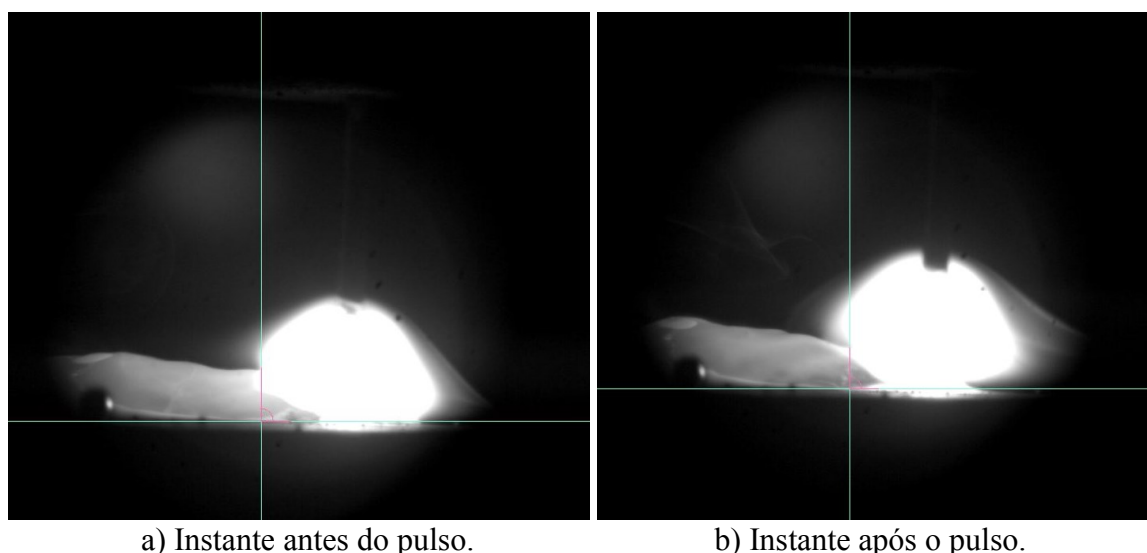
Figura 4.22: Espectro de frequência da tensão.

Fonte: o autor, 2021.

O espectro de frequência da tensão mostra que o valor mais significativo é aproximadamente de 96 Hz, para todas as camadas, porém, conforme Figura 4.22(b) os valores de intensidade de tensão sofrem variação considerável. O comportamento do sinal elétrico da

tensão reporta na formação da gota na ponta do eletrodo e seu movimento em pequena amplitude, ocorre durante o período de corrente de base, com crescimento do volume do metal fundido em curto espaço de tempo.

O uso da câmera de alta velocidade auxiliou na determinação da frequência de oscilação da poça de fusão por meio do monitoramento de imagens superiores e laterais, com base nas alturas das cristas formadas pelas ondas e suas posições a cada *frame* de acordo com a taxa de amostragem, conforme a Figura 4.23, que possui um *link* para acesso e visualização do vídeo. As periodicidades mais significativas para a composição do sinal se apresentam com maiores amplitudes e associa-se este valor com a medição da oscilação a partir das imagens analisadas. A partir de um número conhecido de quadros para que ocorra o deslocamento do ponto de referência.



a) Instante antes do pulso.

b) Instante após o pulso.

Figura 4.23: Perfil da poça de fusão.

<https://youtu.be/AGtDEn95QqE>

Fonte: o autor, 2020.

O impacto da gota na poça de fusão causa formação de onda e uma elevação da altura do perfil e se propaga ao longo da camada líquida. Desta forma a mudança do perfil observado pode ocorrer com a minimização das forças eletromagnéticas do arco e da pressão do plasma sobre a superfície líquida, conforme proposto por Lin & Eagar, (1985). Uma vez que, uma maior pressão do arco pode atuar na conformação da camada depositada, de forma a aumentar sua largura e reduzir o reforço, devido a força de achatamento. Estes fatores atuam no mecanismo de convecção da poça e o cisalhamento provocado pelo escoamento do gás de plasma sobre a superfície da poça, pode ocasionar o deslocamento do líquido do topo da poça para a borda e favorece a diminuição do reforço, porém, com a ocorrência do transbordamento.

Ao elevar a tensão U_{ref} , a corrente também apresentou acréscimo de potência do arco elétrico, o que sucede em ampliação na pressão que o arco exerce sobre a poça de fusão e promove uma compressão na superfície da poça e o efeito da tensão é mais significativo sobre a largura da camada, quando comparado com a profundidade, uma vez que uma variação modifica a coluna do arco elétrico.

Nas imagens obtidas dos vídeos capturados com a câmera de alta velocidade, é possível visualizar o movimento da poça de fusão. A circulação do metal fundido na parte mais alta apresenta um comportamento mais lento e isso pode estar associado a sua viscosidade alta devido a redução de temperatura, da região mais distante do arco e próximo de material solidificado. Na extremidade traseira da poça de fusão, forma uma pequena ondulação, como mostrado na Figura 4.24. Com o avanço da fonte térmica, ocorre um alongamento da região do metal fundido, o que vai de encontro ao apresentado por Ma & Zhang, (2011). O ponto em que a poça de fusão estabiliza foi identificado como na linha de fusão.

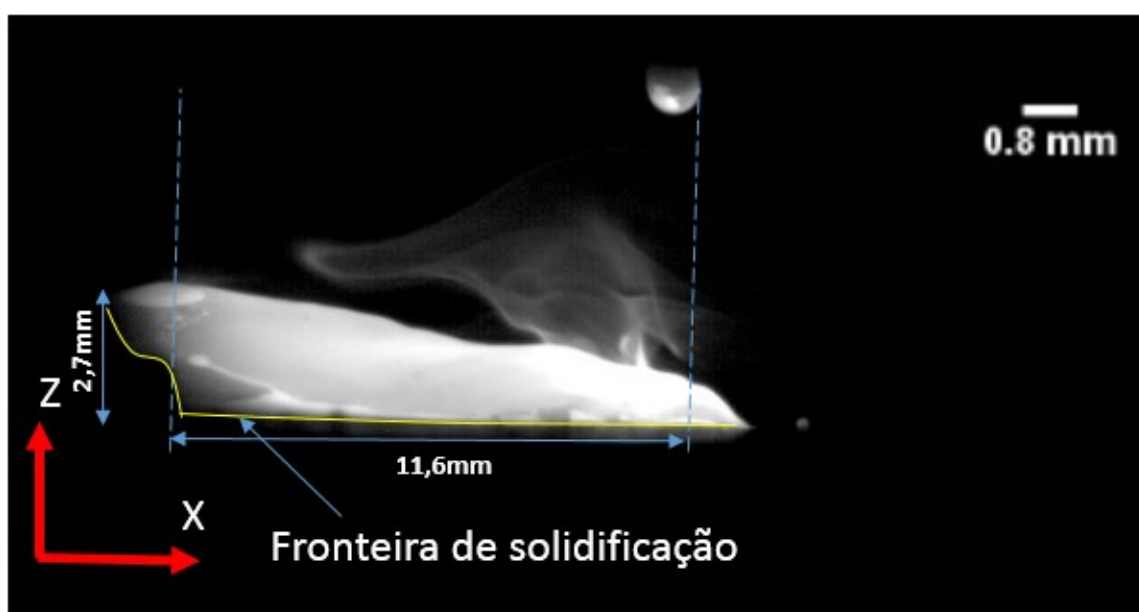


Figura 4.24: Perfil da poça de fusão.
Fonte: o autor, 2021.

Os comprimentos das poças e velocidades da onda foram obtidos a partir das imagens de vídeo de alta velocidade. A medição da velocidade da onda foi realizada seguindo a crista durante o movimento para a parte traseira da poça de fusão. As observações mostram que a dinâmica da poça durante a deposição age diretamente no comprimento do arco e quanto maior a depressão, a camada tornasse mais profunda e estreita. Mudanças da tensão do arco durante a

corrente de pico influencia na pressão do arco, na depressão e conseqüentemente não reforço da camada.

A oscilação da poça de fusão é dominada pela frequência dos pulsos que impõe a força de excitação dominante, o ajuste do período mantém a frequência de oscilação constante e, assim, obtém-se uma regularidade no comportamento da poça e formato final da camada. A possibilidade de controlar o desprendimento da gota permite controlar a oscilação do metal líquido, o que corrobora com o uso do processo pulsado.

Se a velocidade da transferência da gota não é adequada, enquanto uma gota está voando em direção a porção de metal líquido, ocorre o pulso seguinte e uma segunda gota é destacada, se ambas chegam juntas na poça de fusão, promoverão maior agitação da mesma.

Uma informação importante também obtida por meio da análise das imagens é o comportamento da poça de fusão em que a depressão de seu formato hemisférico é reduzida gradualmente após a corrente de pico. O que leva a uma análise sobre a ação da pressão do arco elétrico e a força de cisalhamento sob a superfície livre da poça de fusão, devido ao movimento do jato plasma durante o tempo de pico.

A morfologia da superfície da poça de fusão segue as características geométricas do arco elétrico e a dinâmica da transferência metálica a medida que se alteram as camadas, o que pode ser associada ao acúmulo de calor, por considerar que a parte mais alta da camada está submetida a uma maior temperatura em uma região mais estreita, se comparado com as camadas inferiores.

No posicionamento em que a câmera obteve imagens superiores da poça de fusão, é possível visualizar os limites entre a poça e o metal solidificado, bem como seu comportamento dinâmico. A morfologia do metal fundido permite prever a homogeneidade geométrica da parede. A Figura 4.25, mostra imagens especulares e as larguras da poça, neste caso a câmera está posicionada a 30° em relação à tocha com o eixo óptico no plano vertical alinhado ao eixo da camada depositada, o que permite acompanhar o comportamento dinâmico do metal fundido.

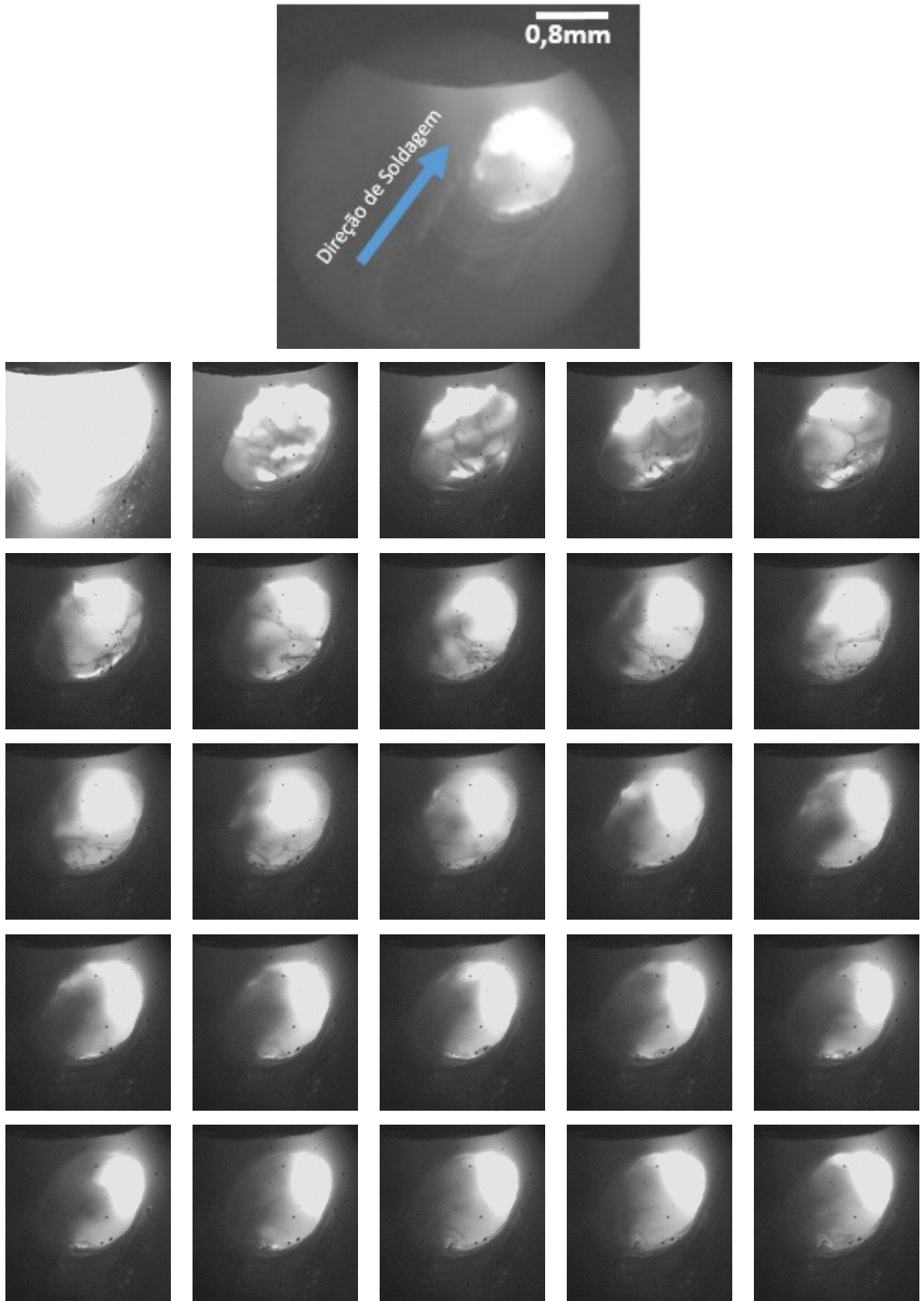
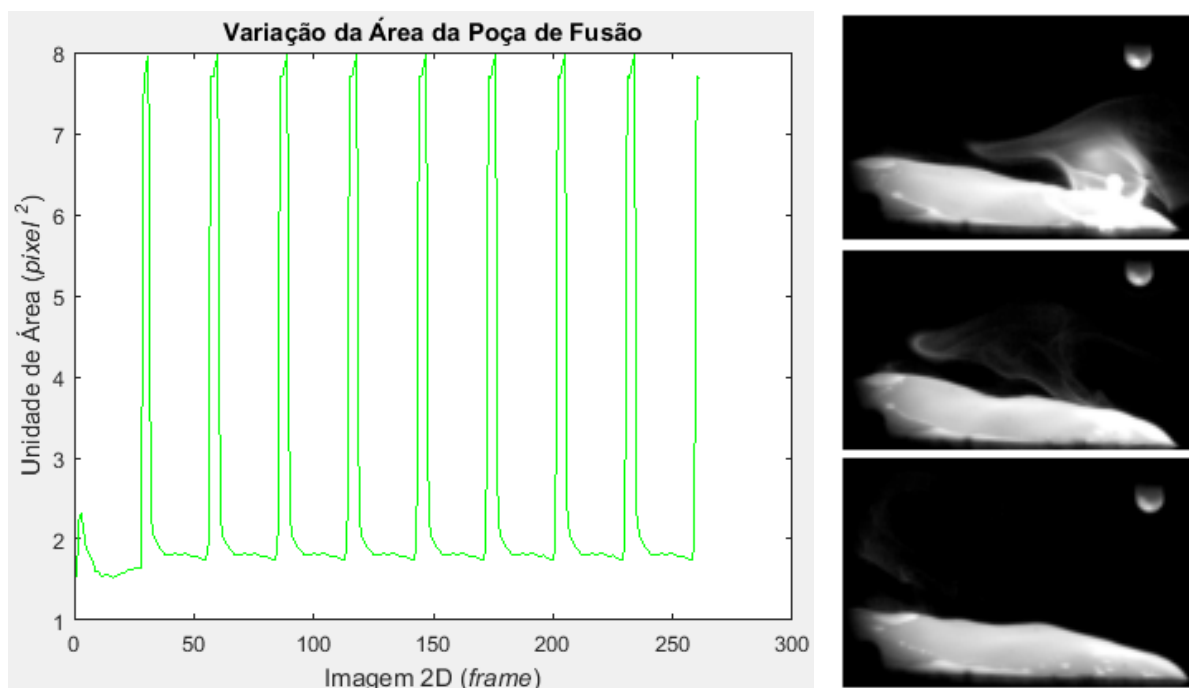


Figura 4.25: Imagem especular da poça de fusão.
Fonte: o autor, 2020.

Os impactos periódicos das gotas promovem oscilações da poça de fusão, o que muda rapidamente o padrão de reflexão. A taxa de amostragem dos quadros sucessivos permite uma análise da dinâmica da poça, em que a mesma inicia logo após a ocorrência do pulso que promove a transferência metálica e promoção da pressão do arco sobre a poça de fusão, caracterizando uma agitação da mesma. Devido à característica especular da poça, a região que apresenta maior brilho está associada a uma maior concentração de calor.

Na Figura 4.25 é possível identificar que a poça de fusão se apresenta mais larga na região frontal e gradualmente se torna mais estreita em direção à parte traseira, devido a perda de calor, além disso, a falta de uma simetria perfeita da camada, torna-se um indício de que o transbordamento tende a ocorrer mais à direita do que à esquerda. A sequência de imagens apresenta mudanças da forma da superfície da poça de fusão, devido a alteração da reflexão.

Ao avaliar os dados obtidos com os experimentos realizados, foi possível identificar que o ciclo das ondulações depende dos parâmetros do processo de deposição, tais como: tamanho de gota, velocidades de queda da gota e de alimentação do arame, potência do processo, entre outros. Devido à característica especular da poça, foi utilizado um algoritmo de processamento de imagem baseado no processo de limiarização e a detecção é iniciada da direção para que encontre as bordas e determinar a variação da área, conforme representado pela Figura 4.26(a).



a) Variação da área.

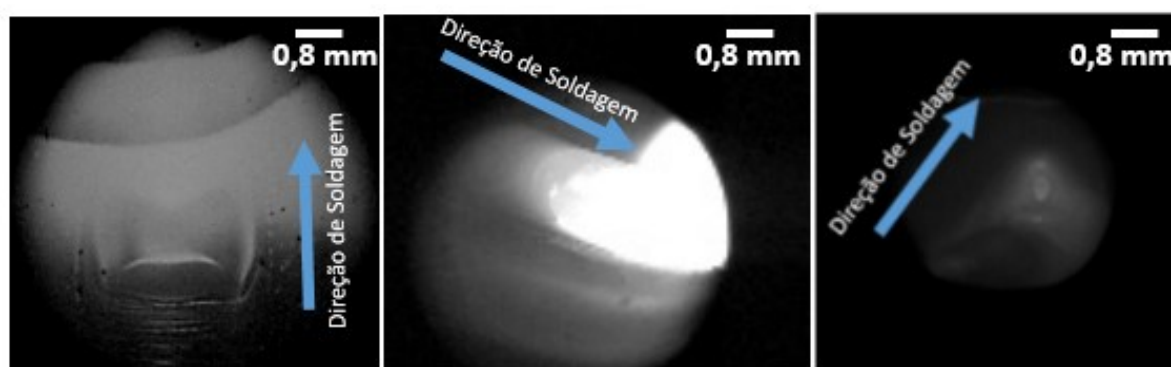
b) Poça de fusão.

Figura 4.26: Comportamento do metal fundido.

Fonte: o autor, 2021.

A Figura 4.26(b) confirma o que foi apresentado por Xiong, *et al.*, (2016), em que o metal fundido tende a fluir para trás (região em solidificação) devido à pressão do arco na poça de fusão aumenta o nível de líquido na borda e ao retornar novamente para esta região a poça de fusão sobrepõe-se devido a porção sólida, isso então converte em diferentes geometrias ao longo da camada, sendo mais representativas as alturas no início e fim, onde há uma redução gradativa com a extinção do arco, a poça de fusão com a forma inclinada não pode realizar um refluxo e solidifica rapidamente e também devido a redução repentina da entrada de calor. Se a tocha estivesse inclinada de modo a empurrar o material fundido, tenderia a influenciar na largura da camada depositada, assim como a velocidade de deslocamento da tocha. Porém, neste trabalho estes dois parâmetros foram mantidos fixos, com isso, a forma de minimizar os problemas é atuar no aporte térmico (corrente e tensão), ao longo da deposição. Os impactos das gotas na poça de fusão são influenciados pelas componentes verticais das forças e estas tendem a ser máximas na posição da tocha utilizada, ou seja, 90° promove maiores flutuações do metal fundido e este excesso de agitação da poça de fusão contribuem com a taxa de resfriamento. A oscilação da poça minimiza em poucos milissegundos devido ao amortecimento viscoso.

O dimensional do metal fundido foi obtido com a câmera de alta velocidade, conforme mostra a Figura 4.27, que possui *links* para visualização dos vídeos. O controle do tamanho da poça de fusão é necessário para minimizar o efeito do transbordamento. Na Figura 4.27(a) a poça de fusão apresenta morfologia quase simétrica e seu contorno é delineado, o que significa uma excelente estabilidade de seu comportamento e isso pode estar atribuído entre todos os parâmetros, mas acredita-se que seja mais influenciado pela inclinação da tocha.



a) Vista superior frontal.

b) Vista diagonal frontal.

c) Vista diagonal traseira.

<https://youtu.be/m-aggYFa74> <https://youtu.be/qsIaUNCYtD4> https://youtu.be/iTZgl7fl_rQ

Figura 4.27: Formato da poça de fusão.

Fonte: o autor, 2020.

Para extrair pontos característicos da camada solidificada foram utilizados algoritmos de Canny para definir os contornos ativos (Wang, Shan, Niu, Tan, & Zhang, 2014), de forma a acompanhar a deformação da região e ajustar as bordas da imagem para então segmentá-la. A área perto da cauda da poça de fusão, que está prestes a se solidificar, foi escolhida como a posição de detecção baseada principalmente na escala de cinza entre vários *pixels* para definir a borda, cujos pontos estão localizados na área solidificada podem ser assumidos como uma linha, o que facilita a extração das informações.

Outro fator importante a ser considerado para o controle da homogeneidade da parede é a trajetória desenvolvida pelas gotas durante a transferência metálica e estas tenderam a seguir linearmente em direção da poça de fusão, conforme Figura 4.28 e foi possível observar que a transferência das gotas determina a estabilidade e qualidade da deposição. A garantia do trajeto da gota também se deve por garantir que a extremidade do eletrodo se mantenha posicionado na linha de centro da camada, garantindo as tolerâncias admissíveis do processo GMAW.

A relação da posição com o tempo para cada experimento apresenta uma diferença, o que pode ser referente a forma como ocorre o destacamento em cada período sob as mesmas condições de operação, provenientes de uma variação do fluxo do plasma, na quantidade de massa fundida. Porém, observa-se que valores maiores de corrente e menor comprimento de arco apresentaram um comportamento mais homogêneo. A intensidade do brilho do arco representa um indicativo do nível da corrente, foi possível verificar que envolve completamente as gotas quando estas estão em direção da poça de fusão.

Estes resultados demonstram a importância do uso de filtros, de modo a reduzir a intensidade luminosa proveniente do arco elétrico, caso contrário, nem todas as imagens permitem obter uma característica homogênea da região de interesse. Com uma melhor imagem da poça de fusão, é possível realizar a análise do comportamento da poça que pode trazer respostas para algumas questões referentes aos dados obtidos das camadas solidificadas, assim como a questão do transbordamento e o uso desta ferramenta aliado a outras técnicas de controle podem permitir melhores qualidades na Manufatura Aditiva por Deposição a Arco.

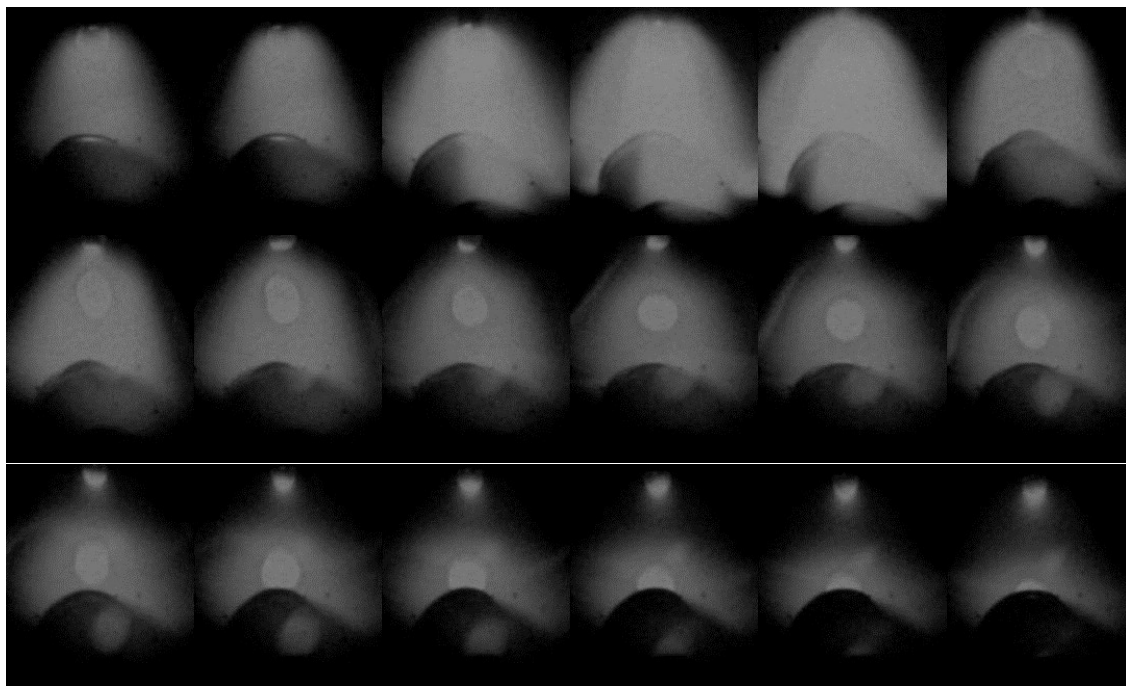


Figura 4.28: Trajetória desenvolvida pela gota.
Fonte: o autor, 2020.

A Figura 4.29(a) apresenta imagens sequenciais do ciclo pulsado e através destas é que se faz o processamento digital e a análise das informações obtidas. É importante observar que a intensidade luminosa do arco deve ser filtrada para que o máximo de informação da poça de fusão possa ser obtido, com isso, técnicas e recursos de filtragem foram utilizados para esta etapa. O processamento das imagens obtidas, para extrair informações da poça de fusão, foi a partir da binarização com o auxílio do algoritmo de Canny, conforme apresentando na sequência (b), (c) e (d) da Figura 4.29. Na Figura 4.29(c), é possível observar como a poça de fusão pode ser aproximada a uma elipse.

A implementação de algoritmos baseados em contornos ativos com o software *MATLAB*[®] a partir de técnicas de processamento para segmentar imagens permitiu identificar e medir a largura e o comprimento da poça de fusão e o uso do *threshold*, teve a finalidade de isolar a região de interesse dos demais objetos da imagem. Uma maior intensidade da poça de fusão se correlaciona a um maior valor da escala de cinza (255) que corresponde a pixel mais claro da imagem, enquanto que a fronteira com a camada solidificada é detectada por um limiar definido. A Figura 4.29(c) mostra as bordas detectadas pelo algoritmo para a poça de fusão e para os diferentes valores de parâmetros do processo, o número de *pixels* que representa a largura da região sofreu alterações, o que está associado ao aporte térmico.

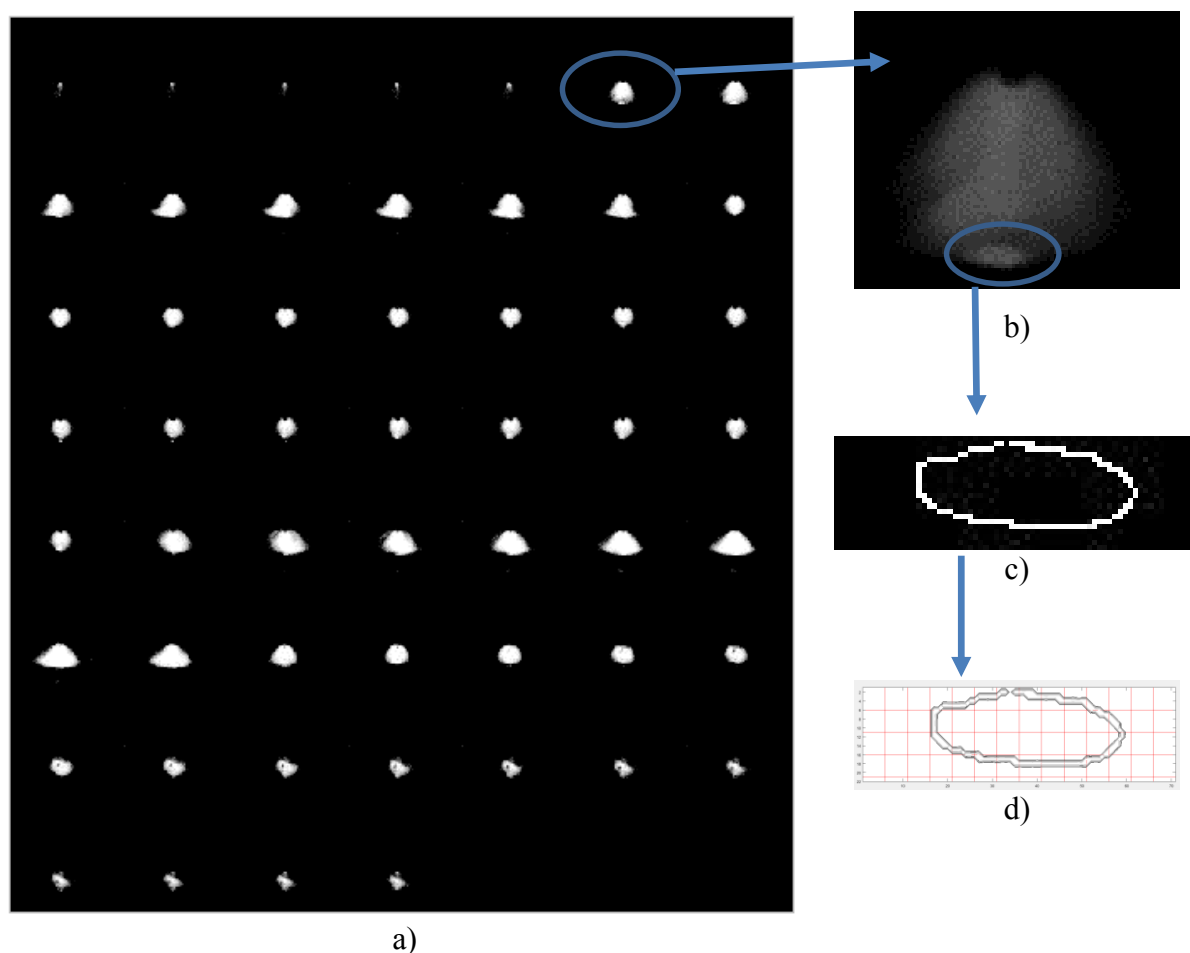


Figura 4.29: Mosaico de imagens obtidas durante o processo pulsado.
Fonte: o autor, 2019.

O valor da tensão média tende a cair com a redução do tamanho do arco elétrico, que corresponde ao aumento da alimentação do arame, conforme apresentado na Figura 4.30. Para investigar o comportamento do arco e sua predominância na tensão do arco, o processamento das imagens foi realizado e correlacionado com os sinais de tensão obtidos pelos oscilogramas a partir da conversão da intensidade da luz do arco em um intervalo de escalas de cinza arbitrárias, que representam qualitativamente a estrutura do arco.

Como o diâmetro do arco é menor na região próxima ao eletrodo, as forças eletromagnéticas tendem a ser maiores neste local, do que próximo da peça, conseqüentemente a pressão interna na coluna de plasma também apresenta esta mesma característica. O comprimento da região do arco mais brilhante foi quantificado medindo a distância entre a parte inferior da gota e a poça de fusão.

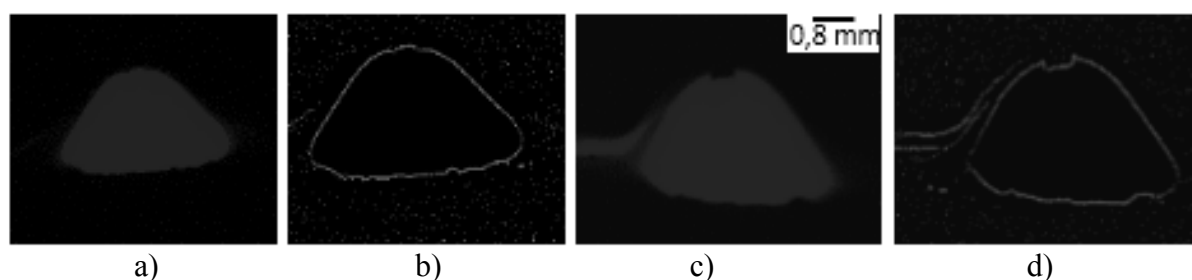


Figura 4.30: Comportamento do arco elétrico.

<https://youtu.be/J5eYwppt2n4>

(a) e (c) Imagens originais do arco. (b) e (d) Aplicação do filtro Gaussiano.

Fonte: o autor, 2021.

Com uma distância entre bico de contato e o substrato de 16mm, o arco apresentou propriedades estáveis. A variação da extensão livre do eletrodo tem efeito nas características de transferência metálica, uma vez que o aumento no seu comprimento diminui o tamanho das gotas e aumenta a frequência de transferência, reduzindo a corrente de transição, o que pode ser utilizado para aumentar a velocidade de alimentação, sem que haja um aumento real na energia aplicada.

A medição da extensão do arco ocorreu em diferentes momentos do processo e decorre em um valor médio de 3,9 mm, conforme mostra a Figura 4.31. A variação do comprimento do arco elétrico muda drasticamente devido a necessidade de fusão do arame que é continuamente alimentado e segue uma sequência para garantir a transferência regular do metal fundido.

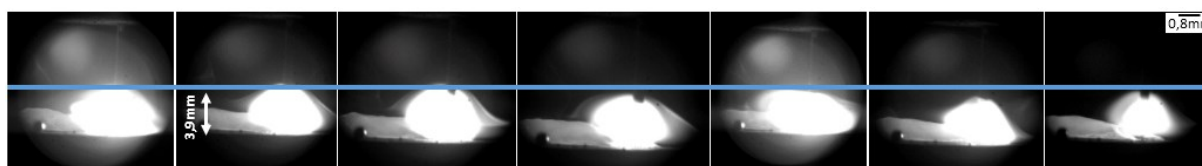


Figura 4.31: Análise do comprimento do arco.

Fonte: o autor, 2020.

As imagens representam os instantes de transição entre os níveis de corrente o que permite determinar visualmente a distância entre a ponta do eletrodo de arame e a superfície da poça de fusão. O aumento da frequência dos pulsos, promove um crescimento da transferência do metal para a poça de fusão, faz com que se aumente a largura da camada depositada, este fenômeno pode estar associado com a velocidade de alimentação do arame e a conseqüente taxa de deposição.

A tensão do arco oscila com a pulsação da corrente e a variação do valor da tensão não apresenta correspondência única com o comprimento da coluna de plasma, pois mesmo que este permaneça com o mesmo comprimento, as mudanças dos níveis de corrente, bem como a transição entre base e pulso geraram sinais de tensão variantes no oscilograma. Foi observado também o efeito de estricção da gota metálica que contribui para o aumento do valor da tensão na fase de pulso. A redução do comprimento do arco, ou seja, a tensão de referência, mantidas as demais variáveis foi possível obter uma potência reduzida para a formação e volume da gota.

O grau de sobreposição das camadas é diretamente impactado pela distância das bordas, o monitoramento da largura da camada mostra-se uma tarefa muito importante para o uso na técnica de Manufatura Aditiva. O monitoramento realizado com as imagens obtidas da espessura da camada por meio da visualização da poça de fusão e alteração dos parâmetros do processo, tem como objetivo manter a parede com uma área de sobreposição de modo manter a homogeneidade do perfil.

Na Figura 4.32 é exibida a imagem em que o arco elétrico abraça o perfil da camada já solidificada, uma vez que ao analisar a transferência metálica que ocorre devido a energia da coluna de plasma adjacente à área da poça de fusão, que é o meio de transferir calor para a chapa. Em (b), (c) e (d) da Figura 4.32 é aplicado um filtro passa-alta com máscara de tamanho 5x5 o que permite visualizar a convexidade do perfil do arco sobre as camadas já depositadas e para que possa minimizar o efeito do transbordamento a poça de fusão deve estar posicionada na menor região convexa possível, assim como a trajetória da gota. O fluxo no arco elétrico quando desvia da linha do centro do eletrodo de arame, indica que a densidade de corrente é maior no ponto mais baixo do arame fundido, o que promove a força de aperto magnético na região conduzindo um forte jato na direção da poça de fusão. O aumento da tensão de referência influencia diretamente na geometria da camada, pois reduz a intensidade da corrente, o que significa menor ação dos campos magnéticos e menor concentração da pressão sobre a poça de fusão.

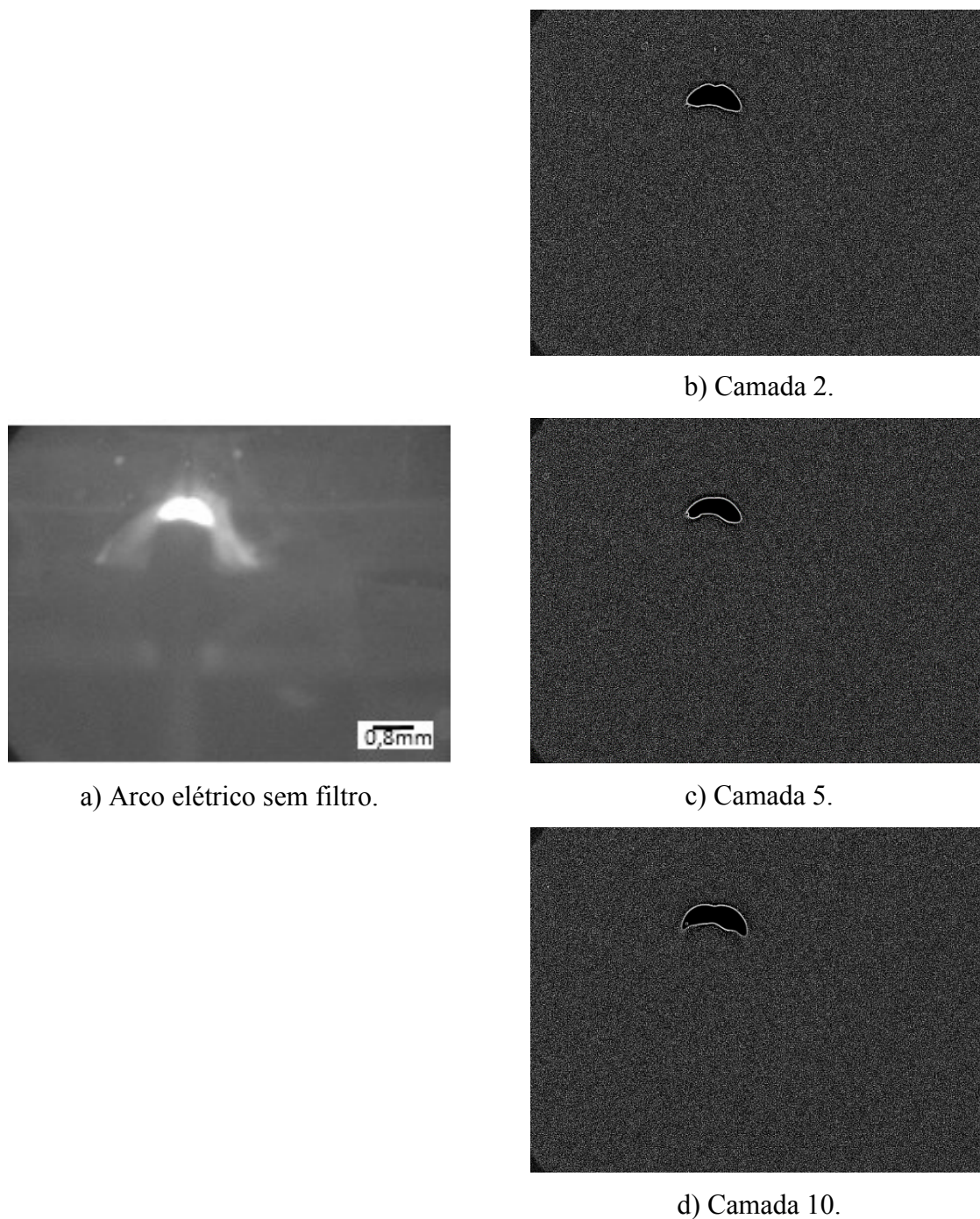
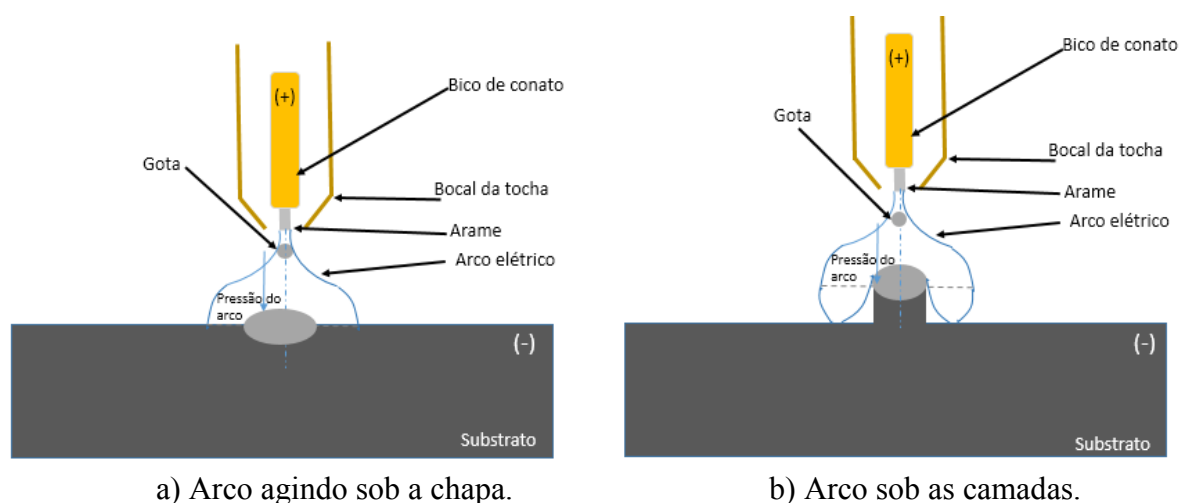


Figura 4.32: Imagem do arco elétrico.
Fonte: o autor, 2020.

A variação na intensidade da luminosidade do arco elétrico no instante de pulso foi identificada um comportamento que varia de acordo com a quantidade de camadas, sendo que as primeiras apresentam menos intenso e há um acréscimo de seu valor com o aumento do número de das camadas e se manteve aproximadamente constante a partir da quinta camada. O uso da câmera de alta velocidade com aplicação da função EDR permitiu detectar áreas claras e escuras na mesma imagem que apresenta elevada intensidade, auxiliando na análise da

convexidade do arco elétrico. Com isso, surge uma explicação para se alterarem os parâmetros à medida que as camadas são depositadas, de modo a manter a intensidade do arco com o objetivo de manter a largura homogênea.

O esquemático representado na Figura 4.33, apresenta uma análise, em que a diferença de potencial entre as extremidades do arco varia com a geometria do local de confluência, em um primeiro caso a pressão da coluna de plasma age sobre uma chapa plana, região a qual possui uma maior área de incidência minimizando a força.



a) Arco agindo sob a chapa.

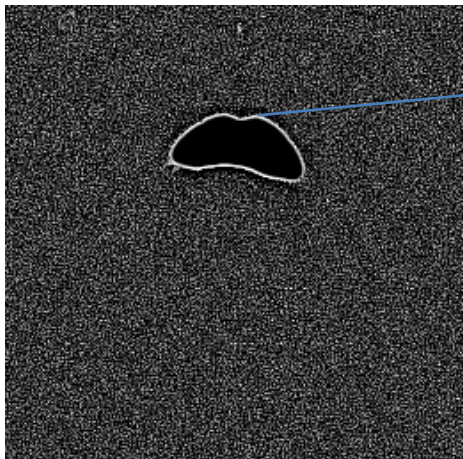
b) Arco sob as camadas.

Figura 4.33: Atuação do arco elétrico de acordo com o perfil.

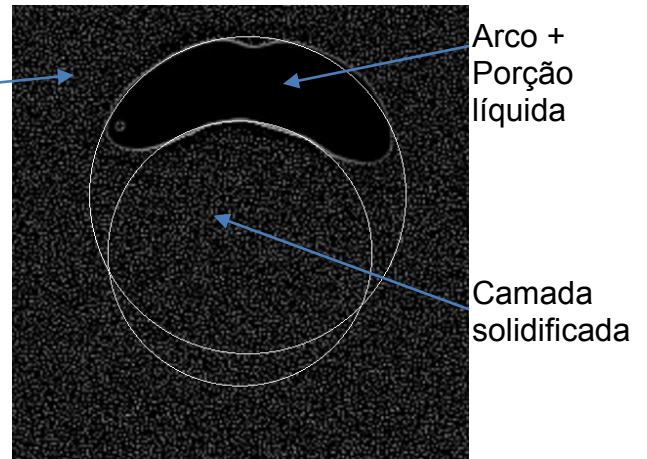
Fonte: o autor, 2021.

Na Figura 4.33(b), mesmo com uma perda do jato do arco elétrico devido a convexidade da superfície e a energia incide na região que possui área reduzida, o que concentra sua força neste local, há um aumento da potência específica do arco, pressão e consequentemente o calor imposto. Para o GMAW-P a pressão do arco depende da relação de corrente de pico/base e frequência f . A pressão do arco aumenta consideravelmente com o aumento da razão entre as correntes. A alta pressão do arco empurra o metal líquido para o lado e para a frente na direção da camada. No entanto, ao variar os parâmetros durante o processo e com a análise das imagens obtidas, devido a minimização do agito da poça, tudo isso leva a acreditar que há uma frequência (f) que otimize o movimento do metal fundido, uma vez que a superfície de deposição não é mais plana, o que pode contribuir na redução do efeito de transbordamento.

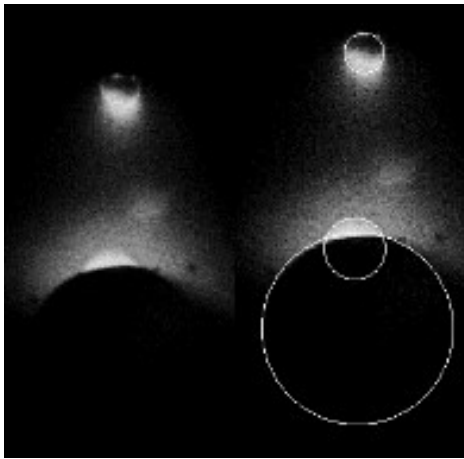
Alterar os parâmetros do processo faz com que a poça esteja concentrada na menor região convexa, conforme proposto na Figura 4.34, que baseia na reconstrução por aproximação por círculos.



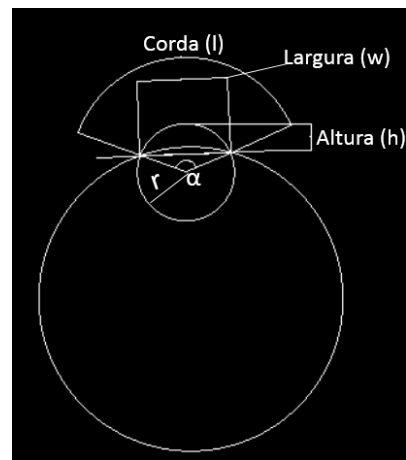
a) Arco elétrico sobre a camada.



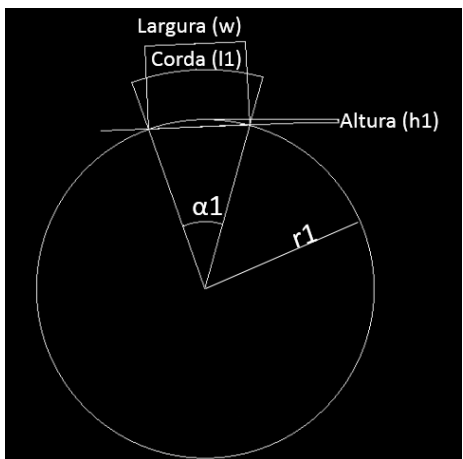
b) Aproximação por círculos.



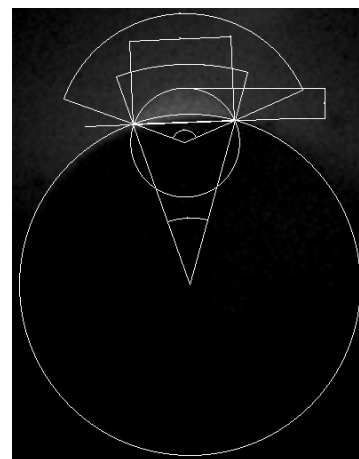
c) Identificação dos elementos na imagem.



d) Modelamento da gota sobre a camada.



e) Modelamento da camada solidificada



f) Área de incidência sobre a camada.

Figura 4.34: Modelo baseado nas imagens do arco elétrico sobre os perfis das camadas.

Fonte: o autor, 2021.

A causa do transbordamento está associada à convexidade da superfície, pressão do arco, força da gravidade, acúmulo de calor que aumenta devido a redução da taxa de resfriamento à

medida que a parede cresce, com isso, a camada superior apresenta maior volume e dificuldade em solidificar, o que facilita a fluidez do metal líquido para as laterais.

Sabe-se que o calor imposto, o volume da poça de fusão, dentre outras características resultam na qualidade geométrica, mecânica e metalúrgica da camada depositada, um conhecimento dos parâmetros pode garantir o sucesso do processo. Com isso, à medida que a camada de deposição aumenta sua altura, a poça de fusão tendeu a se tornar mais estável, o que pode estar associado à melhora na condução de calor nas camadas superiores.

Com o aumento do número de camadas, o IC e a molhabilidade indicam influências diretas na largura, conforme apresentado pela Figura 4.34(a). Com o aumento da altura da camada, há um indicativo do aumento da área. A relação da altura/largura no processo pulsado foi controlado por meio da taxa de fusão do arame.

Uma linha de referência que une os vértices para obter a área de contato da gota com o cordão já solidificado, é proposta na Figura 4.34(c). E a intersecção entre as duas circunferências modeladas indica o ângulo, consequentemente o índice de convexidade, Figura 4.34(d).

Ao produzir uma peça, os principais parâmetros geométricos a serem controlados são a largura e a altura da camada depositada. Essas dimensões são provenientes da poça de fusão, e resultam da interação entre a potência do arco, velocidade de deslocamento, taxa de deposição, temperatura de interpasse e propriedades do material.

A literatura indica que há um aumento gradual da largura do perfil da parede entre a primeira e a quinta camada, e então tende a se manter constante (Shukla, Dash, Kiran, & Bukkapatnam, 2020). É evidente que a camada já existente é refundida pela nova deposição, o que resulta e comprova a formação de um perfil em forma de arco. Como a energia do arco e sua pressão variam de maneira distribuída gaussiana, a maior intensidade está concentrada na região do central, que apresenta menor área, o que eleva a potência específica, o que resulta em uma maior quantidade de metal refundido. Para o cálculo da área de incidência sobre a camada, conforme o modelamento proposto na Figura 4.34(f), obtém-se a seguinte relação:

$$w = 2 * r * \text{sen} \frac{\alpha}{2} \rightarrow 2 * \sqrt{h(2 * r - h)} \quad (4.1)$$

$$h = r - \sqrt{r^2 - \frac{w^2}{4}} \quad (4.2)$$

$$S_{\text{área1}} = \frac{1}{2} * r^2 * \left(\pi * \frac{\alpha}{180} - \text{sen}\alpha \right) = \frac{l * r - (r - h) * w}{2} \quad (4.3)$$

$$S_{\text{área2}} = \frac{1}{2} * r1^2 * \left(\pi * \frac{\alpha1}{180} - \text{sen}\alpha1 \right) = \frac{l1 * r1 - (r1 - h1) * w}{2} \quad (4.4)$$

$$S_{\text{área}} = S_{\text{área1}} - S_{\text{área2}} \quad (4.5)$$

Para as condições de operação em que o tamanho da gota tende a aumentar, consequentemente a área de incidência também aumenta, o que corrobora com o modelo proposto para redução do parâmetros para minimizar defeitos geométricos. O modelo identificou que com maiores valores de corrente média, maior foi a área da poça de fusão, o que pode estar relacionado com a elevação das forças eletromagnéticas.

O modelo indica a sensibilidade da geometria na deposição sucessiva de camadas, e com as imagens obtidas, uma análise da molhabilidade permitiu determinar uma melhora superficial quanto ao problema do tranbordamento. Mais uma vez, ressalta-se a necessidade de controle do tamanho da arco elétrico/gota, pois este valor influencia diretamente na área de contato sobre a superfície já solidificada. Reduzindo a energia do processo, por meio da corrente média, a pressão do arco e o impacto das gotas na superfície da poça de fusão, são minimizadas, o que pode indicar uma menor capacidade de refusão das camadas inferiores. A Figura 4.35 resume os fatores que influenciam na regularidade do perfil.

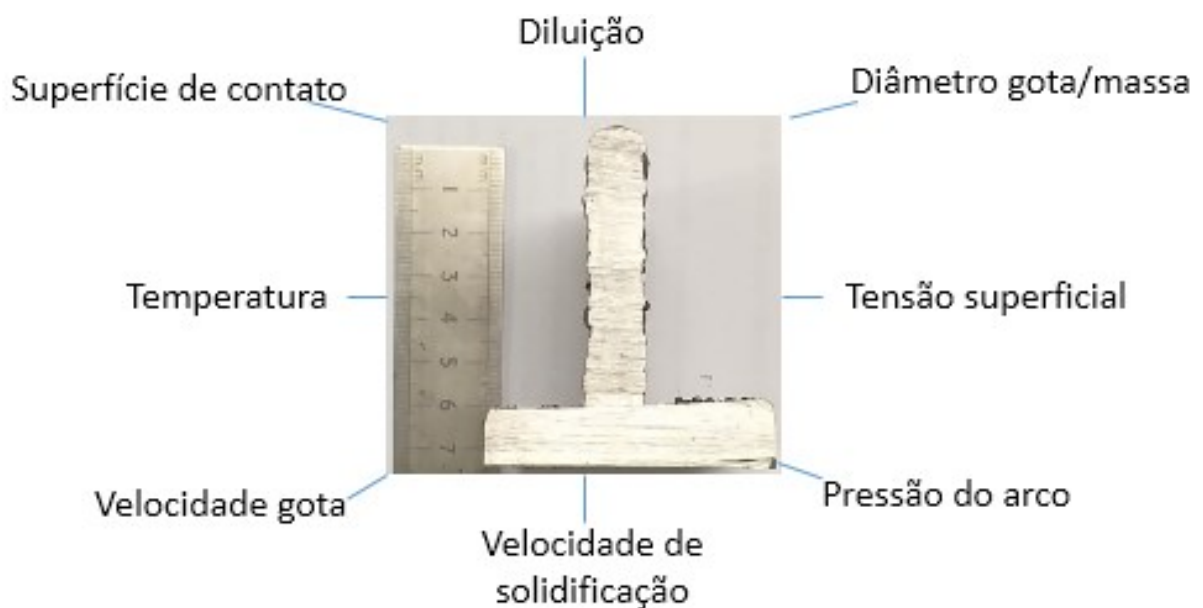


Figura 4.35: Fatores que influenciam na geometria da camada.

Fonte: o autor, 2021.

5 Conclusões

Como a Manufatura Aditiva é uma tecnologia emergente, ainda há uma série de técnicas e desafios que precisam ser superados para garantir a confiabilidade do processo e qualidade das peças produzidas. Essas evoluções podem ser divididos em três categorias distintas: precisão de fabricação, garantia de qualidade e automação do sistema.

Neste trabalho desenvolveu-se um sistema de controle e monitoramento de processos de Manufatura Aditiva por Deposição à Arco, proporcionando contribuição às diferentes linhas de pesquisa que são trabalhadas na MADA.

A medida que ocorrem as deposições das camadas, estas tendem a se apresentar mais volumosas e difíceis de solidificar, em relação à base que se apresenta mais estreita., Com o uso da técnica de avaliar o comportamento da poça de fusão na transferência metálica pulsada, foi possível identificar a influência direta dos parâmetros do processo na geometria das camadas depositadas e promover o controle dos sinais garantindo uma geometria da parede mais homogênea, beneficiando-se então da eficiência do material depositado.

As conclusões serão apresentadas conforme os tópicos apresentados na metodologia:

1 – Manipulador robótico: atualização, adequação e operacionalização do sistema de controle de um robô remanufaturado, para que a partir de um modelo CAD desenvolvido fosse possível converter as coordenadas deste para o robô realizar a trajetória proposta, baseado em CAM, sem uso de uma linguagem proprietária. Além da interação com outro manipulador robótico e a configuração de uma célula de manufatura cooperativa. Orientar a peça e a tocha permite que as geometrias possam ser criadas sem uso de suportes para sustentar a estrutura, ou produzir peças complexas.

2 – Parametrização do processo de Manufatura Aditiva: a integração entre um computador, sistema de aquisição de dados e a fonte de processo, permitiu inferir nos parâmetros durante as deposições. Para as condições deste trabalho é possível concluir que:

- a. Com o aumento da corrente média, há um crescimento da largura e do reforço à medida que as camadas sobrepostas são depositadas, o que é favorável para alcançar a altura projetada para a parede.

- b. A frequência de pulso não afetou o reforço, mas sim a penetração e a largura em níveis baixos de correntes médias. O uso da pulsação da corrente possibilitou alterar as características geométricas da parede;
- c. O arco elétrico necessita de uma região que seja suficientemente capaz de suportar sua base para que não promova a fusão das laterais da camada, além de permitir uma maior estabilidade do arco no topo da camada.

3 – Sistema de visão: possibilidade de aquisição de imagens do comportamento da poça de fusão, transferência metálica e arco elétrico, auxiliou no modelamento da camada e permitiu inferência no processo, de modo que a energia do processo fosse reduzida de acordo com a área de incidência, minimizando a potência específica, bem como o volume e o peso da poça de fusão.

Devido a superfície convexa que apresenta menor área de contato, o efeito do transbordamento é iminente e conseqüentemente a heterogeneidade da largura e com base no modelo desenvolvido que avalia o comportamento do arco elétrico foi possível desenvolver uma forma de contribuir para minimizar o efeito da curvatura na geometria desenvolvida.

A partir do problema identificado e a metodologia proposta obtiveram avanços, porém, devido a taxa de frames por segundo, o processamento não foi capaz de permitir uma inferência em tempo real no processo, o que fica como uma sugestão para trabalhos futuros, para otimização dos algoritmos para o tratamento das imagens, conforme apresentado na próxima seção.

6 Sugestões de Trabalhos Futuros

- Dar continuidade ao trabalho e finalizar o controle adaptativo, com correção de trajetória e velocidade de deslocamento do robô.
- Com os dados experimentais obtidos, estes serão utilizados para uma modelagem matemática, com adição das informações de temperatura, para gerar a simulação do comportamento do processo via *software*. O que pode permitir controlar o tamanho da poça de fusão.
- Realizar um estudo comparativo quanto a influência da quantidade de gotas por pulso na geometria e microestrutura da parede confeccionada.
- Agregar sistemas de manipulação do arco elétrico, como os propostos por Corradi (2020) e Juliani (2021).
- Desenvolver um método que possibilite determinar a largura da camada medindo a frequência natural do movimento da poça.
- Adicionar e alterar os parâmetros de velocidade de deposição e inclinação da tocha para ajuste de novos modelos propostos.
- Investigar e caracterizar a microestrutura e propriedades mecânicas, com a alteração do aporte térmico.
- Realizar maiores análises com diversos ângulos da peça e tocha (GA: *Gravity Aligned*; NGA: *Non-Gravity Aligned*), com o objetivo de “segurar” a poça de fusão no lugar.
- Utilizar sistema de visão estereoscópica que permita a reconstrução tridimensional das camadas depositadas e implementar um controlador automático para medição das alturas da camada e comparar com o valor previsto, a fim de evitar depositar muito ou pouco material, fazendo com que o sistema se torne estável.
- Desenvolver um modelo otimizado com Rede Neural Artificial baseado na aquisição dos dados, processamento e estratégia de classificação para melhor predição da geometria da camada, baseado nos parâmetros do processo aqui tratados.

7 Referências Bibliográficas

- Alberti, E. A., Silva, L., & d' Oliveira, A. (2014). Manufatura Aditiva: O Papel da Soldagem Nesta Janela de Oportunidade. . *Soldagem e Inspeção*, Vol.19 N°02 p.190-198.
- Allum, C. J. (1985). Metal Transfer in Arc Welding as a Varicose Instability: I. Varicose Instability in a Current-Carrying Liquid Cylinder with Surface Change. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1431-1446.
- Allum, C. J. (1984). Pulsed GMAW, Interactions and Process Parameters - Parts 1 & 2. *Welding and Metal Fabrication*, 85-89 e 126-129.
- Alsharhan, A. T., Centea, T., & Gupta, S. k. (2017). Enhancing mechanical properties of thinwalled structures using non-planar extrusion based additive manufacturing. *ASME 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the JSME/ASME 6th International Conference on Materials and Processing*. Los Angeles: American Society of Mechanical Engineers.
- Arduino. (2019). Fonte: <https://www.arduino.cc/en/Main/Products>. Acesso em 07 de abril de 2019.
- ASEA. (1984). Product Manual. ASEA Industrial Robot Systems.
- AWS, A. W. (2004). *Welding Handbook, Welding Processes, Paart I*. Miami.
- Bai, X., Colegrove, P., Ding, J., Zhou, X., Diao, C., Bridgeman, P., Williams, S. (2018). Numerical analysis of heat transfer and fluid flow in multilayer deposition of PAW-based wire and arc additive manufacturing. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 124., 504-516.
- Bai, X., Zhang, H., & Wang, G. (2013). Improving prediction accuracy of thermal analysis for weld-based additive manufacturing by calibrating input parameters using IR imaging. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1087-1095.
- Bastos, T. F. (1999). *Aplicação de Robôs Industriais*. Fonte: <https://www.teodianobastoslab.net/RobMov/robosindustriais.pdf>. Acesso em: 30 de março de 2020.

- Bhatt, P., Kabir, A., Malhan, R., Shah, B., Shembekar, A., Yoon, Y., & Gupta, S. K. (2019). A robotic cell for multi-resolution additive manufacturing. *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Montreal: IEEE.
- Bhatt, P., Kabir, A., Peralta, M., Bruck, H., & Gupta, S. (2019). A robotic cell for performing sheet lamination-based additive manufacturing. *Additive Manufacturing n.27*, 278-289.
- Bhatt, P., Malhan, R., & Gupta, S. (2019). Computational foundations for using three degrees of freedom build platforms to enable supportless extrusion-based additive manufacturing. *14th Manufacturing Science and Engineering Conference*. Erie: ASME.
- Bhatt, P., Peralta, M., Bruck, H., & Gupta, S. (2018). Robot assisted additive manufacturing of thin multifunctional structures. *ASME 13th International Manufacturing Science and Engineering Conference, vol. 1*. . Texas: American Society of Mechanical Engineers.
- Bomfim, M. H. (2013). Remanufatura de Manipuladores Robóticos Industriais Utilizando Arquitetura Aberta. *Dissertação de Mestrado*. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil: UFMG.
- Bonaccorso, F., Cantelli, L., & Muscato, G. (2011). An Arc Welding Robot Control for a Shape Metal Deposition Plant: Modular Software Interface and Sensors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, v58 n8*, 3126-3132.
- Bouguet, J. Y. (2004). *Camera Calibration Toolbox for Matlab*. Fonte: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/. Acesso em 13 de abril de 2017.
- Bracarense, A. Q., Bastos Filho, T. F., Felizardo, I., & Rogana, W. G. (2002). Soldagem Robotizada. Em V. F. Romano, *Robótica Industrial - Aplicação na Indústria de Manufatura e de Processos*. Rio de Janeiro, Rj, Brasil: Edgard Blucher Ltda.
- Brooks, B., Arif, K., Dirven, S., & Potgieter, J. (2017). Robot-assisted 3D printing of biopolymer thin shells. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 957-968*.
- Cadiou, S., Courois, M., Carin, M., Berckmans, W., & Masson, P. L. (2020). Heat Transfer, Fluid Flow and Electromagnetic Model of Droplets Generation and Melt Pool Behaviour for Wire Arc Additive Manufacturing. *International Journal of Heat and Mass Transfer, 1-13*.

- Canny, J. F. (1986). A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v 8, n6, 679-689.
- Carvalho, G. C. (1997). An Adaptive Control System for Off-line Programming in Robotic Gas Metal Arc Welding. *PhD Thesis*. Reino Unido: Cranfield University.
- Cary, H. B. (2002). *Modern Welding Technology*. Prentice Hall.
- Chan, B., Pacey, J., & Bibby, M. (1999). Modelling gas metal arc weld geometry using artificial neural network technology. *Canadian Metallurgical Quarterly*, V.38.
- Chen, H. B., Lin, T. B., Chen, S. Wang, J. F., Jia, F. Q., Zhang, H. (2008). Adaptive Control on Wire Feeding in Robotic Arc Welding System. International Conference on Robotics, Automation and Mechatronics.
- Chen, D., M., C., & Wu, C. (2015). Effects of Phase Difference on the Behavior of Arc and Weld Pool Tandem P-GMAW. *Journal of Materials Processing Technology*, 45-55.
- Chen, W., & Chin, B. A. (1990). Monitoring Joint Penetration Using Infrared Sensing Techniques. *Welding Journal*, 181s-185s.
- Chu, H. H., & Wang, Z. Y. (2016). A Vision-Based System for Post-Welding Quality Measurement and Defect Detection. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86, 3007-3014.
- Coelho, F. G. (2016). Desenvolvimento de um Sistema de Visão de Baixo Custo Utilizando um Manipulador Robótico Industrial Visando a Automatização de Processo de Soldagem. *Dissertação de Mestrado*. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil: UFMG.
- Corradi, D. R. (2020). Influência da Oscilação Magnética do Arco Elétrico na Geometria de Paredes Multicamadas de Passe Único Fabricadas por Manufatura Aditiva Baseada na Soldagem GTAW. *Tese de Doutorado*. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil: UFMG.
- Couto, M. O., Costa, R. R., Leite, A. C., Lizarralde, F., Rodrigues, A. G., & Filho, J. C. (2020). Weld Bead With Measurement in a GMAW WAAM System by Using Passive Vision. *Congresso Brasileiro de Automática*.

- da Silva, L. J., Souza, D. M., Araújo, D. B., Reis, R. P., & Scotti, A. (2020). Concept and Validation of an Active Cooling Technique to Mitigate Heat Accumulation in WAAM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2513-2523.
- Ding, D., Pan, Z. C., & Larkin, N. (2016). Adaptive path planning for wire-feed additive manufacturing using medial axis transformation. *Journal of Cleaner Production*, 942-952.
- Ding, D., Pan, Z. C., Li, H., Larkin, N., & van Duin, S. (2015). Multi-direction slicing of STL models for robotic wire-feed additive manufacturing. *International Solid Freeform Fabrication Symposium*. Austin.
- Ding, D., Pan, Z., & Cuiuri, D. L. (2015). A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 8-19.
- Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., & Li, H. (2014). A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 173-183.
- Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H. L., & van Duin, S. (2016). Automatic multi-direction slicing algorithms for wire based additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 139-150.
- Ding, D., Shen, C., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., Larkin, N., & van Duin, S. (2016). Towards an automated robotic arc-welding-based additive manufacturing system from CAD to finished part. *Computer-Aided Design*, 66-75.
- Ding, Y., Dwivedi, R., & Kovacevic, R. (2017). Process planning for 8-axis robotized LASER based direct metal deposition system: a case on building revolved part. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 67-76.
- Dutra, J. C. (1996). Fonte de Soldagem Inversal 450. Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina.
- Eagar, T. W., & Kim, S. Y. (1993). Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding. *Welding Journal*, 269-278.

- EN1011-1, DIN (2009). Welding - Recommendations for Welding of Metallic Materials. Part I: General Guidance for Arc Welding.
- Essers, W. G., & Walter, R. (1981). Heat Transfer and Penetration Mechanisms with GMA and Plasma-GMA Welding. *Welding Journal* 60(2), 37-42.
- Evjemo, L., Moe, S., Gravdahl, J., Roulet-Dubonnet, O., Gellein, L., & Brøtan, V. (2017). Additive manufacturing by robot manipulator: an overview of the state-of-the-art and proof-of-concept results. *International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 1-8.
- Fang, Z. J., Xu, D., & Tan, M. (2010). Visual Seam Tracking System for Butt Weld of Thin Plate. *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, 519-526.
- Feliciano, F. F., Souza, I. L., & Leta, F. R. (2005). Visão Computacional Aplicada à Metrologia Dimensional Automatizada: Considerações Sobre sua Exatidão. *Engevista*, 38-50.
- Fisher, A. (2011). Estudo da Influência dos Parâmetros no Processo de Soldagem GMAW-Arco Pulsado. *Tese de Doutorado*. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil: UFMG.
- Font comas, T., Diao, C., Ding, J., Williams, S., & Zhao, Y. (2017). A Passive Imaging System for Geometry Measurement for the Plasma Arc Welding Process. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64, 7201-7209.
- Franco, L. D. (2007). Sincronização, Captura e Análise de Imagens da Poça de Soldagem em Sistemas GMAW em Modo de Transferência Metálica por Curto-Circuito. *Dissertação de Mestrado*. Brasília: UNB.
- Frazier, W. E. (2014). Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1917-1928.
- Fu, K. S., Gonzalez, R. I., & Lee, G. (1987). *Robotics: Control, Sensing, Vision and Intelligence*. Singapore: McGraw Hill.
- Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2010). Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. *Springer*, 459p.
- Gomes, J. F., & Wiltgen, F. (2020). Avanços na Manufatura Aditiva em Metais: Técnicas, Materiais e Máquinas. *Tecnologia*, 1-16.

- Grassi, M. V. (2005). Desenvolvimento e Aplicação de um Sistema de Visão para Robô Industrial de Manipulação. *Dissertação de Mestrado*. Porto Alegre, Rio Grande do Sul: UFRGS.
- Greene, W. J. (1960). An Analysis of Transfer in Gas-Shielded Welding Arcs. *Trans. AIEE Part II*, 194-203.
- Haleem, A., & Javaid, M. (2019). Additive Manufacturing Applications in Industry 4.0: A Review. *Journal of Industrial Integration and Management*.
- Halisch, C., Radel, T., Tyralla, D., Seefeld, T. (2020). Measuring the Melt Pool Size in a Wire Arc Additive Manufacturing Process Using a High Dynamic Range Two-Colored Pyrometric Camera. *Welding in the World*. DOI- 10.1007/s40194-020-00892-5
- Han, Q., Li, Y., & Zhang, G. (2018). On-line Control of Deposited Geometry of Multi-Layer Multi-Bead Structure for Wire and Arc Additive Manufacturing. *Springer eBook*.
- Haykin, S. (2008). *Redes Neurais: Principios e Prática*. Porto Alegre: bookman.
- Henriques, R. V., Lima II, E. J., Castro, C. A., & Bracarense, A. Q. (2006). Análise da sensibilidade da variação dos valores de corrente, tensão e velocidade de soldagem na geometria do cordão na soldagem de alumínio. *Anais do XXXII CONSOLDA*.
- Heralic, A., Christiansson, A. K., Ottosson, M., & Lennartson, B. (2010). Increased Stability in LASER Metal Wire Deposition Through Feedback from Optical Measurements . *Optical LASERs Engineers*, 478-485.
- Houghton, M. A., Lucas, J. J., & Lucas, W. (2007). Vision Systems for Monitoring and Control of Arc Welding Operations. *Soldagem e Inspeção. São Paulo*, v12, n4, 293-299.
- IMC-Soldagem. (2019). *Manual de Instruções*. Fonte: [https://www.imc-soldagem.com.br/images/documentos/manuais/inversal_450-600_manual_instrucoes_2ed_\(1998\).pdf](https://www.imc-soldagem.com.br/images/documentos/manuais/inversal_450-600_manual_instrucoes_2ed_(1998).pdf). Acesso em 20 de maio de 2019.
- Infinity Photo-Optical Company*. (2019). Fonte: <https://www.infinity-usa.com/k-series/model-kc-videomax/>. Acesso em junho de 2019.

- Ishak, I., & Larochelle, P. (2017). Robot arm platform for additive manufacturing: 3D lattice structures. *Florida Conference on Recent Advances in Robotics*. Boca Raton: (FCRAR).
- Ishak, I., Fisher, J., & Larochelle, P. (2016). Robot arm platform for additive manufacturing using multi-plane toolpaths. *ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, vol. 5A*,. Charlotte: American Society of Mechanical Engineers.
- Jhavar, S., Jain, N., & Paul, C. P. (2014). Development of MicroPlasma Transferred Arc Wire Deposition Process for Additive Layer Manufacturing Applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 1102-1110.
- Jin, Z., Li, H., & Gao, H. (2019). An Intelligent Weld Control Strategy Based on Reinforcement Learning Approach. *The International of Advanced Manufacturing Technology*, 2163-2175.
- Johnson, J., Carlson, N., Smartt, H., & Clark, D. E. (1991). Process Control of GMAW: Sensing of Metal Transfer Mode. *Welding Journal*, 91-99.
- Jönsson, P. G., Szekely, J., Choo, R. T., & Quinn, T. P. (1994). Mathematical Models of Transport Phenomena Associated With Arc-Welding Process: A Survey. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 995-1016.
- Jönsson, P., Murphy, A., & Szekel, J. (1995). The Influence of Oxygen Additions on Argon Shielded Gas Metal Arc Welding Process. *Welding Research Supplement*, 48-58.
- Juliani, L. (2021). Utilização da Oscilação Magnética do Arco Elétrico Seguindo Figuras de Lissajous na Soldagem GMAW para Passe de Raiz. *Tese de Doutorado*. Minas Gerais, Brasil: UFMG.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2001). *Manufacturing Engineering and Technology*. Prentice Hall.
- Kim, I. S. (1995). Numerical and Experimental Analysis for the G.M.A.W. Process. *Doctor of Philosophy Thesis, Department of Mechanical Engineering*. Wollongong, Austrália: University of Wollongong.

- Kim, I. S., Kwon, W., & Siores, E. (1996). An Investigation of a Mathematical Model for Predicting Weld Bead Geometry. *Canadian Metallurgical Quarterly*, v35, n4., 385-392.
- Kim, I. S., Son, J. S., Park, I. J., Kim, I. J., & Kim, H. H. (2005). An Investigation into an intelligent system for predicting bead geometry in GMA welding process. *Journal of Material Processing Technology*, 159(p.113-118).
- Kim, Y. S., & Eagar, T. W. (1993). Analysis Of Metal Transfer In Gas Metal Arc Welding. *Welding Journal*, v. 72, n. 6, 269-278.
- Kou, S., & Le, Y. (1983). *Metallurgical Transition. A*, 14A: 2245.
- Kou, S., & Sun, D. K. (1985). Fluid Flow and Weld Penetration in Stationary Arc Welds. *Metallurgical Transactions*, 203-213.
- Kovacevic, R., & Zhang, Y. M. (1997). Real-time Image Processing for Monitoring of Free Weld Pool Surface. *Journal Manufacturing Science Engineering*, 161-169.
- Kusch, M. H., & Thurner, S. (2011). Bestimmung von Wirkungsgraden an Schutzgas-schwei Bverfahren. *Schweissen und Schneiden*, 30-33.
- Kutzer, M., DeVries, L., & Blas, C. (2018). Part Monitoring and Quality Assessment of Conformal Additive Manufacturing Using Image Reconstruction. *American Society of Mechanical Engineers*. Quebec: ASME.
- Lancaster, J. F. (1986). *The Physics of Welding*. 2. ed. England: Pergamon Press.
- Lancaster, J. F. (1987). The Physics of Welding. Part 1: The Electric Arc in Welding. *IEEE Proceedings B*, 134(5) , 233-254.
- Las Casas, M. S. (2012). Modelagem utilizando redes neurais artificiais para predição de largura, reforço e quantidade de ferrita de cordões de solda aços inoxidáveis austeníticos. *Dissertação de Mestrado*. Belo Horizonte, MG: Departamento de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, UFMG.
- Las Casas, M. S., Ávila, T. L., Bracarense, A. Q., & Lima II, E. J. (2018). Welding Parameter Prediction Using Artificial Neural Network: FN and Geometric Parameter Prediction of Austenitic Stainless Steel Welds. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, <https://doi.org/10.1007/s40430-017-0928-0>.

- Lee, J. I., & Um, K. W. (2000). A prediction of welding process parameters by prediction of back-bead geometry. *Journal of Materials Processing Technology*, 106-113.
- Li, F., Chen, S. S., Zhao, Y., & Tian, H. (2018). Thermoelectric Cooling-Aided Bead Geometry Regulation in Wire and Arc-Based Additive Manufacturing of Thin-Walled Structures. *Applied Sciences*.
- Li, J. Z., Alkahari, M. R., Rosli, N. A., Hasan, R., Sudin, M. N., & Ramli, F. R. (2019). Review of Wire Arc Additive Manufacturing for 3D Metal Printing. *International Journal of Automation Technology*, 346-353.
- Li, L., Haghghi, A., & Yang, Y. (2018). A novel 6-axis hybrid additive-subtractive manufacturing process: design and case studies. *Journal Manufacturing Processes*, 150-160.
- Liberini, M., Astarita, A., Campatelli, G., Scippa, A. M., Durante, M. B., Minutolo, F. M., & Squillace, A. (2016). Selection of Optimal Process Parameters for Wire Arc Additive Manufacturing. *10th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering - CIRP ICME '16*, pp. 470-474.
- Lima II, E. J., Castro, C. A., Bracarense, A. Q., & Campos, M. F. (2005). Determinação da Relação Entre Parâmetros de Soldagem, Largura da Poça e Aspectos do Cordão de Solda Utilizando Câmera de Alta Velocidade. *Soldagem e Inspeção*, 182-189.
- Lima II, E. J., Castro, C. A., Bracarense, A. Q., & Campos, M. F. (2010). Determining the Relationship Between Welding Parameters, Pool Width and Weld Bead Geometry Using High Speed Filming. *Welding International*, vol. 21, no. 3, 220-226.
- Lin, M., & Eagar, T. (1985). Influence of Arc Pressure on Weld Pool Geometry. *Welding Journal*, 163-169.
- Liu, J., Xu, Y., Hou, Z., & Chen, S. (2020). Wire and Arc Additive Manufacturing of Metal Components: A Review of Recent Research Developments. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 149-198.
- Lopera, J. E. P., Motta, J. M., & Alfaro, S. C. (2016). Real-time Measurement of Width and Height of Weld Beads in GMAW Process. *Sensors*, 16, 1-14.

- Lopes, G. C. (2015). Autocalibração de um Braço Robótico Utilizando Acelerômetros. *Monografia de Conclusão de Curso*. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil: UFMG.
- Luo, Y., Li, J., Xu, J., Zhu, L., Han, J., & Zhang, C. (2018). Influence of pulsed arc on the metal droplet deposited by projected transfer mode in wire-arc additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 259., 353-360.
- Ma, X. J., & Zhang, Y. M. (2011). Gas Metal Arc Weld Pool Surface Imaging: Modeling and Processing. *Welding Journal*, 85-94.
- Ma, X., Zhang, Y. M., Gay, A. M., & Male, A. T. (2012). 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. *IEEE Transactions*, 243-249.
- Majcher, k. (2014). How to Build 3-D Printing. *MIT Technology Review Report Breakthrough Factories*, v.117, n.6, 10-11.
- Manikya Kanti, K., & Srinivasa Rao, P. (2008). Prediction of Bead Geometry in Pulsed GMA Welding Using Back Propagation Neural Network. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 20, 300-305.
- Manz, F. (1981). Welding Arc Sounds. *Welding Journal*, 23s-27s.
- Marques, P. V., Modenesi, P. J., & Bracarense, A. Q. (2011). *Soldagem Fundamentos e Tecnologia*. Belo Horizonte: UFMG.
- Martina, F., Mehnen, J., Williams, S. W., Colegrove, P., & Wang, F. (2012). Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(6), 1377-1386.
- Marya, M., & Marya, S. K. (1998). A Theoretical and Experimental Analysis of Variances in Weld Bead Morphologies. *Journal of Materials Engineering and Performance*. Vol. 7, No. 4, 515-523.
- Matsunawa, A., & Ohji, T. (1982). Role of Surface Tension in Fusion Welding. *Transactions of JWRI*. Vol. 11, No. 2., 145-154.

- Melkanoff, M. A., Puhl, F., Langer, V., Greenberg, D. P., Shepard, M. S., & Voelcker, H. (1982). The Challenge of CAD/CAM Education. *Computer Graphics*, 209-211.
- Mills, K. C., & Keene, B. J. (1990). Factors Affecting Variable Weld Penetration. *International Materials Reviews*, 185-216.
- Miranda, H. C. (2002). Reconhecimento e Controle da Transferência Metálica no Processo MIG/MAG Pulsado. *Tese de Doutorado*. Uberlândia, MG, Brasil: UFU.
- Miranda, H. C., & Ferraresi, V. A. (18-23 de Maio de 2003). Identificação da Transferência Metálica na Soldagem MIG/MAG Pulsada de Aço Inoxidável a partir de um Sensor Óptico. *COBEF*. Uberlândia, MG, Brasil: COBEF.
- Mnich, C., Al-Bayat, F., Debrunner, C., Steele, J. P., & Vicent, T. (Julho de 2004). In Situ Weld Pool Measurement Using Stereovision. *2004 Japan – USA Symposium on Flexible Automation*. Colorado, Denver, USA.
- Modenesi, P., & Nixon, J. (1994). Arc Instability Phenoma in GMA Welding. *Welding Research Supplement*, 219-224.
- Mota, P., Reis, R., Costa, A., Silveira, F., Souza, R., & Scotti, A. (2011). Influência do Tipo de Material no Rendimento de Fusão em Soldagem a Arco. *Soldagem & Inspeção*, vol.16 n4, 369-376.
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2009). *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*. 4ed. LTC.
- Mughal, M. P., Fawad, H., & Mufti, R. A. (2006). Three-dimensional finite-element modelling of deformation in weld-based rapid prototyping. *Proceeding of Institution Mechanical Engineers*, 875-878.
- Munhoz, A. L., Ahrens, C. H., Carvalho, J., Santos, J. R., Silva, J. V., Foggiatto, J. A., Volpato, N. (2017). *Manufatura Aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. São Paulo: Blucher.
- Nascimento, A. S., Dias, A. C., Macias Filho, B. B., & da Mota, C. A. (2003). Procedimento Experimental para Seleção de Parâmetros de Pulso para Soldagem com Arame Tubular em Corrente Pulsada. *2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*. Uberlândia, MG, Brasil.

- Neto, M. C., & Brandi, S. D. (1997). Modelamento da Frequência de Destacamento de Gotas na Soldagem de Ligas de Alumínio como Processo SAMGP. *XXIII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem*. São Paulo: FATEC.
- Nguyen, T. C., Weckman, D. C., & Kerr, H. W. (2005). The Humping Phenomenon during High Speed Gas Metal Arc Welding. *Science Technology Welding Joining*, 447-459.
- Nixon, J. H., & Norrish, J. (1992). Determination of pulsed MIG process parameters. Synergic MIG Supplement. *Welding & Metal Fabrication*.
- Nixon, J., & Norrish, J. (1988). Determination of Pulsed MIG Process Parameters. *Welding and Metal Fabrication*, 1-20.
- Norrish, J. (2003). A Review of Metal Transfer Classification in Arc Welding. *IIW Doc. XII-1769-03*.
- Nunes, J. L. (1982). Metal Transfer Investigations with a Synergic Power Supply. *PhD Thesis* Reino Unido: Cranfield Institute of Technology.
- Pan, Z., Ding, D., Wu, B., Cuiuri, D., Li, H., & Norrish, J. (2018). Arc Welding Processes for Additive Manufacturing: A Review. *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing*, 3-24.
- Pedrotti, F. L., & Pedrotti, L. S. (1993). *Introduction to Optics*. Prentice-Hall.
- Pereira, W. A. (1995). Comparação de Características Operacionais entre os Processos MIG Pulsado e MAG Curto-Circuito. *Dissertação de Mestrado*. Uberlândia, Minas Gerais, Brasil: Universidade Federal de Uberlândia.
- Pinho, T. B. R. (2013). Rede de Instrumentação e Atuação para Manipulador IRB6. *Monografia de Conclusão de Curso*. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil: UFMG.
- Pinto, D. P. (2011). Modelagem da Forma Geométrica do Cordões de Solda Utilizando Curvas para Simulação Computacional. *Dissertação de Mestrado*. Belo Horizonte: Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFMG.
- Ponomarev, V., Scotti, A., Silvinskiy, A., Al-Erhayem, O. (2003). Atlas of MIG/MAG Welding Metal Transfer Modes. *IIW Doc. XII-1171to 1775-03*.

- Rafieezad, M., Ghaffari, M., Nemani, A. V., & Nasiri, A. (2019). Microstrutural Evolution and Mechanical Properties of a Low-Carbon Low-Alloy Steel Produced by Wire Arc Additive Manufacutring. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2121-2134.
- Ramos, E. G., Carvalho, G. C., & Alfaro, S. C. (2013). Análise da Oscilação da Poça de Solda em P-GMAW por Meio de Processamento de Imagens Obtidas por Perfilografia. *Soldagem & Inspeção*, v.18, n.1, 39-49.
- Repossini, G., Laguzza, V., & Grasso, M. C. (2017). On the use of spatter signature for in-situ monitoring of LASER Powder Bed Fusion. *Additive Manufacturing*, 35-48.
- Rhee, S., & Kannatey-Asibu Jr., E. (1992). Observation of Metal Transfer During Gas Metal Arc Welding. *Welding Journal*, 381-386.
- Richardson, I. M., Bucknall, P. W., & Stares, I. (1994). The Influence of Power Source Dynamics on Wire Melting Rate in Pulsed GMA Welding. *Welding Journal*, 32-37.
- Rokhlin, S. I., & Guu, A. C. (1990). Computerized Radiographic Sensing and Control of an Arc Welding Process. *Welding Journal*, 83-97.
- Saeed, G., & Zhang, Y. (2003). Mathematical Formulation and Simulation of Specular Reflection Based Measurement System for Gas Tungsten Arc Weld Pool Surface. *Measurement Science and Technology*.
- Saeed, G., Lou, M., & Zhang, Y. M. (2004). Computation of 3D Weld Pool Surface from the Slope Field and Point Tracking of LASER Beams. *Measurement Science Technology*, 389-403.
- Santos, D., Pertence, A., & Cetlin, P. (2005). The development of 3D models through rapid prototyping concepts. *Journal of Materials Processing Technology*.
- Scotti, A. (1991). PhD Thesis. *Process Modelling to Establish Algorithms for Automated GMAW*. UK: Cranfield Institute of Technology.
- Scotti, A., Ponomarev, V. (2008). Soldagem MIG/MAG: Melhor Entendimento, Melhor Desempenho. São Paulo. Editora Artliber

- Shembekar, A., Yoon, Y., Kanyuch, A., & Gupta, S. (2019). Generating robot trajectories for conformal 3d printing using non-planar layers. *Journal Computing and Information Science in Engineering*.
- Shembekar, A., Yoon, Y., Kanyuck, A., & Gupta, S. (2018). Trajectory planning for conformal 3d printing using non-planar layers. *ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, vol. 1A*, . Quebec: American Society of Mechanical Engineers.
- Shen, H.-Y., Wu, J., Lin, T., & Chen, S.-B. (2008). Arc Welding Robot System With Seam Tracking and Weld Pool Control Based on Passive Vision. . *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 39, n. 7-8, 669-678.
- Shukla, P., Dash, B., Kiran, D. V., Bukkapatnam, S. (2020). Arc Behavior in Wire Arc Additive Manufacturing Process. *Procedia Manufacturing*, (48). 725-729.
- Spencer, J. D., Dickens, P. M., & Wykes, C. M. (1998). Rapid Prototyping of Metal Parts by Three-Dimensional Welding. *Journal of Engineering Manufacture*, 212(3)., 175-182.
- Su, C., & Chen, X. (2019). Effect of depositing torch angle on the first layer of wire arc additive manufacture using cold metal transfer (CMT). . *Industrial Robot*, 46(2)., 259-266.
- Suryakumar, S., Karunakaran, K. P., Bernard, A., Chandrasekhar, U., Raghavender, N., & Deepak, S. (2011). Weld Bead Modeling and Process Optimization in Hybrid Layered Manufacturing. *Computer Aided Design*, 331-344.
- Taberero, I., Paskual, A., Alvarez, P., & Suarez, A. (2018). Study on Arc Welding Process for High Deposition Rate Additive Manufacturing. *Procedia CIRP*, 358-362.
- Thompson, M., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R., Gibson, I., Ahuja, B. (2016). Design for additive manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 65-73.
- Uziel, A. (2016). Looking at Large-Scale, Arc-Based Additive Manufacturing. *Welding Journal*.
- VisionResearch. (maio de 2019). *Phantom*. Fonte: <https://phantomhighspeed-service.force.com/servlet/servlet.FileDownload?file=00P1N00000dSuCfUAK&oid=00D1N000002Br2EUAS>. Acesso em 16 de novembro de 2019.

- Wang, X., Shan, J., Niu, Y., Tan, L., Zhang, S. (2014). Enhanced Distance Regularization for Re-Initialization Free Level Set Evolution with Application to Image Segmentation. *Neurocomputing*, 223-235.
- Waszink, J. H., & Graat, L. H. (1983). Experimental Investigation Of The Forces Acting On A Drop Of Weld Metal. *Welding Journal*, 108s-116s.
- Waszink, J. H., & Piena, M. J. (1986). Experimental Investigation of Drop Detachment and Drop Velocity in GMAW. *Welding Journal*, 289s-298s.
- Williams, S., Martina, F., Addison, A., Ding, J., Pardal, G., & P., C. (2015). Wire+arc additive manufacturing. *Materials Science and Technology*, 641-647.
- Wu, B., Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., Han, J., & Fei, Z. (2017). Effects of Heat Accumulation on the Arc Characteristics and Metal Transfer Behaviour in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 304-312.
- Wu, C. S., Hu, Z. H., & Zhong, L. M. (2012). Prevention of Humping Bead Associated With High Welding Speed By Double-Electrode Gas Metal Arc Welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 573-581.
- Wu, C., Dai, C., Fang, G., Liu, Y.-J., & Wang, C. (2017). RoboFDM: a robotic system for support-free fabrication using FDM. *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Singapore: IEEE.
- Xia, C., Pan, Z., Polden, J., Li, H., Xu, Y., Chen, S., & Zhang, Y. (2020). A Review on Wire Arc Additive Manufacturing: Monitoring, Control and a Framework of Automated System. *Journal of Manufacturing Systems*, 31-45.
- Xiong, J. L., Li, R., & Yin, Z. Q. (2018). Influences of Process Parameters on Surface Roughness of Multi-Layer Single-Pass Thin-Walled Parts in GMAW-Based Additive Manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 128-136.
- Xiong, J., Li, R., Lei, Y., & Chen, H. (2018). Heat Propagation of Circular Thin-Walled Parts Fabricated in Additive Manufacturing Using Gas Metal Arc Welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 12-19.

- Xiong, J., Yin, Z., & Zhang, W. (2016). Closed-Loop Control of Variable Layer Width for Thin-Walled Parts Inwire and Arc Additive Manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 100-106.
- Xiong, J., Zhang, G., & Zhang, W. (2015). Forming appearance analysis in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80(9-12), 1767-1776.
- Xiong, J., Zhang, G., Hu, J., & Wu, L. (2014). Bead Geometry Prediction for Robotic GMAW-Based Rapid Manufacturing Through a Neural Network and a Second-Order Regression Analysis. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 157-163.
- Xiong, J., Zhang, G., Qiu, Z., & Li, Y. (2013). 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*, v. 41, 80-88.
- Yan, Y., Zhang, G., Wun, L. (2011). Simulation and Controlling for Weld Shape Process in P-GMAW Based on Fuzzy Logic. International Conference on Mechatronics and Automation.
- Yang, D. Q., Wang, G., & Zhang, G. J. (2017). A Comparative Study of GMAW and DE-GMAW Based Additive Manufacturing Techniques: Thermal Behavior of the Deposition Process for Thin-Walled Parts. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. v91, Issues5-8, 2175-2184.
- Yang, D., He, C., & Zhang, G. (2016). Forming Characteristics of Thin-Wall Steel Parts by Double Electrode GMAW Based Additive Manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 153-160.
- Yang, S. M., Cho, M. H., Lee, H. Y., & Cho, T. D. (2007). Weld Line Detection and Process Control for Welding Automation Measurement. *Science Technology*, 819-826.
- Yeung, H., Lane, B. M., Donmez, M. A., Fox, J. C., Neira, J. E. (2018). Implementation of Advanced LASER Control Strategies for Powder Bed Fusion System. College Station, TX, [online], <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.112>.
- Zhang, G., Spaak, A., Martinez, C., Lasko, D., Zhang, B., & Fuhlbrigge, T. (2016). Robotic additive manufacturing process simulation-towards design and analysis with building

- parameter in consideration. *International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. Texas: IEEE.
- Zhang, Y. M., Li, P., Chen, Y., & Male, A. T. (2002). Automated system for welding-based rapid prototyping. *Mechatronics*, 37-53.
- Zhang, Y. M., Wang, Q. Y., & Liu, Y. K. (2021). Adaptive Intelligent Welding Manufacturing. *Welding Journal*, 63s-82s.
- Zhang, Y., Hong, G., & Ye, D. (2018). Extraction and evaluation of melt pool, plume and spatter information for powder-bed fusion AM process monitoring. *Materials & Design*, 458-469.
- Zhao, G., Ma, G., Feng, J., & Xiao, W. (2018). Nonplanar slicing and path generation methods for robotic additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 3149-3159.
- Zhao, H., Zhang, G., Yin, Z., & Wu, L. (2011). A 3D Dynamic Analysis of Thermal Behavior During Single-Pass Multi-Layer Weld-Based Rapid Prototyping. *Journal of Materials Processing Technology*, 488-495.
- Zheng, H., Cong, M., Dong, H., Liu, Y., & Liu, D. (2017). CAD-based automatic path generation and optimization for LASER cladding robot in additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 3605-3614.
- Zinato, G. A. (2019). Sintonia de Controladores PID Empregados em Motores de Robôs Industriais. *Monografia de Conclusão de Curso*. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil: UFMG.
- Zou, Y., Yunhua, L. Y., Jiang, L., & Xue, L. (2011). Weld Pool Image Processing Algorithm for Seam Tracking of Welding Robot. *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 6th ICIEA 2011: IEEE, p. 161-165, 2011.*, 161-165.

APÊNDICE A – Código fonte: “ControladorMaster.ino”

Os códigos gerados para o controle do manipulador retrofitado estão divididos em “ControladorMaster” que gerencia o pacote de dados a serem distribuídos para os escravos que irão acionar seus respectivos motores:

```
#include <SPI.h>
#define delay_microsegundos_slave 30
int rele = 8;
byte bufferResposta[11];
void setup (void)
{
//Configura o SPI como Master e todas as demais configurações necessárias:
SPI.begin ();
//Diminui um pouco a frequência de envio do master:
SPI.setClockDivider(SPI_CLOCK_DIV8);
pinMode (rele, OUTPUT);
//Configura pinos A1 a A5 como saída, para habilitar os Slaves dos Eixos:
DDRC |= _BV(PC1); //Pino A1 = Saída
DDRC |= _BV(PC2); //Pino A2 = Saída
DDRC |= _BV(PC3); //Pino A3 = Saída
DDRC |= _BV(PC4); //Pino A4 = Saída
DDRC |= _BV(PC5); //Pino A5 = Saída
//Seta pinos A1 a A5 como 5 V = Slave desabilitado. Serão habilitados apenas no momento do
//envio
PORTC |= _BV(PC1); //Pino A1 = 5 V
PORTC |= _BV(PC2); //Pino A2 = 5 V
PORTC |= _BV(PC3); //Pino A3 = 5 V
PORTC |= _BV(PC4); //Pino A4 = 5 V
PORTC |= _BV(PC5); //Pino A5 = 5 V
Serial.begin(250000);
Serial.print("PRONTO");
}
boolean interpretandoCMD = false;
byte indiceBufferComandoRecebido;
```



```
byte bufferRecebimento [14];
//identifica se a fila do atual slave está cheia
bool fila_cheia_slave = false;
void loop (void)
{
digitalWrite(rele, HIGH);
if (Serial.available()) //Byte está pronto para leitura?
{
char c = Serial.read(); // c = caractere recebido
if (!interpretandoCMD) //Já está interpretando algum comando? Não, espera um caractere de
//início de comando.
{
switch(c) //verifica qual caractere recebido
{
case 'S':
//Encontrou um caractere de início de comando.
break;
case 'R':
//Encontrou um caractere de início de comando.
break;
case 'M':
//Encontrou um caractere de início de comando. Habilita ou desabilita Motor
break;
case 'O':
//Encontrou um caractere de início de comando. Onde está? (Qual posição do encoder)
break;
default: return;
}
interpretandoCMD = true;
indiceBufferComandoRecebido = 0;
bufferRecebimento[0] = c;
}
```

```

else //Já está interpretando algum comando? Sim, aqui lê todos os caracteres necessários deste
//comando.
{
indiceBufferComandoRecebido++;
//Aqui já está interpretando um comando:
if (indiceBufferComandoRecebido < 11)
{
bufferRecebimento[indiceBufferComandoRecebido] = c;
//Aqui ocorre um caso especial.
//O comando sendo interpretado é um 'Onde está?'.
if (bufferRecebimento[0] == 'O' && indiceBufferComandoRecebido == 1)
{
//Aqui já sabe para qual eixo é.
byte eixodestino = bufferRecebimento[1];
//completa o buffer de recebimento com zeros. (Serão desprezados pelo slave neste comando,
//o importante é só o retorno do slave, que é a posição atual do mesmo.
bufferRecebimento[2] = '0';
bufferRecebimento[3] = '0';
bufferRecebimento[4] = '0';
bufferRecebimento[5] = '0';
bufferRecebimento[6] = '0';
bufferRecebimento[7] = '0';
bufferRecebimento[8] = '0';
bufferRecebimento[9] = '0';
bufferRecebimento[10] = '0';
enviaBufferParaEixo(eixodestino);
//Aqui tem a posição do Slave no bufferResposta
//Retorna para o computador o que o Slave respondeu:
for (int i = 0; i<=10; i++)
{
Serial.print((char)bufferResposta[i]);
}
//Para sinalizar o final da string enviada:

```

```

Serial.println();
interpretandoCMD = false;
return; //Ok finalizado
}
if (indiceBufferComandoRecebido == 10)
{
//Acabou a interpretação do comando.
//O comando recebido tem a Taxonomia: CEHHHHHHHHK
//Onde:
//C = Comando. 'S' é um comando de setpoint
//E = Eixo. '1' é o eixo 1
//HHHHHHHHH = Valor em hexadecimal representado um int32.
//K = Check. Representa os bits menos significativos das quatro últimas posições acima.
// Ex: Valor Hexa: 11111111 => em binário 0001 0001 0001 0001 0001 0001 0001 0001. K=
//F = 1111.
// Ex: Valor Hexa: 1111F023 => em binário 0001 0001 0001 0001 1111 0000 0010 0011. K=
//9 = 1001.
interpretandoCMD = false;
//Validação do valor recebido:
//Para saber se o valor recebido não foi corrompido na transmissão:
bool checksum = validaValorRecebido();
if (!checksum)
{
//Ocorreu um erro na transmissão
Serial.print('E'); //Responde ERRO = E
return; //Não prosseguir para enviar ao Slave
}
//O comando vai para qual eixo? Segundo Byte do buffer.
byte eixodestino = bufferRecebimento[1];
enviaBufferParaEixo(eixodestino);
//Validação do valor retornado pelo Slave:
//Para saber se o valor recebido não foi corrompido na transmissão:
bool checksum_slave = validaRespostaSlave());

```

```

if (checksum_slave)
{
//Validado. Aqui garante que recebeu do computador a informação correta e transmitiu para o
//Slave a informação correta
Serial.print('K'); //Responde OK = K
}
else
{
//Erro. Houve um erro na comunicação com o Slave, ou a fila está lotada.
if (!fila_cheia_slave) Serial.print('N'); //Aqui não foi por fila cheia, ocorreu um erro, Responde
NOK = N
else Serial.print('P'); // Fila cheia, Responde Pare = P
}
}
}
}
}
}
}
digitalWrite(rele, LOW);
}
//Envia o conteúdo do buffer para seu respectivo eixo
void enviaBufferParaEixo(byte eixo)
{
habilitaSlave(eixo);
//habilitaSlave('5');
//transfere o primeiro byte e recebe a resposta 'lixo':
byte lixo = SPI.transfer(bufferRecebimento[0]);
for (int i = 1; i<=9; i++)
{
delayMicroseconds(delay_microsegundos_slave); //Tempo para que o Slave consiga processar
//a resposta
bufferResposta[i-1] = SPI.transfer(bufferRecebimento[i]);
}
}

```

```

delayMicroseconds(delay_microsegundos_slave); //Tempo para que o Slave consiga processar
//a resposta
//Para obter a última resposta, envia um 'lixo' qualquer:
bufferResposta[9] = SPI.transfer('L');
desabilitaSlave(eixo);
//desabilitaSlave('5');
}
//Habilita o Slave
//Garante que o eixo específico esteja recebendo as informações.
void habilitaSlave(byte eixo)
{
//Habilita Slave Selecionado. Pino = 0 V
switch(eixo)
{
case '1': PORTC &= ~_BV(PC1); break; //PC4 = A1 = Eixo1
case '2': PORTC &= ~_BV(PC2); break; //PC3 = A2 = Eixo2
case '3': PORTC &= ~_BV(PC3); break; //PC2 = A3 = Eixo3
case '4': PORTC &= ~_BV(PC4); break; //PC1 = A4 = Eixo4
case '5': PORTC &= ~_BV(PC5); break; //PC0 = A5 = Eixo5
}
}
//Desabilita o Slave
//Inverso da função acima.
void desabilitaSlave(byte eixo)
{
//Desabilita Slave Selecionado. Pino = 5 V
switch(eixo)
{
case '1': PORTC |= _BV(PC1); break; //PC4 = A1 = Eixo1
case '2': PORTC |= _BV(PC2); break; //PC3 = A2 = Eixo2
case '3': PORTC |= _BV(PC3); break; //PC2 = A3 = Eixo3
case '4': PORTC |= _BV(PC4); break; //PC1 = A4 = Eixo4
case '5': PORTC |= _BV(PC5); break; //PC0 = A5 = Eixo5
}
}

```

```

}
}
//Valida o Valor recebido do computador.
//Garante que não houve erro de comunicação
bool validaValorRecebido()
{
bool validado = true;
//Primeiro Valida eixo de destino:
bool eixovalidado = (bufferRecebimento[1] > 48) && (bufferRecebimento[1] < 54); //Só pode
//ser de '1' a '5'
if (!eixovalidado) return false;
//Em seguida valida o valor recebido.
//K = Check. Representa o agrupamento dos bits menos significativos de cada caractere
//recebido no Valor.
//Ex: Valor Hexa: 1111 => em binário 0001 0001 0001 0001. check= F = 1111.
//
//          1  1  1  1 = check = F
//Ex: Valor Hexa: F023 => em binário 1111 0000 0010 0011. check= 9 = 1001.
//
//          1  0  0  1 = check = 9
byte check = 0;
for (int i = 0; i<4; i++)
{
int indice = i+6;
//if ((bufferRecebimento[indice] > 47) && (bufferRecebimento[indice] < 58))
//{
//OK, é um numero
check |= (caracterHex_int(bufferRecebimento[indice]) & 1) << (3 - i);
//}
//else
//{
// return false;
//}
}
byte check_recebido = caracterHex_int(bufferRecebimento[10]);

```

```

//Valida o check recebido com o check calculado a partir do valor recebido:
if (check_recebido != check) return false;
else return true;
}
//Transforma o caractere recebido em valor Hexadecimal correspondente. Ex: 'A' retorna 10,
//'C' retorna 12.
byte characterHex_int(char c)
{
//É um caractere no mínimo maior ou igual a '0'
if (c > 47)
{
//E é um caractere menor ou igual a '9'
if (c < 58)
{
return c - (byte)'0';
}
else if (c > 64 && c < 71)
{
return c - (byte)'A' + 10;
}
}
//nenhum? Retorna zero
return 0;
//Valida a resposta do Slave
//O Slave deve responder tudo que o Master enviou, mais 1. Ex: Master envia 'S100000000' =
//(83 49 48 48 48 48 48 48 48 48). Slave tem que responder 'T21111' = (84 50 49 49 49 49 49
//49 49 49)
//Exceto quando a fila de setpoints encheu, neste momento o Slave manda 'TPPPPPPPPP'
bool validaRespostaSlave()
{
fila_cheia_slave = false; // Ajusta-se assim inicialmente
byte numero_P = 0;
for (int i = 0; i<10; i++)

```

```
{
//Verifica primeiro se houve lotação da fila
if (bufferResposta[i] == 'P')
{
numero_P++;
if (numero_P > 2)
{
fila_cheia_slave = true;
return false; //constatada lotação na fila
}
}
else if (bufferResposta[i] != (bufferRecebimento[i] + 1)) return false; //em seguida valida
}
return true;
}
```


APÊNDICE B – Código fonte: “ServoControlador.ino”

/* Servocontrolador Controle de malha fechada para motor DC.

Pinos utilizados:

Entradas 2 e 3 são conectadas as entradas A e B do *encoder*, respectivamente.

A entrada 4 é conectada ao Sinal de Índice do *Encoder*

As Saídas 5 e 6 controlam o PWM enviado a ponte H, sendo a 6 o PWM e a 5 a direção.

O Encoder é usado em QUADRATURA

*/

```
int x1 = 0;
```

```
int x2 = 0;
```

```
#include "PinChangeInt.h"
```

```
#include <EEPROM.h>
```

```
#include <PID_v1.h>
```

```
#include "Queue.h"
```

```
#include <SPI.h>
```

```
#define encoder0PinA 2 // PD2;
```

```
#define encoder0PinB 3 //PD4 ;
```

```
#define M1 5
```

```
#define M2 6 // Saída PWM para motores
```

```
#define INDICE 3
```

```
double kp=1.2,ki=0.8,kd=0.03;
```

```
double input=0, output=0, setpoint=0;
```

```
PID myPID(&input, &output, &setpoint,kp,ki,kd, DIRECT);
```

```
volatile long encoder0Pos = 0; //Posição absoluta do encoder
```

```
long destino_desejado=0; //Posição de destino DESEJADA
```

```
long proximo_setpoint = 0;
```

```
long antigo_setpoint = 0;
```

```
long temp_timer_serial;
```

```
unsigned long a_;
```

```
unsigned long b_;
```

```
bool dir = false;
```

```
#define tamanho_fila 100
```

```
Queue<long> fila_setpoints(tamanho_fila); //buffer de 50 setpoints
```

```

bool temp_executacomandos_fila = true; // por padrão já inicia habilitado a executar comandos
//do buffer continuamente
unsigned long temp_timer_executacomando;
char SPI_buffer [11];
volatile byte SPI_indice;
bool recebidoComandoI2C_completo = false;
bool interpretandoComandoSPI = false;
volatile bool pronto_limpar_fila = false;
bool habilitaMotor = true;
char localAtual_armazenado [11] = "S?00000000"; //mantêm o local atual (posição do encoder)
//armazenado nesse array, para quando for solicitado pelo master já estará pronto
void setup() {
//Configura o SPI modo escravo:
pinMode(MISO, OUTPUT);
SPCR |= _BV(SPE);
SPI.attachInterrupt();
//Configura os pinos de conexão ao encoder como ENTRADA
pinMode(encoder0PinA, INPUT_PULLUP);
pinMode(encoder0PinB, INPUT_PULLUP);
pinMode(INDICE, INPUT_PULLUP);
//Habilita interrupção de mudança no pino 4 = Encoder_B:
//PCintPort::attachInterrupt(encoder0PinB, encoderBint,CHANGE);
//Interrupções Externas Nativas do Arduino (pino 2 e 3):
attachInterrupt(0, encoderAInt, CHANGE); //Configura interrupção externa no pino 2 e
//amarra-se a ela a função de incrementar o valor do encoder.
attachInterrupt(1, encoderBInt, CHANGE); //Configura interrupção externa no pino 3 e amarra-
//se a ela a função de incrementar o valor do encoder.
//Frequência PWM:
//TCCR1B = TCCR1B & 0b11111000 | 1; // set 31 kHz PWM
Serial.begin (38400);
ajuda();
//recoverPIDfromEEPROM();
//Configurando o PID:

```

```

myPID.SetMode(AUTOMATIC);
myPID.SetSampleTime(1);
myPID.SetOutputLimits(-255,255);
}
bool fila_cheia = false;
void loop(){
//Executa setpoints de 20 em 20 ms, se disponível e habilitado.
if (temp_executacomandos_fila && (millis() - temp_timer_executacomando >= 20)) {
antigo_setpoint = proximo_setpoint;
executa_proximo_setpoint();
destino_desejado = antigo_setpoint;
temp_timer_executacomando = millis();
fila_cheia = (fila_setpoints.count() >= tamanho_fila);
}
//Verifica se foi enviado comando para limpar a fila
if (pronto_limpar_fila) {
fila_setpoints.clear();
pronto_limpar_fila = false;
}
if (recebidoComandoI2C_completo) {
recebidoComandoI2C();
}
//Processamento e atualização do PID de posicionamento:
input = encoder0Pos;
setpoint=destino_desejado;
while(!myPID.Compute()) {}
if (habilitaMotor)
{
if(input==setpoint) pwmOut(0);
else pwmOut(output);
}
//Aqui atualiza a posição atual armazenada em um char array, pois se o master solicitar já estará
//disponível.

```

```

//Mas só pode-se modificar a posição armazenada se o comando de 'Onde está?' Não estiver
//sendo executado,
//para que não aconteça de atualizar a posição no meio do envio.
if (!(interpretandoComandoSPI && SPI_buffer[0] == 'O')) armazenaPosicaoAtual();
//Só processa o serial de 200 em 200 milissegundos
if((millis() - temp_timer_serial >= 200) && Serial.available()) {
temp_timer_serial = millis();
comando_USB();
}
x1= digitalRead(encoder0PinA);
x2= digitalRead(encoder0PinB);
Serial.println(x1);
Serial.println(x2);
}
//Função para Saída do PWM
void pwmOut(int out) {
if(out<0) {
analogWrite(M1,0);
analogWrite(M2,abs(out));
}
else {
analogWrite(M2,0);
analogWrite(M1,abs(out));
}
}
//ENCODER EM QUADRATURA:
//PIND & 4 = Leitura pino 2
//PIND & 8 = Leitura pino 3
const int QEM [16] = {0,-1,1,2,1,0,2,-1,-1,2,0,1,2,1,-1,0}; //Matriz do encoder de Quadratura
static unsigned char New, Old;
void encoderBInt() {
Old = New << 2;
New = ((PIND & 8) >> 3)+ ((PIND & 4) >> 1); //

```

```

encoder0Pos+= QEM [Old + New];
b_++;
}
void encoderAInt() { // Interrupção de mudança de pino
Old = New << 2;
New = ((PIND & 8) >> 3)+ ((PIND & 4) >> 1); //
encoder0Pos+= QEM [Old + New];
a_++;
}
//Quando está interpretando um comando, responde o equivalente ao recebido, porém, em todos
//os campos com o byte incrementado em 1.
ISR (SPI_STC_vect) {
bool erro_checksum = false;
byte c = SPDR;
if (!interpretandoComandoSPI)
{
switch(c)
{
case 'S':
//Encontrou um comando. Setpoint
break;
case 'R':
//Encontrou um comando. Reset setpoint
break;
case 'M':
//Encontrou um comando. Habilita ou desabilita Motor
break;
case 'O':
//Encontrou um comando. Onde está? (Qual posição do encoder)
break;
default: return;
}
interpretandoComandoSPI = true;

```

```

SPI_indice = 0;
SPI_buffer [SPI_indice] = c;
//retorna para o master que recebeu o S ou o R
SPDR = c+1; //para validar no master
}
else
{
SPI_indice++;
//Aqui já está interpretando um comando:
if (SPI_indice < 10) {
SPI_buffer [SPI_indice] = c;
if (SPI_indice ==9)
{
//Último comando recebido
//Acabou a interpretação do comando
interpretandoComandoSPI = false;
//Sinaliza para que o sistema processe:
if (!fila_cheia) recebidoComandoI2C_completo = true;
}
//Aqui ocorre um caso especial.
//O comando sendo interpretado é um 'Onde está'?'
if (SPI_buffer[0] == 'O')
{
//Aqui a tratativa é diferente. Retorna posição do encoder
SPDR = localAtual_armazenado[SPI_indice];
return; //Não pode prosseguir nesse código, pois a tratativa é diferente do resto dos comandos
}
if (!fila_cheia) SPDR = c+1; //para validar no master
else SPDR = 'P'; //informa fila cheia
}
}
}
bool erro_checksum;

```

```

void recebidoComandoI2C(){
recebidoComandoI2C_completo = false;
if (SPI_buffer[0] == 'S')
{
//Comando SETPOINT
//A posição 0 do buffer é 'S' = comando
//A posição 1 é o número do eixo, ignora
//A posição 2 a 9 é o valor do setpoint em hexadecimal, formando um número de 32 bits = long
//Salvamos o setpoint:
long setpoint_ = 0;
setpoint_ |= (long)caracterHex_int(SPI_buffer[2]) << 28; //7 posições
setpoint_ |= (long)caracterHex_int(SPI_buffer[3]) << 24; //6 posições
setpoint_ |= (long)caracterHex_int(SPI_buffer[4]) << 20; //5 posições
setpoint_ |= (long)caracterHex_int(SPI_buffer[5]) << 16; //4 posições
setpoint_ |= (long)caracterHex_int(SPI_buffer[6]) << 12; //3 posições
setpoint_ |= (long)caracterHex_int(SPI_buffer[7]) << 8; //2 posições
setpoint_ |= (long)caracterHex_int(SPI_buffer[8]) << 4; //1 posição
setpoint_ |= (long)caracterHex_int(SPI_buffer[9]); //0 parado
fila_setpoints.push(setpoint_);
fila_cheia = (fila_setpoints.count() >= tamanho_fila);
}
else if (SPI_buffer[0] == 'R')
{
//Comando RESET SETPOINT
encoder0Pos = 0;
proximo_setpoint = 0;
destino_desejado = 0;
}
else if (SPI_buffer[0] == 'M')
{
//Comando HABILITA OU DESABILITA MOTOR
//Último caractere informa. 1 - habilita, 0 - desabilita.
//Por padrão o sistema já inicia habilitado

```

```

if (SPI_buffer[9] == '1')
{
habilitaMotor = true;
}
else if (SPI_buffer[9] == '0')
{
habilitaMotor = false;
analogWrite(M1,0);
analogWrite(M2,0);
}
}
}

/*Interpreta e executa comandos recebidos pela porta USB do arduino. Serial.*/
void comando_USB() {
char comando = Serial.read();
//Processa o segundo parâmetro, se houver:
char parametro[7] = " ";
for (int i =0; i<7; i++)
{
delay(100);
if (Serial.available())
{
char p = Serial.read();
if (p == ';') break;
parametro[i] = p;
}
else break;
}

//Para não diferenciar maiúsculas/minúsculas:
if(comando>'Z') comando-=32;
switch(comando) {
case 'P': kp=atof(parametro);
myPID.SetTunings(kp,ki,kd);

```



```
Serial.println();
Serial.print("Kp=");
Serial.print(atoi(parametro));
Serial.println(" OK");
break;
case 'I': ki=atof(parametro);
myPID.SetTunings(kp,ki,kd);
Serial.println();
Serial.print("Ki=");
Serial.print(atoi(parametro));
Serial.println(" OK");
break;
case 'D': kd=atof(parametro);
myPID.SetTunings(kp,ki,kd);
Serial.println();
Serial.print("Kd=");
Serial.print(atoi(parametro));
Serial.println(" OK");
break;
case '!': printPos();
break;
case 'X': destino_desejado=atol(parametro);
break;
case 'C': Serial.print("Kp=");
Serial.print(kp);
Serial.print(" Ki=");
Serial.print(ki);
Serial.print(" Kd=");
Serial.println(kd);
break;
case '?': ajuda();
break;
case 'W': writetoEEPROM();
```

```
break;
case 'K': eedump();
break;
case 'R': recoverPIDfromEEPROM();
break;
case 'S': fila_setpoints.push(atol(parametro));
Serial.println();
Serial.print("SetPoint=");
Serial.print(atol(parametro));
Serial.println(" OK");
break;
case 'L': fila_setpoints.clear();
break;
case 'F': encoder0Pos=atol(parametro);
break;
}
}
void printPos() {
Serial.println("");
Serial.print(F("Posicao_Encoder="));
Serial.print(encoder0Pos);
Serial.print(F(" Saida_PID="));
Serial.print(output);
Serial.print(F(" SetPoint="));
Serial.println(setpoint);
}
void ajuda() {
Serial.println(F("\nServocontrolador - Interface Serial/USB"));
Serial.println(F("Comandos:"));
Serial.println(F("P222.3 - Define constante Kp = 222.3"));
Serial.println(F("I222.3 - Define constante Ki = 222.3"));
Serial.println(F("D222.3 - Define constante Kd = 222.3"));
Serial.println(F("S500 - Muda o setpoint atual para a posição absoluta de 500 pulsos));
```

```

Serial.println(F("? - Exibe essa mensagem de ajuda"));
Serial.println(F("C - Exibe as constantes atuais do controlador (Kp, Ki, Kd)"));
Serial.println(F(". - Exibe o ponto atual do sistema (posição do encoder, saída PID e
setpoint)"));
}
void writetoEEPROM() { // Mantém os valores definidos do PID na EEPROM para que sejam
//mantidos quando o Arduino desligar
  eeput(kp,0);
  eeput(ki,4);
  eeput(kd,8);
  double cks=0;
  for(int i=0; i<12; i++) cks+=EEPROM.read(i);
  eeput(cks,12);
  Serial.println("\nPID values stored to EEPROM");
  //Serial.println(cks);
}
void recoverPIDfromEEPROM() {
  double cks=0;
  double cksEE;
  for(int i=0; i<12; i++) cks+=EEPROM.read(i);
  cksEE=eeget(12);
  //Serial.println(cks);
  if(cks==cksEE) {
    Serial.println(F("*** Found PID values on EEPROM"));
    kp=eeget(0);
    ki=eeget(4);
    kd=eeget(8);
    myPID.SetTunings(kp,ki,kd);
  }
  else Serial.println(F("*** Bad checksum"));
}
void eeput(double value, int dir) {
  char * addr = (char *) &value;

```

```

for(int i=dir; i<dir+4; i++) EEPROM.write(i,addr[i-dir]);
}
double eeget(int dir) {
double value;
char * addr = (char * ) &value;
for(int i=dir; i<dir+4; i++) addr[i-dir]=EEPROM.read(i);
return value;
}
void eedump() {
for(int i=0; i<16; i++) {
Serial.print(EEPROM.read(i),HEX);
Serial.print(" ");
}Serial.println();
}
//Lê o setpoint da pilha de comandos e o atualiza houver comandos na fila.
bool executa_proximo_setpoint() {
if (fila_setpoints.count() > 0) {
proximo_setpoint = fila_setpoints.pop();
fila_cheia = (fila_setpoints.count() >= tamanho_fila);
}
}
//Transforma um caractere ASCII (vindo em notação Hexadecimal) em um inteiro de 4 bits
byte characterHex_int(char c)
{
//É um caractere no mínimo maior ou igual a '0'
if (c > 47)
{
//E é um caractere menor ou igual a '9'
if (c < 58)
{
return c - (byte)'0';
}
else if (c > 64 && c < 71)

```

```

{
return c - (byte)'A' + 10;
}
}
//nenhum? Retorna zero
return 0;
}
//Transforma um inteiro de 4bits em um caractere com notação Hexadecimal
char int_caracterHex(byte c)
{
return "0123456789ABCDEF"[0x0F & c];
}
void armazenaPosicaoAtual()
{
long posicao = encoder0Pos; //Armazena aqui, pois a variável pode ser alterada nesse meio
//tempo, devido a interrupção do Encoder
//Pega cada posição de 4bits do int32, separa, transforma em caractere e compila o array:
localAtual_armazenado[2] = int_caracterHex((byte)((posicao & 0xF0000000ul) >> 28));
localAtual_armazenado[3] = int_caracterHex((byte)((posicao & 0x0F000000ul) >> 24));
localAtual_armazenado[4] = int_caracterHex((byte)((posicao & 0x00F00000ul) >> 20));
localAtual_armazenado[5] = int_caracterHex((byte)((posicao & 0x000F0000ul) >> 16));
localAtual_armazenado[6] = int_caracterHex((byte)((posicao & 0x0000F000ul) >> 12));
localAtual_armazenado[7] = int_caracterHex((byte)((posicao & 0x00000F00ul) >> 8));
localAtual_armazenado[8] = int_caracterHex((byte)((posicao & 0x000000F0ul) >> 4));
localAtual_armazenado[9] = int_caracterHex((byte)((posicao & 0x0000000Ful)));
//Gera o Check:
//(forma um int de 4bits com os bits menos significativos dos 4 últimos caracteres:
localAtual_armazenado[10] = int_caracterHex(((posicao & 0x00001000ul) >> 12) | ((posicao
& 0x00000100ul) >> 8) | ((posicao & 0x00000010ul) >> 4) | (posicao & 0x00000001ul));

```

APÊNDICE C – Código I/O: DAQ

```

% Programa de interface com Máquina IMC Inversal 300
clear all;
close all;
clc;
%Ler os dados da planilha Rotina para enviar para a saída do USB-6008
K=xlsread('D:\DOCTORADO\Maquina de solda\Faguim5.xlsx');
K11=K(:,2);
K22=K(:,3);
K1=K11*0.01965;
K2=K22/2;
D = [K1 K2];
dio = digitalio('nidaq','Dev1'); %Habilita portas digitais
Arame= addline(dio,0,'out'); %Adiciona porta 0 da DAQ
Potencia= addline(dio,1,'out'); %Adiciona porta 1 da DAQ
Gas= addline(dio,2,'out'); %Adiciona porta 2 da DAQ
Disparo= addline(dio,3,'out'); %Adiciona porta 3 da DAQ-%Trigger câmera
putvalue(dio,0); %Envia zero para as saídas %digitais
Motoman = addline(dio,4,'in'); %Adiciona porta 4 da DAQ
ai = analoginput('nidaq','Dev1'); %Habilita porta entrada %analógica
ao = analogoutput('nidaq','Dev1'); %Habilita porta saída %analógica
set(ai,'InputType','SingleEnded'); %Informar ao Matlab que a %tensão lida dos canais
%analógicos tem o referencial no GND
addchannel(ai,[0 1]); %Adiciona canais %analógicos entrada
addchannel(ao,[0 1]); %Adiciona canais %analógicos saída
get(ai)
Nit1=1000;% número de amostras
Nit= length(K),%(Nit1*DuraSolda)/20; %1000 amostras = 20 %segundos
DuraSolda = (Nit*20)/1000; % duração da solda
t = linspace(0,DuraSolda,Nit);
tic; %inicia o cronômetro para que possa calcular a taxa de %amostragem
out=getvalue(Motoman);
while (out<1)

```

```

fprintf ('Aguardando sinal de habilitação\n');
out=getvalue(Motoman)
end
Habilita=out;
while (Habilita>1)           %Motoman envia sinal para %abertura do arco
figure(1);
clf;
f=plot(nan,nan,'b-');
grid,xlim([1 Nit]),ylim([0 240]),title ('Sinais de Entrada na Máquina');
xlabel('Tempo (ms)');
ylabel('Corrente (A)');
figure(2);
clf;
g=plot(nan,nan,'r-');
grid,xlim([1 Nit]),ylim([0 20]),title ('Sinais de Entrada na Máquina');
xlabel('Tempo (ms)');
ylabel('Veloc Arame (m/min)');
putvalue(Gas,1); %Ativa gás
pause (2) % Tempo para purga
figure(3);
clf;
h=plot(nan,nan,'b-');
grid,xlim([1 Nit]),ylim([0 70]),title ('Sinais de Saída da Máquina');
xlabel('Tempo (ms)');
ylabel('Corrente (A)');
putvalue(Arame,1); %Ativa arame
putvalue(Potencia,1); %Ativa potência
for k =1:Nit
valorSaida1=K1(k);
valorSaida2=K2(k);
putsample(ao , [valorSaida1 valorSaida2]);
vecSaida1(k)=valorSaida1;
vecSaida2(k)=valorSaida2;

```

```

valorEntrada=getsample(ai)
In0 = valorEntrada(:,1);
In1 = valorEntrada(:,2);
vecEntrada0(k)=7.459355417*(In0)+4.623986552; %Tensão
vecEntrada1(k)=34.26674016*(In1)-4.006811532; %Corrente
pause (1e-6);
if vecSaida2(k)>230
putvalue(Disparo,1); %Ativa disparo
end
set(f,'xdata',[1:k],'ydata',[vecSaida1([1:k])]);
set(g,'xdata',[1:k],'ydata',[vecSaida2([1:k])]);
set(h,'xdata',[1:k],'ydata',[vecEntrada0([1:k])]);
end
putvalue(Arame,0); %Desativa arame
putvalue(Potencia,0); %Desativa potência
putvalue(Disparo,0); %Desativa disparo
figure(4)
vcc1=50.890585*vecSaida1;
vcc2=1.99*vecSaida2;
[hAx1,hLine1,hLine2] = plotyy([1:Nit],vcc1,[1:Nit],vcc2);
grid,title ('Sinais de Entrada na Máquina');
legend('Canal 0 - Corrente','Canal 1 - Alimentação Arame');
xlabel('Tempo (ms)');
ylabel(hAx1(1),'Corrente (A)' % eixo y à esquerda
ylabel(hAx1(2),'Velocidade (m/min)' % eixo y à direita
figure(5)
[hAx,hLine1,hLine2] = plotyy([1:Nit],vecEntrada0,[1:Nit],vecEntrada1);
D2=[vecSaida1; vecSaida2];
D = [t; vecEntrada0; vecEntrada1; D2];
D1 = D';
format
xlswrite('Essais.xlsx', D1); %Cria uma planilha e salva os %sinais de saída da máquina
grid,title ('Sinais de Saída da Máquina');

```



```
legend('Canal 0 - Tensão Média','Canal 1 - Corrente Média');
xlabel('Tempo (ms)');
ylabel(hAx(1),'Tensão (V)' % eixo y à esquerda
ylabel(hAx(2),'Corrente (A)' % eixo y à direita
samprate = Nit/toc % calcula a taxa de amostragem média
putsample(ao,[0 1]); wait(ai,0.02);
pause (1) % Tempo de purga
putvalue(Gas,0); %Desativa gás
putvalue(dio,0);
delete (dio);
delete(ai);
clear ai;
putsample(ao,[0 1]);
delete(ao);
clear ao;
end
```

APÊNDICE D – Script Excel®

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2			ms	ms	ms	A	A	m/min
3		SubRotina	Tduracao	Tp	Tb	Ip	Ib	V-Arame
4		A	1,2	0,1	0,2	200	20	10
5		B	0,8	0,4	0,4	120	30	7
6		C	2,4	0,1	0,3	150	25	12
7		D	1	0,05	0,2	100	40	8
8		E	1,2	0,1	0,2	200	20	10
9		F	0,8	0,4	0,4	120	30	7
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								

BANCO SELETOR TAB VISUALIZADOR (+)

a) Entrada dos parâmetros.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1													
2			ms	ms	ms	A	A	m/min					
3		SubRotina	Tduracao	Tp	Tb	Ip	Ib	V-Arame					
4		D	1	0,05	0,2	100	40	8					
5		E	1,2	0,1	0,2	200	20	10					
6		D	1	0,05	0,2	100	40	8					
7		A	1,2	0,1	0,2	200	20	10					
8		A	1,2	0,1	0,2	200	20	10					
9		F	0,8	0,4	0,4	120	30	7					
10		B	0,8	0,4	0,4	120	30	7					
11		C	2,4	0,1	0,3	150	25	12					
12													
13													
14													
15													
16													
17													
18													
19													
20													
21													
22													
23													
24													

BANCO SELETOR TAB VISUALIZADOR (+)

Gerar Rotina

b) Seleção e sequência.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1											
2			(x10 μ s)	Ampere	cm/min						
3		SubRotina	TEMPO	CORRENTE(A)	ARAME (m/min)						
4	D		0	40	2						
5	D		1	40	2						
6	D		2	40	2						
7	D		3	40	2						
8	D		4	40	2						
9	D		5	40	2						
10	D		6	40	2						
11	D		7	40	2						
12	D		8	40	2						
13	D		9	40	2						
14	D		10	40	2						
15	D		11	40	2						
16	D		12	40	2						
17	D		13	40	2						
18	D		14	40	2						
19	D		15	40	2						
20	D		16	40	2						
21	D		17	40	2						
22	D		18	40	2						
23	D		19	40	2						
24	D		20	100	8						

Limpar Valores

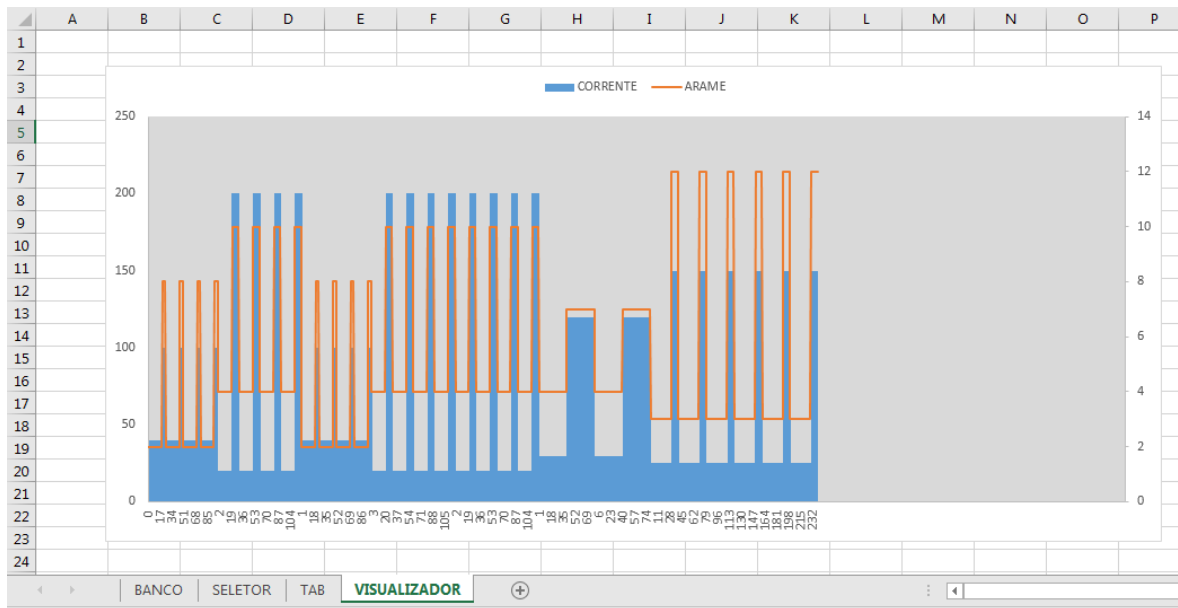
Gerar Rotina

NOME DA ROTINA

RotinaD

Exportar Rotina

c) Tabulação dos dados.



d) Visualiza as formas de onda.

ANEXO A – Funções Cinemáticas Inversa e Direta (Lima II, 2005)

% FUNÇÃO DE Cinemática inversa de atuadores

function A=cininvatu(teta);

k1=-1/158;

A(1)=teta(1)/k1;

BA=190;

BC=240;

BD=140;

DJ=430;

BJ=450;

k2=-2.5/pi;

%lambda2=374.3659361; %Comprimento do atuador linear, para que A2=0 -> teta2=0

aux=cos(-acos(BA/BC)-acos((BJ^2+BD^2-DJ^2)/(2*BJ*BD))+180/180*pi);

lambda2=sqrt(BC^2+BD^2-2*BC*BD*aux);

aux=teta(2)-acos(BA/BC)-acos((BJ^2+BD^2-DJ^2)/(2*BJ*BD))+(180/180)*pi;

A(2)=(sqrt(BC^2+BD^2-2*BC*BD*cos(aux))-lambda2)/k2;

FE=190;

FG=240;

FH=140;

k3=-2.5/pi;

%lambda3=190.115598; %Comprimento do atuador linear, para que A2=0 e A3=0 -> teta3=0

lambda3=sqrt(FG^2+FH^2-2*FG*FH*cos(-acos(FE/FG)+90*pi/180));

A(3)=(sqrt(FG^2+FH^2-2*FG*FH*cos(teta(3)+teta(2)-acos(FE/FG)+0.5*pi))-lambda3)/k3;

k4=-1/128;

A(4)=-(teta(4)+teta(2)+teta(3))/k4;

k5=-1/128;

k6=1.5;

A(5)=((teta(5)/k6)+teta(4))/k5;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Função cinemática inversa

function teta = cininv(T0T,T5T);

```

lam(1)=0.7 *1000;
L(2)=0.69 *1000;
L(2)=0.45 *1000;
L(3)=0.67 *1000;
lam(5)=0.095 *1000;
T05=T0T*inv(T5T);
nx=T05(1,1); ox=T05(1,2); ax=T05(1,3); px=T05(1,4);
ny=T05(2,1); oy=T05(2,2); ay=T05(2,3); py=T05(2,4);
nz=T05(3,1); oz=T05(3,2); az=T05(3,3); pz=T05(3,4);
teta(1)=atan2(-px,py);
w1=-sin(teta(1))*px + cos(teta(1))*py + lam(5)*sin(teta(1))*ax - lam(5)*cos(teta(1))*ay;
w2=pz-lam(1)-lam(5)*az;
S3=(w1*w1+w2*w2-(L(2)*L(2)+L(3)*L(3)))/(2.0*L(2)*L(3));
teta(3)=asin(S3);
C3=cos(teta(3));
S2=(w2*L(3)*C3-
w1*(L(3)*S3+L(2)))/((L(3)*L(3)*C3*C3)+(L(3)*S3+L(2))*(L(3)*S3+L(2)));
C2=(w1*L(3)*C3+w2*(L(3)*S3+L(2)))/((L(3)*L(3)*C3*C3)+(L(3)*S3+L(2))*(L(3)*S3+L(
2)));
teta(2)=atan2(S2,C2);
S2=sin(teta(2));
C2=cos(teta(2));
lam5S34= sin(teta(1))*S2*px-cos(teta(1))*S2*py+C2*pz-lam(1)*C2-L(2)-L(3)*S3;
lam5C34=-sin(teta(1))*C2*px+cos(teta(1))*C2*py+S2*pz-lam(1)*S2-L(3)*C3;
teta34=atan2(lam5S34,lam5C34);
teta(4)=teta34-(teta(3));
S5=cos(teta(1))*nx+sin(teta(1))*ny;
C5=cos(teta(1))*ox+sin(teta(1))*oy;
teta(5)=atan2(S5,C5);

```

ANEXO B – Programa Arduino® (Zinato, 2019)

```

#define encoder0PinA 2 // PD2;
#define encoder0PinB 3 //PD4;
#define M_PWM 5
#define M_D1 7
#define M_D2 8
#define Dig9 9
#define Dig6 6
#define INDICE 10
volatile long encoder0Pos = 0; //Posição absoluta do encoder
unsigned long temp_timer_amostragem;
unsigned long temp_timer_ensaio;
unsigned long a_;
unsigned long b_;
void setup() {
    //Configuramos os pinos de conexão ao encoder como ENTRADA
    pinMode(encoder0PinA, INPUT_PULLUP);
    pinMode(encoder0PinB, INPUT_PULLUP);
    pinMode(INDICE, INPUT_PULLUP);
    pinMode(Dig9, INPUT_PULLUP);
    pinMode(Dig6, INPUT_PULLUP);
    pinMode(M_D1, OUTPUT);
    pinMode(M_D2, OUTPUT);
    pinMode(M_PWM, OUTPUT);
    //Habilitamos interrupção de mudança no pino 4 = Encoder_B:
    attachInterrupt(0, encoderAInt, CHANGE); //Configuramos //interrupção externa no pino 2 e
    //amarramos a ela a função de //incrementar o valor do encoder.
    attachInterrupt(1, encoderBInt, CHANGE); //Configuramos //interrupção externa no pino 3 e
    //amarramos a ela a função de //incrementar o valor do encoder.
    //Frequencia PWM:
    //Neste trabalho está sendo utilizado a padrão do Arduino.
    //Verificar informações sobre o timer em:
    //https://playground.arduino.cc/Main/TimerPWMCheatsheet

```

```

//TCCR1B = TCCR1B & 0b11111000 | 1; // set 31 kHz PWM
  Serial.begin (38400);
  pwmOut(0);
  Serial.println("Aguardando 5 segundos...");
  delay(5000);
  pwmOut(255); //
  temp_timer_amostragem = millis();
  temp_timer_ensaio = millis();
}
void loop(){
  //Executa setpoints de 5 em 5 ms, se disponível e habilitado.
  if (((millis() - temp_timer_amostragem) >= 5)) {
    temp_timer_amostragem = millis();
    Serial.println(encoder0Pos);
    //encoder0Pos=encoder0Pos+5;
  }
}
//Função para Saida do PWM
void pwmOut(int out) {
  if (out < 0) {
    analogWrite(M_PWM, abs(out));
    digitalWrite(M_D1,LOW);
    digitalWrite(M_D2,HIGH);
  }
  else {
    analogWrite(M_PWM, abs(out));
    digitalWrite(M_D2,LOW);
    digitalWrite(M_D1,HIGH);
  }
}
//ENCODER EM QUADRATURA:
//PIND & 4 = Leitura pino 2
//PIND & 8 = Leitura pino 3

```

```
const int QEM [16] = {0,-1,1,2,1,0,2,-1,-1,2,0,1,2,1,-1,0}; //Matriz do encoder de Quadratura
static unsigned char New, Old;

void encoderBInt() {
    Old = New << 2;
    New = ((PIND & 8) >> 3)+ ((PIND & 4) >> 1); //
    encoder0Pos+= QEM [Old + New];
    b_++;
}

void encoderAInt() { // handle pin change interrupt for D2
    Old = New << 2;
    New = ((PIND & 8) >> 3)+ ((PIND & 4) >> 1); //
    encoder0Pos+= QEM [Old + New];
    a_++;
}
```


ANEXO C – Rotina *Matlab*[®] (Zinato, 2019)

```

Tempo = [0:5:5*(length(abs(Posicao))-1)];
figure(1)
plot(Tempo,abs(Posicao));
title('Posição x Tempo');
xlabel('Tempo');
ylabel('Posição');
t = length(abs(Posicao));
%Determinação da velocidade de movimento através de derivação %numérica
for x = 1:(t-1)
    Deriv_Pos(x) = (((Posicao(x+1))-(Posicao(x)))/0.005);
end
Tempo2 = [0:5:5*(length(abs(Posicao))-2)];
figure(2)
plot(Tempo2,Deriv_Pos);
title('Velocidade x Tempo');
xlabel('Tempo');
ylabel('Velocidade');
%Geração de vetor com a entrada dada no sistema (neste caso, o %PID funciona a 100 o tempo
%todo) e criação do vetor velocidade %com somente as 200 primeiras posições do vetor
%original.
TmVect = 200;
Entrada=255*ones(1,TmVect);
Velocidade=Deriv_Pos(1:TmVect);
Tempo=0:0.005:0.005*(TmVect-1);
figure(3)
plot(Tempo,Velocidade)
%usar o systemIdentification
%Ajustar estes valores com base na FT encontrada pelo %systemIdentification para cada
%amostra
G=tf([192.2033],[0.008358 1])
G.iodelay=0.005;
figure(3)

```

```

hold on
step(255*G,1)
%Ajustar estes valores com base na FT encontrada pelo %systemIdentification para cada
%amostra
K=192.2033;
tau=0.008358;
teta=0.005;
%4.1 - Ziegler-Nichols
Kp=1.2*tau/(K*teta)
Ti=2*teta
Td=0.5*teta
PID=tf([Kp*Td*Ti Kp*Ti Kp],[Ti 0])
figure(4)
step(feedback(PID*G,1),0.1)
title('Ziegler-Nichols');
Resposta=step(feedback(PID*G,1),0:0.001:0.1);
RMSE=0;
for i=1:101
    RMSE=RMSE+(1-Resposta(i))^2;
end
RMSE_ZN=(RMSE/200)^0.5
%4.2 - IMC by Rivera
lambda = 0.8*teta
Kp=(2*tau+teta)/(K*(lambda+teta))
Ti=tau+(teta/2)
Td=(2*teta)/(2*tau+teta)
PID=tf([Kp*Td*Ti Kp*Ti Kp],[Ti 0])
figure(4)
hold on
step(feedback(PID*G,1),1)
title('IMC - Rivera');
Resposta=step(feedback(PID*G,1),0:0.001:0.1);
RMSE=0;

```

```

for i=1:101
    RMSE=RMSE+(1-Resposta(i))^2;
end
RMSE_Riv=(RMSE/200)^0.5
%4.3 - IMC by Skogestad
Kp=(2*tau+teta)/(3*teta*K)
Ti_1=tau+(teta/2)
Ti_2=8*teta
if Ti_1<Ti_2
    Ti=Ti_1
else
    Ti=Ti_2
end
Td=(tau*teta)/(2*tau+teta)
PID=tf([Kp*Td*Ti Kp*Ti Kp],[Ti 0])
figure(4)
hold on
step(feedback(PID*G,1),0.1)
title('IMC - Skogestad');
Resposta=step(feedback(PID*G,1),0:0.001:0.1);
RMSE=0;
for i=1:101
    RMSE=RMSE+(1-Resposta(i))^2;
end
RMSE_Skog=(RMSE/200)^0.5
%Sree et al
Kp=((tau/teta)+0.5)/K
Ti=tau+(0.5*teta)
Td=(0.5*teta)*((tau+0.1667*teta))/(tau+0.5*teta)
PID=tf([Kp*Td*Ti Kp*Ti Kp],[Ti 0])
figure(4)
hold on
step(feedback(PID*G,1),0.1)

```

```

title('Sree et al');
Resposta=step(feedback(PID*G,1),0:0.001:0.1);
RMSE=0;
for i=1:101
    RMSE=RMSE+(1-Resposta(i))^2;
end
RMSE_Sree=(RMSE/200)^0.5
%Vilanova
Ti=tau+0.03*teta
Kp=Ti/2.65*K*teta
N=(tau/Ti)-1
Td=1.72*teta*N
PID=tf([Kp*Td*Ti Kp*Ti Kp],[Ti 0])
figure(4)
hold on
step(feedback(PID*G,1),0.5)
title('Resposta ao degrau');
Resposta=step(feedback(PID*G,1),0:0.001:1);
RMSE=0;
for i=1:1001
    RMSE=RMSE+(1-Resposta(i))^2;
end
RMSE_VN=(RMSE/200)^0.5

```