

**MODELAGEM E CONTROLE DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO  
CORDÃO DE SOLDA NO PROCESSO GMAW USANDO SISTEMAS  
RECONFIGURÁVEIS**

Por,  
**Edna Margarita Moncayo Torres, MSc.**

Brasília,

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

Faculdade de Tecnologia

Departamento de Engenharia Mecânica

**Programa de Pós-Graduação em Sistemas Mecatrônicos**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Programa de Pós-Graduação em Sistemas Mecatrônicos

TESE DE DOUTORADO EM MECATRONICA

**MODELAGEM E CONTROLE DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO  
CORDÃO DE SOLDA NO PROCESSO GMAW USANDO SISTEMAS  
RECONFIGURÁVEIS**

Por,

**Edna Margarita Moncayo Torres, MSc.**

**Orientador: Prof. PhD. Sadek C. Absi Alfaro**

Brasília

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Programa de Pós-Graduação em Sistemas Mecatrônicos

**MODELAGEM E CONTROLE DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS  
DO CORDÃO DE SOLDA NO PROCESSO GMAW USANDO SISTEMAS  
RECONFIGURÁVEIS**

**EDNA MARGARITA MONCAYO TORRES**

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

**APROVADA POR:**



**Prof. Sadek Crisóstomo Absi Alfaro, PhD – Universidade de Brasília.  
(Orientador)**



**Eduardo de Magalhães Braga, Dr – Universidade Federal do Pará.  
(Examinador Externo)**



**Evandro Leonardo Silva Teixeira, Dr.- UnB - Faculdade do Gama  
(Examinador Externo)**



**Prof. Carlos Humberto Llanos Quintero, Dr. - Universidade de Brasília.  
(Examinador Interno)**

BRASÍLIA/DF, 18 DE JULHO DE 2018.



*Dedico este trabalho ao meu pai que desde o céu me acompanha a quem devo grande parte de quem sou, quem me ensinou a amar, a caminhar pela vida, e a entender que nenhuma derrota é definitiva, que nenhuma queda é para sempre.*

## AGRADECIMENTOS

*Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por ter sido o meu guia durante toda essa caminhada, por colocar ao meu lado pessoas especiais, que fizeram deste doutorado um misto de desafios, conquistas, alegrias e novas descobertas.*

*Agradeço a meu pai, Jorge Moncayo, por tudo que me ensinou, por tudo que fez por mim, por todo amor e carinho que sempre me dedicou. Foi o melhor pai do mundo e sem dúvida que seu exemplo, suas palavras, seus ensinamentos foram os melhores que alguém pode receber. Por isso, meu pai, todos meus triunfos são seus também.*

*A minha mãe Nubia Torres a meu irmão Jorge Enrique por serem uma fonte inesgotável de carinho e amor. Porque devo para eles tudo o que eu sou hoje, tudo o que tenho alcançado e tudo o que alcançarei na vida; À minha família que mesmo na distância apoiaram, me deram força, incentivo e carinho.*

*Ao meu orientador, Professor Dr. Sadek Absi Alfaro, agradeço de uma forma única e imensa, pelos grandes ensinamentos, formação, o apoio e as lições de vida que aprendi.*

*Agradeço também a Efrain Rodriguez, pelo carinho e o apoio incondicional em todos os momentos.*

*Agradeço aos grandes amigos da equipe de soldagem Jesus Emilo Pinto, Andres Giron, Jairo Muñoz, Mylen Monteiro, Fabian Giron e Roger Thompson, deixo meu agradecimento profundo pela amizade, guia e companheirismo.*

*Aos amigos que conheci em Brasil e que são uma parte muito importante da minha vida, a os quais devo também agradecimentos pelo voto de confiança e força nas horas difíceis – Maria Fernanda Ramirez, Cristhian Riaño, Maria Camila Riaño, Claudia Gomez, Wendy Vargas, Cristabell Lopez, Gloria Liliana Lopez, Camilo Sanchez, Beatriz Sarmiento, Juan Pablo Diago, Juan Fernando Riasco, Sergio Pertuz, Suamy Cepeda, Clara Concha, William Gabalan e Sebastian Toquica.*

*Agradeço a todos que diretamente e indiretamente fizeram parte deste trabalho e que de alguma forma contribuíram para a conclusão do mesmo. Quero agradecer também o suporte financeiro fornecido pela CAPES.*

## RESUMO

### MODELAGEM E CONTROLE DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO CORDÃO DE SOLDA NO PROCESSO GMAW USANDO SISTEMAS RECONFIGURÁVEIS

Os requisitos de monitoramento, controle e processamento de dados em tempo real nos processos de soldagem aponta para a necessidade de desenvolvimento e aperfeiçoamento técnico dos diversos processos de fabricação. Neste contexto, as técnicas de projeto em FPGAs (*Field-Programmable Gate Arrays*) podem contribuir para a melhoria do rendimento de controladores projetados para processos de soldagem. Com base na importância do desenvolvimento de plataformas integradas, flexíveis e eficientes para a criação rápida de protótipos de sistemas de controle dirigido a aplicativos industriais, o presente estudo desenvolveu um sistema integrado em uma FPGA para a aquisição de imagens, controle e a modelagem das características geométricas externas de cordão de solda no processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*). Desenvolve-se um desenho de *hardware/software* para lograr um sistema com alto grau de flexibilidade e modularidade, ajustando os parâmetros do processo, permitindo uma resposta em tempo real, em que os parâmetros de velocidade de soldagem, velocidade de alimentação do arame e a tensão foram preditos em função de largura e reforço desejados. Para realizar o controle em malha fechada do sistema desenhou-se um controlador com base em uma máquina de inferência, onde se tomou como referência a diferença pretendida entre a largura e o reforço, além dos valores reais obtidos do cordão de solda. Tal cordão foi medido através de um sistema de aquisição e processamento de imagens fazendo uso de um kit veek mt da Terasic. O sistema de comunicação integrado desenvolvido demonstrou ser um dispositivo adequado para a aplicação definida, uma vez que a modelagem prediz adequadamente os parâmetros do processo para uma largura e o reforço do cordão de solda. O controlador e o sistema de aquisição de imagens apresentaram resultados satisfatórios em sua aplicação experimental.

## **ABSTRACT**

### **MODELING AND CONTROL OF GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF WELD BEAD IN THE GMAW PROCESS USING RECONFIGURABLE SYSTEMS**

The monitoring requirement, control, real time data processing, in welding processes, shows the need to develop and improve techniques in the various manufacturing processes. In this context, design techniques in FPGAs could contribute to improve the yield of controllers designed for welding processes. Considering the importance of the development of integrated, flexible and efficient platforms for fast creation of control system prototypes aimed at industrial applications, this work has developed an integrated system in an FPGA for image acquisition, control and modeling of external weld bead geometry in the GMAW process. A hardware/software design approach was developed in order to achieve a system with a high level of flexibility and modularity by adjustment of the process parameters, allowing a real-time response, where the welding speed, wire feed rate and tension are predicted due to a desired width and reinforcement. To perform the closed-loop control system designed tcontroller which is taken as reference the difference between width and reinforcement desires and actual values of the weld bead. The weld bead is measured by an acquisition system and image processing using the Terasic ALTERA VEEK-MT. The integrated system has been developed which has proven to be a suitable device for the specific application.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Processo de soldagem GMAW (Modificado de Modenesi <i>et. al.</i> , 2012). .....	7
Figura 2.2: Características geométricas do cordão (modificado Torres <i>et al.</i> 2013).....	9
Figura 2.3: Terminologia do processo de solda GMAW (modificado Modenesi <i>et. al.</i> , 2012).....	11
Figura 2.4: Efeito da tensão na geometria do cordão de solda. a) 21V, b) 24 V e c) 27 V. (Fonte própria).....	11
Figura 2.5: Efeito do amperagem no cordão de solda, a) 100A, b) 150 A e c) 200 A. (Fonte própria) .....	12
Figura 2.6: Efeito da velocidade de avanço no cordão de solda, a) velocidade de avanço demasiado baixa, b) velocidade de avanço correta. (Fonte própria) .....	13
Figura 2.7: Efeito das diferentes longitudes livres do eléctrodo sobre o cordão de solda. (Fonte própria).....	15
Figura 2.8: Efeito da posição do eléctrodo e a técnica de solda sobre o cordão (a) ângulo de empurre. (b) ângulo perpendicular (c) ângulo de arrastre. (Fonte própria).....	16
Figura 2.9: Zonas de transferência metálica na soldagem GMAW (Lopera, 2010).....	18
Figura 2.10: Sequência modo de transferência por curto circuito. (Fonte própria) .....	19
Figura 2.11: Sequência modo de transferência globular. (Fonte própria).....	19
Figura 2.12: Sequência modo de transferência por spray.....	20
Figura 2.13: Tecnologias diferentes de programação e implementação de sistemas embarcados. (HAMBLEN e FURMAN, 2001).....	21
Figura 2.14: Arquitetura de uma FPGA. ....	24
Figura 2.15: Cella lógica de uma FPGA.....	24
Figura 2.16: Diagrama de blocos de uma FPGA.....	25
Figura 2.17: Esquema geral dos sistemas de controle. (a) Em malha aberta; (b) em malha fechada.....	28
Figura 2.18: Esquema de um processo de controle especialista (Lopera, 2016).....	29
Figura 3.1: Classificação das investigações relacionadas com a geometria do cordão de solda.....	30
Figura 3.2: distribuição porcentual dos trabalhos e pesquisas.....	39
Figura 4.1: Distribuição e Localização do Sistema Computacional, Hardware e Equipamentos Utilizados.....	41
Figura 4.2: Mesa de deslocamento linear. ....	42

Figura 4.3: Esquema da metodologia desenvolvida para a pesquisa.....	45
Figura 4.4: Planejamento Composto Central para três variáveis.....	46
Figura 4.5: Sistema de <i>scanner</i> .....	49
Figura 4.6: Reconstrução do cordão de solda em 3D.....	50
Figura 4.7: Medidas dos parâmetros geométricos.....	50
Figura 4.8: Sequência para a obtenção dos parâmetros ótimos.....	55
Figura 4.9: Sistema de controle proposto.....	58
Figura 4.10: configuração dos espelhos.....	59
Figura 4.11: Sistema de visão.....	60
Figura 4.12: Arquitetura geral do sistema.....	61
Figura 4.13: Imagem original da largura e o reforço.....	62
Figura 4.14: Imagem es escala de cinza.....	62
Figura 4.15: Bloco redutor de cores RGB para cinza.....	63
Figura 4.16: Imagem binarizada.....	64
Figura 4.17: Seção da largura e da altura do cordão.....	64
Figura 4.18: Medidas da largura e o reforço do cordão.....	65
Figura 4.19: Componentes do <i>hardware</i> projetado para escritura de dados no cartão SD.....	66
Figura 4.20: Fluxograma do algoritmo que comanda o controle da largura.....	68
Figura 4.21: Fluxograma do algoritmo que comanda o controle do reforço.....	69
Figura 4.22: Esquematisação de um sistema embarcado em uma FPGA.....	70
Figura 4.23: Desenvolvimento de sistemas embarcados usando as IDE's SOPC, Quartus e Nios II.....	71
Figura 4.24: <i>Interface</i> do <i>System On a Programmable Chip</i> desenvolvida.....	72
Figura 4.25: Interface desenvolvida em Quartus II.....	73
Figura 4.26: Pinagem do sistema desenvolvido.....	74
Figura 4.27: IDE Nios II, usada para a programação da camada de software de sistemas embarcados em FPGA's.....	75
Figura 4.28: Esquema da comunicação da FPGA com o processo de soldagem.....	77
Figura 5.1: Cordão final obtido da parte 1 dos experimentos.....	78
Figura 5.2: Reconstrução em 3D da parte 1 dos experimentos.....	79
Figura 5.3: Medidas das características geométricas da parte 1 dos experimentos.....	79
Figura 5.4: Cordão final obtido da parte 2 dos experimentos.....	80
Figura 5.5: Reconstrução em 3D da parte 2 dos experimentos.....	80
Figura 5.6: Medidas das características geométricas da parte 2 dos experimentos.....	80

Figura 5.7: Cordão final obtido da parte 3 dos experimentos. ....	81
Figura 5.8: Reconstrução em 3D da parte 3 dos experimentos. ....	81
Figura 5.9: Medidas das características geométricas da parte 3 dos experimentos.....	82
Figura 5.10: Cordão final obtido da parte 4 dos experimentos .....	82
Figura 5.15: Reconstrução em 3D da parte 4 dos experimentos. ....	83
Figura 5.16: Medidas das características geométricas da parte 4 dos experimentos.....	83
Figura 5.13: Superfície de resposta do reforço do cordão de solda.....	86
Figura 5.14: Superfície de resposta do erro com respeito a <i>não uniformidade</i> do cordão de solda para o reforço. ....	86
Figura 5.15: Superfície de resposta da Largura do cordão de solda.....	88
Figura 5.16: Superfície de resposta do erro com respeito a <i>não uniformidade</i> do cordão de solda para a largura.....	88
Figura 5.17: Combinações variáveis de entrada para uma largura de 6mm.....	89
Figura 5.18: Combinações variáveis de entrada para uma largura de 7 mm.....	90
Figura 5.19: Combinações variáveis de entrada para um reforço de 2mm. ....	90
Figura 5.20: Combinações variáveis de entrada para um reforço de 2.5mm. ....	91
Figura 5.21: Cordão final obtido com largura de 5mm e um reforço de 2 mm.....	92
Figura 5.22: Reconstrução em 3D do cordão com largura de 5 mm e um reforço de 2 mm. ....	92
Figura 5.23: Medidas das características geométricas do cordão com largura de 5 mm e um reforço de 2 mm.....	93
Figura 5.24: Cordão final obtido com largura de 6 mm e um reforço de 3 mm.....	93
Figura 5.25: Reconstrução em 3D do cordão com largura de 6 mm e um reforço de 3 mm. ....	94
Figura 5.26: Medidas das características geométricas do cordão com largura de 6 mm e um reforço de 3 mm.....	94
Figura 5.27: Cordão final obtido com o sistema de controle com uma largura de 7 mm e o reforço de 3 mm, e uma largura de 5 mm e o reforço de 3 mm .....	98
Figura 5.28 Reconstrução em 3D do cordão final obtido com o sistema de controle com uma largura de 7 mm e o reforço de 3 mm, e uma largura de 5 mm e o reforço de 3 mm. ....	98
Figura 5.29: Medidas das características geométricas do cordão final obtido com o sistema de controle com uma largura de 7 mm e o reforço de 3 mm, e uma largura de 5 mm e o reforço de 3 mm.....	99

Figura 5.30: Comparação das amostras adquiridas pelo sistema de visão com as adquiridas com o <i>scanner</i> com uma largura de 7 mm e 5 mm.....	99
Figura 5.31: Comparação das amostras adquiridas pelo sistema de visão com as adquiridas com o <i>scanner</i> com um reforço de 3 mm. ....	100
Figura 5.32: Ações de controle na velocidade de soldagem para o cordão com uma largura de 7 mm e o reforço de 3 mm, e uma largura de 5 mm e um reforço de 3 mm. ....	100
Figura 5.33: Ações de controle na velocidade de alimentação do arame para uma largura de 7 mm e o reforço de 3 mm, e uma largura de 5 mm e um reforço de 3 mm. ....	101
Figura 5.34: Cordão final obtido com o sistema de controle com uma largura de 6 mm e o reforço de 2 mm, e uma largura de 5 mm e o reforço de 2 mm. ....	101
Figura 5.35: Reconstrução em 3D do cordão final obtido com o sistema de controle com uma largura de 6 mm e o reforço de 2 mm, e uma largura de 5 mm e o reforço de 2 mm. ....	102
Figura 5.36: Medidas das características geométricas do cordão final obtido com o sistema de controle com uma largura de 6 mm e o reforço de 2 mm, e uma largura de 5 mm e o reforço de 2 mm.....	103
Figura 5.37: Comparação das amostras adquiridas pelo sistema de visão com as adquiridas com o <i>scanner</i> com uma largura de 6 mm e 5 mm.....	103
Figura 5.38: Comparação das amostras adquiridas pelo sistema de visão com as adquiridas com o <i>scanner</i> com um reforço de 2 mm. ....	104
Figura 5.39: Ações de controle na velocidade de soldagem para o cordão com uma largura de 6 mm e o reforço de 2 mm, e uma largura de 5 mm e um reforço de 2 mm. ....	104
Figura 5.40: Ações de controle na velocidade de alimentação do arame para o cordão com com uma largura de 6 mm e o reforço de 2 mm, e uma largura de 5 mm e um reforço de 2 mm. ....	105

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Níveis y faixas dos Parâmetros de soldagem.....	47
Tabela 4.2: Experimentos selecionados.....	48
Tabela 5.1: resultados dos experimentos.....	84
Tabela 5.2: Parâmetros de soldagem ótimos para algumas medidas de largura.....	91
Tabela 5.3: Sequência de imagens obtidas .....	95

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ANFIS	- Neuro-Fuzzy adaptativo
ANN	- Artificial Neural Networks (Redes neurais artificiais)
CPLDs	- Complex Programmable Logic Device
DBCP	- Distancia bico de contato peça
DSPs	- Digital Signal Processors
FCAW	- Flux Cored Arc Welding (Soldagem a arco elétrico com arames tubulares)
FPGA	- Field-Programmable Gate Arrays
FEM	- Finite Element Model (Modelo elementos finitos)
GA	- Algoritmos Genéticos
GMAW	- Gas Metal Arc Welding (Soldagem a arco elétrico com gás de proteção)
GTAW	- Gas Tungsten Arc Welding
HDL	- Hardware Description Language
MAG	- Metal Active Gas (Solda a eletrodo consumível com gás inerte)
MIG	- Metal Inert Gas (Solda a eletrodo consumível com gás ativo)
MSE	- Mean Square Error (Erro quadrático médio)
NI	- National Instruments
OTP	- One Time Programmable
PCC	- Planejamento Composto Central (Central Composite Design)
PI	- Proporcional integral (Controlador)
PID	- Proporcional-integral-derivativo (Controlador)
PLDs	- Programmable Logic Device
PROM	- Programmable Read Only Memory
RNAs	- Redes Neurais Artificiais
RNBs	- Redes Neurais Biológicas
SMAW	- Shielded Metal Arc Welding (Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido)
SRAM	- Static Random Access Memory
VHSIC	- Very High Speed Integrated Circuit
$x_1$	- Velocidade de arame (m/min)
$x_2$	- Tensão (V)
$x_3$	- Velocidade de soldagem (mm/s)

$\sigma$	- Desvio padrão
$\mu$	- Valor Médio
H	- energia de soldagem, em J/cm;
V	- tensão de soldagem, em Volts;
I	- corrente de soldagem, em Ampères
$H_L$	energia líquida de soldagem, em J/cm
$\eta$	fator adimensional de rendimento

# SUMÁRIO

<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>xvi</b>
<b>1 – INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 – OBJETIVOS</b> .....	<b>3</b>
<b>1.1.1 - Objetivo Geral</b> .....	<b>3</b>
<b>1.1.2 - Objetivos Específicos</b> .....	<b>3</b>
<b>1.2 - MOTIVAÇÃO DO TRABALHO</b> .....	<b>4</b>
<b>1.3 – JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>5</b>
<b>1.4 - ESTRUTURA DO DOCUMENTO</b> .....	<b>6</b>
<b>2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>7</b>
<b>2.1 - Processo de soldagem GMAW</b> .....	<b>7</b>
<b>2.1.1 - Vantagens, limitações e aplicações do processo GMAW.</b> .....	<b>8</b>
<b>2.1.2 - Variáveis operativas do processo de soldagem GMAW</b> .....	<b>9</b>
<b>2.1.3 - Modos de transferência metálica</b> .....	<b>17</b>
<b>2.2 - SISTEMA EMBARCADOS (OU SISTEMAS EMBUTIDOS)</b> .....	<b>20</b>
<b>2.2.1 - Tipos de aplicações de sistemas embarcados</b> .....	<b>22</b>
<b>2.2.2 - Modos de funcionamento de sistemas embarcados</b> .....	<b>22</b>
<b>2.2.3 - FPGAS (FIELD PROGRAMMABLE GATE ARRAYS)</b> .....	<b>23</b>
<b>2.2.4 - FERRAMENTAS DE PROGRAMAÇÃO</b> .....	<b>25</b>
<b>2.2.5 - Revisão de literatura relacionada com FPGA e Controle</b> .....	<b>26</b>
<b>2.3 - TÓPICOS EM CONTROLE</b> .....	<b>28</b>
<b>3 - ESTADO DA ARTE</b> .....	<b>30</b>
<b>3.1 - INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS NA GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA</b> .....	<b>30</b>
<b>3.2 – MONITOREAMENTO</b> .....	<b>32</b>
<b>3.3 – MODELAGEM</b> .....	<b>34</b>

3.4	– CONTROLE.....	37
3.5	– SUMÁRIO .....	39
<b>4-</b>	<b>METODOLOGIA EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTOS.....</b>	<b>40</b>
4.1	– EQUIPAMENTO E BANCADA EXPERIMENTAL .....	40
4.1.1	– Sistema de soldagem.....	40
4.1.1.1	– Fonte de soldagem.....	40
4.1.1.2	– Computador .....	40
4.1.1.3	– Mesa de deslocamento linear.....	42
4.1.1.4	- Consumíveis utilizados nos processos .....	43
4.2	- KIT VEEK-MT DA TERASIC .....	43
4.3	- Sistema de aquisição dos sinais elétricos .....	44
4.4	- METODOLOGIA.....	44
4.4.1	- MODELAGEM DAS CARACTERISTICAS GEOMETRICAS DO CORDÃO DE SOLDA.....	45
4.4.1.1	- Identificação das variáveis importantes .....	46
4.4.1.2	- Desenvolver a matriz de experimentos .....	48
4.4.1.3	- A realização de experimentos com base na matriz de experimentos .....	49
4.4.1.4	- Desenvolvimento dos modelos .....	50
4.4.1.5	- Determinação dos parâmetros óptimos.....	54
4.4.2	- REALIZAR A IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE.....	57
4.4.2.1	- Captura e processamento de imagens.....	58
4.4.2.2	– Desenho do controlador.....	67
4.4.3	- COMUNICAR A FPGA COM O PROCESSO DE SOLDAGEM .....	69
4.4.3.1	- Etapas de desenvolvimento de sistemas embarcados para as FPGA's da Altera .....	71
4.4.3.2	- Sistema de acondicionamento de sinais para realizar a comunicação da FPGA com o processo de soldagem. ....	76
<b>5.</b>	<b>- RESULTADOS.....</b>	<b>78</b>

<b>5.1 - MODELAGEM DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO CORDÃO.</b>	
.....	78
<b>5.3 - IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE.....</b>	<b>96</b>
<b>6 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>106</b>
<b>7 - CONCLUSÕES.....</b>	<b>110</b>
<b>8 – TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>112</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>113</b>

# 1 – INTRODUÇÃO

O processo de soldagem por GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) tem se tornado cada vez mais presente no processo de fabricação dos mais variados tipos de processos industriais, devido às vantagens proporcionadas em relação às outras técnicas existentes. Este tem aplicabilidade na soldagem de metais de relevante importância comercial, tais como: aço carbono, aço inoxidável, alumínio e cobre. É considerado um dos processos mais propícios à aplicação da robótica, devido à sua alta produtividade, confiabilidade e fácil automatização.

A geometria do cordão nos processos de soldagem mostra-se de suma importância na determinação das características mecânicas da solda. As variáveis da geometria do cordão (largura, reforço e profundidade de penetração, por exemplo) encontram-se fortemente influenciadas pelos parâmetros operacionais, incluindo aspectos como, por exemplo, corrente, tensão e velocidade de soldagem – entre os mais importantes.

Recentemente, muitos estudos buscaram analisar o efeito dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão via utilização das mais variadas técnicas. Estes destacam a possibilidade da determinação dos parâmetros de soldagem mais adequados para as características geométricas do cordão com base em testes experimentais. Porém, tal procedimento geralmente consome recursos e tempo excessivos. Portanto, a criação de ferramentas capazes de prever e controlar, de forma confiável, as variáveis do processo possibilita, sem dúvida, a melhoria da qualidade do produto final, a segurança operacional e a diminuição do custo de fabricação. Nos processos de soldagem, a visão pode fornecer dados na inspeção e qualidade da junta soldada, no monitoramento de parâmetros, na correção de trajetórias e para o controle do processo. Porém, a visão em tempo real é uma tarefa custosa do ponto de vista computacional, tendo em vista que mesmo imagens de tamanho pequeno são submetidas a diversas operações para extração de informações, tais como: filtragens, transformações de cores, binarização, detecção de bordas etc., que requerem uma grande velocidade de processamento, onde grande parte dos sistemas comuns não logra suprir, acarretando em falhas e atrasos nas aplicações.

A execução direta de algoritmos mapeados em *hardware* em FPGA (*Field-Programmable Gate Arrays*) oferece aumento de velocidade tipicamente entre 10 e 100 vezes, em

comparação com o mesmo algoritmo em *software*. Além disso, as FPGAs apresentam outras vantagens em relação aos microprocessadores genéricos e aos DSPs (Digital Signal Processors) como, por exemplo, sua flexibilidade em aplicações de alto desempenho e em aplicações que possam explorar larguras de *bits* específicas e com alto grau de paralelismo de instruções.

Diante do exposto, propõe-se um sistema de modelagem e controle em tempo real que possa ser implementado nas fontes de soldagem, a fim de encontrar os parâmetros mais adequados para determinadas características geométricas, além de detectar o mais rápido possível os defeitos nas características geométricas do cordão, efetivando-se as mudanças necessárias, corrigindo o processo e adquirir a qualidade exigida pelas normas e regulamentos nos diferentes setores existentes e produtos que estão sendo fabricados. Assim, tem-se que o sistema de controle proposto faz uso de técnicas de visão computacional e sistemas reconfiguráveis.

## **1.1 – OBJETIVOS**

### **1.1.1 - Objetivo Geral**

Modelar e controlar as características geométricas externas (largura e reforço) do cordão de solda por meio de sistemas reconfiguráveis no processo GMAW em tempo real, a partir de modelos de regressão, processamento de imagens digitais e inteligência artificial, a fim de garantir a produção de cordões de boa aparência e qualidade.

### **1.1.2 - Objetivos Específicos**

- Modelar as características geométricas do cordão de solda e, assim, encontrar os parâmetros da tensão, a velocidade de alimentação do arame e a velocidade de soldagem;
- Realizar a implementação dos modelos no sistema embarcado e comprovar seu correto funcionamento;
- Desenvolver um sistema de captura e processamento da imagem, com o propósito de obtenção da medida do cordão em tempo real;
- Projetar um controlador embarcado na FPGA visando o controle das características geométricas do cordão de solda em tempo real;
- Realizar a comunicação entre o processo de soldagem e a FPGA visando obter a variação de parâmetros de soldagem em tempo real; e
- Validar a metodologia proposta, realizando a implementação do sistema de controle no processo GMAW.

## 1.2 - MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

Nos últimos anos, a tecnologia da soldagem passou por profundos avanços devido as crescentes exigências dos diferentes ramos industriais. Uma das bases para tais mudanças foi o rápido progresso da eletrônica, que possibilitou uma vertiginosa transformação das fontes de energia para soldagem. Tal transformação tem exigido dos fabricantes um grande esforço para se manter em um mercado progressivamente mais competitivo. De forma geral, novos métodos e tecnologias mecanizadas e automatizadas têm sido desenvolvidos nos processos de soldagem e continuam evoluindo cada dia visando aumentar a produtividade, reduzir custos e fornecer soluções a necessidades. Pode-se dizer que os sistemas de monitoramento e controle simultâneo de largura e reforço implementados atualmente por outros autores, além de não ser focados no controle simultâneo de ambos os parâmetros, não apresentam uma metodologia de aplicação prática na indústria devido a problemas de obstrução de objetos, emprego de sistemas robustos de alinhamento, emprego de mais de uma câmera, problemas que ao final não permitem a sua adaptação ou aumentam significativamente os custos de implementação.

Atualmente, os novos avanços na tecnologia (o caso dos sistemas reconfiguráveis, por exemplo) permitem obter não somente ganhos significativos de desempenho, mas também o desenvolvimento de aplicações inovadoras, capazes de perceber e resolver problemas de alto desempenho, além de tomar rápidas decisões, com maior velocidade que os algoritmos em *software*. E ainda, pela experiência no laboratório e com base nos requisitos das aplicações industriais como, por exemplo, a recuperação de turbinas e o preenchimento de cavidades, e analisando a forte influência da geometria do cordão neste tipo de problemas, faz-se importante a obtenção dos valores dos parâmetros principais do processo de soldagem para, assim, lograr as características geométricas desejadas do cordão, evitando discontinuidades, desperdício de material e minimizando os custos de fabricação.

Diante do exposto, o presente estudo tem como motivação principal tornar as fontes de soldagem inteligentes, disponibilizando-lhes monitoramento e controle *online* das características geométricas do cordão de solda no processo GMAW. Este trabalho visa contribuir no desenvolvimento de sistemas embarcados que, permitam modelar e controlar os parâmetros geométricos dos cordões de solda em processos GMAW. A utilização de agentes inteligentes focados no monitoramento em tempo real dos parâmetros de interesse, neste caso largura e reforço, permitirá ao sistema emular a toma de decisões tais como as

de um operário humano. O sistema de monitoramento proposto neste trabalho, baseado num sistema de visão computacional, espelhos e filtros com uma única câmera, permite medir simultaneamente a largura e o reforço dos cordões de solda, o que permitirá uma adequada adaptação em futuros sistemas de soldagem automatizados na indústria.

### **1.3 – JUSTIFICATIVA**

A demanda por aumento de produtividade e qualidade na área da soldagem motiva o desenvolvimento de processos mais robustos e automatizados. Entretanto, desenvolver uma automação completa para substituir o soldador não é uma tarefa simples, uma vez que este faz uso de muitos dos seus sentidos para realizar o ajuste de parâmetros do processo para alcançar o resultado esperado.

A capacidade de um equipamento ajustar automaticamente seus parâmetros diante de mudanças no processo define o controle de soldagem. A caracterização da geometria do cordão durante a soldagem é o ponto fundamental para o controle com o monitoramento fazendo uso da visão artificial. A câmera deve ser preparada para resistir às interferências geradas pela soldagem, tais como: alta intensidade luminosa, respingos e fumos.

Neste ínterim, visando a obtenção de fontes de soldagem inteligentes, com base na importância do desenvolvimento de plataformas integradas, flexíveis, que logrem bom rendimento e baixo consumo de energia em sistemas de controle para aplicações industriais, o presente estudo trata de uma plataforma de desenvolvimento com base em FPGA para a modelagem e o controle da largura e o reforço do cordão de solda, fazendo uso de um sistema de visão artificial para o monitoramento *online* para ditas características geométricas, visando obter um sistema que possa ser implementado nas fontes de soldagem, tornando-lhes inteligentes e apresentando tanto a eleição dos parâmetros de processo, quanto à capacidade da eleição das características geométricas desejadas e o controle delas em caso de descontinuidade, obtendo, assim, cordões com as características geométricas eleitas, além de boa aparência e qualidade.

## **1.4 - ESTRUTURA DO DOCUMENTO**

O Capítulo Dois apresenta a revisão bibliográfica abordando dois temas principais, a saber: o primeiro, trata das considerações principais na soldagem GMAW, bem como das variáveis mais importantes envolvidas no processo; o segundo trata dos dispositivos lógicos programáveis e suas ferramentas de programação.

O Capítulo Três apresenta um estado da arte referente às características geométricas do cordão de solda, onde se tem a questão da influência dos parâmetros, a modelagem, o monitoramento e o controle na geometria do cordão.

O Capítulo Quatro descreve os equipamentos e a metodologia para realizar um sistema embarcado com o objetivo de obter a modelagem e o controle das características geométricas do cordão em tempo real.

No Capítulo Cinco tem-se a apresentação dos resultados obtidos na fase de modelagem e controle da largura e o reforço do cordão de solda.

Nos Capítulos Seis e Sete, tem-se a discussão dos resultados obtidos e a apresentação das considerações finais e propostas para o desenvolvimento de futuros estudos utilizando-se a referida temática.

## 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 - Processo de soldagem GMAW

O processo de soldagem GMAW emprega um arco elétrico entre um arame contínuo sólido ou tubular a fim de prover o metal de adição, fazendo uso de um gás de proteção fornecido por uma fonte externa. O referido gás tem o propósito de proteger as zonas de solda do ar, visando evitar defeitos. Tal processo caracteriza-se por sua versatilidade, por sua aplicação em todas as posições de solda, pela facilidade para ser automatizado e robotizado, pela homogeneidade na qualidade dos cordões e pela possibilidade de ser utilizado para aplicar uma ampla faixa de materiais, inclusive, àqueles que têm problemas de soldabilidade (AWS, 1987).

Wegloski *et al*, (2008) classificaram o processo de solda GMAW em duas subcategorias, a saber: MIG (*Metal Inert Gas*) – quando a proteção utilizada é inerte ou rica em gases inertes; e, MAG (*Metal Active Gas*) – quando o gás utilizado é ativo ou contém misturas ricas em gases ativos e o processo com arame tubular são arames enchidos com ligas metálicas conhecido por sua denominação em inglês como *metal-cored*. A Figura 2.1, a seguir, ilustra esquematicamente o referido processo.

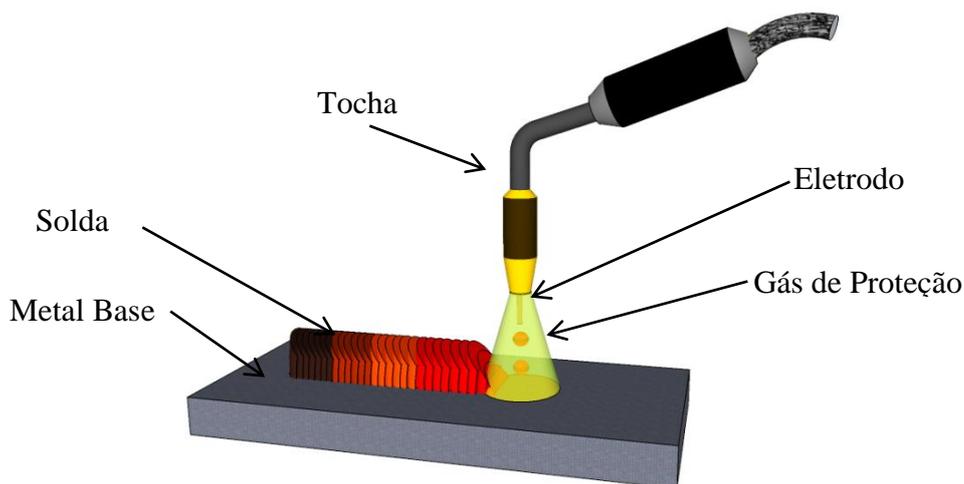


Figura 2.1: Processo de soldagem GMAW (Modificado de Modenesi *et. al.*, 2012).

Os componentes básicos para o processo de soldagem GMAW são: a fonte de potência, o sistema de alimentação, o mecanismo de impulsão do eléctrodo, o sistema de fornecimento de gás, a tocha ou pistola de solda, as mangueiras e os cabos. O equipamento pode regular

automaticamente as características elétricas do arco, isto é, a longitude do arco elétrico é regulada pela tensão de trabalho e intensidade da corrente.

### **2.1.1 - Vantagens, limitações e aplicações do processo GMAW.**

- Vantagens

1. É o único processo por arco com eletrodo consumível que pode ser empregado em todos os metais e ligas comerciais.
2. Permite a solda em todas as posições – o que não é possível com outros processos.
3. Comparado ao processo de arco metálico com eletrodo revestido (SMAW), requer menor nível de habilidade por parte do soldador.
4. Comparado com o processo SMAW e o GTAW (processo de arco elétrico com eletrodo de tungstênio), tem-se maior velocidade de depósito de material.
5. Depositam-se costuras longas sem pontos intermediários de início e parada.
6. Mínima necessidade de limpeza pós-soldagem, uma vez que não se tem a formação de uma escoria grossa.
7. Redução de fumaças e gases com respeito ao processo SMAW.
8. Grande aproveitamento do metal de adição.
9. Solda de espessuras pequenas (até 6 mm) sem necessidade de chanfro.
10. Penetração do arco maior do que no processo SMAW, sobretudo, com a transferência por *spray*.

- Limitações do processo:

1. Requer de equipamentos de solda complexos, caros e menos portáteis.
2. A pistola deve estar perto da peça de trabalho; portanto, possui restrições para sua utilização em pontos de difícil acesso.
3. Na solda de aços endurecíveis, a susceptibilidade ao fissuramento do metal soldado é maior, devido ao fato de não existir escoria para a redução da velocidade de resfriamento do cordão.
4. O processo é menos prático que aquele por SMAW, para soldas em exteriores, bem como o vento pode desviar a atmosfera protetora da zona de solda com o consequente aparecimento de defeitos.

5. Os altos níveis de radiação de calor e de intensidade de arco podem provocar certa rejeição ou resistência por parte dos soldadores.
6. Maior velocidade de resfriamento, aumentando, assim, a ocorrência de trincas.

- Aplicações:

Devido à ação do gás de proteção, o processo MIG é adequado à soldagem de: aços carbono, aços de baixa, média e alta liga; aços inoxidáveis, alumínio e suas ligas; magnésio e suas ligas; e, cobre e suas ligas. O processo MAG é utilizado na soldagem de aços de baixo carbono e aços de baixa liga. (ALMEIDA, 2004), enquanto que na faixa de espessuras é possível soldar metais desde 0,5 mm de espessura em diante (até uma espessura praticamente ilimitada). É um processo versátil que permite a solda em todas as posições, selecionando os parâmetros adequados. É possível a mecanização, uma vez que se constitui um processo ideal para aplicações robotizadas. Por outro lado, não constitui a melhor seleção para a solda em exteriores, pelos problemas que se podem apresentar com a proteção gasosa.

### 2.1.2 - Variáveis operacionais do processo de soldagem GMAW

No campo da solda, a qualidade depende principalmente das propriedades mecânicas do metal e a zona afetada pelo calor, que, por sua vez, é influenciada pelas características metalúrgicas e composições químicas. Destarte, tais características mecânico-metalúrgicas dependem da geometria do cordão de solda, que estão diretamente relacionadas com os parâmetros do processo (ESME *et al.*, 2011). Algumas das características geométricas importantes dos cordões mostram-se na Figura 2.2, a seguir.

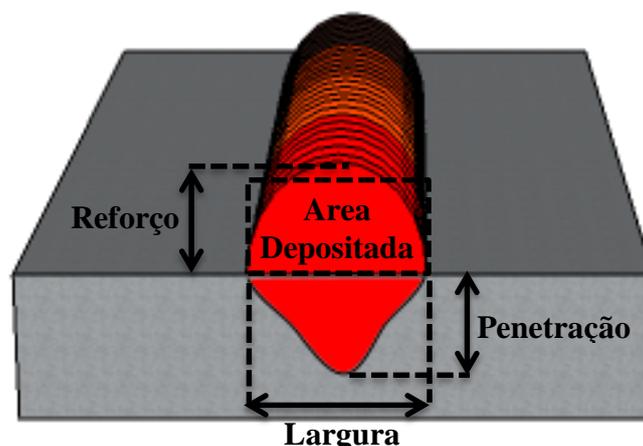


Figura 2.2: Características geométricas do cordão (modificado Torres *et al.* 2013).

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

- Variáveis pré-determinadas: tipo e espessura do metal de base; propriedades requeridas para o metal de solda;
- Variáveis de fundo: processo de soldagem; tipo de equipamento; projeto da junta; técnica de soldagem; tipo e diâmetro de eletrodo, fluxo, gás etc.;
- Variáveis secundárias: comprimento do eletrodo e posicionamento da pistola em relação à peça; e
- Variáveis primárias: corrente (tipo e intensidade); tensão e velocidade de soldagem.
- 

Alguns parâmetros de soldagem podem ser ajustados durante o processo. Entretanto, outros parâmetros são definidos em uma etapa anterior a soldagem e não podem ser alterados durante o processo. O conhecimento e o controle destes são essenciais para a produção de soldas consistentes e de uma qualidade satisfatória. Tais parâmetros não são completamente independentes e a mudança no valor de alguma destas, em geral, requer mudança em alguma ou em várias das outras, a fim de produzir os resultados esperados. É preciso o domínio de habilidade e experiência necessárias para selecionar os valores ideais da cada uma das variáveis para uma aplicação em particular. Os referidos valores são afetados pelos seguintes aspectos: o tipo de metal base, a composição do eletrodo, a posição de solda e os requerimentos de qualidade. Portanto, não existe um conjunto único de parâmetros que proporcione os resultados esperados em cada um dos casos. As variáveis apresentadas a seguir são algumas das existentes no processo GMAW, que afetam a geometria e tamanho do cordão de solda.

- **Tensão do Arco**

A tensão de arco é uma aproximação da longitude física do arco em termos elétricos, conforme a Figura 2.3, a seguir.

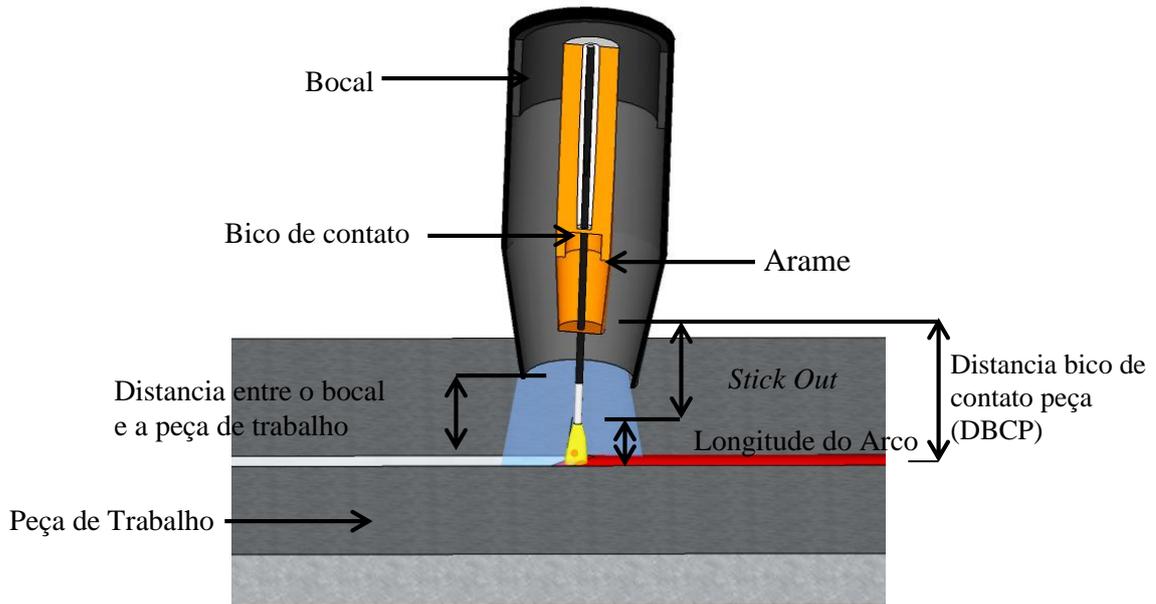


Figura 2.3: Terminologia do processo de solda GMAW (modificado Modenesi *et. al.*, 2012).

A tensão do arco, juntamente com o comprimento do arco, são dois parâmetros importantes na determinação das características do cordão: um encontra-se muito relacionado ao outro, pois a tensão do arco depende do comprimento do arco, do tipo e do diâmetro do eletrodo, do gás de proteção, influenciando, assim, o modo de transferência. Em um processo onde tais parâmetros são constantes, um aumento de tensão do arco gera um aumento da largura e uma diminuição da altura (ou reforço) do cordão de solda, além da redução da penetração, conforme evidenciado na Figura 2.4, a seguir.

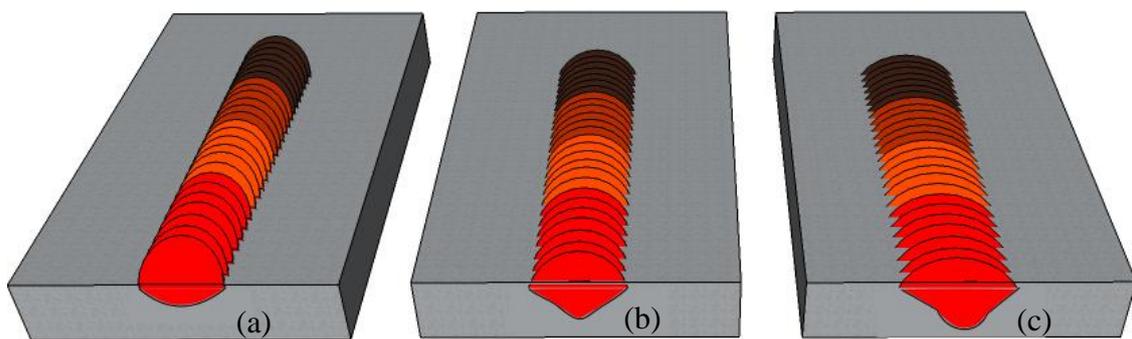


Figura 2.4: Efeito da tensão na geometria do cordão de solda. a) 21V, b) 24 V e c) 27 V. (Fonte própria)

Segundo Fortes (2004), as tensões elevadas do arco provocam excesso de respingos de solda e mordeduras; e tensões baixas, que implicam em falta de fusão e cordões muito convexos.

- **Corrente de Soldagem**

A corrente de soldagem é a corrente de saída da fonte quando a solda está sendo realizada. Se forem mantidas constantes todas as demais variáveis de soldagem, um aumento na corrente de soldagem irá causar o aumento na taxa de deposição e, conseqüentemente, aumento na profundidade e largura do cordão de solda (MODENESI, 2005).

No processo MIG/MAG, a corrente de soldagem está diretamente relacionada à velocidade de alimentação do arame (desde que a extensão do eletrodo seja constante). Quando a velocidade de alimentação do arame é alterada, a corrente de soldagem varia no mesmo sentido. Em outras palavras, um aumento na velocidade de alimentação do arame causará um aumento da corrente de soldagem ou vice-versa.

O aumento na corrente, mantendo-se os outros parâmetros constantes, resulta em uma maior profundidade de penetração da solda, aumentando, também, a taxa de deposição de material e o tamanho do cordão de solda em sua seção transversal, conforme evidenciado na Figura 2.5 (FORTES, 2004).

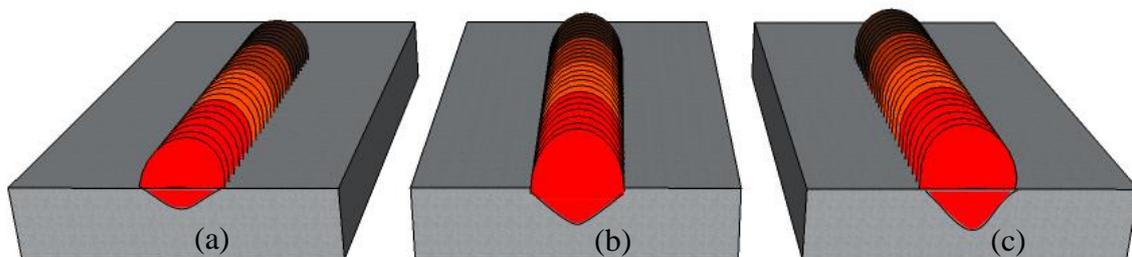


Figura 2.5: Efeito do amperagem no cordão de solda, a) 100A, b) 150 A e c) 200 A. (Fonte própria)

- **Velocidade de Soldagem**

A velocidade de soldagem é a velocidade linear da deslocamento do arco ao longo da união. Um aumento ou diminuição da velocidade modifica o grau de penetração, largura do cordão e sua forma geométrica. Nas Figura 2.6(a) e Figura 2.6(b), apresentadas a seguir,

têm-se os efeitos da velocidade em uma união. Quando se reduz a velocidade, se aumenta a deposição do metal de adição por unidade de comprimento. Com velocidades muito baixas, o arco de solda atua com mais intensidade na poça de solda do que sobre o metal base, reduzindo-se a penetração efetiva. Tal condição também produz um cordão de solda mais largo. Na medida em que se aumenta a velocidade, tem-se o aumento da quantidade de energia térmica por unidade de comprimento de solda transferida desde o arco para o metal base, uma vez que o arco atua diretamente sobre o metal base. Com um aumento adicional na velocidade de soldagem, transferir-se-á para o metal base menos energia térmica por unidade de comprimento de solda. Portanto, a fusão do metal base, em primeira instância, sofre determinado aumento e, em seguida, tem-se sua diminuição quando se incrementa a velocidade de avanço. Vale ressaltar que se tem ainda o aumento da velocidade, que terá uma tendência a produzir mordeduras ao longo das bordas do cordão de solda, devido à insuficiência de deposição de metal de aporte para encher o trajeto fundido pelo arco.

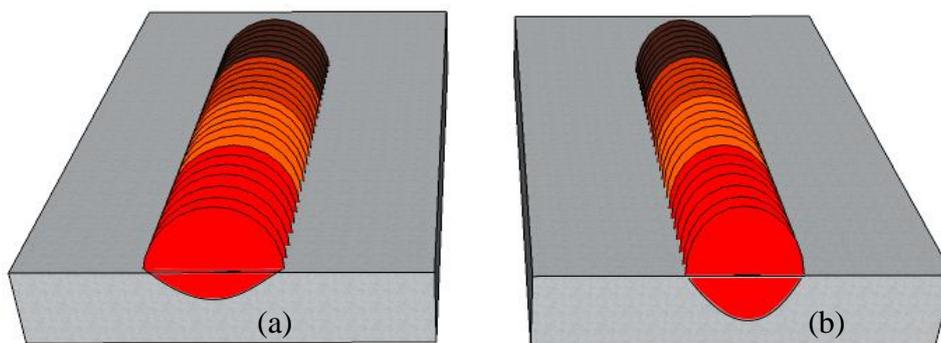


Figura 2.6: Efeito da velocidade de avanço no cordão de solda, a) velocidade de avanço demasiado baixa, b) velocidade de avanço correta. (Fonte própria)

- **Gases de Proteção**

O uso correto do gás de proteção (adequado ao tipo de aplicação) ou de uma mistura é outro fator determinante em soldagem, uma vez que o uso de determinado gás ou de uma combinação de gases influem na penetração e geometria de um cordão de solda, quando as demais condições se mantêm com um ajuste correto. Em soldagem de arco metálico com proteção gasosa nos materiais não ferrosos se empregam gases inertes como proteção. Na natureza têm-se seis tipos de gases inertes, a saber: hélio, argônio, neon, cripton, radônio e xênon. Destes, somente o hélio e o argônio são importantes nos processos de soldagem – que se deve ao fato de que estes são os únicos gases nobres que se podem obter por

destilação do ar em quantidades consideráveis e são completamente inertes. As principais diferenças físicas entre o argônio e o hélio são a densidade, a condutividade térmica e o potencial de ionização (RENGIFO, 2004).

- **Extensão livre do eléctrodo**

Define-se como extensão livre do eletrodo (ou *stick-out*) a distância entre o último ponto de contato elétrico do arame (normalmente, o tubo de contato) e a ponta do eletrodo ainda não fundida, conforme evidenciado na Figura 2.3. Quando se aumenta a extensão livre do eletrodo, se produz um aumento em sua resistência eléctrica. O aquecimento por resistência, por sua vez, faz com que a temperatura do eletrodo se eleve, resultando em um pequeno incremento da velocidade de fusão do mesmo. Em geral, a maior resistência eléctrica produz uma queda de tensão maior entre a ponta do eletrodo e a peça de trabalho.

Tal situação é detectada imediatamente pela fonte de potência, a qual compensa este aumento com uma redução na corrente. Isto, de imediato, reduz a velocidade de fusão do eletrodo e permite que se encurte o comprimento física do arco. Em consequência – a não ser que se tenha um incremento de tensão na máquina de soldar – o metal depositará um cordão estreito e de reforço alto. A extensão livre do eletrodo desejável encontra-se, em geral, entre 6 a 13 mm para a transferência por curto circuito, e de 13 a 15 mm para os outros tipos de transferências na solda do alumínio e suas ligas (AWS, 2001). Conforme apresentado na Figura 2.7, o tamanho da extensão livre do eletrodo possui uma influência importante na geometria e penetração do cordão de solda – a menor extensão livre do eletrodo maior é a penetração e vice-versa.

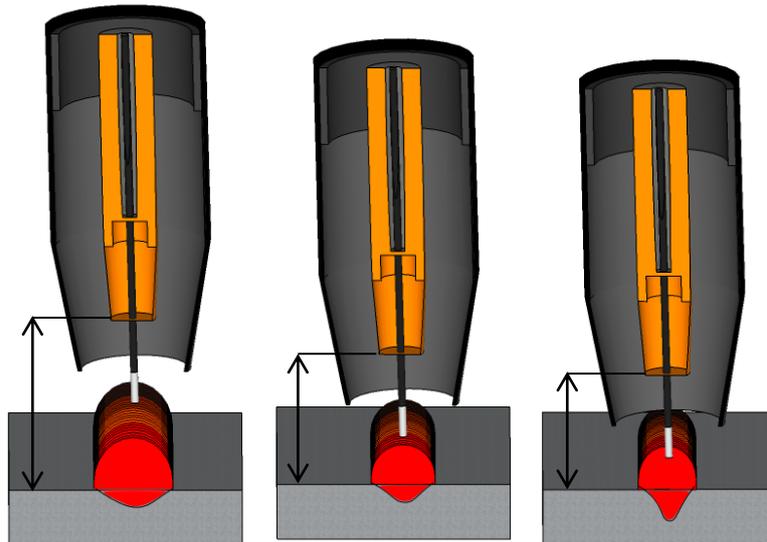


Figura 2.7: Efeito das diferentes longitudes livres do eléctrodo sobre o cordão de solda.  
(Fonte própria).

- **Orientação do eletrodo**

Como em todos os processos de soldagem por arco, a orientação do eletrodo em relação à junta que passa pelo processo de soldagem, também afeta à forma do cordão de solda e a penetração. Tal efeito sobre a qualidade do cordão de solda considera-se maior que o da tensão de arco ou o da velocidade de avanço. É possível apontar a orientação do eletrodo em dois sentidos, a saber: o ângulo de trabalho e o ângulo de deslocação.

- ✓ **Ângulo de trabalho**

Também chamado ângulo transversal, é o ângulo que forma o eixo do eletrodo e a superfície da peça de trabalho. Em uniões de topo em posição plana, geralmente o ângulo de trabalho é de  $90^\circ$ , tal como se pode observar na Figura 2.7, apresentada anteriormente, enquanto em uniões de ângulo ou filete, o ângulo de trabalho deve ser de  $45^\circ$ .

- ✓ **Ângulo de deslocação**

É o ângulo que se forma entre o eixo do eletrodo em relação à direcção de deslocamento da solda. Quando este aponta na direcção oposta à direcção de deslocamento, a técnica se denomina “solda de revés com ângulo de arraste”. Quando o eletrodo aponta na direcção da deslocação, a técnica é conhecida como “solda à direita ou avanço com ângulo de

empurre”. Tais ângulos e técnicas podem proporcionar diferentes resultados que são determinantes nas características finais da união. Seu uso está relacionado com os resultados que se queiram atingir. A orientação do eletrodo e seu efeito sobre o reforço e a penetração da solda são apresentados na Figura 2.8, a seguir.

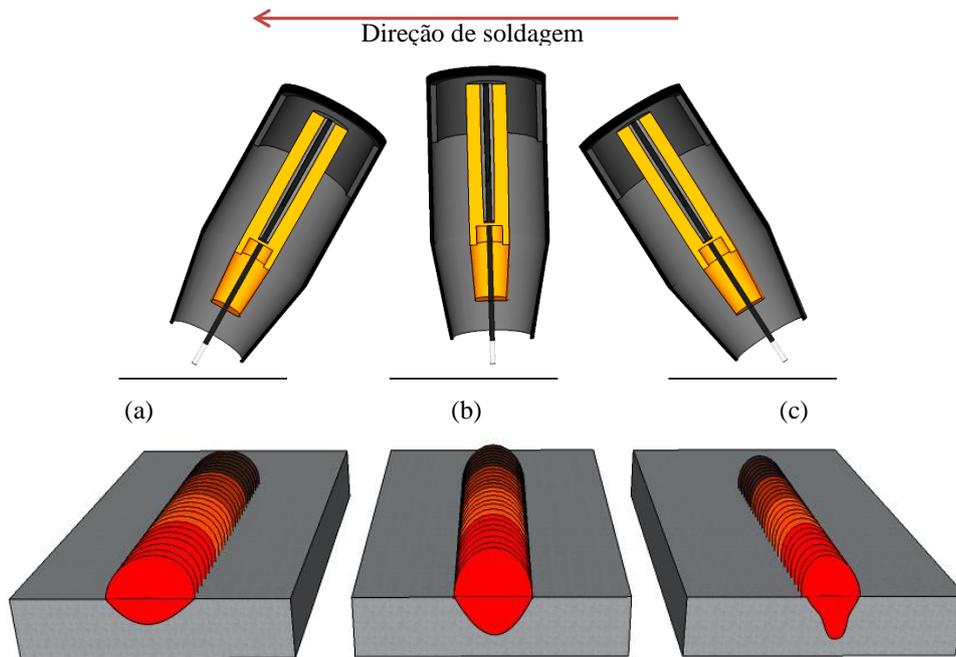


Figura 2.8: Efeito da posição do eléctrodo e a técnica de solda sobre o cordão (a) ângulo de empurre. (b) ângulo perpendicular (c) ângulo de arrastre. (Fonte própria)

Quando o eletrodo dá-se da perpendicular ofertando-lhe um ângulo de ataque e com todas as demais condições sem alteração, a penetração diminui e o cordão de solda se apresenta de forma larga e plana.

- **Diametro do eletrodo**

O diâmetro do eletrodo influi na configuração da solda. Na solda, inicia-se com a seleção do material de adição. A primeira consideração é o diâmetro, que pode variar de 0.635 mm a 6.35 mm. Os diâmetros maiores são mais fáceis de alimentar, ou seja, recomenda-se o uso de diâmetros maiores.

O segundo fator na seleção do material de adição é o tipo de liga. Dois tipos básicos de eletrodos são utilizados na solda, a saber: maciço e tubular.

### ✓ Arames Sólidos

São arames contínuos e maciços, protegidos, em alguns casos, por uma fina camada de cobre, com o objetivo de evitar a oxidação. Os arames sólidos podem ser utilizados para soldar diversos materiais, tais como: aços carbono, aços de alta liga, alumínio, cobre e aços inoxidáveis. A soldagem com arames maciços não apresenta escória e a produção da poça de fusão é totalmente dependente do gás de proteção (MOREIRA, 2006).

### ✓ Arames Tubulares

Os arames tubulares são arames contínuos e ocos que possuem em seu interior fluxos que permitem a soldagem dos mais diversos tipos de materiais, tais como: aços carbono, aços de alta resistência e baixos liga, e aços inoxidáveis, além de poderem ser utilizados para depositar revestimentos duros sobre superfícies sujeitas à abrasão e ao impacto (FORTES, 2004). Os arames tubulares de tipo *Metal Cored* possuem fluxo metálico em seu interior com a função de unir o metal de solda juntamente com os elementos contidos no interior do eletrodo, a fim de aumentar a força do material depositado e também para desoxidá-lo.

A principal diferença entre o processo com arame tubular e com arame maciço é o metal de adição que, no arame tubular, contém em seu interior um fluxo em forma de pó. Tal fluxo contém elementos desoxidantes que auxiliam na proteção e estabilidade do arco, além de poder conter elementos de liga.

### **2.1.3 - Modos de transferência metálica**

O processo GMAW atua com múltiplas variáveis, e a interação destas tem uma forte influência em fenômenos como, por exemplo, a transferência de calor e de massa. Esta última se refere à questão da transferência do material desde a ponta do arame para a peça de trabalho. As investigações evidenciam que as variáveis que mais incidem são: a tensão, a corrente e o gás protetor (WEGLOWSKI *et al.*, 2008; KARADENIZ *et al.* 2007; PIRES *et al.*, 2007). Todas as variáveis apontadas exercem certa influência sobre a transferência de massa, com o qual se pode determinar a estabilidade do processo, o nível de penetração, a emissão de gases e a qualidade da solda (WEGLOWSKI *et al.*, 2008).

Em geral, pode-se considerar que existem três formas principais de transferência do metal de adição do eletrodo para a peça, a saber: transferência por curto circuito, transferência globular e transferência goticular (*spray*). O modo de transferência metálica varia de acordo com os parâmetros de soldagem utilizados (MODENESI, 2001).

A Figura 2.9, a seguir, apresenta esquematicamente os campos operacionais das principais formas de transferência metálica na soldagem GMAW.

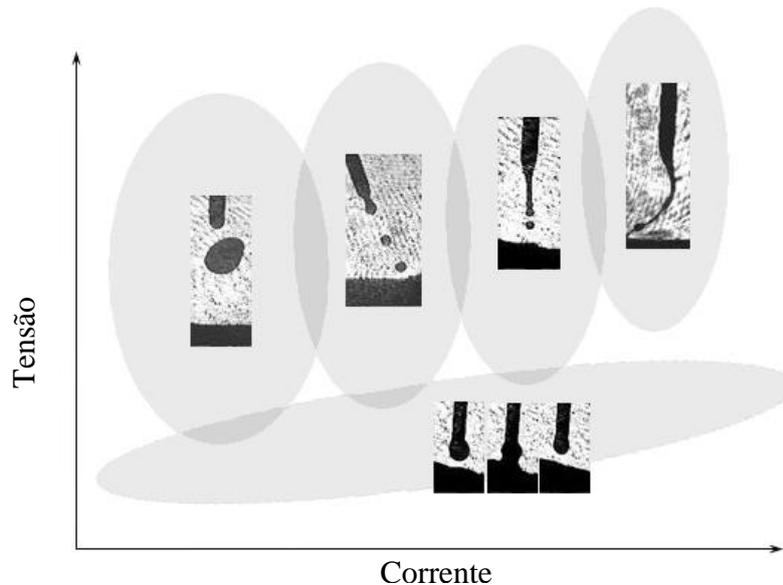


Figura 2.9: Zonas de transferência metálica na soldagem GMAW (Lopera, 2010).

- **Transferência por curto circuito**

A transferência por curto-circuito ocorre quando se utilizam baixos valores de tensão e, em geral, com baixos valores de corrente. Nesta forma de transferência, uma gota de metal se forma na ponta do eletrodo, acarretando em aumento de diâmetro até tocar a poça de fusão, ocasionando o curto-circuito e a extinção do arco. O referido modo de transferência caracteriza-se por uma grande instabilidade do arco, podendo apresentar intensa formação de respingos.

A Figura 2.10, a seguir, ilustra um ciclo completo de um curto-circuito. Quando o arame toca a poça de fusão, a corrente começa a aumentar para uma corrente de curto-circuito. Quando se atinge o valor alto de corrente, o metal é transferido e o arco é, então, reaberto. Como o arame está sendo alimentado mais rapidamente do que o arco que consegue fundi-lo, este último eventualmente será extinto por outro curto. O ciclo recomeça e não se tem metal transferido durante o período de arco aberto, mas somente nos curtos-circuitos.

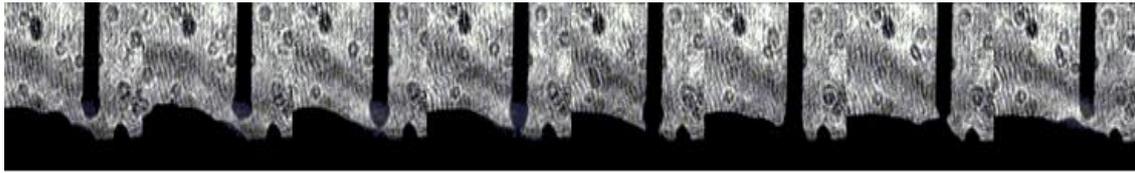


Figura 2.10: Sequência modo de transferência por curto circuito. (Fonte própria)

- **Transferência globular**

A transferência metálica globular ocorre tipicamente em correntes baixas e moderadas, mas com faixa de tensão relativamente alta (arco relativamente mais longo) o suficiente para evitar a transferência por curto-circuito. Na referida transferência, onde os destacamentos das gotas se dão basicamente pela ação gravitacional, as gotas que se formam têm o seu diâmetro geralmente maior que o diâmetro do seu eletrodo, antes do destacamento.

O tamanho, a forma e a posição da gota, bem como sua frequência de transferência (1 a 10 Hz) dependem principalmente do diâmetro e da composição do arame-eletrodo, do gás de proteção e da intensidade da corrente de soldagem, e ainda, durante a formação e o destacamento da gota, a resistência elétrica no trecho “gota-arco” vai se alterando progressivamente, o que oferta um caráter dinâmico bem característico aos sinais de corrente e tensão (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

Para Modenesi (2009), em uma primeira aproximação, a transferência globular típica é semelhante ao gotejamento de água em uma torneira parcialmente aberta. O metal líquido forma-se na ponta do arame pela fusão deste, mantendo-se preso por ação da tensão superficial. Com o aumento do tamanho da gota, tem-se o aumento de seu peso, acarretando na separação do arame; a gota de metal líquido se transfere para a poça de fusão por ação da gravidade, conforme evidenciado na Figura 2.11, a seguir.

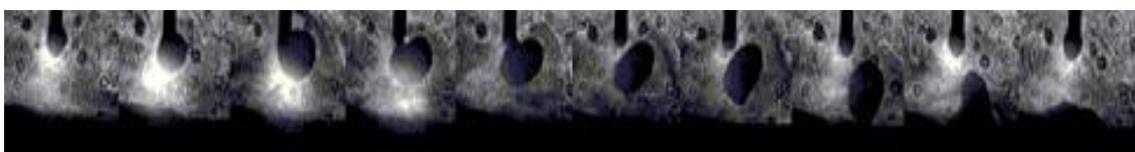


Figura 2.11: Sequência modo de transferência globular. (Fonte própria)

- **Transferência Goticular**

Na transferência goticular ou *spray* (vide Figura 2.12, a seguir), causada pelo aumento da corrente de soldagem, o diâmetro das gotas de metal que se transferem para a peça diminui até certa faixa de corrente, onde o modo de transferência muda bruscamente de globular para *spray*. Este tipo de transferência é caracterizado pela grande quantidade de pequenas gotas (menor que o diâmetro do arame eletrodo) em alta frequência, formando quase um jato contínuo, conforme apresentado anteriormente na Figura 2.9. As gotas formadas são depositadas com alta energia (altas correntes e tensões), proporcionando uma poça de fusão bastante fluída, limitando o processo para a posição plana e de chapas grossas (CAMPOS, 2005).

Tal modal é habitualmente empregado em situações onde são possíveis e desejáveis taxas de deposição máximas. Não há restrições ao uso de quaisquer arames tubulares com o referido modo de transferência (FORTES, 2004).

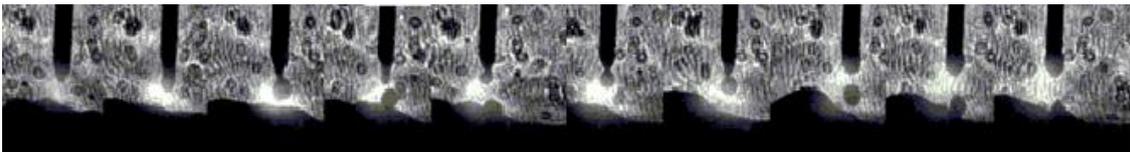


Figura 2.12: Sequência modo de transferência por spray.

## 2.2 - SISTEMA EMBARCADOS

Um sistema embarcado é um sistema em que toda a unidade de processamento é dedicada para a realização de uma devida função, geralmente restrita por computação de tempo real. Ao contrário dos computadores de propósito geral, os quais trabalham com diversos periféricos e processos, os sistemas embarcados se especializam em funções para as quais se necessita um processamento melhor e dedicado a uma única função. Em geral os sistemas embarcados são usados quando o desempenho aprimorado é uma necessidade, ou quando um processo exige exclusividade. Os sistemas de lógica digital embarcados podem ser implementados através de diferentes tecnologias, tais como lógica padrão, lógica programável, ASIC's (*Application Specific Integrated Circuit* ou Circuito Integrado de Aplicação Específica), ou de personalização completa. A Figura 2.13, a seguir, subdivide as tecnologias de desenvolvimento, e no caso deste trabalho, foi utilizada a lógica programável, por meio da tecnologia de FPGA's da Altera.

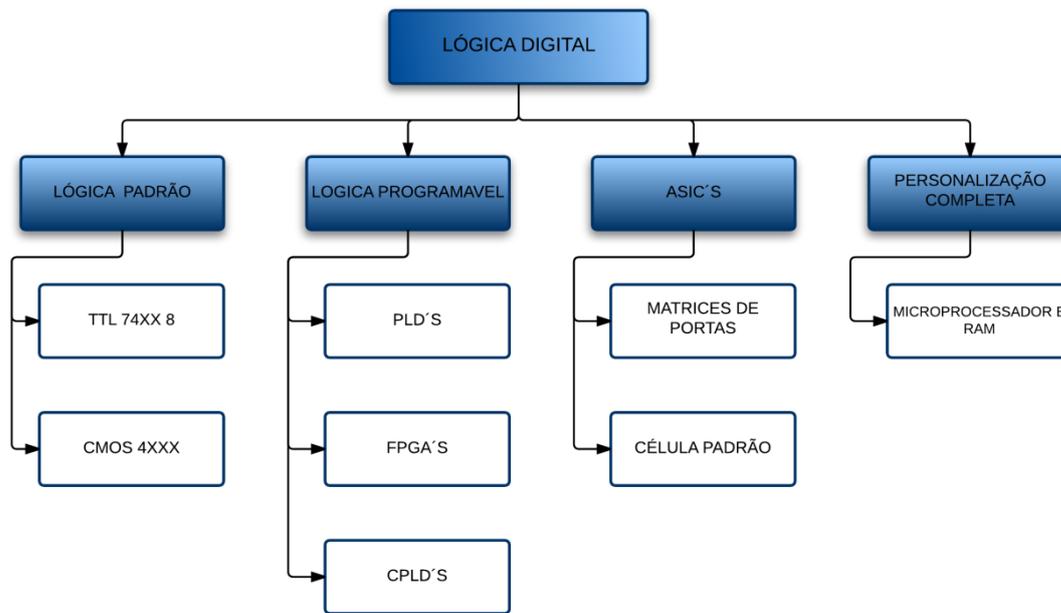


Figura 2.13: Tecnologias diferentes de programação e implementação de sistemas embarcados. (HAMBLÉN e FURMAN, 2001)

Dispositivos PLDs (Programmable Logic Device), CPLDs (Complex Programmable Logic Device) e FPGAs (Field Programmable Gate Arrays) possuem operações funcionais internas definidas pelo usuário após o processo de fabricação. Estes dispositivos são construídos a partir de um arranjo matricial de elementos lógicos reprogramáveis, permitindo implementar, teoricamente, qualquer tipo de circuito digital. Isto faz com que empresas especializadas em fabricação de circuitos integrados utilizem FPGAs na fase de projeto, prototipação e verificação (HUTTON *et al.*, 2006). Apesar da exibibilidade que oferecem estes dispositivos, os mesmos apresentam desvantagens de desempenho, área, consumo de potência e tempo de configuração (HAMBLÉN e FURMAN, 2011)

As características mais desejadas em sistemas embarcados são:

- A capacidade computacional e a sua independência de operação. Outros aspectos relevantes são referentes aos tipos de sistemas, modos de funcionamento e itens desejados em aplicações embarcadas.
- Tamanho e peso: sempre os menores possíveis. Com a crescente miniaturização dos equipamentos eletroeletrônicos, os itens tamanho e peso são fatores decisivos na competitividade de um produto. Sem contar os custos envolvidos no envio de

equipamentos grandes e pesados, já que um usuário pode adquirir um sistema embarcado em qualquer parte do mundo.

- **Consumo de energia:** quanto maior for a autonomia do sistema e menor for sua necessidade de recarga ou troca de sistema de alimentação, mais competitivo será o produto, sem contar que as atuais legislações referentes ao consumo de energia preveem a necessidade cada vez maior de eficiência energética.
- **Robustez do equipamento:** muitos sistemas embarcados são projetados para trabalhar em ambientes com condições adversas (vibrações, calor, poeira, variações na tensão de alimentação, interferências eletromagnéticas, raios, umidade, corrosão, etc.). É necessário resistir bravamente a todas estas interferências e sobreviver.

### 2.2.1 - Tipos de aplicações de sistemas embarcados

- **Propósito geral:** são as aplicações mais parecidas com os computadores de mesa, mas em embalagens embarcadas. Nelas costuma haver grande interação entre os usuários e o sistema, geralmente através de terminais de vídeo ou monitores.
- **Sistemas de controle:** controles em malha fechada com realimentação em tempo real. Geralmente são as aplicações mais robustas, com placas dedicadas e múltiplos sensores de entrada e saída. Muitas vezes fornecem pouca interação com o usuário, mostrando sinalizações através de LEDs. Usados nos motores de automóveis, processos químicos, controle de vôo, usinas nucleares, etc.
- **Processamento de sinais:** onde envolve um grande volume de informação a ser processada em curto espaço de tempo. Os sinais a serem tratados são digitalizados através de ADs, processados, e novamente convertidos em sinais analógicos por DAs. Caso de tratamento de áudio, filtros, modems, compressão de vídeo, radares e sonares, etc.
- **Comunicações e redes:** chaveamento e distribuição de informações. Sistemas de telefonia e telecomunicações e internet.

### 2.2.2 - Modos de funcionamento de sistemas embarcados

Os dois modos de funcionamento dos sistemas embarcados, apresentados a seguir, são determinantes para saber como programar o dispositivo e como será seu funcionamento e comportamento na aplicação para o qual foi desenhado.

- ✓ **Reativo:** o funcionamento se dá como resposta a eventos externos, que podem ser periódicos (caso de sistemas rotacionais ou de controles de loop) ou assíncronos (pressionamento de um botão por parte do usuário). Há, então, uma necessidade de entrada de dados para que aconteçam as ações de funcionamento. Geralmente não há limite de tempo para que os sinais de entrada sejam acionados, pois dependem da interação com o usuário ou com o processo ao qual é destinado. Porém, a saída, função do sinal de entrada, deve ser realizada exatamente após os sinais de entrada começar a atuar.
- ✓ **Controle em tempo real:** existem limites de tempo para executar cada tarefa (leitura de sensor, emissão de sinais para um atuador, atualização de display, etc.). Por isso mesmo, nem sempre tempo real é igual ao modo mais rápido de executar uma tarefa. Estes modos de operação, por serem cíclicos, não dependem da entrada de sinais para executar as atividades, sendo capaz de tomar decisões referentes à ausência dos mesmos. Os sistemas de tempos real são classificados em:
  - ✓ Soft Real Time: As tarefas podem ser executadas em um intervalo de tempo específico, sem consequências graves se este limite de tempo não for cumprido.
  - ✓ Hard Real Time: As tarefas devem ser executadas em um tempo específico, com consequências graves se qualquer tarefa falhar.

### 2.2.3 - FPGAS (FIELD PROGRAMMABLE GATE ARRAYS)

As FPGA são dispositivos lógicos programáveis com uma densidade de comportas muito superior aos CPLD, mas com respostas de tempo menores (HUTTON *et al.*, 2006).

Estes dispositivos têm uma grande quantidade de células lógicas distribuídas regularmente por sua superfície, o conexionado das células lógicas não se realiza mediante uma matriz de interconexão senão mediante canais de interconexão distribuídos entre as células lógicas que cruzam a superfície da FPGA horizontal e verticalmente (vide Figura 2.14, a seguir), as células lógicas estão conformadas por umas pequenas LUT (*Look-Up Tables*) de um ou dois registros e em ocasiões algum multiplexor para interconectar as LUT com os registros (PARDO E BOLUDA, 2011).

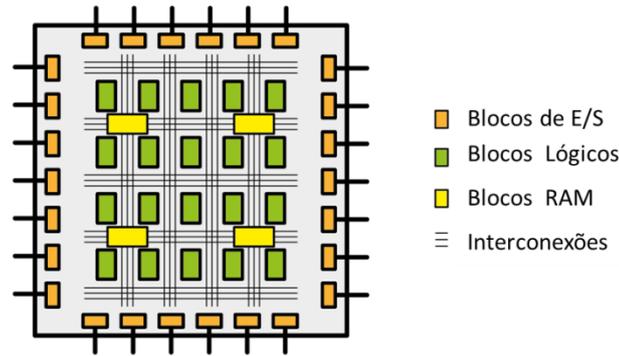


Figura 2.14: Arquitetura de uma FPGA.

Há uma divisão básica entre os tipos de FPGA, as FPGA baseadas em SRAM (*Static Random Access Memory*) e as OTP (*One Time Programmable*), as primeiras são reprogramáveis enquanto as OTP só se programam uma vez. As mais utilizadas são as SRAM as quais são reprogramadas a cada vez que se energizam pelo que é necessário o uso de uma memória serial de tipo PROM (*Programmable Read Only Memory*) ou um sistema de memória para cada FPGA.

Uma cela lógica de uma FPGA baseada em SRAM (vide Figura 2.15, a seguir) em lugar de portas contém um LUT o qual determina as saídas combinacionais ou também pode ser usado para fazer conexões. O LUT é um segmento de memória RAM de 16x1, portanto tem quatro entradas de direção e em general pretende-se programar o funcionamento de uma tabela de verdade modelando a operação de uma rede de portas. A tabela de verdade é carregada no LUT durante a programação configuração (HAMBLEN e FURMAN, 2011)

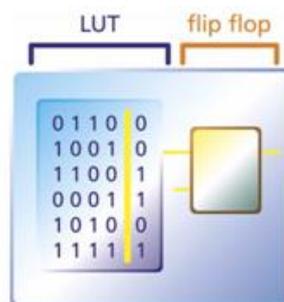


Figura 2.15: Cela lógica de uma FPGA.

As células lógicas são consideradas os blocos básicos para o desenho de uma FPGA, no entanto costuma também se desenhar blocos de propósito especiais conformados por células lógicas, circuitos de soma, resta entre outros para conformar blocos lógicos (LB).

Estes blocos permitem caminhos de comunicação rápida reduzindo tempos de propagação e melhorando a implementação de desenhos. Os LB ou CLB (*Congurable Logic Block*) são conectados mediante uma rede a outros LB e blocos de entrada - saída IOBs (*Input/Output Blocks*). A rede mostra-se na Figura 2.16, a seguir, está conformada por matrizes de comutação responsáveis por passar sinais de um segmento a outro (SASS E SCHMIDT, 2010).

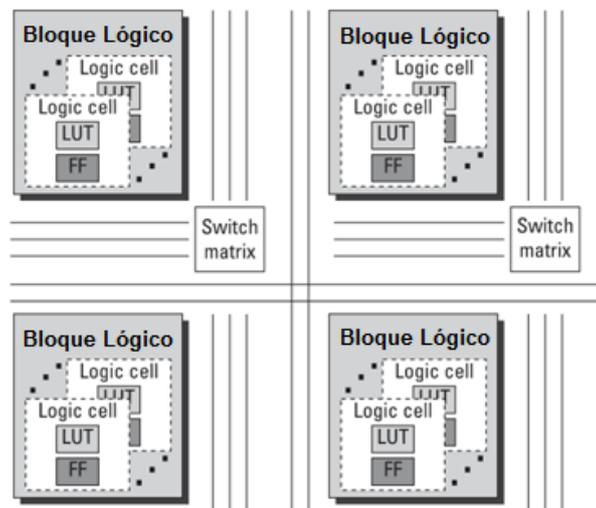


Figura 2.16: Diagrama de blocos de uma FPGA.

#### 2.2.4 - FERRAMENTAS DE PROGRAMAÇÃO

As linguagens utilizadas como código fonte para o desenvolvimento de desenhos com dispositivos de lógica programável são os denominados linguagens de descrição hardware (*HDL, Hardware Description Language*). Também existem programas de captura de esquemas, úteis para a realização de desenhos simples, sem ter que recorrer à complexidade de uma linguagem HDL, conquanto este sistema não é útil para desenhos complicados. Uma linguagem HDL permite definir as interconexões e o comportamento de um circuito eletrônico, sem a utilização de diagramas esquemáticos.

Os passos no desenho de um sistema são os seguintes:

1. Definir a tarefa ou tarefas que tem que realizar o circuito.
2. Escrever o programa usando uma linguagem HDL.
3. Verificação da sintaxe e simulação do programa.
4. Programação do dispositivo e verificação do funcionamento.

Um rasgo comum destas linguagens costuma ser a independência do hardware empregado e a modularidade ou hierarquia, isto é, uma vez implementado o desenho, este pode ser usado dentro de outro desenho mais complexo e com outro dispositivo compatível.

Entre as linguagens de programação disponíveis, destacam os seguintes:

- **ABEL HDL:** *Advanced Boolean Expression Language*. Trata-se de uma linguagem limitada, utilizado para o desenho de sistemas de baixa complexidade.
- **Verilog HDL:** É uma linguagem de descrição hardware de alto nível para dispositivos mais complexos. Apresenta uma sintaxe similar à da linguagem de programação C, no entanto, a característica principal que o define é que difere das linguagens de programação convencionais, ao não seguir uma execução estritamente linear das sentenças incluídas nos correspondentes desenhos.
- **VHDL:** Acrônimo que representa a combinação VHSIC (*Very High Speed Integrated Circuit*) e HDL (*Hardware Description Language*). Ao igual que Verilog, é uma linguagem de descrição hardware de alto nível empregado para o desenvolvimento de sistemas complexos. Como característica principal, em VHDL existem várias formas de desenhar um mesmo circuito:
  - ✓ Funcional: Descrever a forma em que se comporta o circuito. A descrição é sequencial, assemelhando às linguagens de programação convencionais.
  - ✓ Fluxo de dados: Descrição de atribuições concorrentes de sinais, isto é, descrição em paralelo.
  - ✓ Estrutural: Descrição do circuito com instâncias de componentes.
  - ✓ Mista: Combinação de todas ou alguma das formas anteriores.

### **2.2.5 - Revisão de literatura relacionada com FPGA e Controle**

Têm-se diversas implementações relacionadas com sistemas de controle usando FPGA. As ferramentas para a programação destes dispositivos são variadas, Gateau *et al* (2010) implementa uma ferramenta para gerar o código em VHDL de um controlador PI fazendo uso de uma interface elaborada em Matlab. Supõe-se vantajosa a implementação do controle sobre uma FPGA porque há uma elevada velocidade de amostragem e processamento.

Fakhrulddin *et al* (2010) Faz uso da ferramenta Labview FPGA para implementar um controlador PID sobre a FPGA, dentro da programação realiza-se o conversor análogo digital do placa de desenvolvimento utilizada (SPARTAN 3E) e implementa-se um módulo PWM para ser utilizado como sinal de controle sobre uma planta conformada por um motor DC.

Atualmente os sistemas de automação industrial utilizam em sua grande maioria controladores lógicos programáveis (PLC) para a realização de processos lógicos e controle, estes têm surgido ante a necessidade de substituição da lógica cablada usando relés. No entanto, as necessidades e requerimentos da indústria em diferentes processos são cada vez maiores, o uso de FPGA permitiria diminuição nos tempos de execução e a possibilidade de executar vários processos com um só dispositivo, no entanto, o desenho sobre FPGA não satisfaz as especificações IEC (*international electrotechnical commission*) de controle, neste sentido se propuseram algumas considerações para passar do standard IEC a linguagem de descrição hardware e realizou-se um desenvolvimento que permite a uma FPGA realizar os labores que realizaria um PLC com todos os benefícios que a FPGA oferece (MANISH *et al* 2010). Normalmente em aplicações com motores de passo o controle faz-se em laço aberto fazendo uso de microcontroladores e DSPs, no entanto, dependendo do tipo de aplicação poderiam ser apresentado diferentes inconvenientes como perda de posição por sobrecarga, perda de torque em determinados faixas de velocidade, alta dissipação de potência entre outros. Um novo enfoque para o controle deste tipo de motores, propõe adaptar um controle de laço fechado a motores passo a passo implementado sobre FPGA contra restando efeitos como o desgaste normal dos componentes, minimizando o consumo de energia ademais tendo um maior domínio no movimento (NADINE *et al* 2011).

Em diversas oportunidades implementaram-se controladores PID sobre FGPA com algumas variações ou introduzindo algum valor agregado em sua implementação, Tarek e Ashraf (2008), implementam um controlador digital Proporcional Integral Derivativo (PID) sobre uma FPGA usando aritmética distribuída, Chan *et al* (2014) fazem um desenvolvimento similar concluindo uma baixa percentagem de uso da FPGA sobre a qual se implemento o algoritmo, Caruso *et al* (2010) implementam o algoritmo de um PID em um microcontrolador embebido sobre uma FPGA para o controle de posição de um motor

de corrente contínua. Uma variação importante da implementação do algoritmo de um PID sobre FPGA realiza-o Tipsuwanpom *et al* (2004) onde o controlador PID é sintonizado mediante lógica difusa e se aplica a um sistema de controle de temperatura.

### 2.3 - TÓPICOS EM CONTROLE

Controle é ação de regulação, ajuste e comando das saídas dos sistemas dinâmicos e/ou processos a fim de alcançar um valor desejado a partir da regulação de determinadas entradas no sistema (Cayo, 2013). Basicamente existem duas configurações nos sistemas de controle: em malha aberta e em malha fechada (Figura 2.17). De forma geral o controlador em malha aberta trabalha a modo de encontrar os parâmetros ótimos que entrem ao sistema, neste caso a saída do sistema não afeta as decisões do controlador. Por outro lado, o controlador em malha fechada monitora acompanha e avalia a variável controlada alimentando o controlador com o erro entre a saída desta variável e o valor pretendido na saída do sistema, a fim de reduzir o erro e levar a saída ao valor esperado.

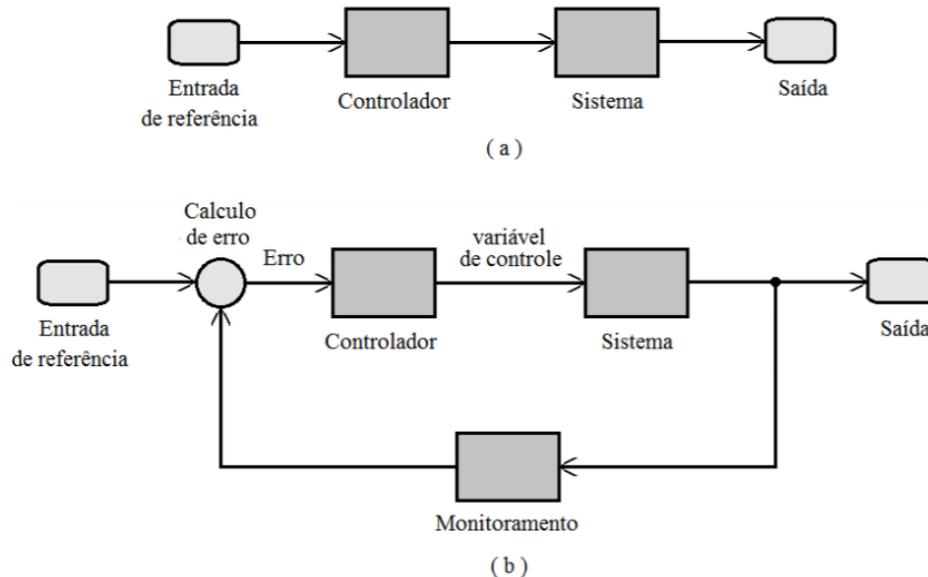


Figura 2.17: Esquema geral dos sistemas de controle. (a) Em malha aberta; (b) em malha fechada

Segundo Lopera (2016) o controle inteligente se realiza através da emulação da inteligência biológica, tomando idéias de como resolver problemas e aplicando-as para a solução dos problemas de controle. As principais áreas no controle inteligente são o

controle fuzzy, as redes neurais, os algoritmos genéticos, os sistemas especialistas e de planejamento. No caso dos sistemas especialistas, estes são conceitualmente similares ao controle fuzzy devido a que muitas operações de controle em geral estão fora da área de problemas de controle tradicionais (baseados em modelos do sistema/processo). Não obstante um sistema especialista pode utilizar estruturas de representação e de inferência muito mais focadas ao problema tratado. A Figura 2.18 mostra um esquema representando de forma geral um sistema de controle especialista.

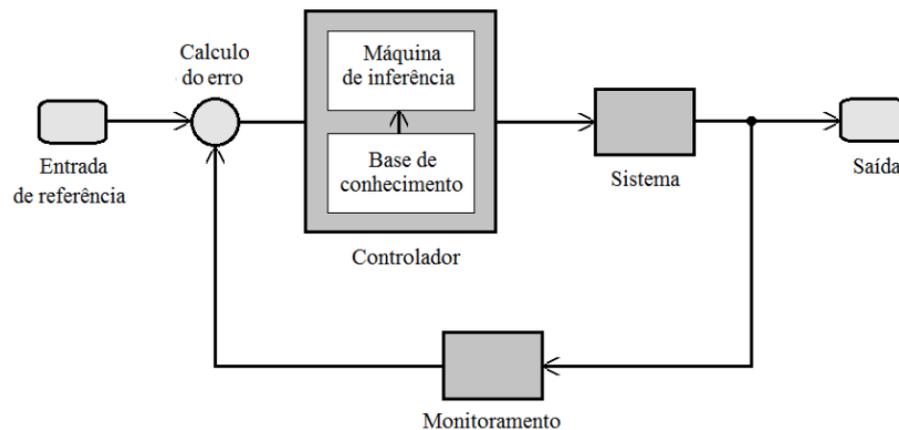


Figura 2.18: Esquema de um processo de controle especialista (Lopera, 2016)

Pode-se dizer, de forma geral, que os controladores especialistas e fuzzy têm realizado os maiores aportes na área de controle inteligente. Isto devido a que podem utilizar métodos heurísticos no controlador e de esta forma não precisar diretamente de um modelo matemático do processo a ser controlado, fazendo referência a que em muitos processos é difícil ou praticamente impossível desenvolver um modelo matemático útil.

### 3 - ESTADO DA ARTE

Recentemente, levou-se a cabo grande quantidade de investigações para estudar o efeito dos parâmetros de soldagem na geometria do cordão, fazendo uso de diferentes tecnologias. Além disso, ocorreram ainda investigações no monitoramento e nas ações de modelagem e o controle das características geométricas do cordão, dado que a seleção correta dos parâmetros do processo é requerida para a obtenção de uma geometria do cordão óptima, com grande influência na qualidade da união. Na Figura 3.1, a seguir, tem-se a relação das investigações dividida em três níveis relacionados com o grau de dificuldade da investigação.

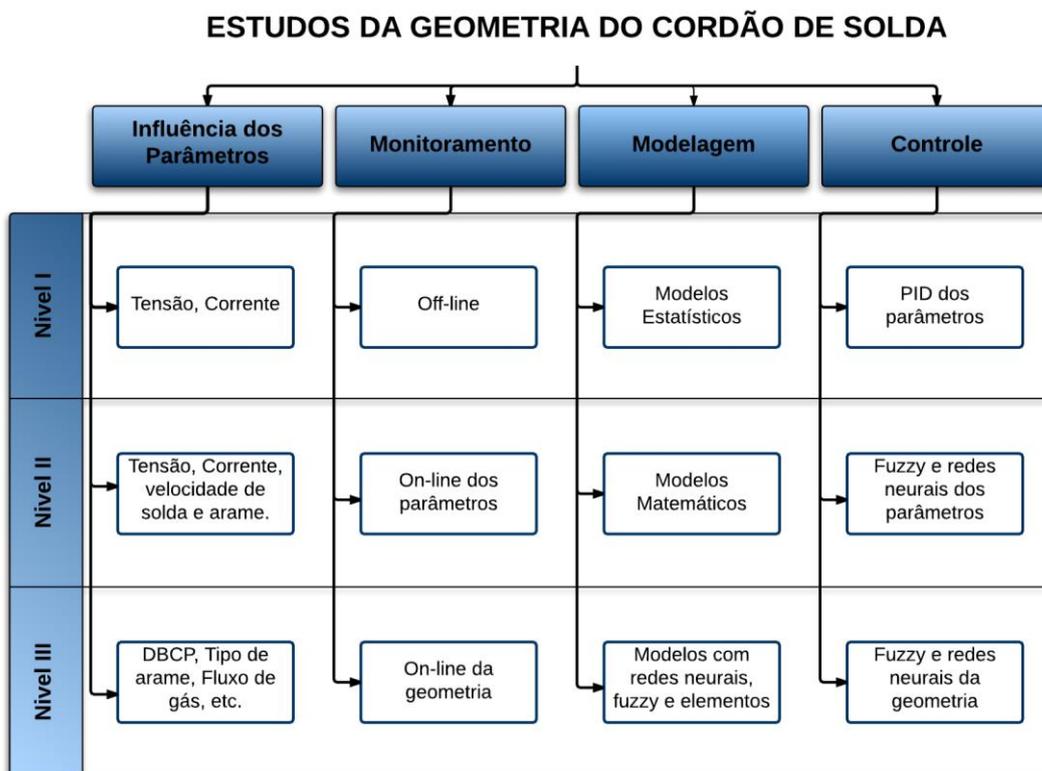


Figura 3.1: Classificação das investigações relacionadas com a geometria do cordão de solda. (Fonte própria)

#### 3.1 - INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS NA GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA

Diversos estudos trataram das relações entre os parâmetros, tais como: tensão, corrente, velocidade de soldagem e geometria da poça de solda (Karandeniz *et al.*, 2007; Lima *et al.*,

2005). Fizeram-se modelos matemáticos que permitiram inferir parâmetros de qualidade do cordão sob alguns aspectos, como, por exemplo, largura, reforço, penetração e zona termicamente afetada. Outros métodos foram utilizados via regressão múltipla para prever as relações entre os parâmetros do processo (Satheesh *et al.*, 2012; Scotti e Monteiro, 2012).

Reis *et al.* (2013) e Zhang *et al.* (2014) pesquisaram os efeitos do comprimento de arco, do ângulo da tocha e a alta frequência dos pulsos de corrente na extinção do arco, analisando a dinâmica da transferência das gotas e o comportamento da poça.

Nouri *et al.* (2007), Ghalib *et al.* (2012), Telsang e Sapakal (2012) e Amit *et al.* (2018) trataram da influência dos parâmetros de soldagem (corrente, tensão, velocidade de soldagem na geometria do cordão, por exemplo) durante o processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), fazendo uso de métodos como, por exemplo, o fatorial completo e a técnica Taguchi, para adquirir os dados, inspecionando a qualidade e medindo a geometria da união.

Gomes *et al.* (2012) utilizaram metodologia similar analisando parâmetros da solda no processo FCAW (*Flux-Cored Arc Welding*).

Tewari *et al.* (2010) pesquisaram os efeitos dos principais parâmetros de soldagem na profundidade de penetração no processo GMAW. Similarmente, Starling *et al.* (2011) objetivaram o estudo do efeito de algumas condições operacionais nas características do cordão produzido por um arame tubular *metal cored*. Também Guimarães (2012), Simões (2012) e Ribeiro *et al.* (2015) analisaram a influência dos parâmetros nos processos TIG (*Tungsten Inert Gas*), GMAW-CW (*Gas Metal Arc Welding – Cored Wire*) e GMAW com a influência da adição de um arame frio respectivamente.

A estabilidade do processo foi estudada por Bazargan *et al.* (2008). Adicionalmente, Silva *et al.* (2011) e Souza e Ferraresi (2012) pesquisaram sobre a qualidade da potência relacionada com o efeito de diferentes modos de transferência no processo GMAW, variando o tipo de gás de proteção sob um mesmo nível de corrente e tensão de soldagem, mantendo constante a taxa de deposição por unidade de comprimento, comparando os processos GMAW e FCAW.

O método Taguchi foi adotado em muitos estudos, como, por exemplo, os de Vargas *et al.* (2006) e Lenin *et al.* (2010), para a realização de uma análise detalhada da influência dos

principais parâmetros do processo de soldagem; os de Meshram e Pohokar (2013) e Satheesh e Dhas (2013), para identificar os níveis ótimos de parâmetros do processo de soldagem por arco metálico com gás; e, em Arivarasu *et al.* (2014), para pesquisar o efeito da frequência com respeito à penetração e largura do cordão no processo GTAW.

Queiroz (2011), Ramazani *et al.* (2014) Ravinder *et al.* (2016) e Mainak *et al.* (2018) investigaram a influência da polaridade do eletrodo na transferência do metal e as propriedades mecânicas da união soldada no processo GMAW, tendo em vista o efeito das características de todas as regiões, tais como: microestrutura, composição química e fração de área sobre as propriedades mecânicas macroscópicas da união soldada.

### 3.2 – MONITOREAMENTO

A técnica de triangulação laser, que consiste de uma câmera e um laser que gera um feixe em forma de linha, o qual passa pela superfície do cordão perpendicularmente ao seu eixo principal, gerando variações na altura e largura do cordão, é uma mais referenciadas e utilizadas, que tem por norte determinar parâmetros geométricos externos em cordões de solda. Neste ínterim, Liu *et al.* (2006), Kim *et al.* (2008), Ma e Zhang (2011) e Kang *et al.* (2007) utilizaram a mesma técnica em tubulações, comprovando a eficácia da técnica de monitoramento *online* e os métodos de processamento de imagens na geometria do cordão.

Entre os sistemas mais utilizados no monitoramento dos processos de soldagem tem-se a visão artificial, monitorando, principalmente, a poça de fusão, a altura e o reforço do cordão. No caso da penetração, grande parte dos estudos tiveram por base medições indiretas, fazendo uso de modelos associados às variáveis gerais do processo. Trabalhos como, por exemplo, de Baskoro *et al.* (2011), Gao *et al.* (2011), Liu *et al.* (2014) e Zou *et al.* (2011) propuseram um estudo sobre o monitoramento da poça de fusão utilizando dispositivos (*Charge-Coupled Device* – CCD) de alta velocidade. Wu *et al.* (2003) e Miao *et al.* (2014), por exemplo, monitoraram o comportamento do arco e o fluxo na poça de fusão fazendo uso de uma câmera de alta velocidade, capturando claramente a imagem completa da poça de fusão durante a soldagem GTAW.

Sistemas de visão são propostos para a detecção em tempo real da altura e a largura do cordão (Xu *et al.*, 2015; Yanling *et al.*, 2015; Xiong e Zhang, 2013). Tem-se a aplicação de vários algoritmos de processamento de imagens – motivo de discussão para a extração dos

parâmetros. Os experimentos de validação confirmaram a eficácia dos sistemas de medida *online* para a geometria do cordão.

Trabalhos realizados por Liu *et al.* (2011) e Guangjun *et al.* (2006) apresentaram um sistema de sensor com base em câmeras capaz de detectar e modelar a poça de fusão. O sistema foi capaz de extrair a forma 2D da poça em tempo real, e uma série de algoritmos foram desenvolvidos para extrair os parâmetros geométricos e obter um modelo destas imagens. Porém, fazendo uso de sistemas similares, González (2005), Xiao *et al.* (2012) e Zhang *et al.* (2012) desenvolveram um sistema de visão artificial para medir a geometria em três dimensões da superfície do poça de fusão no processo GMAW e GTAW. Tem-se que um padrão de rede projeta-se sobre a superfície da poça de fusão. O laser projetado se reflete desde a superfície da poça, e a reflexão é interceptada por um plano de imagem. Foi adoadada uma câmera de alta velocidade equipada com um filtro óptico de banda estreita para capturar o padrão refletido correspondente – que se deforma durante a reflexão –, abordar o algoritmo para avaliar as imagens capturadas e segmentar e identificar o padrão de reflexão. O estabelecimento da correspondência proporcionou os dados necessários para reconstruir a superfície da poça de fusão em base à reflexão.

Murray (2002), Alfaro e Carvalho (2003), Chen e Wu (2007), Thamilarasi e Ragnathan (2010) Mota *et al.* (2013) e Xua *et al.* (2018) desenvolvem métodos de aquisição de informação visual centrados na detecção de visão por computador, processamento de imagens e extração de características da superfície da poça de fusão. Com base nas características visuais adquiridas, modelos foram estabelecidos para prever a dinâmica de poça de fusão durante o processo de soldagem. Lograram-se, então, parâmetros de solda específicos para o controle do comprimento do arco e a geometria do cordão de solda para assegurar a estabilidade do arco, o tamanho da solda e a penetração adequada. E ainada, Gaohua e Junmei (2009) propuseram um método de detecção com base em visão artificial em soldagem em tubulações.

Diversas técnicas, tais como: a reflexão de uma matriz de pontos que se projeta sobre a superfície da poça de fusão por médio de um laser (Song e Zhang, 2007); a redução da luz do arco (Houghton *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2010); a fusão de sensores (Alfaro (2011); os métodos de domínio do tempo, domínio da frequência e análise *wavelet* para analisar os sinais acústicos (Luo *et al.*, 2005); e, as imagens de transmissão de raios X (Li *et al.*, 2014), são utilizadas para de identificar e detectar perturbações nos processos de soldagem

e, assim, diagnosticar falhas no processo. Os resultados então apontaram que as diversas técnicas utilizadas configuram-se como uma ferramenta para medir indiretamente a qualidade nos processos de soldagem.

### 3.3 – MODELAGEM

Na modelagem dos parâmetros geométricos têm-se três abordagens principais, quais sejam: 1) Modelagem estatística; 2) Modelagem matemática; e, 3) Modelagem com base em inteligência artificial. Em geral, nos processos de soldagem se dá uma grande correlação entre todos os parâmetros e as variáveis envolvidas, como, por exemplo, a corrente do processo, a tensão do arco elétrico, a velocidade de soldagem, a velocidade de alimentação do arame (no caso da soldagem GMAW), as propriedades do gás de proteção, do metal de base e do eletrodo, entre outras.

Diversos estudos estabeleceram as relações para determinar os parâmetros ótimos para a especificação da largura e altura do reforço do cordão de solda. Um dos enfoques mais utilizados foi a análise de regressão (Sreeraj *et al.*, 2013; Kolahan e Heidari, 2010; Ganjigatti *et al.*, 2008; Palani e Murugan, 2007), onde, para a recopilção de dados, tem-se a utilização dos desenhos fatoriais de cinco níveis, desenho fatorial completo e o desenho composto central. A adequação dos modelos foi verificada mediante o método ANOVA (*Analysis of Variance*). Este se mostrou bastante eficaz na predição de parâmetros de processo para a geometria externa do cordão de solda. Alam e Khan (2011), por exemplo, utilizaram tal método experimental para predizer a penetração do cordão de solda, e Sreeraj e Kannan (2012) fizeram uso do mesmo enfoque metodológico para obter a diluição ótima de revestimento de aço inoxidável de placas de aço estrutural de baixas emissões de carbono utilizando o processo GMAW.

Kumar (2011), Gautam e Abbas (2013), Gomes *et al.* (2013), Moncayo *et al.* (2013) e Costa e Scotti (2017) se empreitaram no estudo e na análise dos parâmetros dos processos de soldagem que se seguem: tensão do arco, corrente e a velocidade de soldagem, na resposta da geometria do cordão, tais como: altura, largura e penetração do cordão. Os modelos foram desenvolvidos utilizando a metodologia de superfície de resposta para relacionar as variáveis de processo com as características da geometria do cordão. A adequação dos modelos desenvolvidos comprovou-se mediante o uso da técnica ANOVA.

Em Pal *et al.* (2009), Srinivasa *et al.* (2009) e Singh (2013) tem-se a apresentação de modelos matemáticos que correlacionam os parâmetros do processo de solda com a geometria da união soldada, desenvolvidos com a investigação experimental. Naqueles trabalhos aplicou-se o método *Taguchi* para planificar os experimentos. Aqui vale destacar os parâmetros do processo, a saber: velocidade de alimentação de arame; espessura da placa; frequência e amplitude do pulso; velocidade de soldagem, fluxo de gás, tensão – todos desenvolveram os modelos fazendo uso das análises de regressão múltipla. Os resultados dos experimentos demonstraram que os modelos podem prever a geometria da união com uma precisão razoável. De modo similar, Son *et al.* (2007) obtiveram modelos a partir de análises de regressão múltipla. Estes têm sido empregados para a predição dos parâmetros ótimos de soldagem, no que tange o procedimento experimental com base em um método *Taguchi* e a identificação dos diversos problemas que se derivam do processo de solda GMAW.

Outros autores empreenderam modelos estadísticos com diferentes enfoques, tais como: Doumanidis e Kwak (2002), que fizeram uso de um *scanner* térmico mediante a utilização de infravermelhos, para medir a geometria do cordão e obter os parâmetros ótimos; Bingul e Cook (2006), que desenvolveram o modelo dinâmico completo para a extensão do eletrodo derivado mediante a combinação de um modelo dinâmico de resistividade com o modelo de tensão; Zuo *et al.* (2011) que modelaram a transferência em curto circuito do processo GMAW em relação à corrente e tensão de soldagem; Tham *et al.* (2011), que desenvolveram um sistema para mostrar os valores da geometria do cordão de solda para qualquer valor de parâmetro de soldagem e vice-versa; Xiong *et al.* (2013), que desenvolveram um modelo ótimo do perfil da seção transversal do cordão de solda, levando em conta o arco circular, a parábola e a função cosseno; Arif e Chung (2014), que propuseram um modelo integral para prever a transferência de metal nos modos de voo livre; e, Franco *et al.* (2014), que desenvolveram um modelo que permite a predição da penetração e da largura da poça de fusão causada por movimento do raio laser.

A segunda abordagem da modelagem das características geométricas é a modelagem matemática, onde os modelos permitem a predição de alguns parâmetros geométricos, como, por exemplo, a altura do reforço, a largura e a penetração do cordão (Abhay *et al.*, 2018; Khanna e Maheshwari, 2018; Son *et al.*, 2017; Dorta *et al.*, 2011; Rao *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2008; Murugan e Gunaraj, 2005; Kim *et al.*, 2003), bem como o comportamento do processo em condições operacionais de transferência metálica (Rudas *et*

*al.*, 2015; Santana e Modenes, 2011; Planckaert *et al.*, 2010) ou avaliar a qualidade da solda (Casey (2009). Tais modelos tem por base um conjunto de equações que descrevem as características operacionais da fonte de energia, as quedas de tensão que ocorrem no arco elétrico e nos componentes do circuito de soldagem, entre outras.

Sharma *et al.* (2015) e Sanatan *et al.* (2017), também apresentaram modelos matemáticos do reforço e da penetração em soldas de alta deposição produzidos por processos de múltiplos fios. Tao *et al.* (2015) realizaram um estudo experimental para o desenvolvimento de modelos matemáticos para prever a geometria do cordão depositado através de um desenho quadrático. E Marcin *et al.* (2016) realizam a modelagem matemática da distribuição da temperatura no cordão no processo de soldagem GMAW.

A terceira abordagem da modelagem tem por base a inteligência artificial, e o enfoque mais utilizado são as redes neurais artificiais. Os três parâmetros geométricos mais estudados são: 1) Largura; 2) Reforço; e, 3) Penetração. Sobre a questão, Acherjee *et al.* (2011), Xiong *et al.* (2012) e Ramos *et al.* (2013) estabeleceram uma correlação entre os parâmetros de soldagem e a largura do cordão de solda através de um modelo não linear, desenvolvido pela aplicação de rede neural artificial (*Artificial Neural Networks – ANN*). No entanto, aqueles autores realizaram a predição da largura e o reforço, bem como uma comparação entre o modelo de rede neural e o modelo de regressão de segunda ordem, concluindo que o modelo de rede neural apresenta melhor rendimento.

Kim *et al.* (2002) e Kim *et al.* (2004) empreenderam o desenvolvimento de algoritmos inteligentes para compreender as relações entre os parâmetros do processo e a altura do cordão, e para prever os parâmetros através de uma rede neural.

Têm-se os modelos de redes neurais desenvolvidos para descrever a relação entre os parâmetros geométricos do cordão com a penetração do cordão de solda nos trabalhos propostos por Wu *et al.* (2006), Al-Faruk *et al.* (2010) e Wang e Li (2013). Os experimentos levam-se a cabo para obter o conjunto de dados de treinamento e o conjunto de dados de verificação. Os resultados das provas apontam que os modelos tem uma precisão suficiente e pode cumprir os requisitos de controle de penetração da solda. Vale destacar que Nagesh e Datta (2002), Manikya e Srinivasao (2008) e Sathiya *et al.* (2012) pesquisaram o uso das redes neurais artificiais para modelar o processo de soldagem com redes neurais de retropropagação, a fim de associar as variáveis do processo de soldagem com as características da geometria do cordão e a penetração.

Outro enfoque na utilização de redes neurais se deu no trabalho desenvolvido por Ate (2007), onde se tem uma nova técnica com base em redes neurais artificiais (RNAs) para a predição de parâmetros de solda por arco metálico com gás. Os parâmetros de entrada do modelo consistem em misturas de gases, enquanto, as saídas do modelo ANN incluem propriedades mecânicas, tais como: resistência à tração, resistência ao impacto e alongamento e dureza do metal de solda. Ali, os resultados apontaram para a predição dos parâmetros que se encontravam relacionados com os dados medidos, indicando que a técnica apresentada denota bom desempenho. No entanto, Keshmiri *et al.* (2015) apresentaram um enfoque de aprendizagem inteligente para a estimativa dos parâmetros do cordão de solda. O modelo teve por base uma arquitetura de rede neural de quatro camadas, obtendo melhores resultados que os modelos estatísticos.

Outras abordagens utilizadas na modelagem dos processos de soldagem é a aplicação da metodologia de elementos finitos FEA (*Finite Element Method*) (Aloraier e Joshi, 2012; Cronje, 2005). Neste sentido, para a modelagem têm-se os parâmetros a seguir: corrente, tensão e velocidade de soldagem, que medem as dimensões de geometria do cordão (largura, altura, profundidade de penetração e zona afetada pelo calor). A lógica difusa é aplicada na modelagem da largura do cordão (Xue *et al.*, 2005) e para predizer a deposição do metal de solda (Podder e Roy, 2013). Outros autores como, por exemplo, Xu e Wu (2007) e Akbari *et al.* (2014) analisaram numericamente a geometria do cordão de solda fazendo uso de um modelo de condução térmica. E ainda, Dutta e Pratihari (2007) fizeram uso de redes neurais de retro-propagação (*Back Propagation Neural Network* – BPNN) e um sistema genético-neural (GA-NN); Malviya e Pratihari (2011) e Dhas e Kumanan (2011) utilizaram a técnica de otimização de enxame de partículas; e, Sudhakaran (2011) e Sreeraj *et al.* (2013) obtiveram modelos com base em algoritmos genéticos.

### **3.4 – CONTROLE**

O processo de soldagem GMAW convencional é o mais estudado e desenvolvido, mas, a qualidade e quantificação, bem como o controle e a automatização em soldagem, são as áreas menos pesquisadas (Scotti e Ponomarev, 2008). Golob *et al.* (2002), por exemplo, realizaram um modelo matemático do processo GMAW e encontraram a relação matemática entre o comprimento do cordão da solda com a corrente e a velocidade de solda. Aqueles autores implementaram um sistema de controle para a corrente de soldagem via controlador PI Fuzzy, para, então, obterem uma largura estável.

Mousavi e Haeri (2011) desenharam um controlador preditivo funcional com base na estrutura do modelo ARMarkov, a fim de controlar a corrente de solda e a tensão de arco em um processo GMAW e realizar comparações com controladores PI e PID. Aqueles autores, no ano de 2012, implementaram um controlador empregando-se adicionalmente a velocidade de fusão, a entrada de calor e o diâmetro de gota como variáveis para controlar a transferência de calor e massa à peça de trabalho. Por outro lado, Huang *et al.* (2011) desenvolveram um sistema de aquisição de sinais e um controle proporcional em tempo real, obtendo resultados satisfatórios.

Os controladores inteligentes com base no sistema Fuzzy são utilizados para controlar a geometria do cordão de solda. Sobre a questão, Yu *et al.* (2009) e Tsai *et al.* (2010) utilizaram a referida técnica para controlar a largura do cordão de solda, sendo que estes últimos fizeram uso do sistema de imagens e a técnica de detecção de bordas em tempo real. As regras do controlador difuso têm por base as experiências adquiridas do processo de soldagem. Neste sentido, Torres (2013) também fez uso do controlador fuzzy para a largura do cordão, desenvolvendo, além disso, um sistema integrado de aquisição de imagens, permitindo uma resposta em tempo real.

O uso das RNAs se dão para o controle da largura do cordão, como é o caso do trabalho de Yan *et al.* (2011) e Xiong *et al.* (2013), onde, adicionalmente, se tem um sistema de processamento de imagem para extrair parâmetros dos cordões de solda depositados. Os resultados apontaram que os sistemas de controle com base em redes neurais são capazes de manter a largura do cordão, fazendo uso eficiente dos materiais e energias possíveis.

Bera *et al.* (2013), Reza *et al.* (2015) e Zhu *et al.* (2016), apresentaram o controle do sistema GMAW. Um modelo de sistema não linear de múltiplas entradas-saídas (MIMO) foi considerado para o desenho dos controladores. Por outro lado, Liu e Zhang (2013) e Ye *et al.* (2018) pesquisaram sobre a modelagem 3D da geometria da poça de fusão, com base no controle preditivo. Ali fez-se uso de um sistema de detecção de visão 3D, capaz de medir os parâmetros da poça em tempo real. Xiong e Zhang (2014) também desenvolveram um sistema de sensor de visão para controlar a distância do bocal (NTDS) utilizando GMAW. Assim, foi desenhado um sistema de controle adaptativo para manter constante a NTSD. Os resultados experimentais confirmaram que a estabilidade do processo pode ser melhorada ao aplicar o controlador desenvolvido.

### 3.5 – SUMÁRIO

O estado da arte apresentado anteriormente teve como objetivo evidenciar as pesquisas desenvolvidas na geometria do cordão de solda. As fontes de informação consultadas foram: livros, jornais e portais de *internet*. Foram consultadas 150 fontes envolvendo a influência dos parâmetros, monitoramento, modelagem e controle das características geométricas do cordão nos diversos processos de soldagem. A Figura 3.2, a seguir, aponta a distribuição porcentual dos trabalhos e pesquisas abordados.

Com base na revisão bibliográfica, foi possível identificar maior número de estudos da modelagem da geometria nos processos de soldagem. A Figura 3.2 também evidencia a existência de uma carência de estudos no controle da geometria do cordão, sendo o controle da geometria importante, já que mediante ditas características, são determinadas as propriedades mecânico-metalúrgicas de uma união, obtendo, assim, cordões com os requerimentos desejados.

Atualmente tem-se uma necessidade crescente do processo GMAW em diversas aplicações industriais e observando a carência do controle da geometria do cordão. Assim, as linhas que se seguem têm como objetivo a modelagem e o controle *online* da largura e o reforço do cordão de solda, e, além disso, que o sistema proposto seja embarcado nas fontes de soldagem.

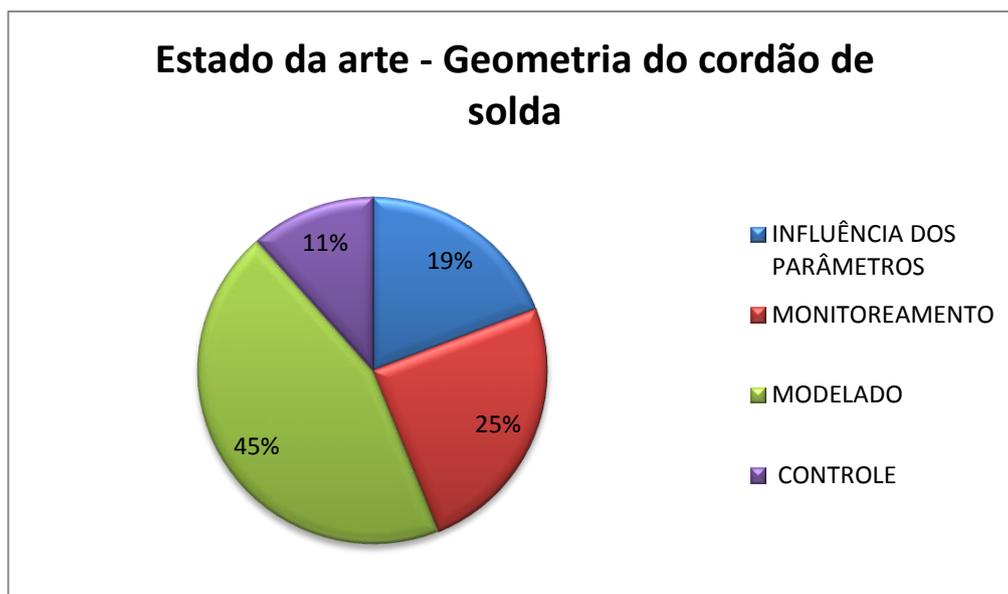


Figura 3.2: distribuição percentual dos trabalhos e pesquisas.

## 4- METODOLOGIA EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTOS

### 4.1 – EQUIPAMENTO E BANCADA EXPERIMENTAL

#### 4.1.1 – Sistema de soldagem

Na Figura 4.1, a seguir, tem-se a distribuição do sistema computacional e o *hardware* utilizados na presente pesquisa. À continuação, detalham-se brevemente cada um dos dispositivos do sistema utilizados, suas funcionalidades que estes desempenham, bem como os materiais utilizados no processo.

##### 4.1.1.1 – Fonte de soldagem

Para a realização dos testes, fez-se uso de uma fonte de soldagem Fronius TransPuls Synergic 5000, digital e multiprocesso (*Shielded Metal Arc Welding – SMAW, Gas Tungsten Arc Welding – GTAW e Gas Metal Arc Welding – GMAW*), que trabalha no processo de soldagem GMAW convencional, operando no modo tensão constante, onde a corrente varia mais fortemente para atender às condições operacionais. As variáveis foram reguladas conforme os valores exigidos pelo trabalho de pesquisa.

##### 4.1.1.2 – Computador

Foi utilizado um computador de placa de aquisição de dados *PCI Eagle 703s*, encarregada de adquirir os sinais elétricos do processo. Os programas instalados para a realização destas tarefas foram: Labview, MATLAB, Quartus II e Nios II.

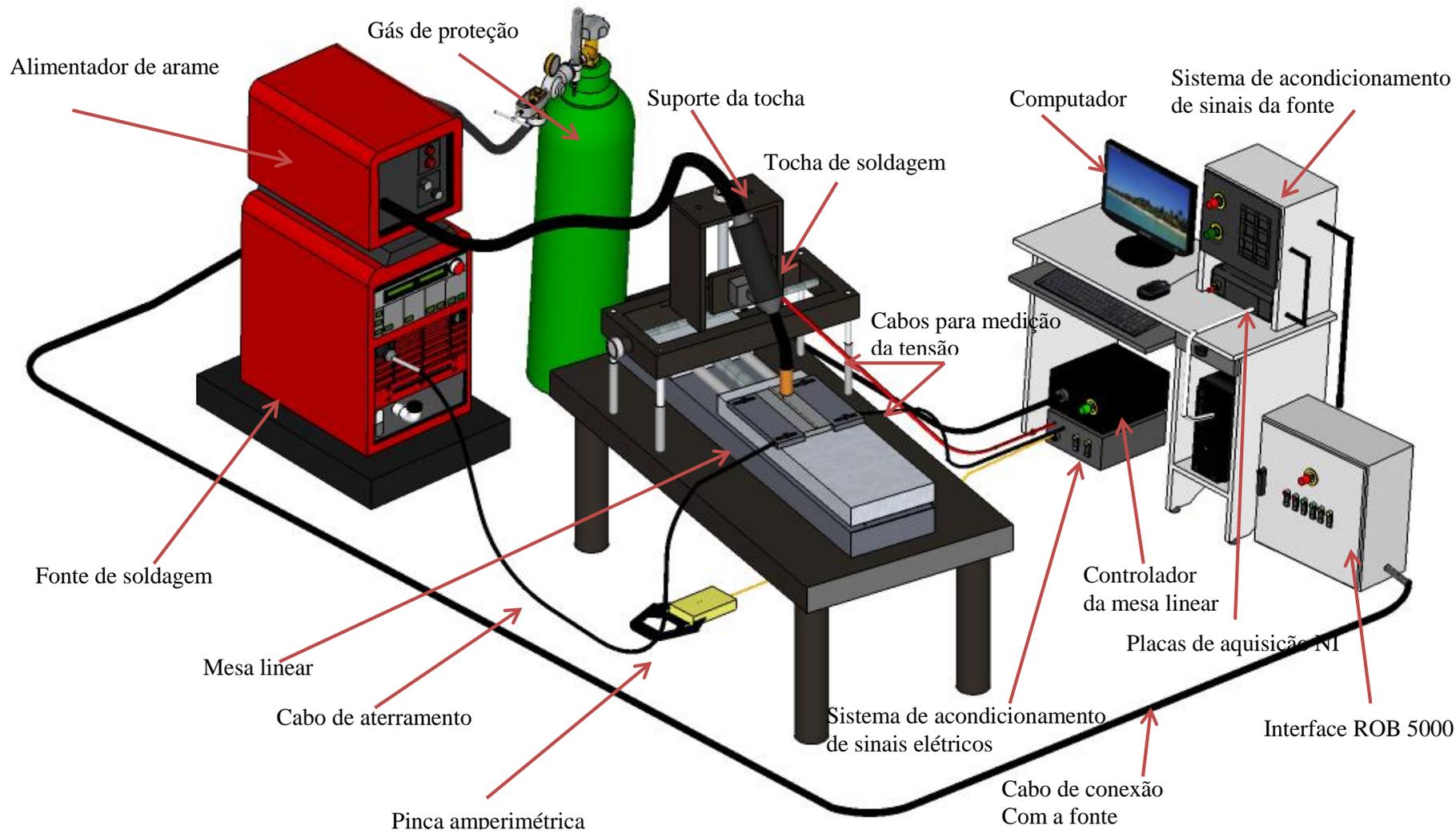


Figura 4.1: Distribuição e Localização do Sistema Computacional, Hardware e Equipamentos Utilizados.

#### 4.1.1.3 – Mesa de deslocamento linear

A mesa linear desenvolvida em trabalhos anteriores (FRANCO, 2008), foi projetada e construída para movimentar-se em uma dimensão. O eixo é acoplado a um motor de passo. A mesa utilizada em conjunto ao motor é exibida na Figura 4.2, a seguir.

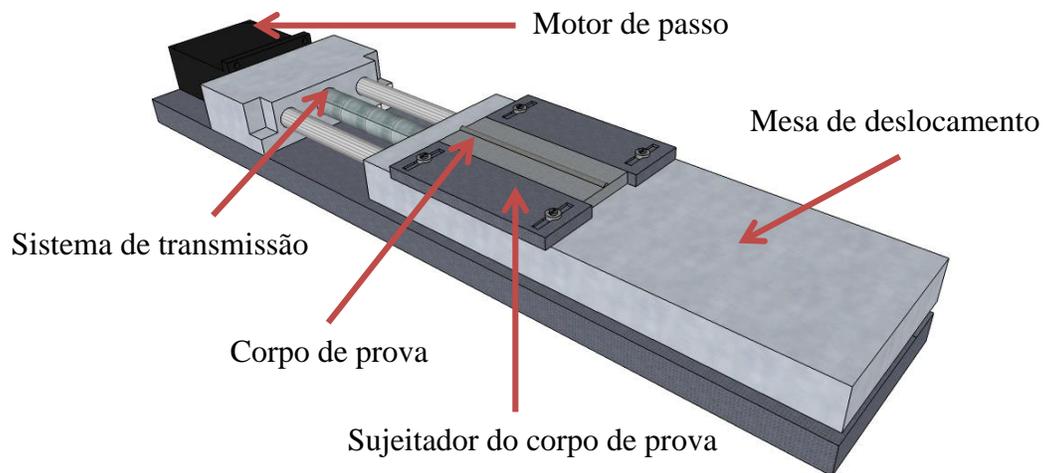


Figura 4.2: Mesa de deslocamento linear.

A mesa suporta uma carga de até 15 kg. O motor de passo utilizado na mesa é do fabricante Berger Lahr, modelo ICIA IDS91. Para seu controle, são necessários dois sinais, ou seja, um sinal quadrado, cuja frequência regula a velocidade do motor, e outro que controla a direção do motor (giro para esquerda ou direita).

Para controlar a velocidade, o sentido do giro do motor e o tempo do processo, fez-se uso de um microcontrolador (PIC16C63A). Em primeira instância, foram definidas as velocidades máximas e mínimas existentes nos tipos de soldagem trabalhados no laboratório. Aqui vale destacar que o sistema permite a utilização da velocidade em uma faixa de 1 a 20 mm/s, que atende as velocidades requeridas no processo GMAW.

O envio de sinais à placa se dá via FPGA (*Field-Programmable Gate Arrays*) DE2 115 da Altera, enviando comandos, tais como: sentido, velocidade de soldagem e tempo de execução ou distância (comprimento do cordão).

#### 4.1.1.4 - Consumíveis utilizados nos processos

De acordo com as disponibilidades do laboratório, os materiais utilizados na presente pesquisa foram:

- Gases

Para o processo GMAW em estudo, a proteção gasosa foi um gás de mistura de 96%Ar + 4%O<sub>2</sub>. Aquele tipo de gás foi utilizado por ser item frequente na soldagem de aço carbono, segundo os fabricantes e pesquisadores consultados. A vazão de gás utilizado no experimento foi de 15 lt/min.

- Metais de adição utilizado nos processos

Para realizar a modelagem da largura e o reforço do cordão de solda fez-se uso do arame maciço da classe AWS A5.18 ER70S, com diâmetro igual a 1 mm.

- Metal de base

O material do metal de base utilizado para a realização dos testes foi o aço carbono AISI 1020, em formato de chapa plana, com dimensões 6,35 mm de espessura, e 300 mm x 50 mm de comprimento e largura, respectivamente, previamente limpos e esmerilados.

## 4.2 - KIT VEEK-MT DA TERASIC

O kit Veek-MT oferece uma plataforma integrada que inclui *hardware*, ferramentas de desenho, propriedade intelectual e desenhos de referência para o desenvolvimento de *software* embestado e a plataforma de *hardware* em uma ampla faixa de aplicativos. O Veek-MT conta com os componentes descritos a seguir.

- Cyclón EP4CE115 IV FPGA;
- Dispositivos de memória: 128MB SDRAM, 2MB SRAM, 8MB FLASH de 8 bits, 32Kbit EEPROM;
- Interruptores e Indicadores: 18 interruptores e 4 *push button*, LEDs 18 vermelhos e nove verdes;
- Audio: 24-bit codificador/descodificador (CODEC);

- Display: LCD 16x2;
- Conector de saída VGA: VGA DAC; e
- Controle Remoto: Módulo receptor de infravermelho.

### **4.3 - Sistema de aquisição dos sinais elétricos**

O monitoramento dos parâmetros (corrente e tensão de soldagem) aliado aos seus respectivos valores médios e tempos de atuação foram adquiridos para que fossem analisados. Tal monitoramento é essencial porque durante a execução do processo tem-se a possibilidade de erro tanto procedente de falha de equipamento como de caráter humano. As referidas aquisições puderam apontar a ocorrência do modo de transferência, facilitando a análise dos sinais, os quais foram úteis para o conhecimento do comportamento do arco de soldagem e sua regularidade.

O sistema de aquisição de sinais utilizado é composto por: um sensor de efeito *Hall* para o monitoramento da corrente, de faixa de medição de  $\pm 600$  A; um divisor de tensão para monitoramento da tensão; e, uma placa de aquisição de sinais elétricos PCI Eagle 703s.

A visualização, o tratamento preliminar e o arquivamento dos sinais elétricos da corrente e da tensão da placa ocorrem por meio de um programa implementado no Labview. Para tanto, os sinais de tensão foram adquiridos entre a região equivalente ao final da tocha (região de contato) e a mesa de soldagem. O tratamento dos dados coletados durante a realização dos testes foi realizado por meio do MATLAB, que permitiu avaliar, manipular e calcular os valores médios de tensão e corrente, bem como construir os gráficos dos sinais monitorados.

### **4.4 - METODOLOGIA**

Nas linhas que se seguem tem-se a metodologia proposta para o desenvolvimento do trabalho de investigação referente à modelagem e controle das características geométricas do processo GMAW usando sistemas reconfiguráveis, apontando as técnicas e os procedimentos a serem desenvolvidos para a realização da investigação.

Na Figura 4.3, a seguir, tem-se a metodologia desenvolvida apresentando três etapas. A primeira se relaciona com a modelagem das características geométricas; a segunda, com a

comunicação do processo de soldagem com a FPGA; e, a terceira, com a realização e a implementação do sistema de controle.

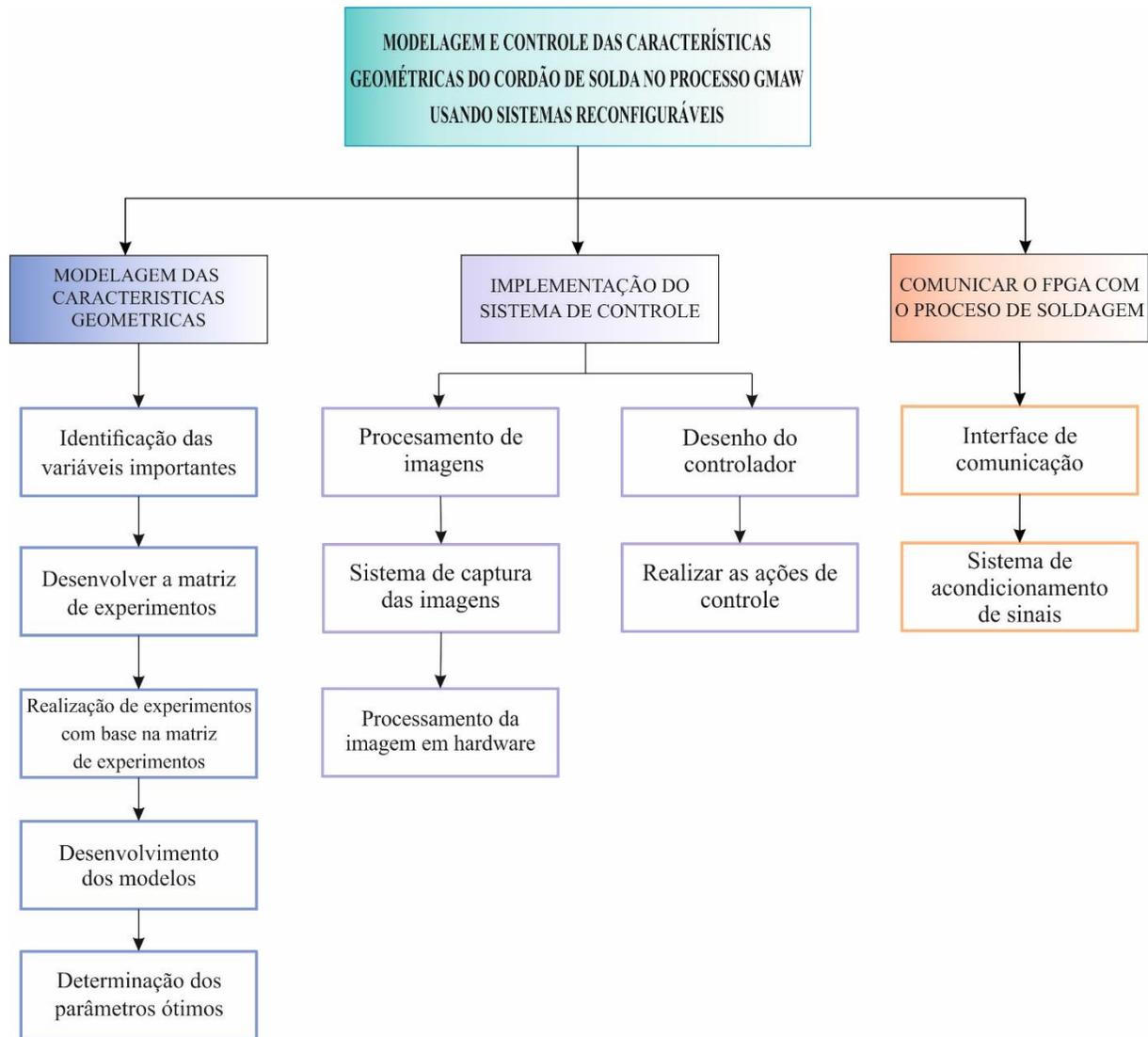


Figura 4.3: Esquema da metodologia desenvolvida para a pesquisa.

#### 4.4.1 - MODELAGEM DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO CORDÃO DE SOLDA

A fim de promover a modelagem da largura e o reforço do cordão de solda têm-se os passos evidenciados na Figura 4.28

#### 4.4.1.1 - Identificação das variáveis importantes

Foram encontrados os parâmetros do processo controláveis que afetam os parâmetros de saída. As variáveis escolhidas foram: velocidade de alimentação de arame, velocidade de soldagem e tensão. As respostas selecionadas foram: largura do cordão (L), altura do reforço (R) e área depositada (AD). Os fatores eleitos foram responsáveis por lograr uma geometria ótima do cordão de solda.

As faixas de trabalho de todos os fatores selecionados se fixam mediante a realização de testes. Neste sentido, foram realizados diversos experimentos variando um dos fatores e mantendo o resto dos valores constantes. A faixa de trabalho da cada parâmetro do processo foi decidida pela inspeção de cordões de aparência lisa e sem defeitos visíveis, buscando, além disso, evitar a existência de problemas, tais como: a não abertura e extinção do arco, a queimadura do bico e o excesso de respingos e porosidades.

No presente estudo fez-se o uso de um Planejamento Composto Central (PCC) (em inglês, *Central Composite Design*), dado que o desenho demandado acarreta em uma distribuição razoável de pontos, ou seja, de informação, em toda a região de interesse, utilizando o menor número possível de pontos experimentais.

A Figura 4.4, a seguir, denota uma representação do planejamento experimental com base no PCC para três variáveis de entrada. O PCC conta com um desenho fatorial  $2^3$  aumentado com seis pontos axiais e um ponto central; o número de corridas ao centro e a distância dos pontos axiais ( $\alpha$ ) foi escolhido para um desenho *rotatable*, onde  $\alpha = (F)^{1/4}$ , sendo F o número de pontos da parte fatorial, isto é, 8, então  $\alpha = (8)^{1/4} = 1.682$ .

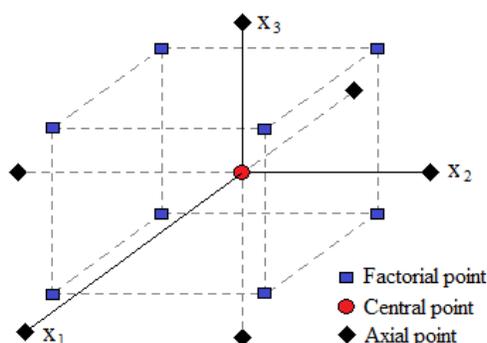


Figura 4.4: Planejamento Composto Central para três variáveis.

As unidades apresentadas anteriormente se dão em função dos níveis codificados (-1, 0, 1) das variáveis de entrada, com as distâncias (diferença de valores) das variáveis estimadas em relação ao centro da região de análise. Neste sentido, faz-se importante que aqueles níveis estejam codificados; do contrário, as diferenças entre as unidades de medida das variáveis acabam influenciando nas respostas do modelo. As variáveis de entrada são codificadas a partir da Equação 4.1, a seguir.

$$x_j = \frac{\xi_j - [\max(\xi_j) + \min(\xi_j)]/2}{[\max(\xi_j) - \min(\xi_j)]/2} \quad (4.1)$$

Onde:

$x_j$  = indica o nível codificado;

$\xi$  = o valor real da variável;

$J$  = representa a variável; e

$\max(\xi_j)$  e  $\min(\xi_j)$  = são os valores reais do planejamento fatorial.

Os níveis codificados e as variáveis de entrada com suas faixas de trabalho estão expostos na Tabela 4.1, a seguir.

Tabela 4.1: Níveis e faixas dos parâmetros de soldagem.

Parâmetros de soldagem	Símbolo	Níveis				
		-1.682	-1	0	1	1.682
Velocidade de arame (m/min)	$x_1$	4.8	5.5	6.5	7.5	8.2
Tensão (V)	$x_2$	16.2	19	23	27	29.7
Velocidade de soldagem (mm/s)	$x_3$	6.6	8	10	12	13.4

#### 4.4.1.2 - Desenvolver a matriz de experimentos

Conforme a combinação dos valores das variáveis apresentados na Tabela 4.1, realizou-se a matriz de experimentos. Na Tabela 4.2, a seguir, têm-se os experimentos selecionados e especificam-se os valores correspondentes para cada variável.

Tabela 4.2: Experimentos selecionados.

No Exp	Níveis			Faixa		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1$	$x_2$	$x_3$
<b>1</b>	-1	-1	-1	5.5	19	8
<b>2</b>	1	-1	-1	7.5	19	8
<b>3</b>	-1	1	-1	5.5	27	8
<b>4</b>	1	1	-1	7.5	27	8
<b>5</b>	-1	-1	1	5.5	19	12
<b>6</b>	1	-1	1	7.5	19	12
<b>7</b>	-1	1	1	5.5	27	12
<b>8</b>	1	1	1	7.5	27	12
<b>9</b>	-1.682	0	0	4.8	23	10
<b>10</b>	1.682	0	0	8.2	23	10
<b>11</b>	0	-1.682	0	6.5	16.2	10
<b>12</b>	0	1.682	0	6.5	29.7	10
<b>13</b>	0	0	-1.682	6.5	23	6.6
<b>14</b>	0	0	1.682	6.5	23	13.4
<b>15</b>	0	0	0	6.5	23	10
<b>16</b>	0	0	0	6.5	23	10
<b>17</b>	0	0	0	6.5	23	10
<b>18</b>	0	0	0	6.5	23	10
<b>19</b>	0	0	0	6.5	23	10
<b>20</b>	0	0	0	6.5	23	10

#### 4.4.1.3 - A realização de experimentos com base na matriz de experimentos

Foram realizados 20 testes experimentais para cada combinação dos parâmetros na geometria do cordão.

Para a medição da largura e do reforço fez-se uso de um sistema de *scanner*, sendo possível a reconstrução em 3D do cordão de solda (vide Figura 4.5, a seguir).

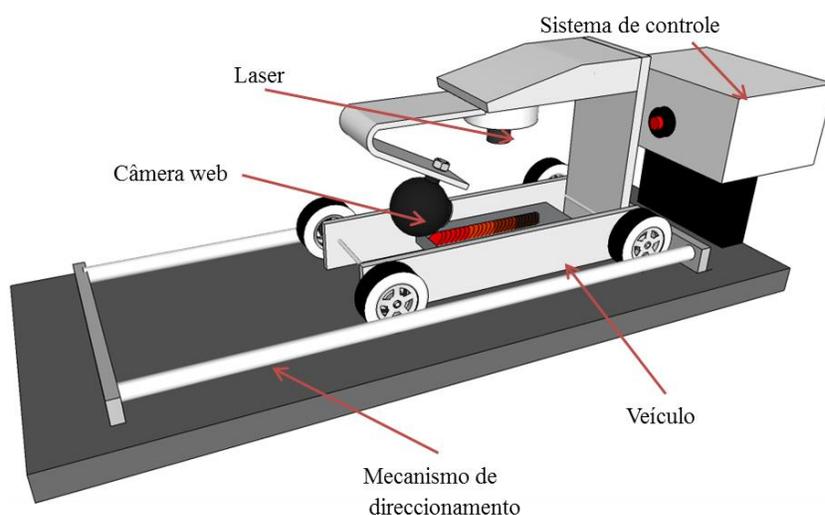


Figura 4.5: Sistema de *scanner*.

Depois do processamento de todas as imagens e da obtenção das medições das dimensões (reforço e largura) dos cordões, além da área total depositada, obteve-se a reconstrução 3D do cordão, conforme apresentado na Figura 4.6, a seguir. E ainda, conforme a Figura 4.7, a seguir, tem-se as medidas dos parâmetros de maneira individual através de duas medidas, a saber: a primeira, a medida média de cada uma das características, sem levar em conta os limites do cordão; e, a segunda, a medida do erro com respeito a não uniformidade do cordão de solda (desvio padrão da medida).

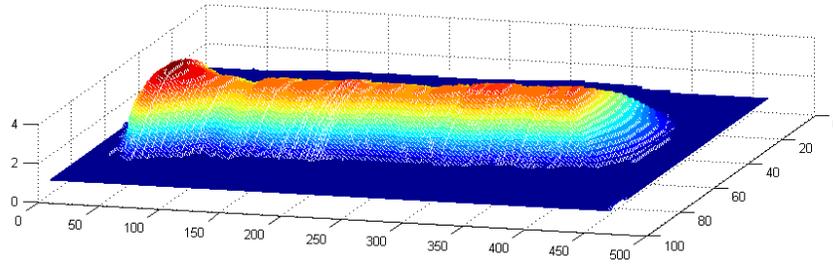


Figura 4.6: Reconstrução do cordão de solda em 3D.

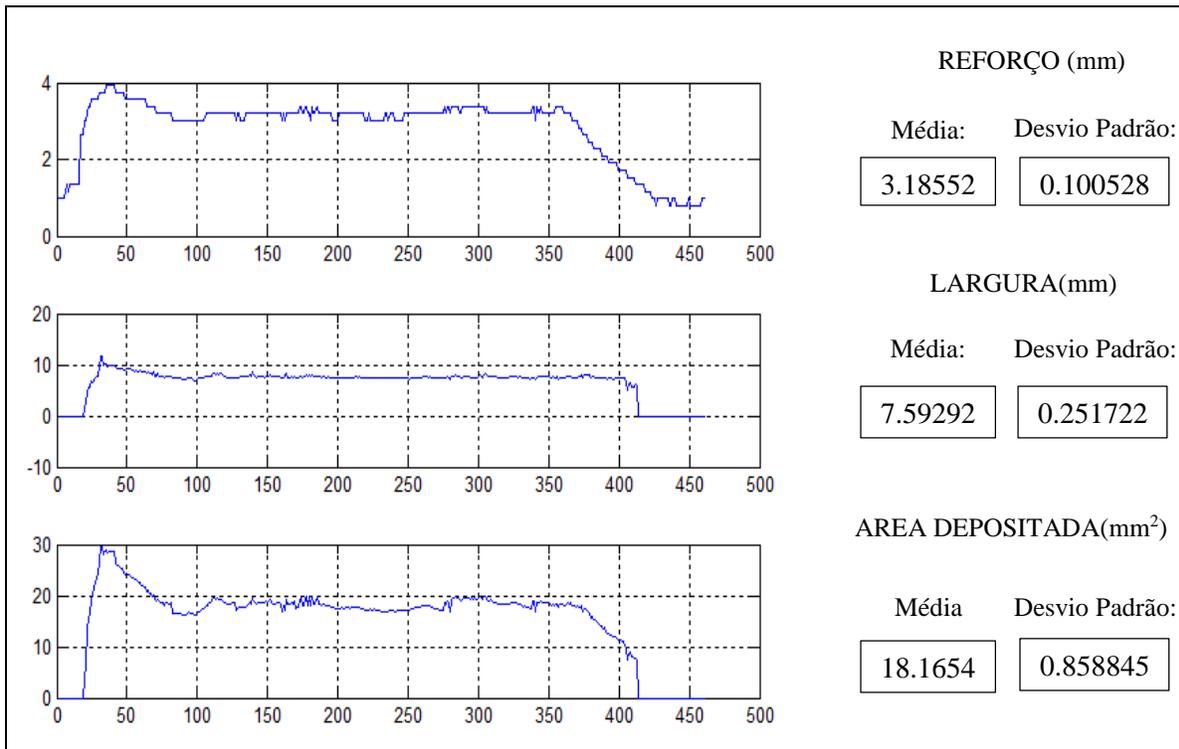


Figura 4.7: Medidas dos parâmetros geométricos.

#### 4.4.1.4 - Desenvolvimento dos modelos

A geometria dos cordões de solda é caracterizada pelos seguintes valores: reforço, largura, penetração e área depositada. Estes são indicadores do comportamento da união soldada pelo que podem ser considerados como fatores de controle do processo. No presente estudo efetuou-se a otimização dos parâmetros do processo de soldagem por arco GMAW mediante a Metodologia da Superfície de Resposta (MSR). As variáveis escolhidas são: tensão do arco,

velocidade de soldagem e velocidade de alimentação de arame. As funções de resposta escolhidas são: reforço e largura.

- **A Metodologia de Superfície de Resposta**

A MSR é um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas para a modelagem e análise em aplicações, onde uma resposta de interesse é influenciada por diferentes variáveis e cujo objetivo é a otimização de tal resposta. O modelo de resposta quadrático ou modelo de segunda ordem é o indicado na Equação 4.2, a seguir.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^K \beta_i X_i + \sum_{i=1}^K \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{j=2}^K \sum_{i=1}^K \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (4.2)$$

Aplicado à soldagem por arco elétrico, pode ser estudado como os parâmetros do processo que afetam o reforço e a largura do cordão de uma união soldada e permite encontrar os valores que otimizem tal resposta; isto é, se trata de obter os valores ótimos para as variáveis independentes que maximizam, minimizam ou cumprem certas restrições na variável resposta. Concretamente, fez-se importante determinar os níveis de três variáveis (velocidade de soldagem, tensão e velocidade de alimentação de arame) que se ajustam às características geométricas externas desejadas.

Tanto a largura, o reforço e a área depositada podem ser expressos como funções das variáveis indicadas e do erro observado, tal e como se estabelece de forma genérica para a função  $y_i$  na Equação 4.3, a seguir.

$$y_i = f(x_1, x_2, x_3, x_4) + \varepsilon_i \quad (4.3)$$

No presente estudo adotou-se um modelo quadrático, estabelecendo a relação entre os fatores e níveis (-1, 0, 1) considerados na Tabela 4.1.

Para realizar a otimização e modelagem das características geométricas em relação às variáveis selecionadas, escolheram-se como entradas os valores médios obtidos para a largura e sua medida de seu desvio padrão. Neste sentido, tem-se o valor da largura e do reforço

desejados, garantindo com que o erro em relação a não uniformidade do cordão de solda seja o mínimo possível; as saídas do modelo são a velocidade de soldagem, tensão e velocidade de alimentação do arame.

Os coeficientes de regressão dos modelos são estimados utilizando o princípio dos mínimos quadrados. Para determinar os valores dos coeficientes de regressão ( $\beta$ 's), o princípio calcula os desvios ( $\varepsilon_i$ ) quadrados das respostas dos experimentos ( $y_i$ ) com base no modelo, evidenciado na Equação 4.4, a seguir.

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \quad (4.4)$$

Outra representação matemática do modelo é apresentada na Equação 4.5, a seguir.

$$L = \sum_{i=1}^n \left( y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} \right)^2 \quad (4.5)$$

Onde:

$L$  = função dos mínimos quadrados.

Os valores dos  $\beta$ 's são determinados quando  $L$  seja mínima. As estimativas dos mínimos quadrados são conhecidas como os estimadores e são identificados como  $b_0, b_1, \dots, b_k$ , para que  $L$  seja mínima os estimadores devem satisfazer as Equações 4.6 e 4.7, a seguir.

$$\frac{\partial L}{\partial \beta_0}_{b_0, b_1, \dots, b_k} = -2 \sum_{i=1}^n \left( y_i - b_0 - \sum_{j=1}^k b_j x_{ij} \right) = 0 \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \beta_j}_{b_0, b_1, \dots, b_k} = -2 \sum_{i=1}^n \left( y_i - b_0 - \sum_{j=1}^k b_j x_{ij} \right) x_{ij} = 0 \quad (4.7)$$

Com o sistema de equações gerado a partir das Equações 4.6 e 4.7 pode ser descrito em forma matricial, conforme apresentado na Equação 4.8, a seguir.

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{i2} & \dots & \sum_{i=1}^n x_{ik} \\ \sum_{i=1}^n x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{i1}^2 & \sum_{i=1}^n x_{i1} x_{i2} & \dots & \sum_{i=1}^n x_{i1} x_{ik} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_{ik} & \sum_{i=1}^n x_{ik} x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{ik} x_{i2} & \dots & \sum_{i=1}^n x_{ik}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_{i1} y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_{ik} y_i \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Assim, a Equação 4.8 pode ser descrita na forma apresentada na Equação 4.9, a seguir.

$$X^T X b = X^T y \quad (4.9)$$

O modo de encontrar os estimadores é apresentado na Equação 4.10, a seguir.

$$b = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (4.10)$$

Onde:

$b$  = vetor coluna com  $(k + 1)$  posições que contém os estimadores dos coeficientes de regressão ( $\beta$ 's).

Neste sentido, sendo um modelo ajustado de segunda ordem, este pode ser escrito como demonstrado na Equação 4.11, a seguir.

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{12} x_1 x_2 \quad (4.11)$$

Na Equação 4.12 ,a seguir, têm-se as diferenças entre as respostas dos experimentos ( $y_i$ ) e as respostas do modelo ( $\hat{y}_i$ ), as quais são conhecidas como resíduos.

$$\varepsilon_i = y_i - \hat{y}_i \quad (4.12)$$

#### 4.4.1.5 - Determinação dos parâmetros ótimos

A tecnologia da soldagem se caracteriza por um grande número de variáveis e parâmetros operacionais inter-relacionados de modo quase sempre complexo, tornando difícil o desenvolvimento de modelos matemáticos teóricos ou empíricos para processos ou produtos. Na presente pesquisa fez-se uso da MSR, a partir dos testes evidenciados na Tabela 4.2.

A seguir, têm-se os modelos da largura e o reforço do cordão de solda. E ainda, são determinados os modelos do desvio padrão de cada característica.

Para prever os parâmetros ótimos para a largura e o reforço desejados é mostrada uma sequência de passos na Figura 4.8, a seguir.

Foram desenvolvidos modelos para a largura e o reforço do cordão de solda, onde as entradas de cada modelo são: velocidade de alimentação do arame, tensão e velocidade de soldagem. A saída do modelo é a característica geométrica desejada. Todas as possíveis combinações das variáveis entrada que satisfazem a resposta desejada da largura ou do reforço são calculadas no modelo da cada característica geométrica do cordão de solda. Todas as combinações encontradas fazem uso, como entrada, nos modelos do desvio padrão; são escolhidos os parâmetros de soldagem que apresentam um mínimo desvio padrão, garantido, assim, que o cordão tenha uniformidade em suas características geométricas externas.

Uma vez encontradas tais combinações de parâmetros, é realizada uma comparação dos parâmetros da largura e o reforço, sendo escolhidos aqueles parâmetros que tenham semelhança e satisfaçam as medidas desejadas. Tais combinações são as entradas para o modelo de energia de soldagem, sendo escolhidos os parâmetros de soldagem que apresentam o valor menor de intensidade de energia de soldagem.

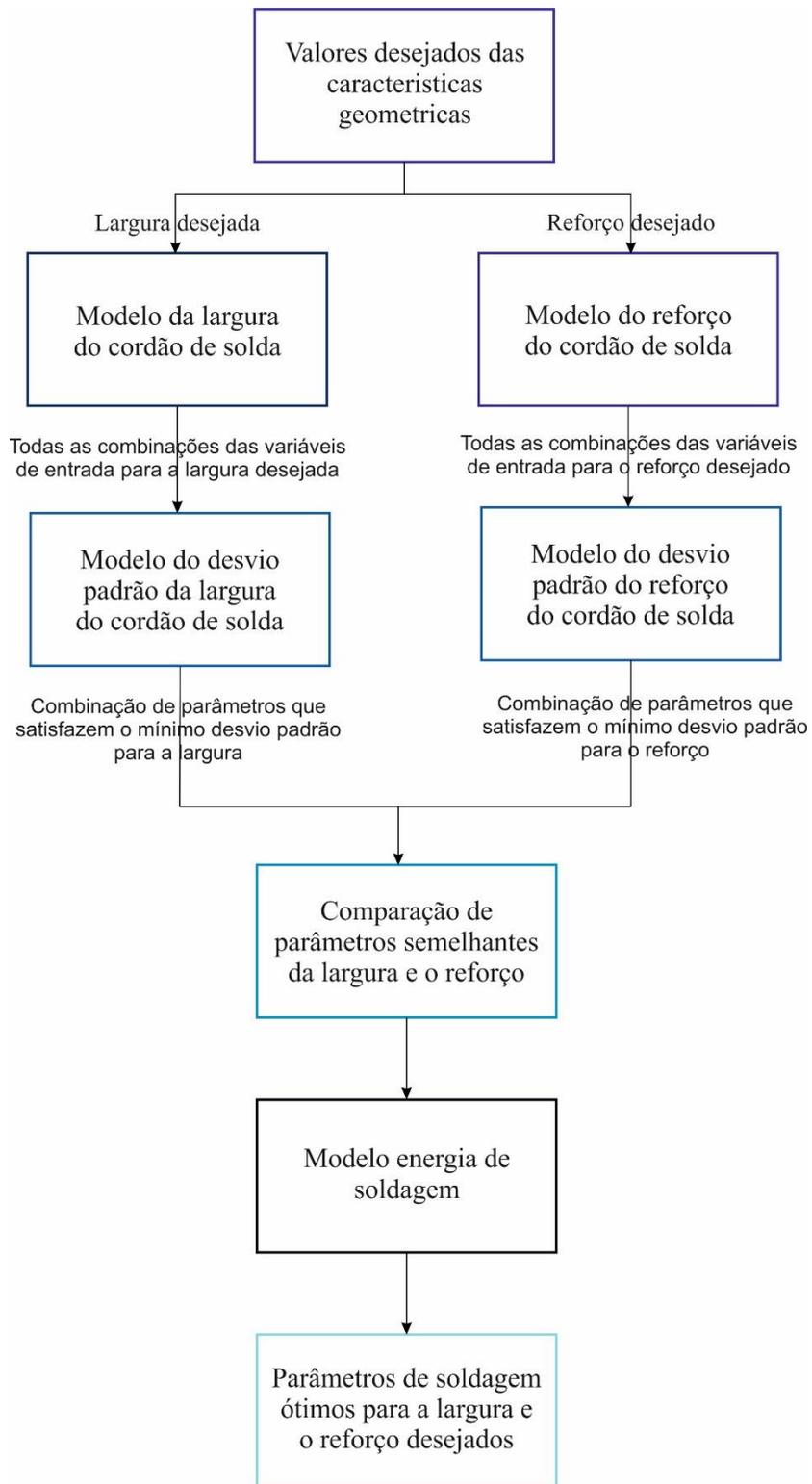


Figura 4.8: Sequência para a obtenção dos parâmetros ótimos.

Foi escolhido o modelo de energia de soldagem, uma vez que dita energia possui grande importância porque afeta o fluxo de calor na junta e, por consequência, modifica variáveis diretamente ligadas ao estado final de tensões residuais da mesma, como, por exemplo, o gradiente térmico na junta. Marques *et al.* (2014) definem a energia de soldagem como a energia liberada pela fonte de calor por unidade de comprimento da solda, sendo útil na avaliação dos efeitos metalúrgicos da operação de soldagem sobre o material soldado e na comparação de diferentes procedimentos e processos de soldagem. Os parâmetros para o cálculo da energia são apresentados na Equação 4.13, a seguir.

$$H = \frac{1}{vT} \int_0^T VI dt \approx \frac{VI}{v} \quad (4.13)$$

$$H_L = \eta H$$

Onde:

$H$  = energia de soldagem, em J/cm;

$V$  = tensão de soldagem, em Volts;

$I$  = corrente de soldagem, em Ampères;

$v$  = velocidade de soldagem, em cm/s;

$H_L$  = energia líquida de soldagem, em J/cm; e

$\eta$  = fator adimensional de rendimento, que depende do processo, dos parâmetros de soldagem e de diversos outros aspectos, incluindo as propriedades físicas dos materiais e a geometria das peças.

A Tabela 4.3, a seguir, apresenta alguns valores para o rendimento térmico ( $\eta$ ).

Tabela 4.3: Valores típicos para  $\eta$  (Fonte: Marques *et al.* (2014))

<b>Processo</b>	<b><math>\eta</math></b>
Eletrodo revestido	0,65 – 0,85
GMAW	0,65 – 0,85
GTAW (CC+)	0,50 – 0,80
GTAW (CA)	0,20 – 0,50
SAW	0,80 – 0,99
Oxi-gas	0,25 – 0,80

Em geral,  $\eta$  varia com diversos parâmetros operacionais, das características do metal de base, da junta e da própria fonte de calor. Na presente pesquisa fez-se uso de um rendimento de 0,75, tendo em consideração os valores da Tabela 4.3.

#### **4.4.2 - REALIZAR A IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE**

Para a implementação da estratégia de controle em tempo real, propõe-se um sistema realimentado, onde o sinal de saída possui um efeito direto sobre a ação do controle, conforme evidenciado na Figura 4.9, a seguir: o sinal de erro na medida – que é a diferença entre o sinal de entrada (largura ou reforço desejados) e o sinal realimentado (largura e reforço medidos através do sistema de aquisição de imagens) – realimenta o controlador fazendo o controle simultâneo das características geométricas, de modo que este tenta reduzir o erro e levar a saída do sistema a um valor desejado, exercendo uma ação de controle sobre a velocidade de soldagem no caso do controle da largura e sobre a velocidade de alimentação do arame no caso do controle do reforço.

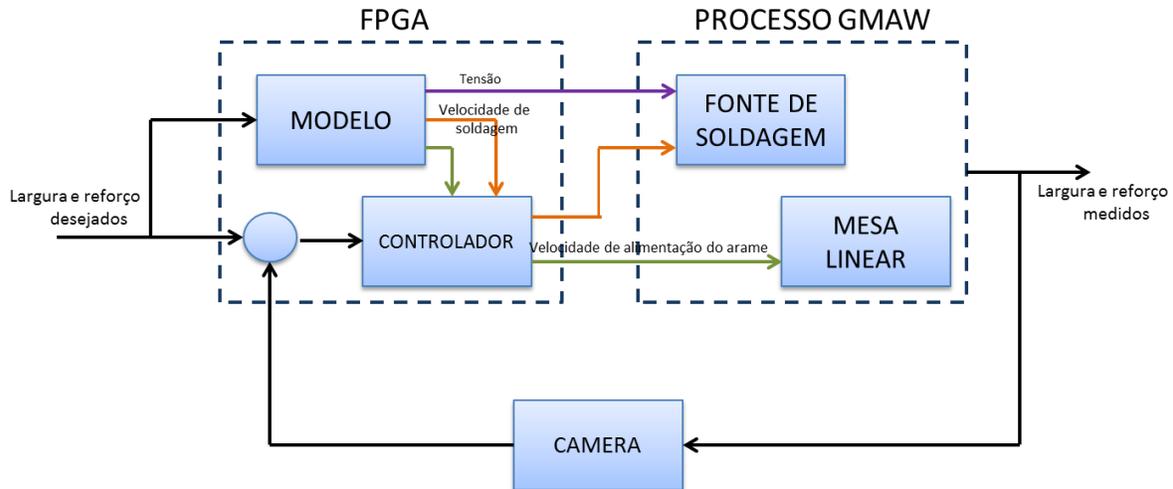


Figura 4.9: Sistema de controle proposto.

#### 4.4.2.1 - Captura e processamento de imagens.

Atualmente, uma das formas amplamente aplicadas para o auxílio dos estudos do processo de soldagem são os sistemas de visão. O uso de câmeras – de baixa ou alta velocidade – pode fornecer diversas informações úteis aos pesquisadores, que não são possíveis de se obter com a monitoração dos sinais elétricos usuais (corrente ou tensão, por exemplo).

Desenvolveu-se um sistema através de uma configuração de espelhos estática, que foi capaz de realizar a captura e obter a medida da largura e o reforço em tempo real. Para atingir este objetivo, fez-se uso de uma câmera digital incluída no kit e do *Software Quartus II da Terasic*, a fim de realizar a captura, e os espelhos são utilizados para fornecer ao sistema informação que o sensor não consegue capturar diretamente. Foi escolhida uma configuração estática que permite que a captura de informação seja feita de modo simultâneo, além da aquisição de informação da geometria do cordão, feita de forma mais rápida utilizando apenas uma câmara e possibilitar várias perspectivas em tempo real, podendo, neste caso, obter a medida da largura e o reforço em tempo real, o que permitirá a aquisição de mais informação em menos tempo e de uma forma eficiente.

A configuração dos espelhos é apresentada na Figura 4.10, a seguir, de modo a realizar a captura da largura e o reforço do cordão. Tal configuração permite que as imagens refletidas

por aqueles espelhos mantenham as dimensões originais. Em um espelho plano tem-se a formação de uma única imagem, mas quando dois espelhos planos estão associados formando um ângulo entre eles, obtém-se a formação de várias imagens. No presente caso, os dois espelhos planos estão dispostos de modo para obter as medidas da largura e o reforço em uma única imagem, facilitando, assim, o processamento.

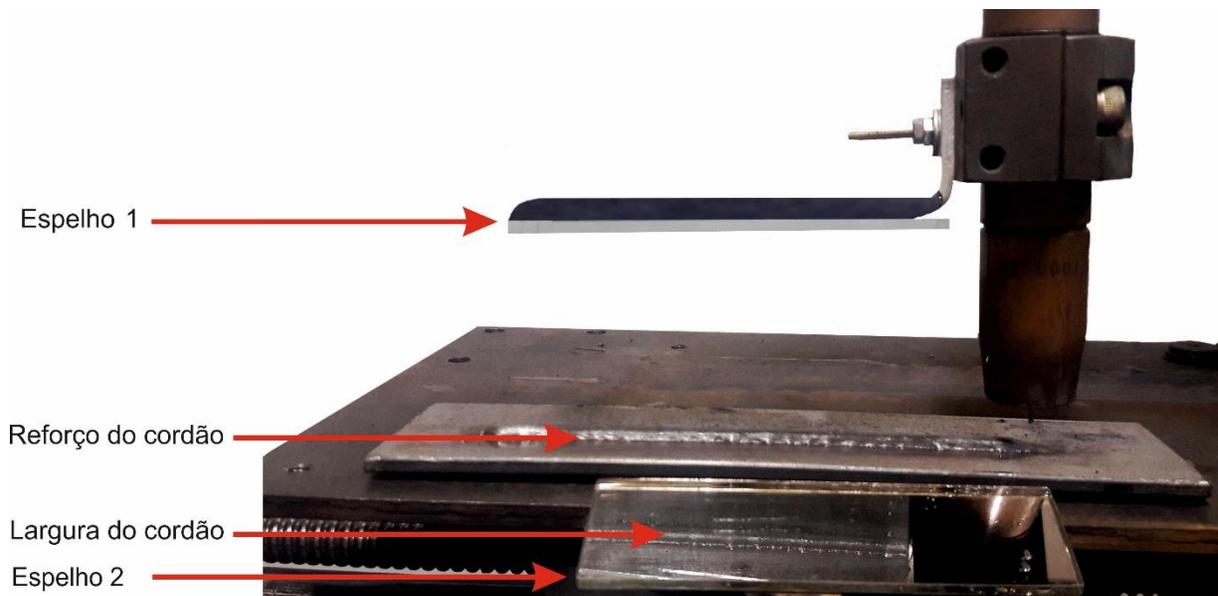


Figura 4.10: configuração dos espelhos

O estudo de boa parte dos fenômenos envolvidos no processo de soldagem necessita de auxílio visual, uma vez que a luminosidade emitida pelo arco pode representar uma grande barreira. Uma das formas utilizadas para se obter a visualização do processo, sem a interferência do arco, é a utilização de filtros durante a aquisição das imagens. Assim, é importante investigar o comportamento do arco de soldagem em relação à sua emissão luminosa no espectro infravermelho. O arco voltaico nos processos de soldagem emite, além da radiação luminosa visível, em praticamente todos os comprimentos de onda, incluindo radiações ultravioleta e infravermelha. A intensidade luminosa emitida, entretanto, em comprimentos de onda infravermelhos superiores a 850 nm, é pequena quando comparada ao espectro visível. Durante a soldagem GMAW, a alta temperatura associada ao arco provoca altos gradientes de temperatura, e a leitura da radiação térmica infravermelha durante tal procedimento mostra-se útil para supervisionar o processo.

Diante do exposto, no presente estudo foram utilizadas técnicas de visualização do processo, sendo a utilização de filtros constante nesta região de emissão. Tem-se a utilização de um filtro infravermelho de mais de 1000nm, um atenuador infravermelho para comprimentos de onda acima de 800nm, um tele objeto de zoom 18-108/2.5 e um polarizador, com o intuito de diminuir a luminosidade do arco presente durante a aquisição de imagens, conforme evidenciado na Figura 4.11, a seguir.

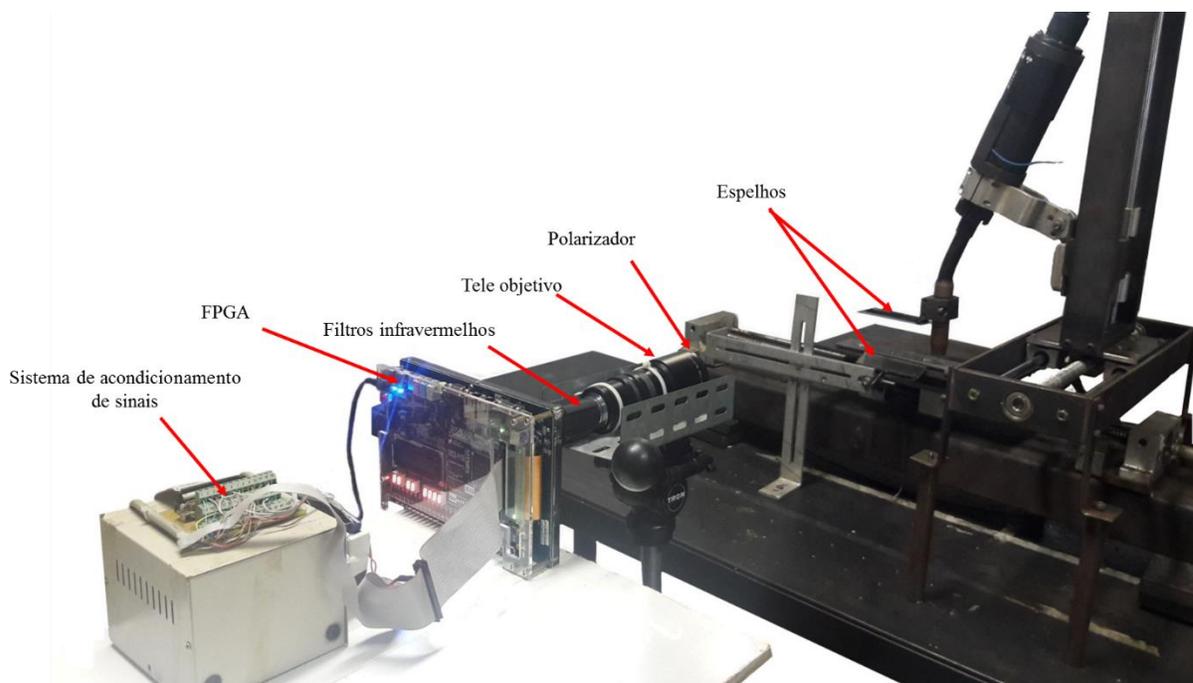


Figura 4.11: Sistema de visão.

A técnica em questão, apesar de eficiente, não é suficiente para apagar completamente o arco, e a luminosidade restante não afeta a medição da largura e a altura do reforço. Em geral, o sistema de visão formado pelos espelhos e filtros é capaz de visualizar a região de interesse de modo claro e com contraste suficiente para a observação das medidas das características geométricas externas.

O desenvolvimento desta parte do trabalho foi dividido em três etapas. Primeiro, com a captura da imagem e a visualização da imagem na tela LCD (*Liquid Crystal Display*). Segundo, levou-se a cabo o desenvolvimento de módulos que realizam as operações de

processamento e manipulação dos dados da imagem em *hardware*. E terceiro, com o desenvolvimento de uma arquitetura que permite a escrita dos dados das medidas das características geométricas em formato .txt através de um meio externo (o cartão SD – do inglês, *Secure Digital*, por exemplo).

- **Captura da imagem e a visualização da imagem na tela *Liquid Crystal Display***

A arquitetura geral do sistema é apontada na Figura 4.12, a seguir. O sistema de captura foi fornecido pelo fabricante do kit DE2, o qual inclui: o controlador e a configuração do sensor CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*), a conversão do sistema RAW (saída fornecida pela câmera) para RGB e a sincronização e o controlador do display LCD (fazendo uso do controlador da memória SDRAM – *Synchronous Dynamic RAM*).

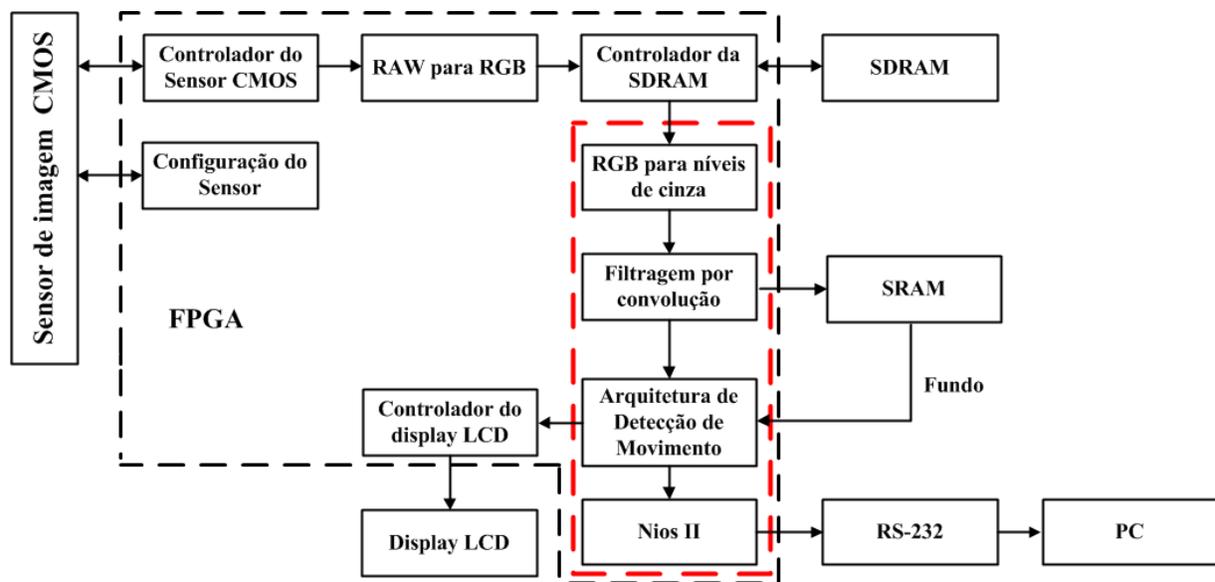


Figura 4.12: Arquitetura geral do sistema.

A câmera fornece três canais de cores de 12 bits, porém, o sistema de controle de captura implementado pelo fabricante prevê a utilização de 8 bits apenas. Assim, todo o processamento foi implementado com base na premissa de 8 bits por canal de cor.

Na Figura 4.13, a seguir, é possível observar como o sistema desenvolvido com os espelhos apontam a largura e altura do cordão de solda em uma única imagem.

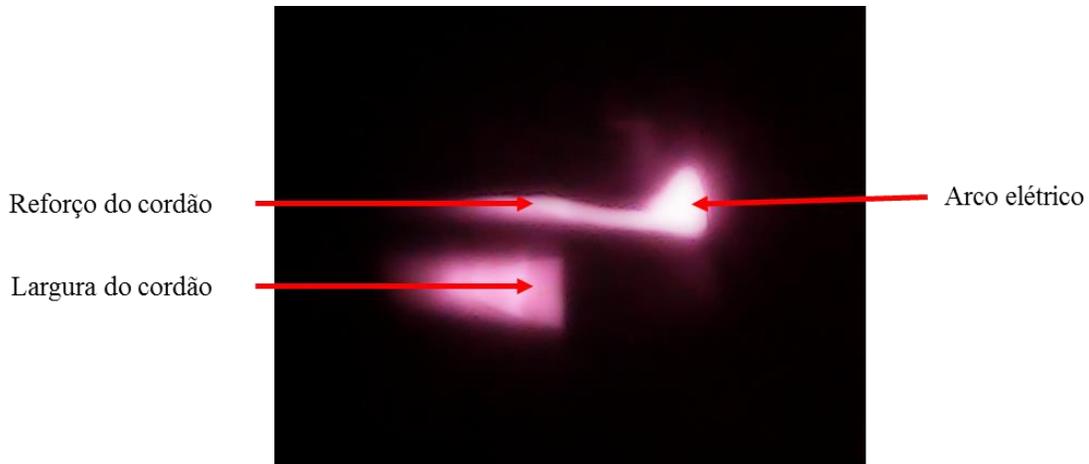


Figura 4.13: Imagem original da largura e o reforço

- **Processamento e manipulação dos dados da imagem em *hardware***

Na presente pesquisa foram utilizadas algumas técnicas de processamento digital de imagens para reduzir os efeitos do ruído, melhorar o contraste e selecionar a área de trabalho. Devido às limitações de memória do kit de desenvolvimento, a imagem de fundo foi convertida a uma imagem em níveis de cinza, conforme evidenciado na Figura 4.14, a seguir (8-bits por *pixel*), sendo posteriormente armazenada na memória SRAM. Tal fato se dá devido à memória SDRAM do kit DE2 ser utilizada para realizar a sincronização do sinal ofertado pela câmera com o sinal recebido pelo *display*. Para tanto, fez-se uma transformação da imagem para a escala de cinza e se aplicou um filtro de mediana, a fim de eliminar *pixels* isolados, conforme evidenciado na Figura 4.14, a seguir.



Figura 4.14: Imagem em escala de cinza.

No presente estudo, os cálculos para a redução de cor se deram em um ciclo de relógio. Neste ínterim, a média aritmética é calculada multiplicando a soma dos três canais (R, G, B) por uma constante na borda de subida, e dividindo tal produto entre uma potência de dois na borda de descida – o que reduz o problema da divisão à utilização de um simples *shift register*, evitando, assim, a utilização de um circuito divisor. A soma dos três canais foi multiplicada por 170 e dividida por 512. O bloco conversão da imagem a uma imagem binária é evidenciado na Figura 4.15, a seguir.

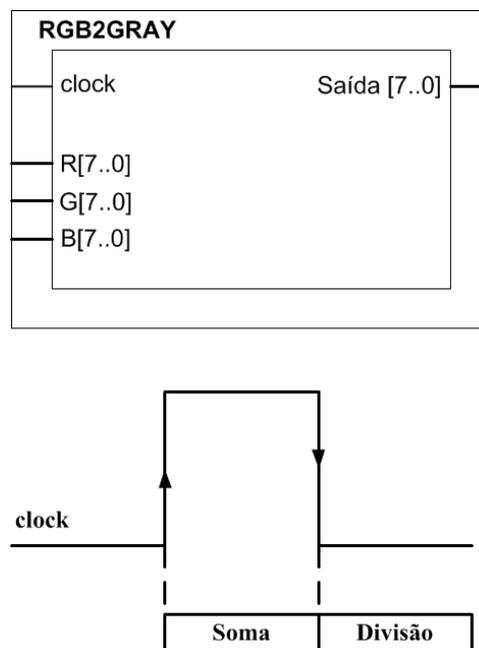


Figura 4.15: Bloco redutor de cores RGB para cinza.

Em seguida deu-se a binarização da imagem, ou seja, o processo de segmentação de regiões homogêneas em tons de cinza com base nas características de similaridade. A segmentação por binarização objetivou separar os objetos de interesse do fundo, consistindo em aplicar uma limiar de tom cinza ( $T$ ) à imagem ( $f(x, y)$ ), transformando uma imagem representada em tom cinza em uma imagem binária, em preto e branco ( $g(x, y)$ ), considerando-se ‘0’ os *pixels* correspondentes ao objeto e ‘1’ àqueles do fundo ou vice-versa, conforme apresentado na Figura 4.16, a seguir. Neste sentido, aplicou-se a Equação 4.2, a seguir.

(4.14)

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

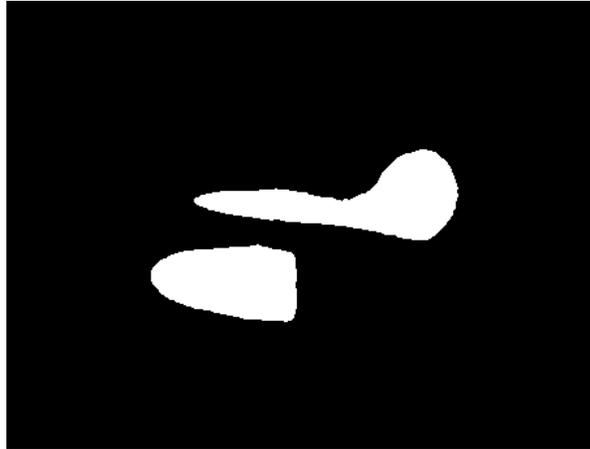


Figura 4.16: Imagem binarizada.

Uma vez binarizada a imagem, procedeu-se encontrar a seção da largura e da altura do cordão, conforme evidenciado na Figura 4.17, a seguir.

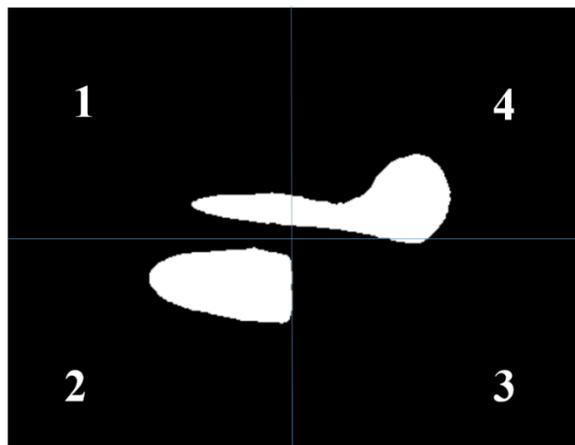


Figura 4.17: Seção da largura e da altura do cordão.

Conforme apresentado na Figura 4.17, o reforço do cordão de solda se encontra na seção 1, e a largura, na seção 2. Fazendo uso das vantagens das FPGAS deu-se o processamento da largura e o reforço do cordão em paralelo, obtendo, assim, as medidas simultaneamente. Neste

sentido, para encontrar a medida da largura foi realizado o processamento da imagem na seção 2, sendo necessária achar a linha apontada pelo espelho; obtida dita linha, procedeu-se a soma de todos os *pixels* da fila na seção 3, obtendo-se a medida em *pixels* da largura.

A medida do reforço do cordão é obtida seguindo a mesma linha obtida para a largura, sendo processada a imagem na seção 2, onde são somados todos os *pixels*, obtendo-se a medida. Na Figura 4.18, a seguir, têm-se as medidas da largura e o reforço do cordão.

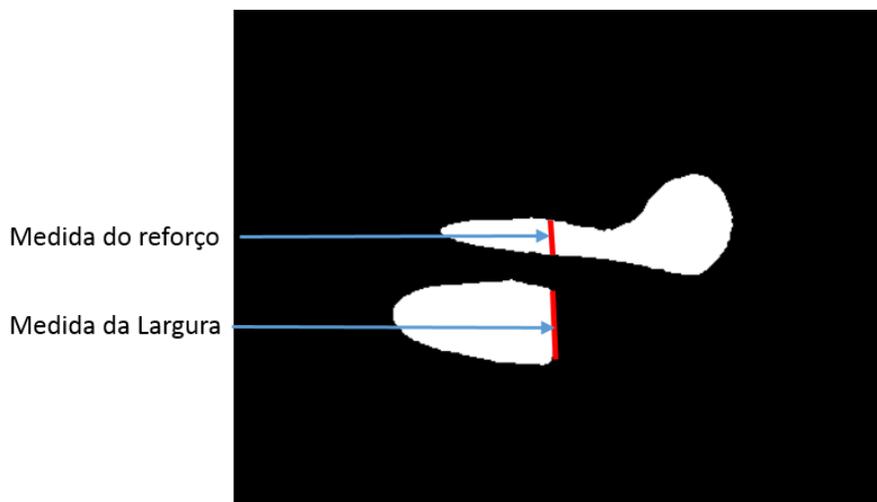


Figura 4.18: Medidas da largura e o reforço do cordão

- **Escritura dos dados através um cartão SD**

Após a captura e o processamento das imagens, a próxima etapa é o armazenamento dos dados. A placa ALTERA DE-2 disponibiliza como recursos memória interna ao FPGA, SDRAM, SRAM, memória FLASH e um leitor de cartões do tipo SD. Para a programação do SD Card foi utilizado o programa *University Program SD Card IP Core* – um circuito de *hardware* que permite a utilização de um cartão SD nas placas Altera. O programa foi projetado para uso em um sistema implementado pelo SOPC Builder e o processador Nios II.

O *hardware* foi modelado fazendo uso da linguagem de descrição de *hardware* Verilog, através da utilização do ambiente SOPC Builder, presente no Quartus II. Através da utilização desse ambiente foi possível escolher os componentes integrantes do *hardware* projetado,

gerando automaticamente os códigos-fonte desse sistema na linguagem Verilog. Na Figura 4.19, a seguir, é possível visualizar uma captura de tela do SOPC Builder contendo os componentes do *hardware* projetado.

Conn...	Name	Description
	cpu_0	Nios II Processor
	instruction_master	Avalon Memory Mapped Master
	data_master	Avalon Memory Mapped Master
	jtag_debug_module	Avalon Memory Mapped Slave
	jtag_uart_0	JTAG UART
	avalon_jtag_slave	Avalon Memory Mapped Slave
	sdram_0	SDRAM Controller
	s1	Avalon Memory Mapped Slave
	Pushbuttons	Parallel Port
	avalon_parallel_port_slave	Avalon Memory Mapped Slave
	SD_Card	SD Card Interface
	avalon_sdcard_slave	Avalon Memory Mapped Slave
	lcd_display	Character LCD
	control_slave	Avalon Memory Mapped Slave

Figura 4.19: Componentes do *hardware* projetado para escritura de dados no cartão SD.

A programação do leitor SD deve levar em conta que o bloco de propriedade intelectual da Altera aceita apenas cartões no formato FAT16. É necessário incluir a biblioteca “altera\_up\_sd\_card\_avalon\_interface.h” para acessar as funções do leitor de cartões SD. Para a leitura de um arquivo, faz-se importante primeiro abrir o cartão SD, fazendo uso da função `alt_up_sd_card_open_dev` e indicando o nome do componente do cartão, criado no SOPC Builder. Em seguida, a função `alt_up_sd_card_fopen` é utilizada para abrir um arquivo, e as funções `alt_up_sd_card_is_Present` e `alt_up_sd_card_is_FAT16` são utilizadas respectivamente para verificar se o cartão está conectado e se ele está no formato FAT16. A função `alt_up_sd_card_read` é utilizada para ler um *byte* do arquivo especificado, e a função `alt_up_sd_card_write` é utilizada para escrever um *byte* no arquivo. A função `alt_up_sd_card_fclose` é utilizada para fechar o arquivo aberto anteriormente.

#### 4.4.2.2 – Desenho do controlador

No presente estudo tem-se uma proposta para controlar simultaneamente a largura e o reforço durante o processo de soldagem, realizado via medição das imagens do comportamento da largura e reforço a uma taxa de aquisição de 30 *fps*, para tomar decisões a respeito se devem atuar ou não. O controlador do estudo de Lopera (2016) utilizou a velocidade de alimentação do arame para controlar o reforço, e a velocidade de soldagem para controlar a largura. Assim, por exemplo, se o valor do parâmetro adquirido é menor do que o valor de referência, as variáveis de controle correspondentes deveriam atuar e influenciar o aumento do parâmetro, mas, se o comportamento do sinal indica que o valor do parâmetro está aumentando de forma significativa ou irregular, logo, não é necessário mudar as variáveis de controle. O tempo de resposta da máquina de soldagem é de aproximadamente 40 ms, e o tempo de resposta dos parâmetros geométricos dependerá de cada situação particular, envolvendo todas as variáveis que influenciam a formação do cordão.

Neste caso trata-se de um controlador com base em um sistema especialista com regras de produção (condição, “se”, e ação, “então”), com dois agentes inteligentes orientados a objetivos (para controlar a largura e o reforço). Tal sistema de controle tem por base o modo de agir de um soldador humano e logra medir simultaneamente a largura e o reforço dos cordões de solda durante o processo de soldagem, bem como corrigir as variáveis de entrada do processo para se obter, ao final, os parâmetros geométricos de referência.

As Figura 4.20 e 4.21, a seguir, apresentam os fluxogramas das regras para a largura e a altura do cordão, respectivamente. Aproveitando as propriedades das FPGAS, as regras de controle são realizadas em paralelo, dando sempre prioridade a controle da largura do cordão.

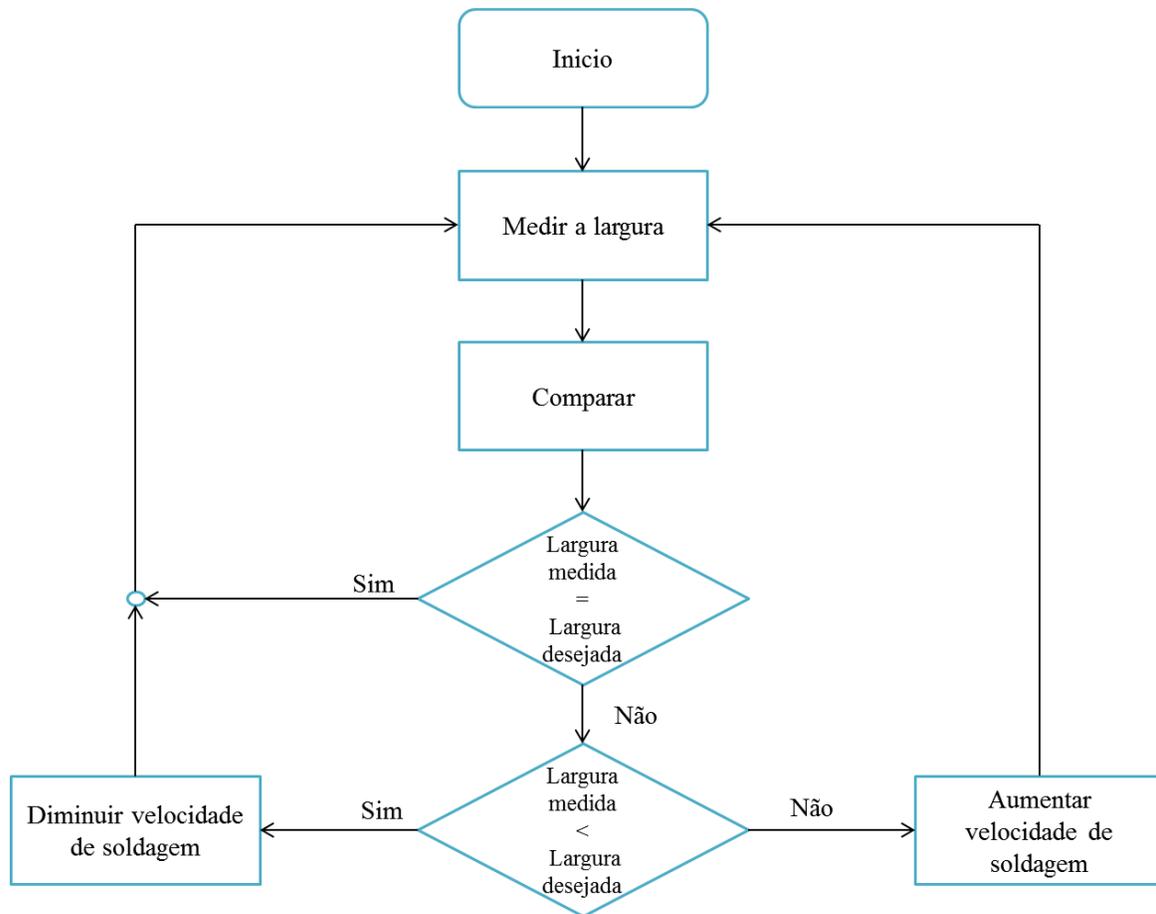


Figura 4.20: Fluxograma do algoritmo que comanda o controle da largura

Por outro lado, além de saber se a variável de controle deve aumentar ou diminuir, o sistema deve saber em que proporção deve mudar, ou seja, qual deve ser o novo valor da variável de controle. Neste caso, por não ter um modelo que indique um possível valor na variável de controle, na base de conhecimento foi decidido que as mudanças de velocidade de alimentação do arame não devem superar o valor de 0,1 m/min cada ciclo de controle, e as mudanças de velocidade de soldagem não devem superar o valor de 0,1 mm/s cada ciclo de controle. Mantendo fixo o valor da tensão dado pelo modelo.

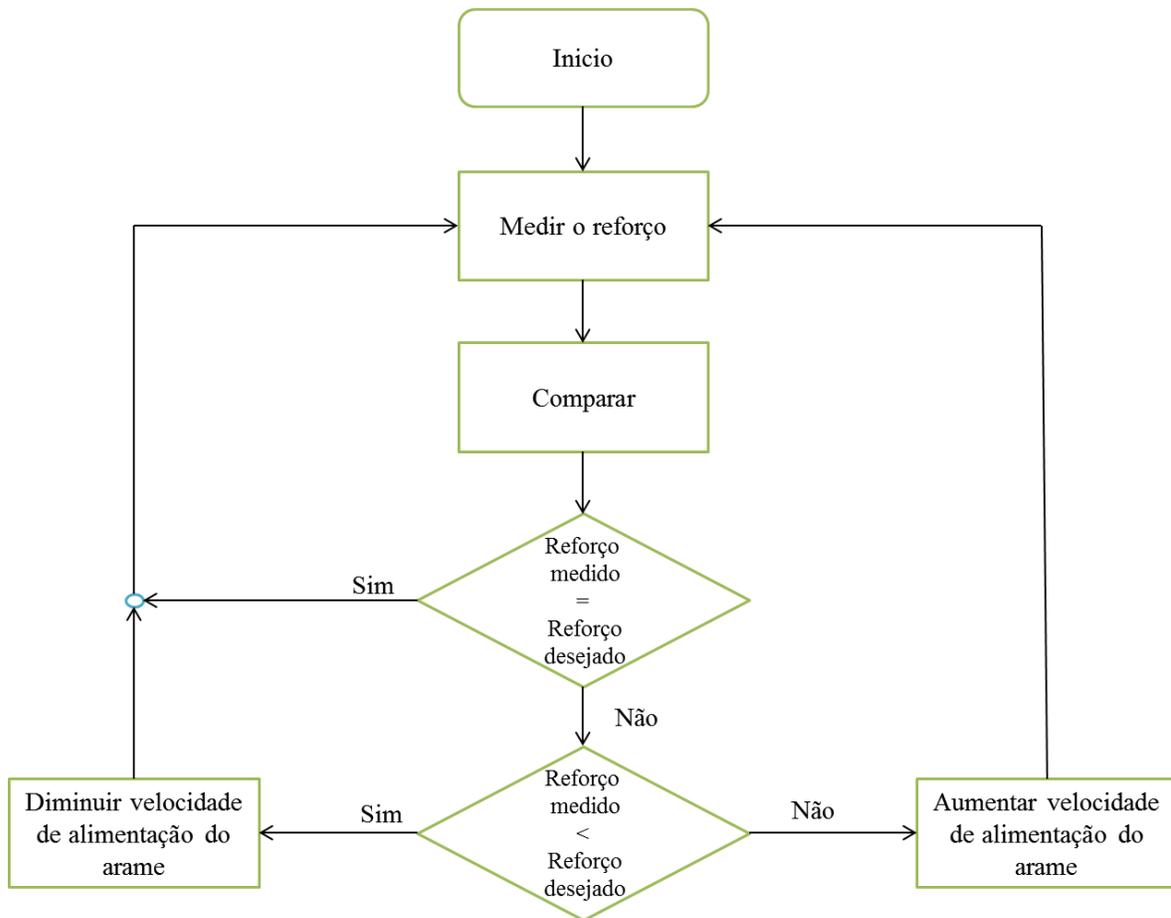


Figura 4.21: Fluxograma do algoritmo que comanda o controle do reforço.

#### 4.4.3 - COMUNICAR A FPGA COM O PROCESSO DE SOLDAGEM

Um dos objetivos da presente pesquisa é realizar a comunicação da FPGA com o processo de soldagem e, assim, obter o sistema embarcado de controle na placa da Altera. Para tanto, foi programado o porto GPIO, definindo uma palavra de 8 bits para as variáveis do processo, quais sejam: tensão, velocidade de alimentação de arame e velocidade de soldagem. E ainda, foram definidas as saídas digitais para o controle da fonte e a mesa linear. O controle remoto foi utilizado para que o usuário escolha qual a largura e o reforço que deseja para o cordão e os demais parâmetros do processo. Na tela LCD tem-se a sequência de ações para execução, entre elas: digitar a largura e o reforço desejados, digitar o sentido da mesa linear, o tempo de soldagem, os parâmetros para inicializar a fonte e o início do processo.

Na Figura 4.22, a seguir, tem-se uma modelagem abstrata para o desenvolvimento de sistemas embarcados. Mostra-se que os controladores, barramentos, sistemas de Debug e o processador Nios II estão carregados dentro do *chip* FPGA, que se comunica com o computador e os *chips* de memórias, periféricos de E/S e/ou outros externamente, através das ligações físicas dos periféricos e da *interface* de comunicação com o computador (USB-Blaster – *Universal Serial Bus* ou *Barramento Universal Serial*).

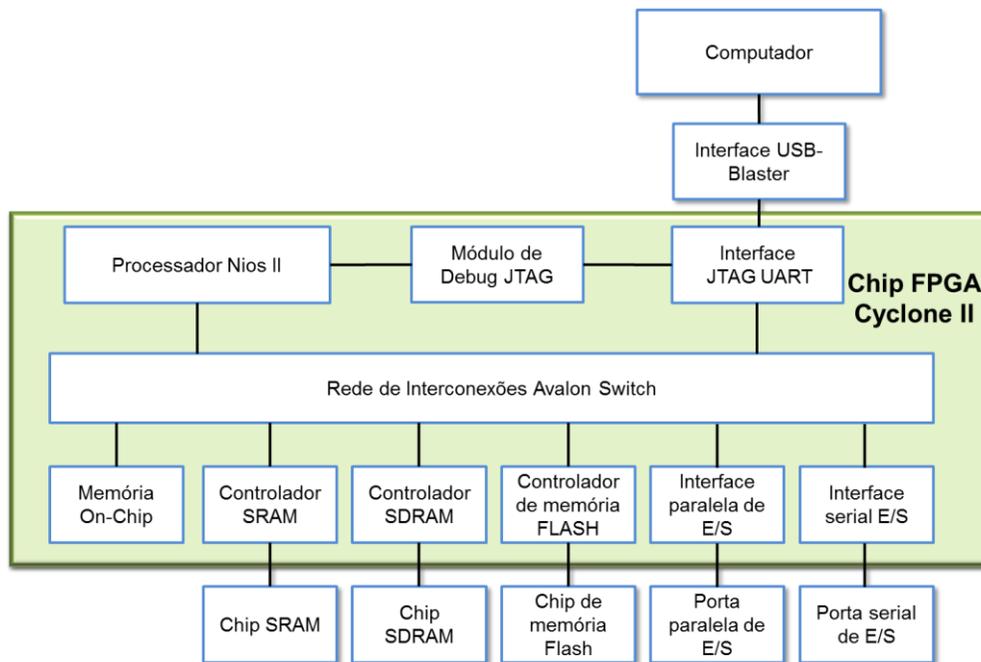


Figura 4.22: Esquemática de um sistema embarcado em uma FPGA

Diante do exposto, todos os periféricos (memórias, portas paralelas e seriais, vídeo e áudio, entre outros) necessitam de seus respectivos controladores embarcados na FPGA. Estes são programados nas linguagens de *hardware* e descarregados nas FPGAs via *interface* conectada ao um computador – *interface* que também é um controlador interno na FPGA: *interface* JTAG-UART (*Join Test Action Group* ou Grupo de Testes de Ações Unificadas – UART, do inglês *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*, ou Receptor/Transmissor Universal Assíncrono). A comunicação para a escrita e/ou leitura de dados nas placas se dá via *interfaces* USB-BLASTER e JTAG-UART, através de uma estrutura cliente-servidor parecida com a convencional de serviço *web*. Assim, é possível descarregar os códigos de *hardware*, verificar

dados durante uma execução e enviar comandos, implicando no desejado controle dos dispositivos e periféricos no sistema embarcado modelado.

#### 4.4.3.1 - Etapas de desenvolvimento de sistemas embarcados para as FPGA's da Altera

O desenvolvimento do sistema embarcado é um processo modular. O funcionamento está ilustrado na Figura 4.23, a seguir. Na presente seção serão descritas todas as etapas necessárias para o desenvolvimento do sistema embarcado para o controle do processo de soldagem, fazendo uso das ferramentas de desenvolvimento: SOPC (*System On a Programmable Chip ou Sistema em um Chip Programável*), Quartus II e Nios II.

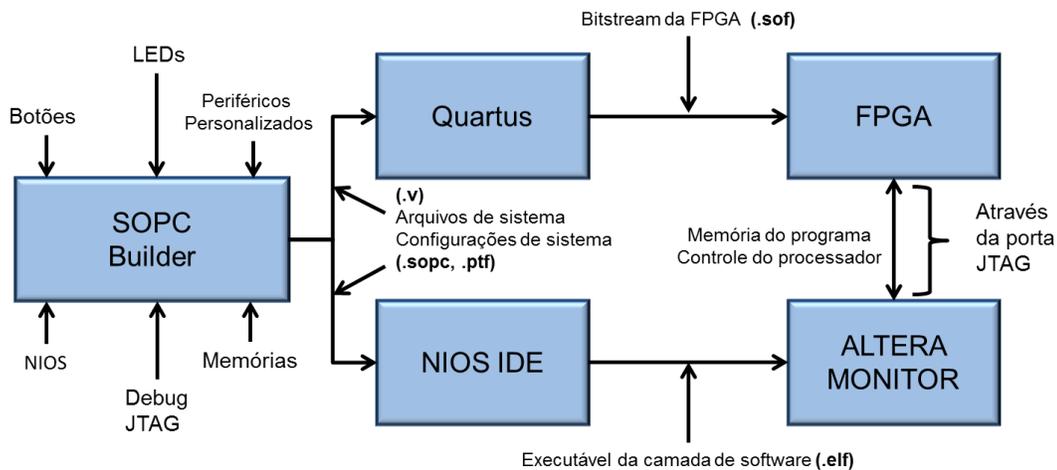


Figura 4.23: Desenvolvimento de sistemas embarcados usando as IDE's SOPC, Quartus e Nios II.

- **Etapa I: A criação e modelagem dos componentes do sistema na IDE SOPC**

A interface do SOPC desenvolvida para o controle do processo pode ser visualizada na Figura 4.24, apresentada a seguir.

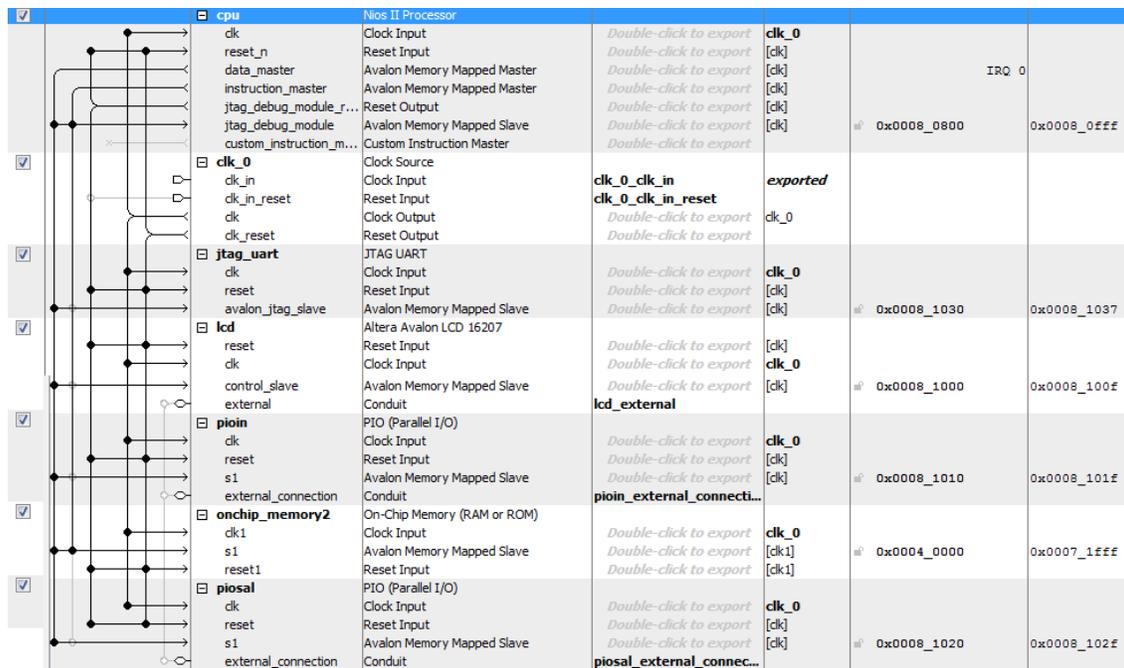


Figura 4.24: Interface do System On a Programmable Chip desenvolvida.

Na IDE tem-se a seleção dos componentes básicos necessários para o desenvolvimento. E para a comunicação da FPGA com o processo de soldagem foram escolhidos os componentes descritos a seguir:

- *Central Processing Unit* (CPU) Nios II;
- Períodos de *clock* da CPU;
- JTAG\_UART (utilidade de escrita na placa através da interface no computador utilizado para o desenvolvimento);
- Controlador de LCD de caracteres (16 colunas x 2 linhas);
- Memória *No Chip* (32 *kbytes*);
- Portas de entrada: para o reconhecimento dos sinais emitidos pelo controle remoto; e
- Portas de saída: para o envio de sinais à fonte de soldagem e à mesa linear.

- **Etapa II: A integração da camada de hardware feita na IDE Quartus IIç**

Para escolher as características geométricas desejadas fez-se uso do controle remoto, que envia um sinal à FPGA tanto dos valores desejados como dos parâmetros de início da fonte de soldagem e a mesa linear. Foi desenvolvido um código em VHDL para a obtenção de tais valores e transformar a uma palavra digital de 8 bits, para conexão junto ao bloco dos componentes do SOPC, conforme evidenciado na Figura 4.25.

Nos sistemas digitais criados através dos componentes do SOPC, a parte principal da camada de *hardware* vira uma caixa preta com os componentes provenientes da etapa anterior, sem qualquer sinal de entrada e saída e quaisquer conexões necessárias. Em função disso, a etapa de integração é dividida em três subetapas descritas a seguir.

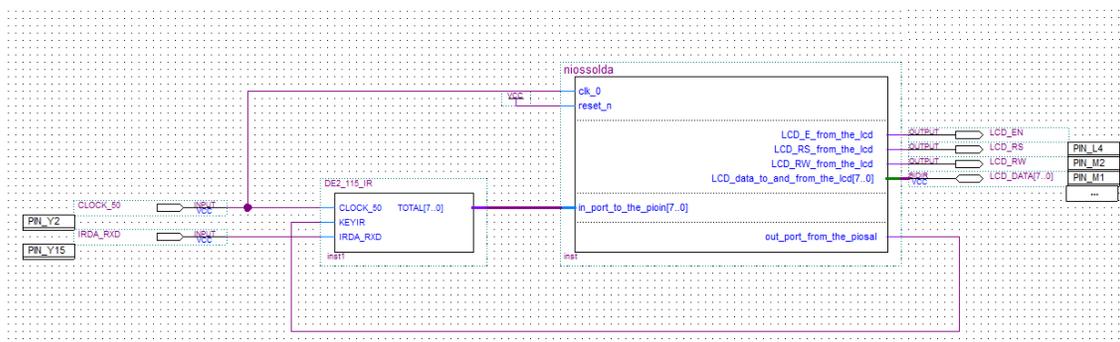


Figura 4.25: Interface desenvolvida em Quartus II.

### Subetapa I: Modelagem do sistema através dos sinais de entrada, saída e conexões

A primeira subetapa da integração do *hardware* é a definição dos sinais de entrada e saída do sistema através da IDE Quartus II. Nesta, é possível fazer uso das caixas pretas criadas no SOPC, conforme apresentado na Figura 4.25, designado de “niossolda”.

Como o SOPC criou o sistema de componentes, é necessário definir todos os sinais de entrada e saída necessários para conectá-lo posteriormente a todos os pontos de uso da FPGA. Tal ação implica em realizar as devidas conexões para que o sistema se comunique com a placa de estudo corretamente. Na entrada têm-se os sinais de *clock*, *reset* e a palavra de 8 bits proveniente do controle remoto. Por outro lado, na saída da caixa preta têm-se os sinais

necessários para controlar o LCD e o sinal para dar continuidade a controle remoto, que dá continuidade à sequência de passos para o início do processo.

## Subetapa II: “Pinagem” dos sinais de entrada e saída

Após a etapa de modelagem do sistema através da criação dos sinais de entrada e saída, a próxima etapa é a conexão dos sinais do sistema aos pontos reais da FPGA, ou seja, a devida integração da modelagem do sistema à placa. Desta forma, é preciso ligar os sinais de entrada e saída criados na Subetapa I aos pinos da FPGA. A Altera disponibiliza para todas as suas placas de estudo um arquivo em *Excel*, que traz a identificação de todos os pinos que possam ter alguma utilidade aos sistemas que venham a ser criados para suas FPGAs. Na Figura 4.26, a seguir, modelam-se os sinais do *hardware*, o qual deve ser ligado aos pinos da FPGA. A etapa de “pinagem” é uma etapa realizada pelo módulo do Quartus denominado Pin-Planner (Planejador de Pinos).

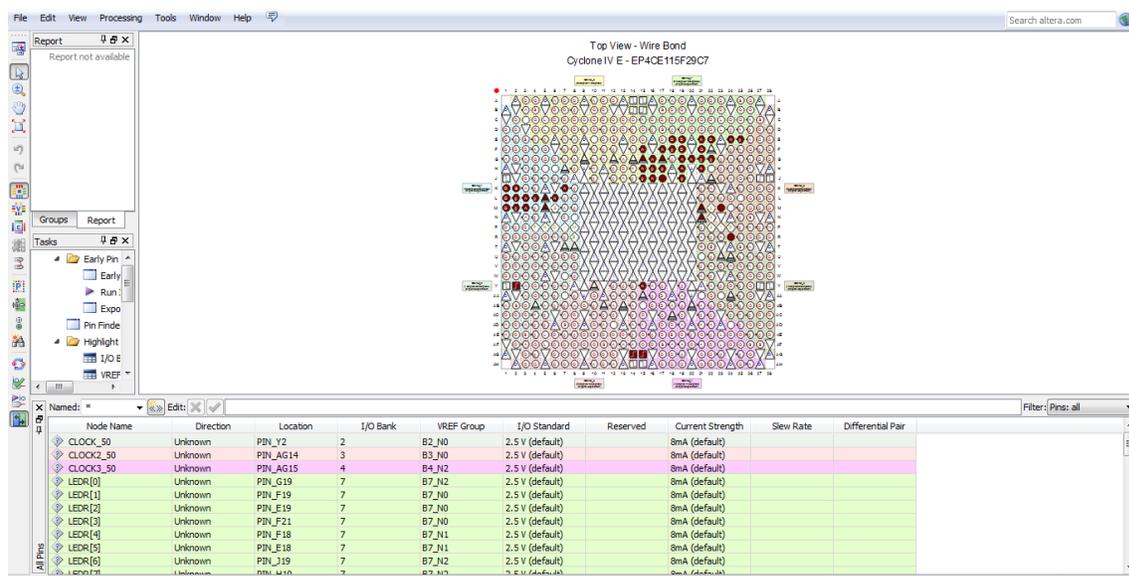


Figura 4.26: Pinagem do sistema desenvolvido.

## Subetapa III: Compilação e descarregamento da camada de hardware na placa

Apesar das diferenças expressivas da forma de programação das linguagens de *hardware* e de *software*, elas possuem uma semelhança: a compilação. Embora se acredite que o *hardware*



#### 4.4.3.2 - Sistema de acondicionamento de sinais para realizar a comunicação da FPGA com o processo de soldagem.

Para realizar a comunicação entre a FPGA e o processo, desenvolveu-se um sistema de acondicionamento de sinais, conforme evidenciado na Figura 4.28, a seguir, que possui amplificadores operacionais (XL 6009 E1 DC), conversores digitais-analógicos e relés de estado sólido (Módulo Relés 8 canais 10A). A placa compõe-se de 20 entradas digitais em uma faixa de 0 a 3,3 volts (sinais da FPGA), duas saídas analógicas de 0 a 10 volts, duas saídas digitais de 0 a 5 volts e duas saídas digitais de 0 a 24 volts.

A comunicação se dá via *interface* ROB 5000, marca *Fronius*, e um microcontrolador (PIC16C63A) para o controle das variáveis da fonte de soldagem e a mesa linear, respectivamente. A *interface* em questão conta com entradas e saídas analógicas em uma faixa de 0 a 10 volts, e entradas e saídas digitais em uma faixa de 0 a 24 volts. As entradas e saídas digitais são utilizadas para a ativação da fonte e para programá-la para trabalhar em modo manual e poder manipular as variáveis, a fim de iniciar o processo de soldagem; as entradas analógicas foram utilizadas para o controle da velocidade de alimentação de arame e a tensão destas entradas. Conforme expresso anteriormente, tem-se uma faixa de 0 a 10 volts equivalentes a 0 a 22 m/min e 0 a 40 volts, respectivamente; as saídas analógicas brindam informação de sinais de velocidade de alimentação de arame, de tensão e de corrente da fonte. O microcontrolador realiza o controle da mesa linear, que inclui o sentido, o início de movimento e a velocidade de soldagem.

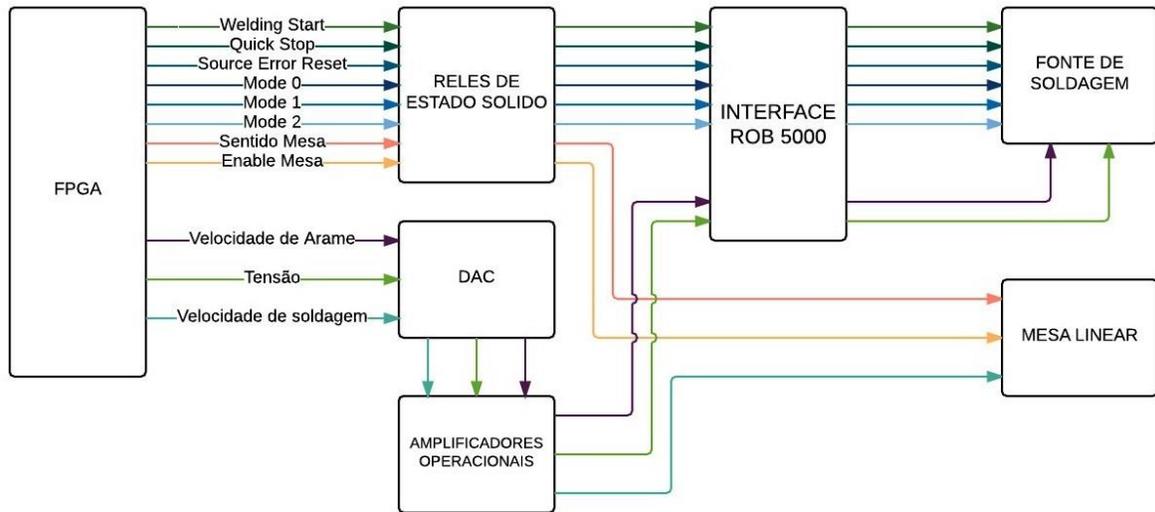


Figura 4.28: Esquema da comunicação da FPGA com o processo de soldagem

## 5. - RESULTADOS

O presente capítulo aponta a descrição dos resultados na modelagem e o controle das características geométricas externas do cordão, bem como os resultados obtidos na comunicação da FPGA (*Field-Programmable Gate Arrays*) com o processo de soldagem, visando determinar os parâmetros ótimos na modelagem e realizar o sistema de controle em malha fechada para a obtenção de cordões com boa aparência e qualidade.

### 5.1 - MODELAGEM DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO CORDÃO.

Conforme evidenciado na Tabela 4.2, foram considerados 20 pontos experimentais para a realização dos experimentos. Neste sentido, quatro corpos de prova foram utilizados para, assim, obter os modelos com a mínima quantidade de recursos. E para facilitar a realização dos mesmos, os experimentos foram divididos em quatro partes para serem realizados nos quatro corpos de prova.

Na primeira parte foram selecionados os cinco primeiros experimentos. Assim, na Figura 5.1, a seguir, tem-se o cordão final obtido, observando a largura e o reforço dos experimentos realizados.

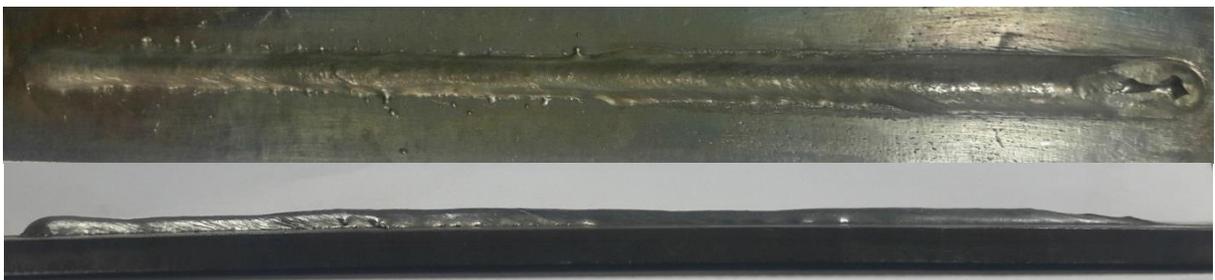


Figura 5.1: Cordão final obtido da parte 1 dos experimentos.

Na Figura 5.2, a seguir, tem-se a reconstrução em 3D da primeira parte dos experimentos. Na Figura 5.3, a seguir, têm-se as medidas das características geométricas do cordão.

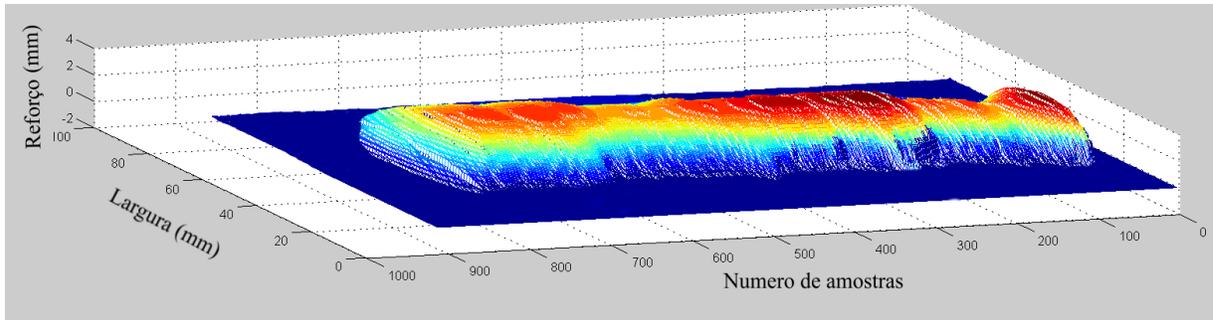


Figura 5.2: Reconstrução em 3D da parte 1 dos experimentos.

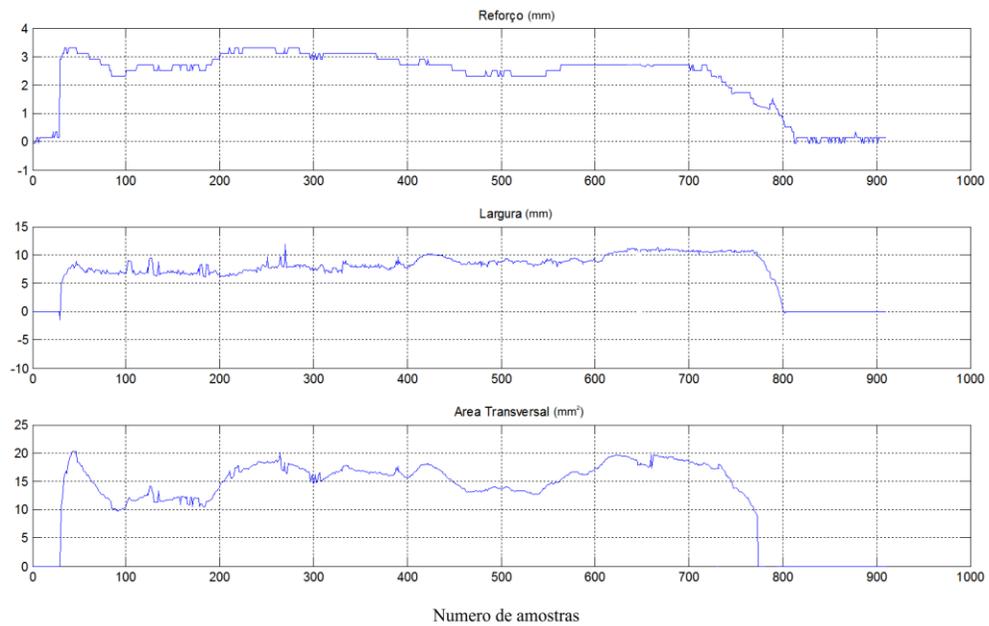


Figura 5.3: Medidas das características geométricas da parte 1 dos experimentos.

Na segunda parte são selecionados os experimentos 6 até o 10, na Figura 5.4, apresentada a seguir, tem-se o cordão final obtido observando a largura e o reforço dos experimentos realizados.

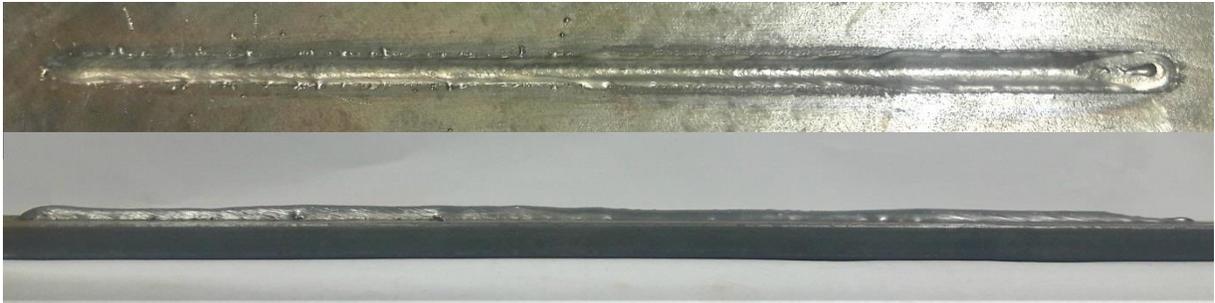


Figura 5.4: Cordão final obtido da parte 2 dos experimentos.

Na Figura 5.5, a seguir, tem-se a reconstrução em 3D da segunda parte dos experimentos. Na Figura 5.6, a seguir, têm-se as medidas das características geométricas do cordão.

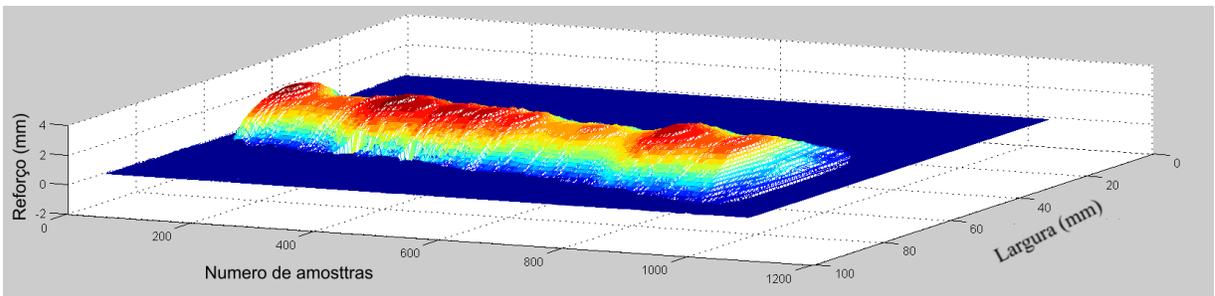


Figura 5.5: Reconstrução em 3D da parte 2 dos experimentos.

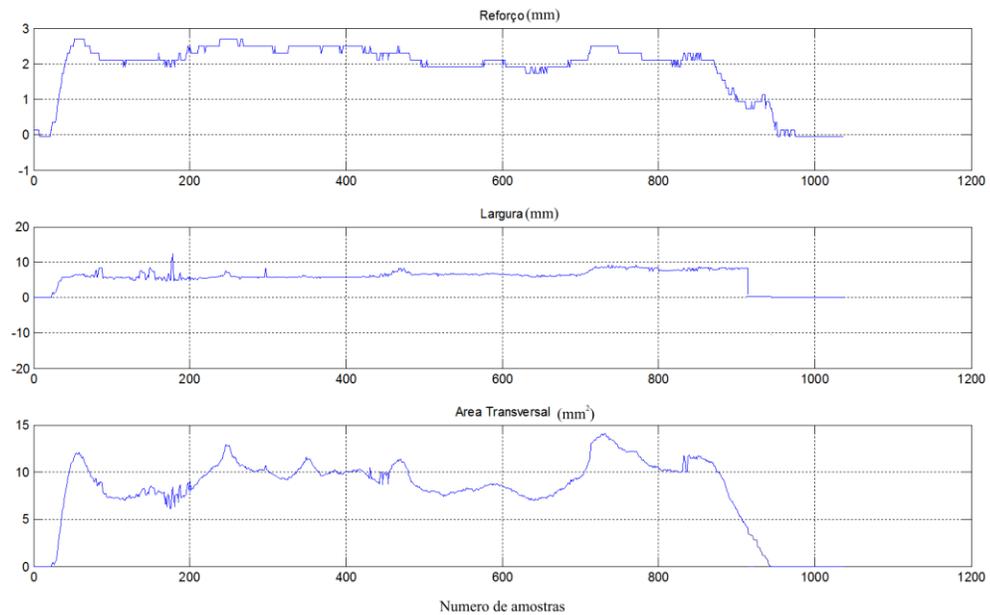


Figura 5.6: Medidas das características geométricas da parte 2 dos experimentos.

Na terceira parte são selecionados os experimentos 7 ate o 15, nas Figura 5.7, apresentada a seguir, mostram-se o cordão final obtido observando a largura e o reforço dos experimentos realizados.



Figura 5.7: Cordão final obtido da parte 3 dos experimentos.

Na Figura 5.8, a seguir, apresenta-se a reconstrução em 3D da terceira parte dos experimentos. Na Figura 5.9, a seguir, têm-se as medidas das características geométricas do cordão.

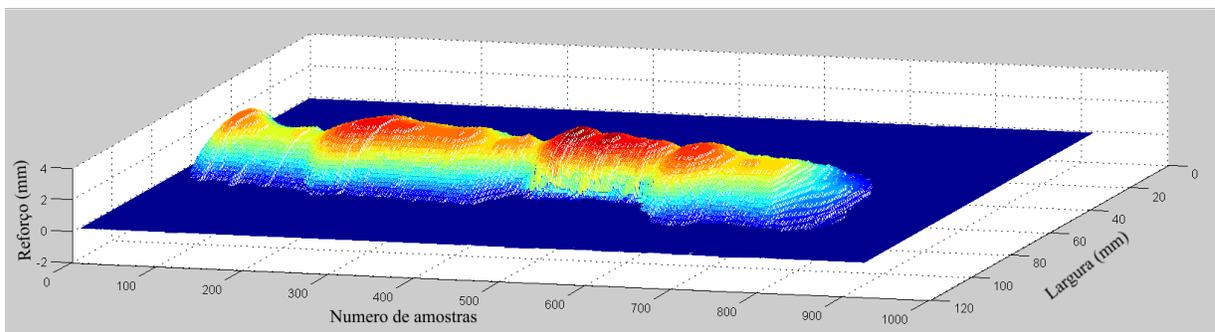


Figura 5.8: Reconstrução em 3D da parte 3 dos experimentos.

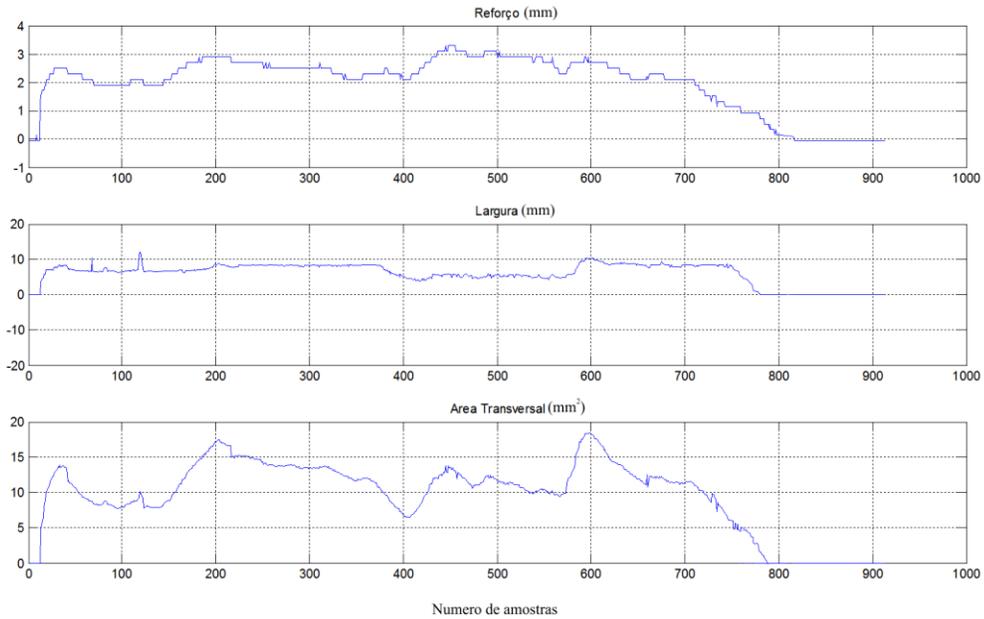


Figura 5.9: Medidas das características geométricas da parte 3 dos experimentos.

Na quarta parte são selecionados os experimentos 16 ate o 20, nas Figura 5.10, apresentada a seguir, tem-se o cordão final obtido observando a largura e o reforço dos experimentos realizados.



Figura 5.10: Cordão final obtido da parte 4 dos experimentos

Na Figura 5.11, a seguir, apresenta-se a reconstrução em 3D da quarta parte dos experimentos. Na Figura 5.12, a seguir, têm-se as medidas das características geométricas do cordão.

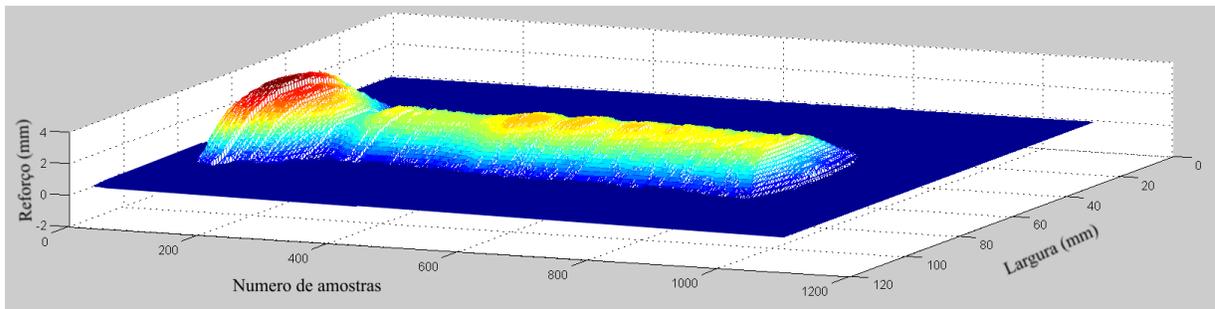


Figura 5.11: Reconstrução em 3D da parte 4 dos experimentos.

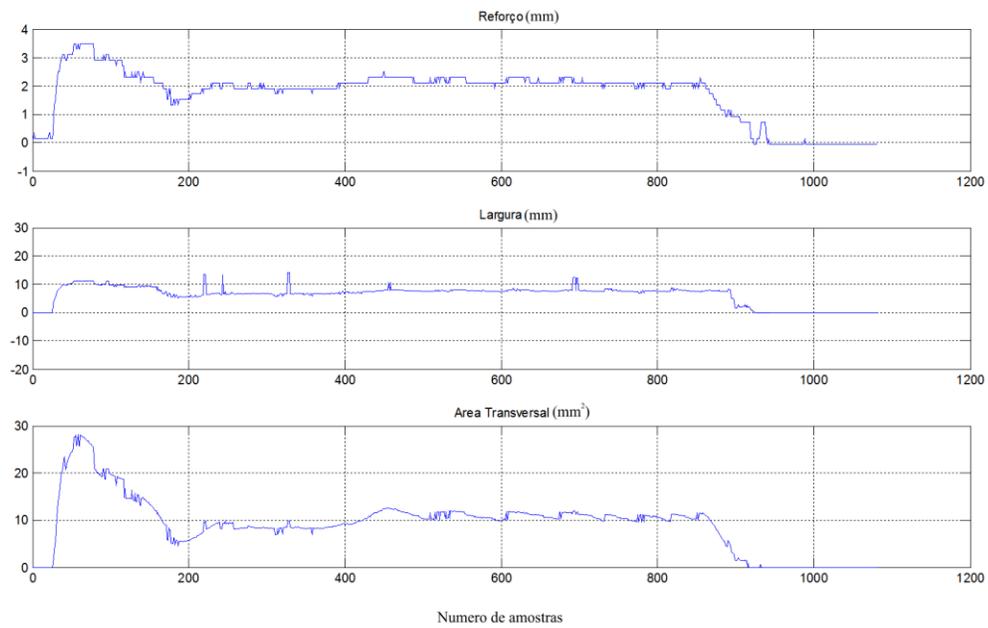


Figura 5.12: Medidas das características geométricas da parte 4 dos experimentos.

A Tabela 5.1, a seguir, destaca os resultados dos experimentos indicados na Tabela 4.2, apresentada anteriormente, com a obtenção das medidas do reforço e a largura.

Tabela 5.1: Resultados dos experimentos.

No Exp	Reforço (mm)		Largura (mm)	
	$\bar{x}$	$s$	$\bar{x}$	$s$
1	2.09	0.09	5.98	0.21
2	2.56	0.08	6.78	0.23
3	1.62	0.10	7.62	0.61
4	2.22	0.11	8.83	0.55
5	1.76	0.08	5.01	0.28
6	2.08	0.13	5.39	0.39
7	1.40	0.14	5.77	0.73
8	1.89	0.13	6.70	0.45
9	1.57	0.12	5.67	0.58
10	2.21	0.12	7.21	0.49
11	2.07	0.34	4.94	0.93
12	1.71	0.10	7.69	0.42
13	2.31	0.09	8.63	0.47
14	1.60	0.09	5.49	0.50
15	1.82	0.10	6.57	0.65
16	1.76	0.12	6.78	0.874
17	1.74	0.09	6.51	0.708
18	1.88	0.10	6.79	0.810
19	1.80	0.09	6.78	0.708
20	1.76	0.10	6.55	0.810

A Equação 5.1, a seguir, apresenta o modelo do reforço avaliando a qualidade do ajuste do modelo através do coeficiente de determinação, obtendo uma percentagem ( $\%R_{adj}^2 = 100 * R_{adj}^2$ ) de 94,88%. Tal coeficiente indica quanto o modelo foi capaz de explicar os dados (em termos de variáveis codificadas  $\zeta_1$ -velocidade de alimentação do arame,  $\zeta_2$ - tensão e  $\zeta_3$ - velocidade de soldagem).

$$y_{1S} = 1.7980 + 0.2183 \zeta_1 - 0.1442\zeta_2 - 0.1874\zeta_3 + 0.412\zeta_1^2 + 0.0414\zeta_2^2 + 0.0641\zeta_3^2 + 0.0385 \zeta_1\zeta_2 - 0.0332 \zeta_1\zeta_3 + 0.0332 \zeta_2\zeta_3 \quad (5.1)$$

A Equação 5.2, a seguir, apresenta o modelo do erro com respeito a não uniformidade do cordão de solda para o reforço.

$$y_{1S}^* = 0.1063 + 0.0030 \zeta_1 - 0.0224\zeta_2 + 0.0089\zeta_3 - 0.0005\zeta_1^2 + 0.0340\zeta_2^2 - 0.0126\zeta_3^2 - 0.0046 \zeta_1\zeta_2 + 0.0070 \zeta_1\zeta_3 + 0.0014 \zeta_2\zeta_3 \quad (5.2)$$

Uma vez que os modelos foram apresentados em termos dos valores codificados (-1,682 , -1 , 0 , 1 , 1,682), a conversão para valores reais dos modelos utilizados é apresentada na Equação 5.3, a seguir.

$$\zeta_1 = x_1 - 6.5 \qquad \zeta_2 = \frac{x_2 - 23}{4} \qquad \zeta_3 = \frac{x_3 - 10}{2} \quad (5.3)$$

A Figura 5.13, a seguir, apresenta a superfície de resposta do reforço em função da velocidade de alimentação do arame e a tensão para um valor constante de velocidade de soldagem (10 mm/s). Em geral, quando a tensão aumenta, tende a diminuir a altura do reforço e apresentar maior velocidade de alimentação do arame, obtendo-se valores mais elevados para o reforço. Tais tendências são justificáveis a partir dos princípios de comportamento de processos de soldagem a arco.

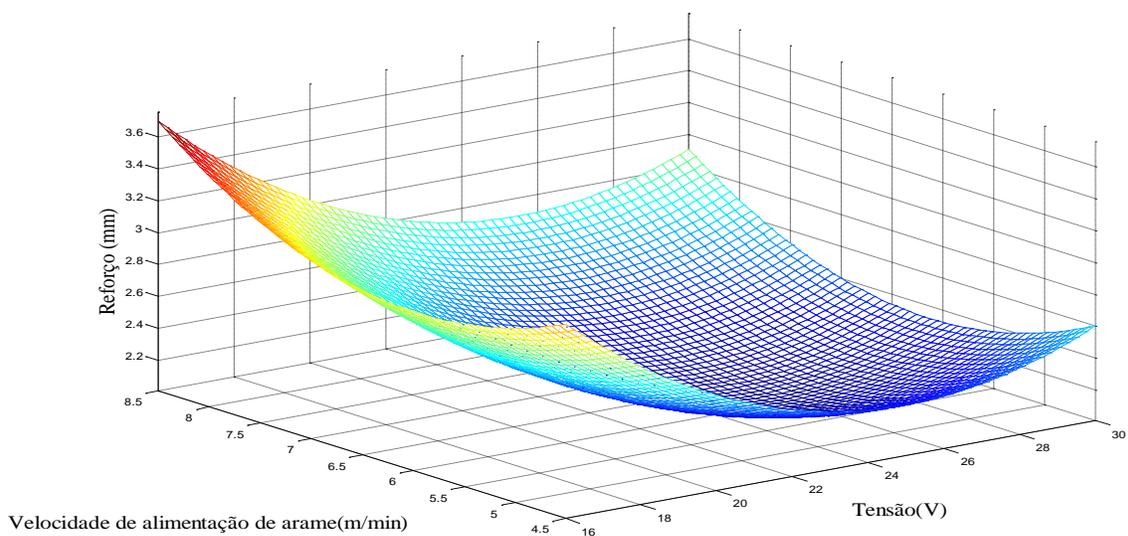


Figura 5.13: Superfície de resposta do reforço do cordão de solda.

A Figura 5.14, a seguir, apresenta a superfície de resposta do erro com respeito a não uniformidade do cordão de solda para o reforço.

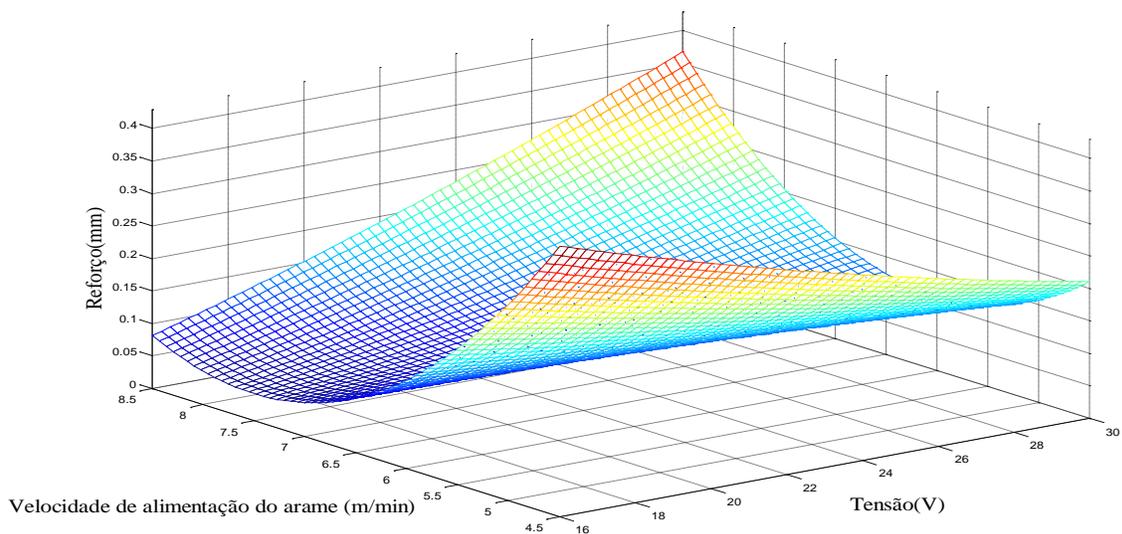


Figura 5.14: Superfície de resposta do erro com respeito a *não uniformidade* do cordão de solda para o reforço.

A equação 5.4, a seguir, apresenta o modelo da largura do cordão obtendo o coeficiente de determinação de  $\%R_{adj}^2 = 98.2\%$ .

$$y_{2S} = 6.6723 + 0.4335\zeta_1 + 0.7605\zeta_2 - 0.8518\zeta_3 - 0.0989\zeta_1^2 - 0.1421\zeta_2^2 + 0.1204\zeta_3^2 + 0.1206\zeta_1\zeta_2 - 0.0871\zeta_1\zeta_3 - 0.2035\zeta_2\zeta_3 \quad (5.4)$$

A equação 5.5, a seguir, apresenta o modelo do erro com respeito a *não uniformidade* da largura do cordão de solda.

$$y_{2S}^* = 0.7657 - 0.0269\zeta_1 + 0.0259\zeta_2 + 0.0235\zeta_3 - 0.1039\zeta_1^2 - 0.0549\zeta_2^2 - 0.1217\zeta_3^2 - 0.0580\zeta_1\zeta_2 - 0.0166\zeta_1\zeta_3 - 0.0261\zeta_2\zeta_3 \quad (5.5)$$

A Figura 5.15, a seguir, mostra a superfície de resposta da largura do cordão de solda relacionada com a velocidade de alimentação do arame e a tensão (velocidade de soldagem constante de 10 mm/s), pode-se observar que a largura aumenta com um aumento da tensão, além disso, aumenta com uma maior velocidade de alimentação do arame. Figura 5.16, a seguir, mostra a superfície de resposta do erro com respeito a *não uniformidade* do cordão de solda para a largura.

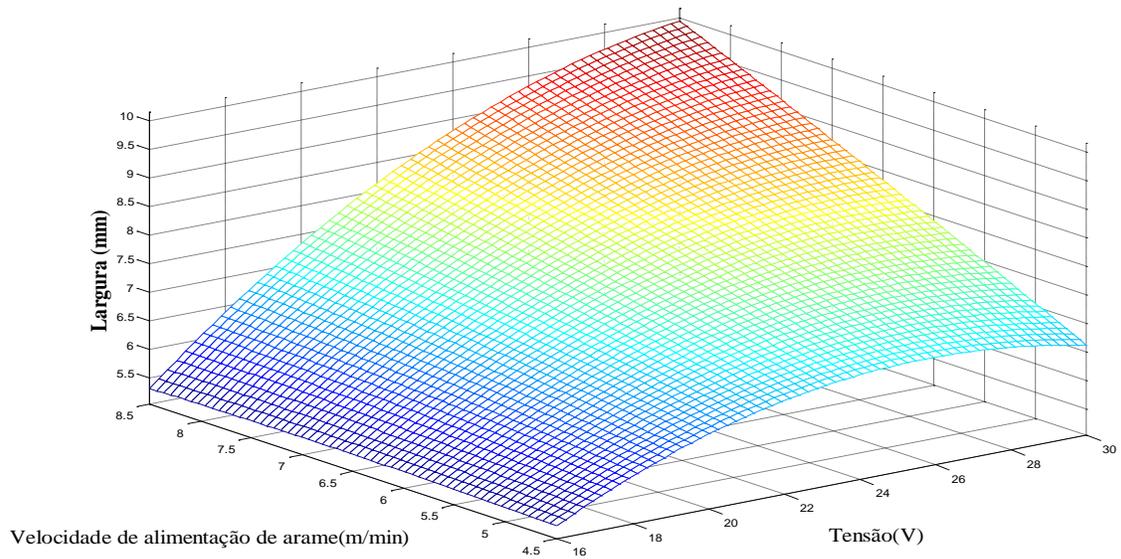


Figura 5.15: Superfície de resposta da Largura do cordão de solda

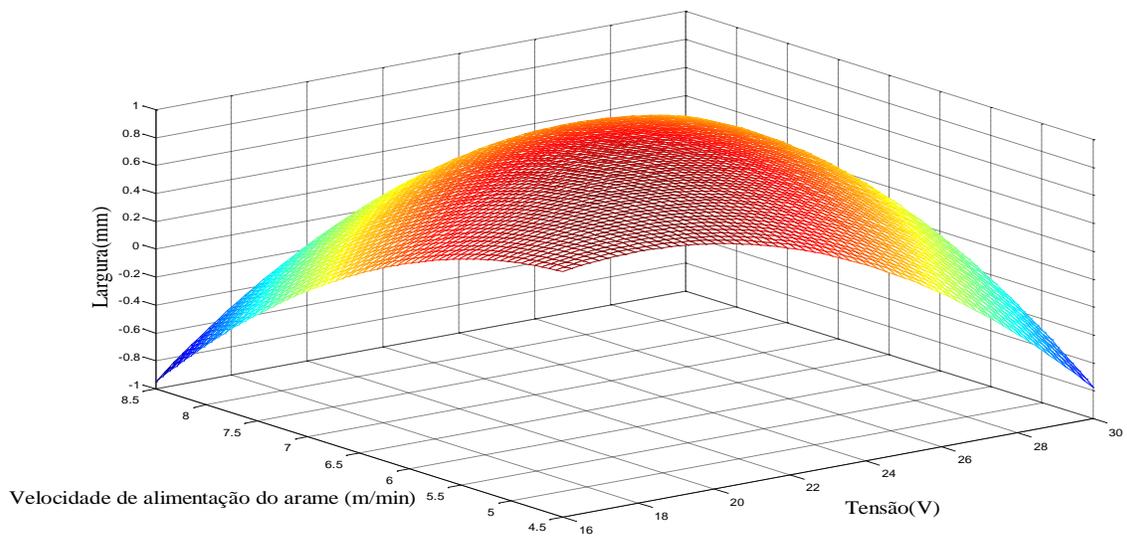


Figura 5.16: Superfície de resposta do erro com respeito a *não uniformidade* do cordão de solda para a largura.

Para a seleção dos parâmetros para uma determinada largura, fez-se uso do programa NIOS II, o qual permite a programação do processador configurável da FPGA e apresenta uma programação em linguagem C. Desenvolveu-se um programa onde se tem as faixas das variáveis entre os níveis -1 e 1. Estes são avaliados no modelo que descreve a largura ou reforço do cordão, para, assim, obter os valores que se ajustam a uma determinada resposta. Nas Figuras 5.17 e 5.18, a seguir, mostram-se as possíveis combinações das três variáveis de entrada, para obter uma largura de 6 mm e 7 mm, respectivamente, no formato final do cordão de solda.

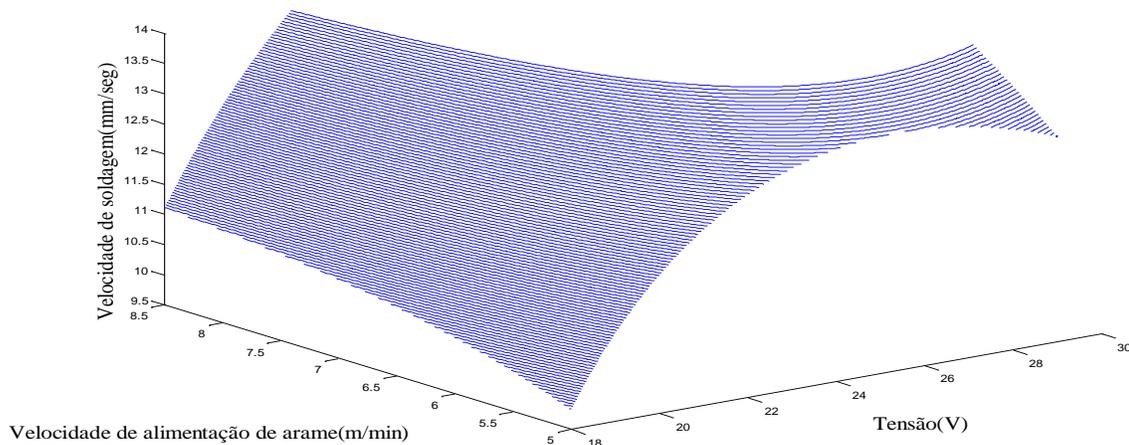


Figura 5.17: Combinações variáveis de entrada para uma largura de 6mm.

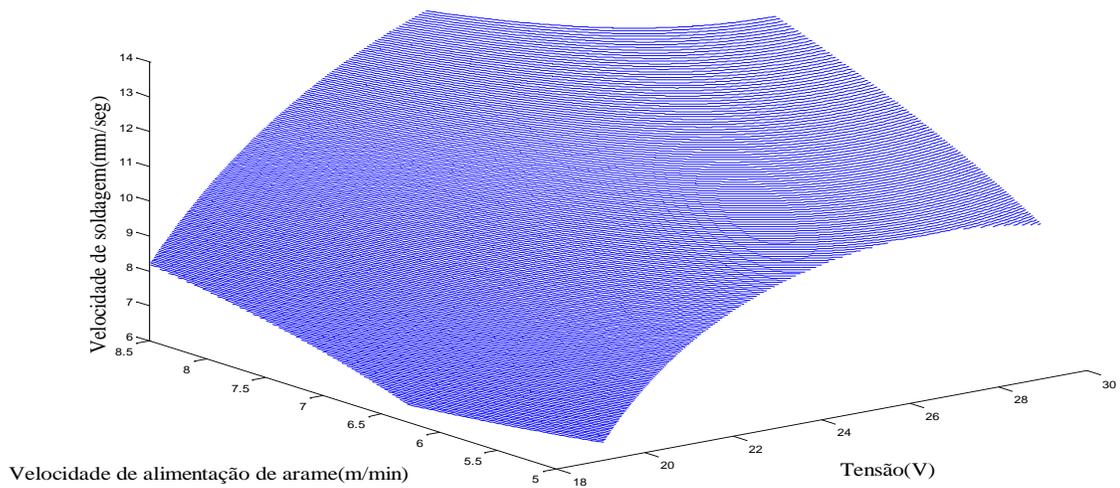


Figura 5.18: Combinações variáveis de entrada para uma largura de 7 mm.

Similarmente, foram encontradas todas as possíveis combinações para o reforço, nas Figuras 5.19 e 5.20, a seguir, são apresentadas todas as possíveis combinações para um reforço de 2 e 2.5 mm respectivamente.

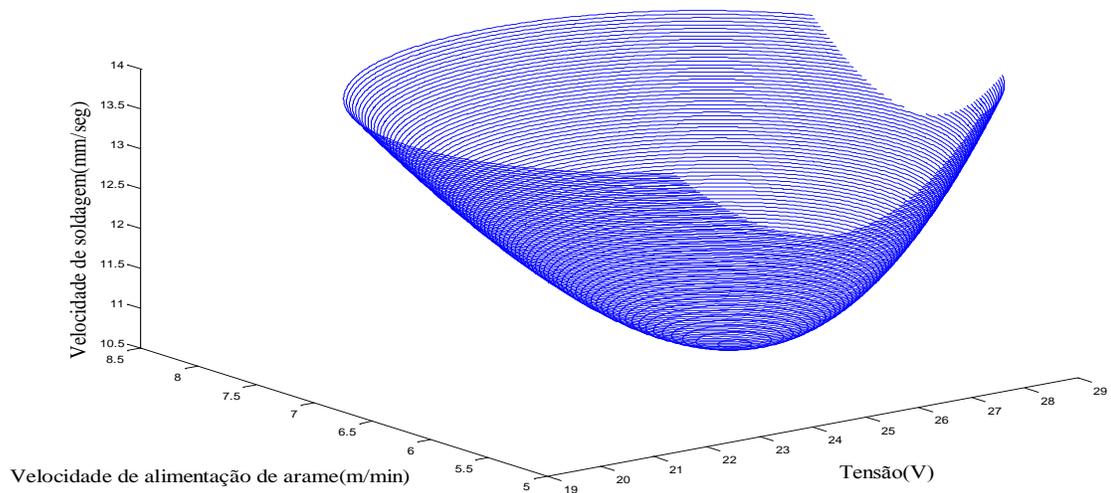


Figura 5.19: Combinações variáveis de entrada para um reforço de 2mm.

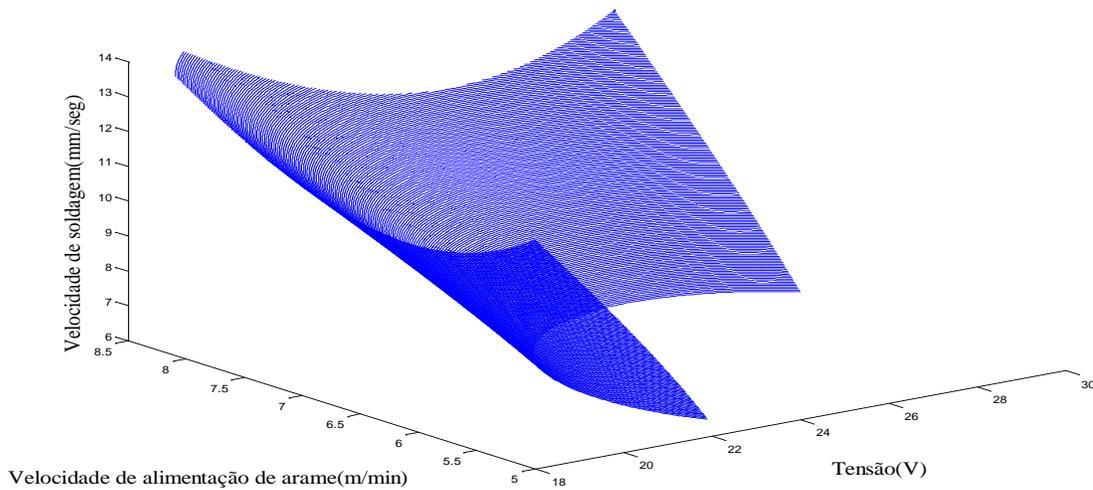


Figura 5.20: Combinações variáveis de entrada para um reforço de 2.5mm.

Uma vez obtidas as combinações, estas são avaliadas no modelo do erro com respeito à não uniformidade, onde, como resultado, se obtêm os erros de cada uma das combinações. E conforme apresentado na metodologia, foram escolhidos os valores que apresentam menor desvio padrão, sendo avaliados no modelo de energia de soldagem, com o objetivo de encontrar os parâmetros adequados que gerem um cordão com boa aparência e qualidade. Assim, na Tabela 5.2, a seguir, tem-se os parâmetros de soldagem para algumas medidas de largura e reforço do cordão.

Tabela 5.2: Parâmetros de soldagem ótimos para algumas medidas de largura e reforço.

Largura (mm)	Reforço (mm)	Tensão (V)	Velocidade de alimentação do arame (m/min)	Velocidade de soldagem (mm/s)
5	2	18	6.84	14.31
5	3	18	6.86	12.58
6	2	26.32	5	13.40
6	2.5	18.62	7.01	11.32
6	3	18.63	7.02	11.56

7	2.5		25.30	5	10.68
7	3		25.32	5	10.68

Foram escolhidos uma largura de 5 mm e um reforço de 2 mm. Na Figura 5,21, a seguir, tem-se a vista frontal e lateral do cordão, onde pode ser observado o reforço e a largura do cordão.

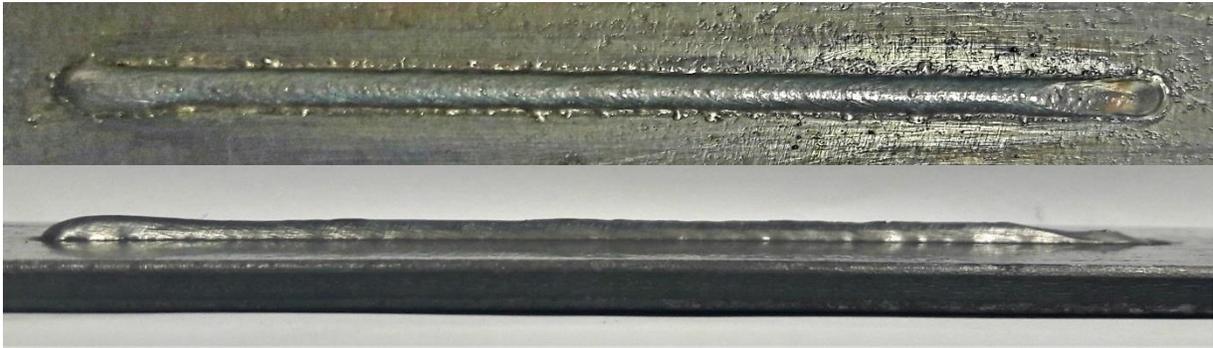


Figura 5.21: Cordão final obtido com largura de 5mm e um reforço de 2 mm.

A fim de assegurar que as medidas finais obtidas sejam semelhantes às variáveis desejadas, fez-se a reconstrução em 3D do cordão, conforme evidenciado na Figura 5.22. Na Figura 5.23, a seguir, tem-se as medidas das características geométricas do cordão, obtendo-se uma largura média de 5,22 mm com um desvio padrão de 0,30 mm, um reforço de 2,16 mm com um desvio padrão 0,15 mm e uma área total depositada de 7.75 mm<sup>2</sup> com um desvio padrão de 0,72 mm<sup>2</sup>.

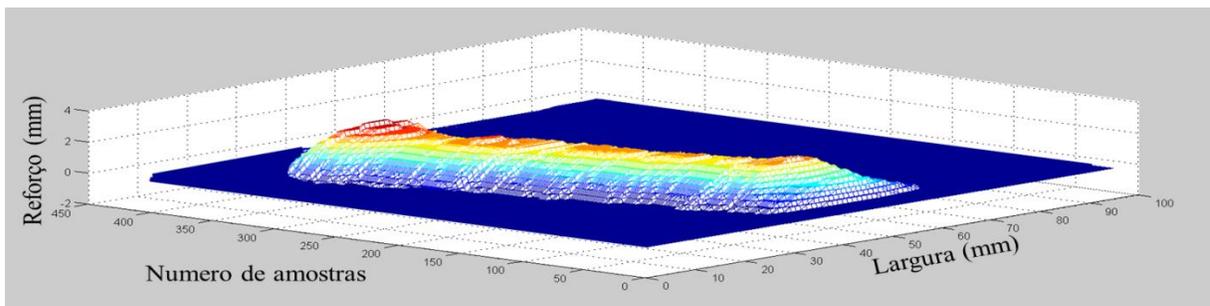


Figura 5.22: Reconstrução em 3D do cordão com largura de 5 mm e um reforço de 2 mm.

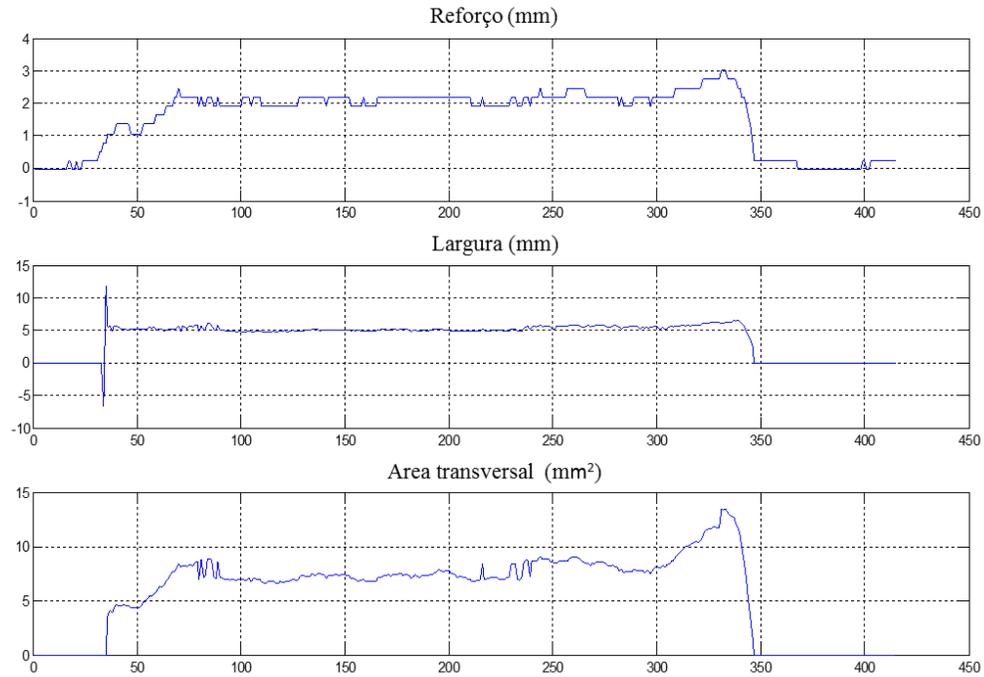


Figura 5.23: Medidas das características geométricas do cordão com largura de 5 mm e um reforço de 2 mm.

Na figura 5.24, a seguir, apresenta-se o cordão de solda com uma largura de 6 mm e um reforço de 3 mm, onde os parâmetros de soldagem selecionados foram apresentados anteriormente na Tabela 5.2.

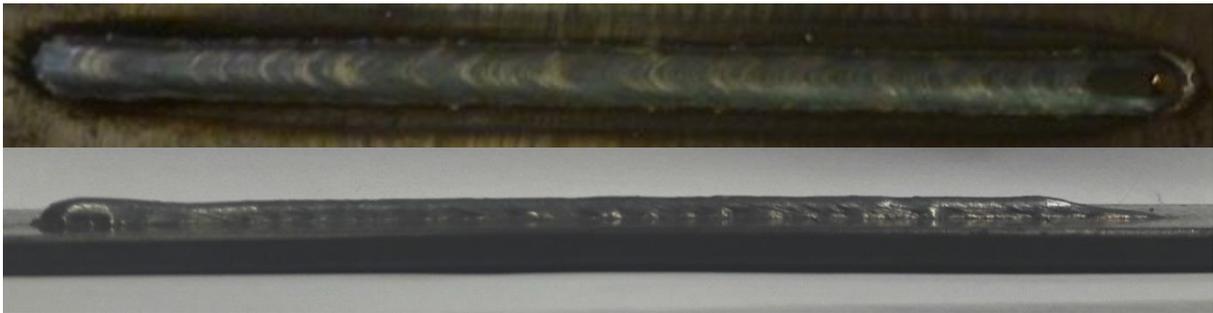


Figura 5.24: Cordão final obtido com largura de 6 mm e um reforço de 3 mm.

Foi realizada a reconstrução em 3D do cordão como é mostrada na Figura 5.25, a seguir, para verificar as medidas das características geométricas. Na Figura 5.26, a seguir, tem-se as medidas das características geométricas do cordão, obtendo-se uma largura média de 6,25 mm

com um desvio padrão de 0,36 mm, um reforço de 3,14 mm com um desvio padrão 0,13 mm e uma área total depositada de 13,96 mm<sup>2</sup> com um desvio padrão de 0,68 mm<sup>2</sup>.

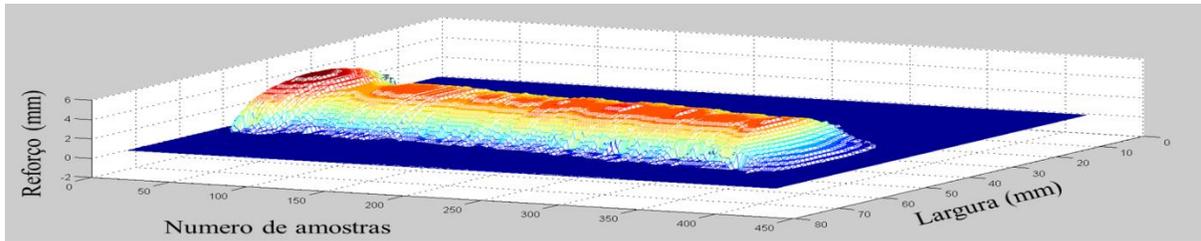


Figura 5.25: Reconstrução em 3D do cordão com largura de 6 mm e um reforço de 3 mm.

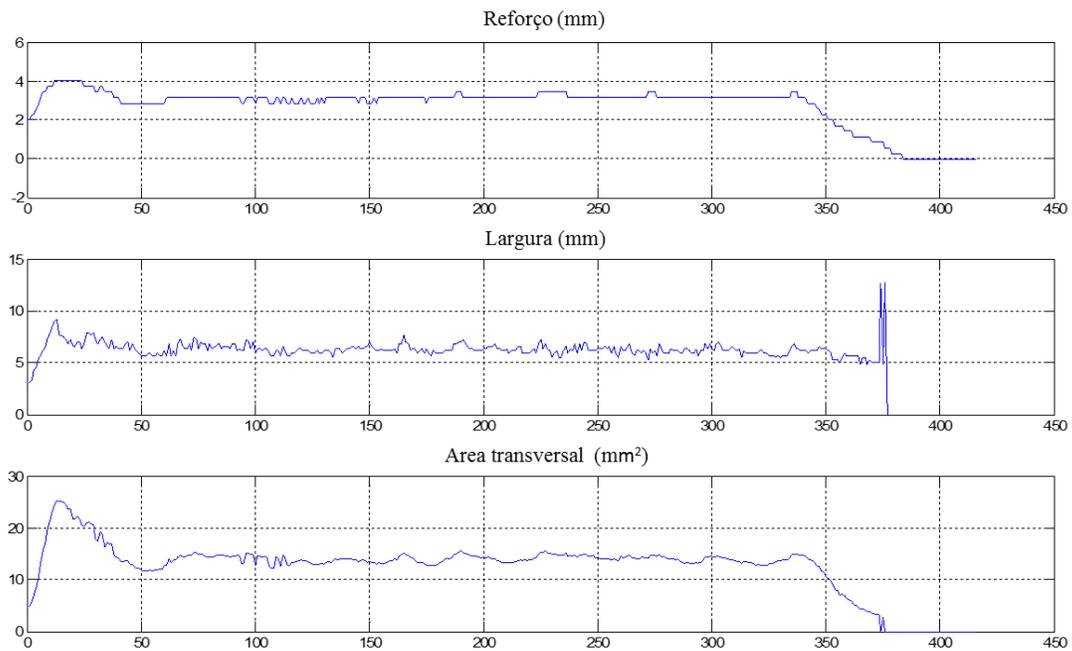


Figura 5.26: Medidas das características geométricas do cordão com largura de 6 mm e um reforço de 3 mm.

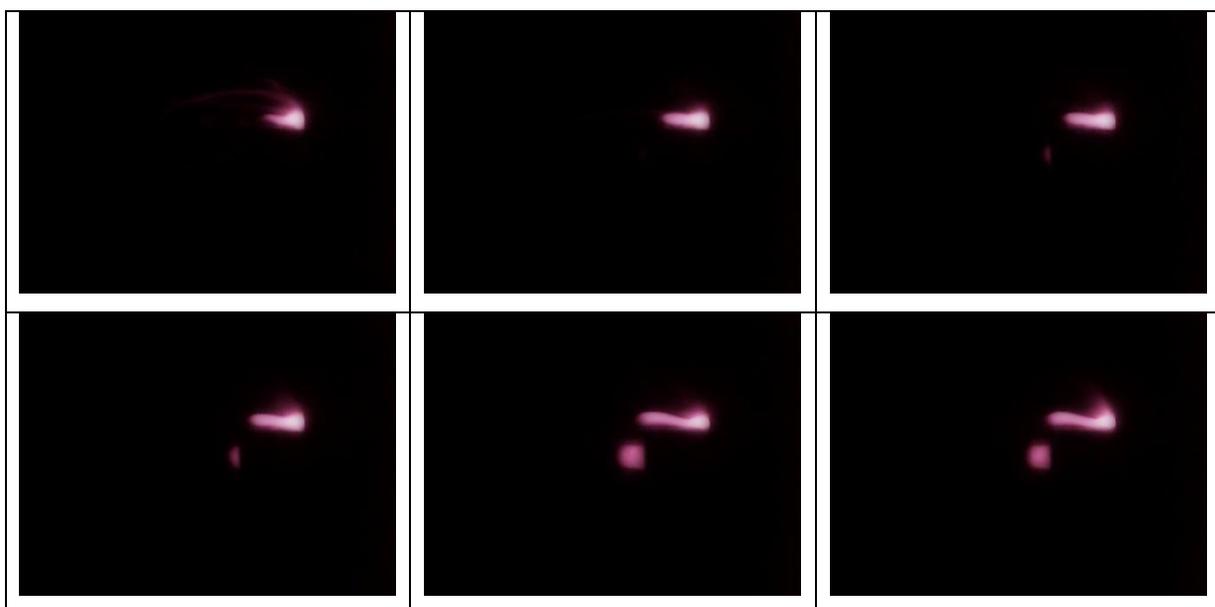
## 5.2 - CAPTURA E PROCESSAMENTO DE IMAGENS

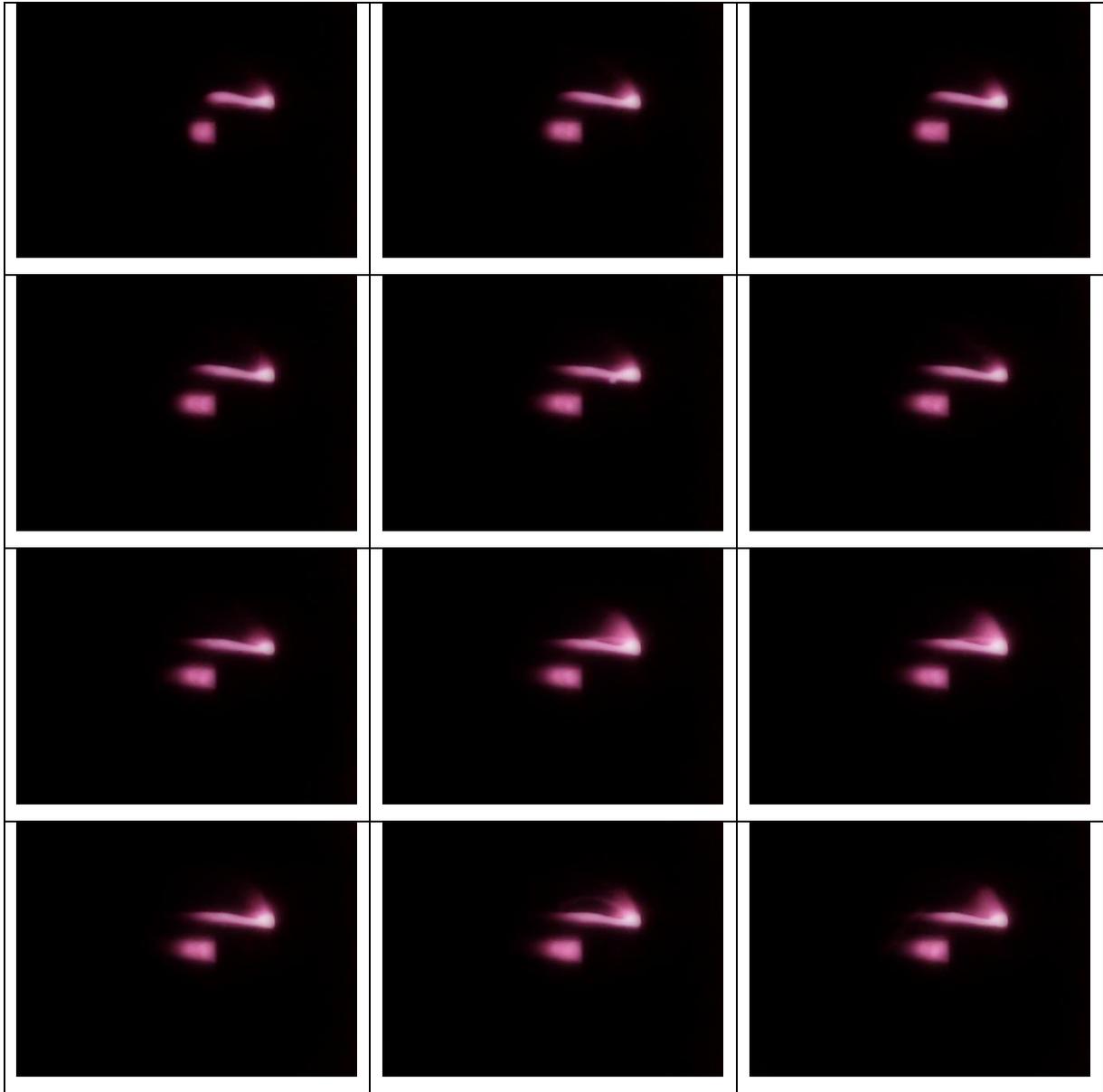
A qualidade dos dados obtidos por um sistema de visão omnidirecional depende de muitos fatores, tais como: geometria, curvatura e qualidade da superfície do espelho. Para aplicações de alta precisão faz-se importante realizar o processo de calibração utilizando equações da superfície do espelho e, posteriormente, modelando os parâmetros geométricos de reflexão da luz. Porém, na presente pesquisa é desconhecida a geometria do espelho, pelo que se torna impossível utilizar as equações de reflexão de luz.

O processo de calibração proposto permite que o sistema de visão seja caracterizado mediante uma função de interpolação que relaciona as distâncias em *pixel* com as distâncias no mundo real. O processo de calibração foi desenvolvido associando objetos colocados a distâncias conhecidas com as distâncias estimadas na imagem (em *pixel*), obtendo uma interpolação polinomial associada a cada seção dos espelhos.

Na Tabela 5.3, a seguir, tem-se uma sequência de imagens onde pode ser observada a largura e o reforço do cordão de solda em uma única imagem.

Tabela 5.3: Sequência de imagens obtidas





### **5.3 - IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE**

Finalmente, realizada a modelagem da largura e o reforço, o processamento de imagens e o controle são integrados na FPGA. Para maior eficiência da solução, o referido sistema contém facilidades de utilização, como, por exemplo, indicações na tela LCD de quais são as características desejadas e o início do processo de soldagem.

A ideia básica em controle é modelar as ações a partir de conhecimento prévio por meio da utilização de regras, relacionando as variáveis de entrada e saída do processo, ao invés de modelar o processo em si – o que leva a uma abordagem diferente dos métodos convencionais de controle de processos, onde os mesmos são desenvolvidos via modelagem matemática dos processos, de modo a derivar as ações de controle como função do estado do processo.

No presente estudo, realizou-se um controlador com base em uma máquina de inferência. Os testes do referido controlador foram realizados diretamente no processo. A variável linguística para a entrada do controlador foi o “erro na medida” da largura ou reforço do cordão de solda. A variável linguística “erro na medida” foi obtida através da diferença entre o valor desejado da largura ou o reforço e o valor da medida identificada mediante o processamento da imagem. Como variável linguística de saída, definiu-se o aumento ou a diminuição da “velocidade de soldagem” para o caso de controle da largura e da “velocidade de alimentação do arame” no caso do reforço.

Para iniciar o processo, o usuário seleciona no sistema a largura e o reforço desejados. No momento em que o usuário realiza a ação “calcular”, o modelo seleciona os parâmetros ótimos para aquela largura e reforço. Antes de iniciar o processo de solda, devem ser efetivados os parâmetros iniciais, ou seja, o tamanho do cordão etc., além da seleção do sistema de controle. No caso da seleção do sistema configurar-se como “sim”, este realiza um vídeo do ocorrido durante a solda, mas não exercerá nenhuma ação de controle. E no caso em que a seleção se dê por controle, o sistema inicia o processo e espera um tempo de 2 segundos até que o arco esteja estável para iniciar a aquisição das imagens. A imagem capturada é processada, obtendo o valor da medida da largura e do reforço do cordão em tempo real, além de que é realizado em forma paralela. Logo, a diferença entre a referida medida e a medida desejada é apontada ao controlador para, então, exercer a ação de controle sobre a velocidade de soldagem ou a velocidade de alimentação do arame, mantendo fixos os outros parâmetros de soldagem. Uma vez encerrado o processo de soldagem, são armazenados todos os dados das medidas do processamento de imagens, além das ações de controle.

Internamente, o programa desenvolvido realiza a comunicação com o ROB 5000 para o controle e envio de parâmetros para a fonte de soldagem e o controle da mesa linear.

Na Figura 5.27, a seguir, tem-se o cordão final obtido, dividido em duas partes, onde, a primeira apresenta uma largura de 7 mm e reforço de 3 mm, e a segunda, uma largura de 5 mm e reforço de 3 mm.



Figura 5.27: Cordão final obtido com o sistema de controle com uma largura de 7 mm e o reforço de 3 mm, e uma largura de 5 mm e o reforço de 3 mm

Fez-se a reconstrução em 3D do cordão, conforme evidenciado na Figura 5.28, a seguir, para verificar as medidas das características geométricas. E na Figura 5.29, a seguir, têm-se as medidas das características geométricas do cordão, obtendo-se na primeira parte do cordão, uma largura média de 7,18 mm com um desvio padrão de 0,29 mm, um reforço de 2,96 mm com um desvio padrão 0,13 mm, e uma área total depositada de 13,87 mm<sup>2</sup> com um desvio padrão de 0,62 mm<sup>2</sup>. Na segunda parte do cordão, uma largura média de 4,95 mm com um desvio padrão de 0,33 mm, um reforço de 2,93 mm com um desvio padrão 0,17 mm e uma área total depositada de 10,1 mm<sup>2</sup> com um desvio padrão de 0,83 mm<sup>2</sup>.

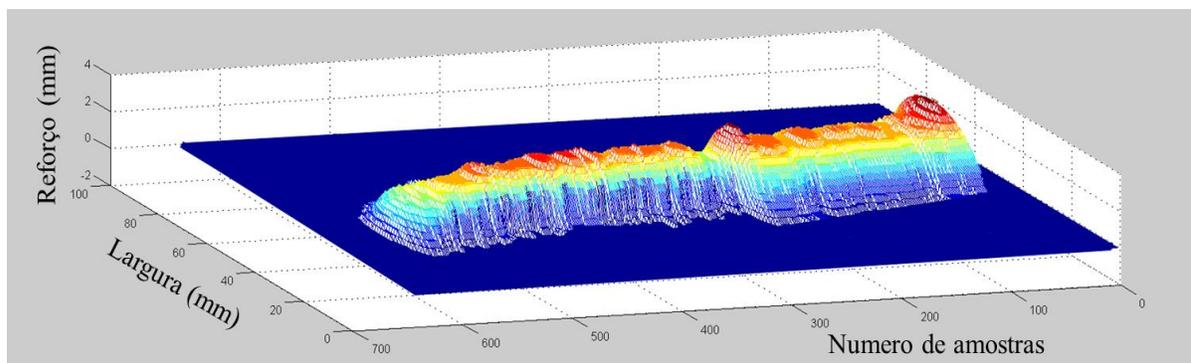


Figura 5.28 Reconstrução em 3D do cordão final obtido com o sistema de controle com uma largura de 7 mm e o reforço de 3 mm, e uma largura de 5 mm e o reforço de 3 mm.

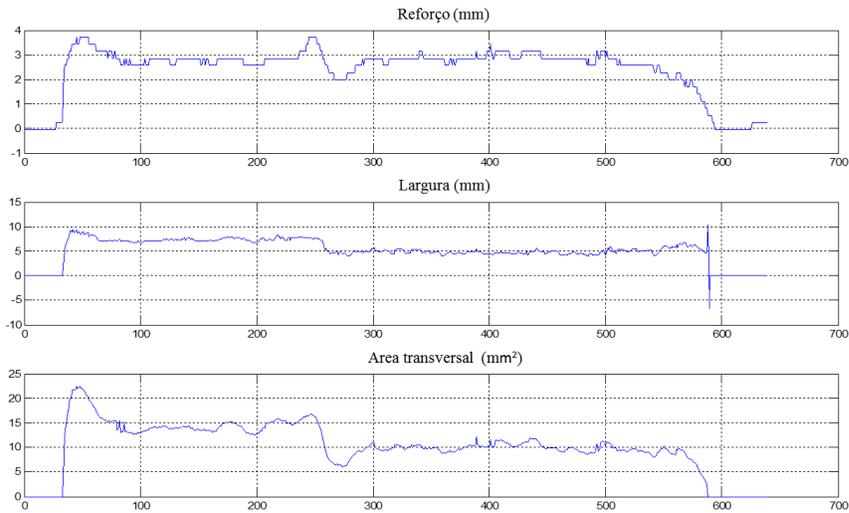


Figura 5.29: Medidas das características geométricas do cordão final obtido com o sistema de controle com uma largura de 7 mm e o reforço de 3 mm, e uma largura de 5 mm e o reforço de 3 mm.

Nas Figuras 5.30 e 5.31, a seguir, têm-se as medições de largura e reforço realizadas pelo sistema de visão computacional proposto de cor azul e as comparações com as realizadas pelo *scanner* 3D de cor vermelho, para diferentes pontos de trabalho na região analisada.

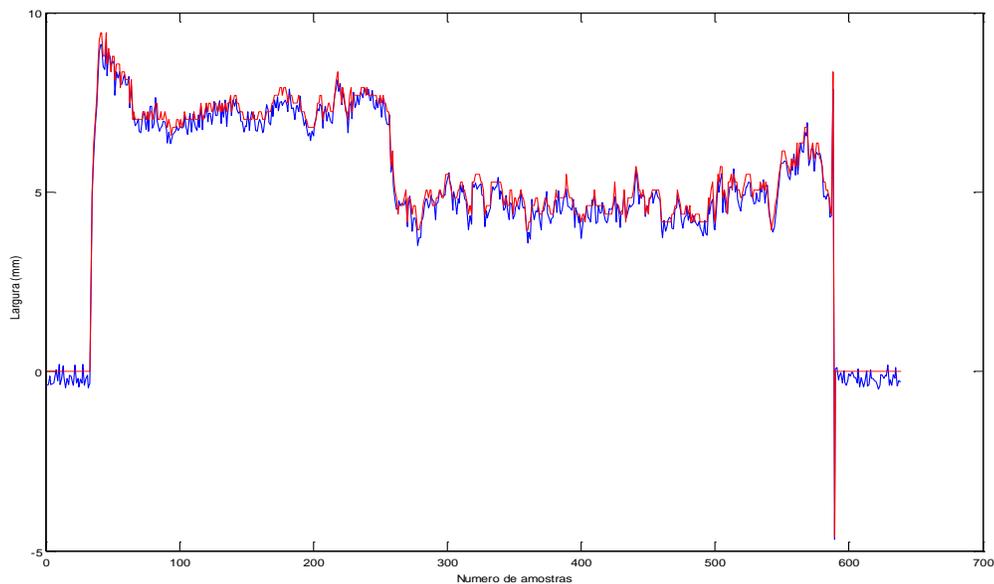


Figura 5.30: Comparação das amostras adquiridas pelo sistema de visão com as adquiridas com o *scanner* com uma largura de 7 mm e 5 mm.

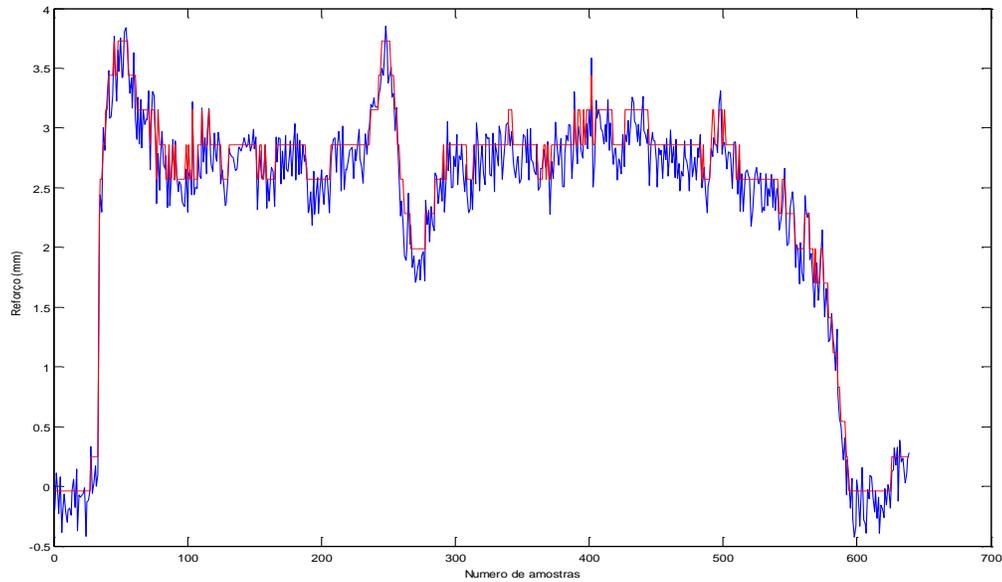


Figura 5.31: Comparação das amostras adquiridas pelo sistema de visão com as adquiridas com o *scanner* com um reforço de 3 mm.

Nas Figuras 5.32 e 5.33 têm-se os exemplos de sinais adquiridos durante diferentes etapas de controle. Neste caso, são apresentadas as ações de controle realizadas no cordão final obtido. Aqui vale destacar que as ações de controle na velocidade de soldagem são utilizadas para controlar a largura e a velocidade de alimentação do arame para controlar o reforço.

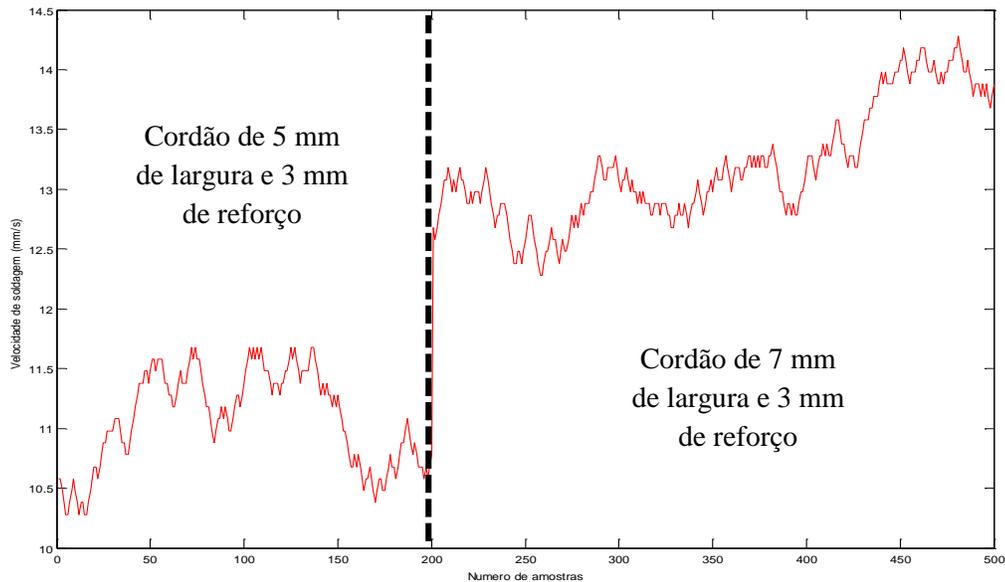


Figura 5.32: Ações de controle na velocidade de soldagem para o cordão com uma largura de 7 mm e o reforço de 3 mm, e uma largura de 5 mm e um reforço de 3 mm.

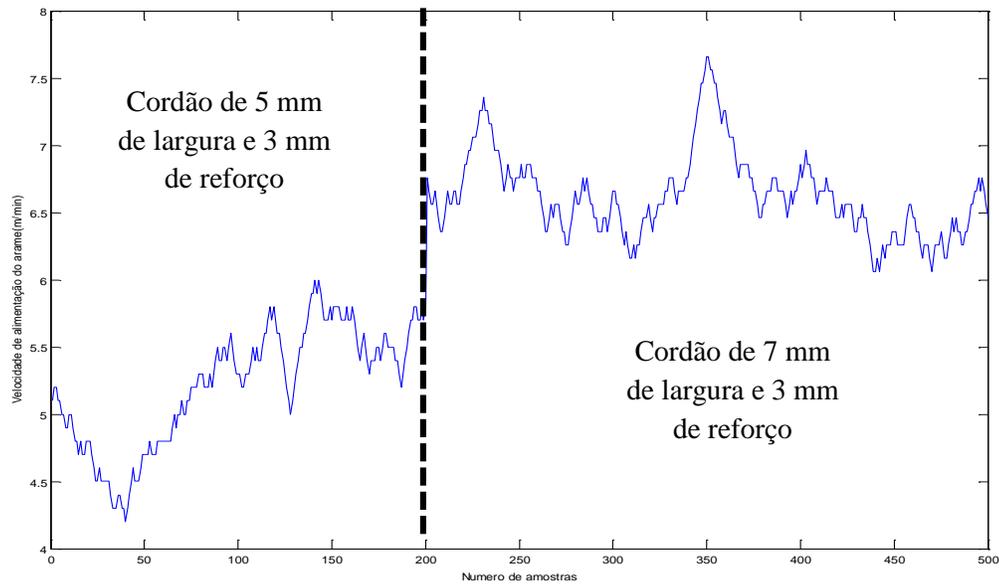


Figura 5.33: Ações de controle na velocidade de alimentação do arame para uma largura de 7 mm e o reforço de 3 mm, e uma largura de 5 mm e um reforço de 3 mm.

Na Figura 5.34, a seguir, tem-se o cordão final obtido, igual que no caso anterior está dividido em duas partes para analisar o efeito do controlador, a primeira apresenta uma largura de 6 mm e o reforço de 2 mm, e a segunda parte uma largura de 5 mm e um reforço de 2 mm. Na Figura 5.27, a seguir, é apresentada a vista lateral do cordão.



Figura 5.34: Cordão final obtido com o sistema de controle com uma largura de 6 mm e o reforço de 2 mm, e uma largura de 5 mm e o reforço de 2 mm.

Fez-se a reconstrução em 3D do cordão, conforme evidenciado na Figura 5.35, a seguir, para verificar as medidas das características geométricas. Na Figura 5.36, a seguir, têm-se as medidas das características geométricas do cordão, obtendo-se na primeira parte uma largura média de 5,85 mm com um desvio padrão de 0,17 mm, um reforço de 1,86 mm com um desvio padrão 0,09 mm e uma área total depositada de 13,87 mm<sup>2</sup> com um desvio padrão de 0,62 mm<sup>2</sup>.

Na segunda parte do cordão, uma largura média de 5,04 mm com um desvio padrão de 0,32 mm, um reforço de 2,08 mm com um desvio padrão 0,11 mm e uma área total depositada de 7,05 mm<sup>2</sup> com um desvio padrão de 0,31 mm<sup>2</sup>.

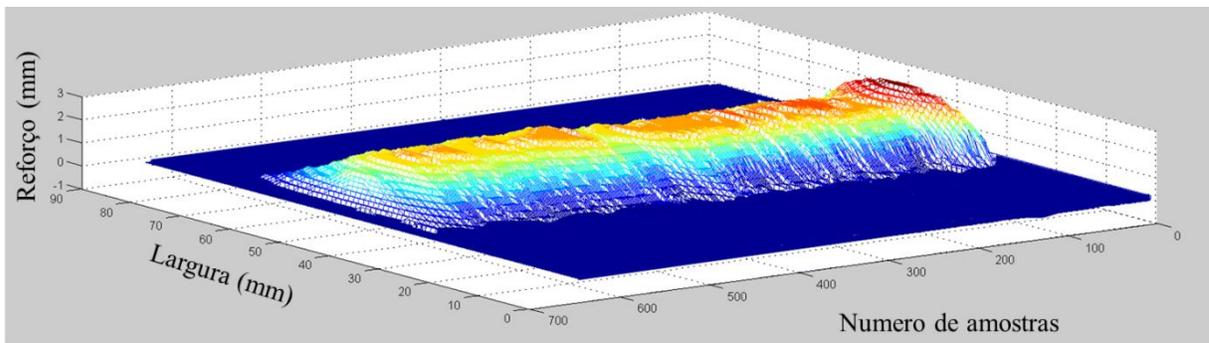


Figura 5.35: Reconstrução em 3D do cordão final obtido com o sistema de controle com uma largura de 6 mm e o reforço de 2 mm, e uma largura de 5 mm e o reforço de 2 mm.

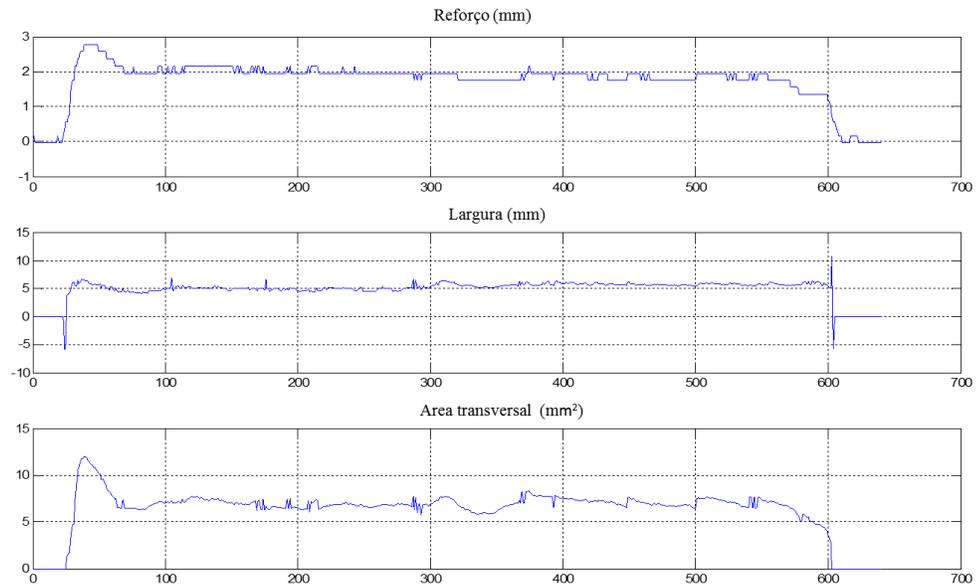


Figura 5.36: Medidas das características geométricas do cordão final obtido com o sistema de controle com uma largura de 6 mm e o reforço de 2 mm, e uma largura de 5 mm e o reforço de 2 mm.

Nas Figuras 5.37 e 5.38, a seguir, têm-se as medições de largura e reforço realizadas pelo sistema de visão computacional proposto de cor azul e as comparações com as realizadas pelo *scanner* 3D de cor vermelho, para diferentes pontos de trabalho na região analisada.

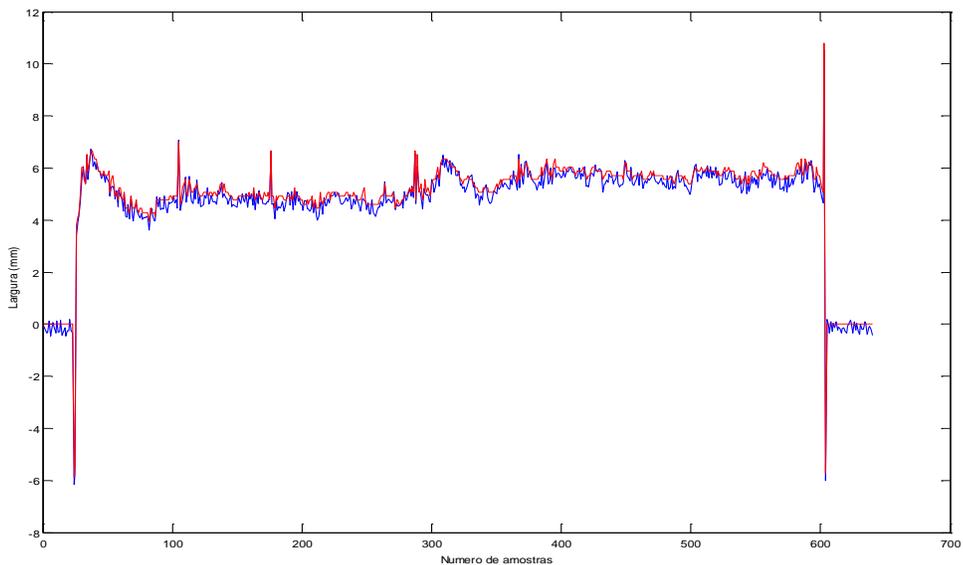


Figura 5.37: Comparação das amostras adquiridas pelo sistema de visão com as adquiridas com o *scanner* com uma largura de 6 mm e 5 mm.

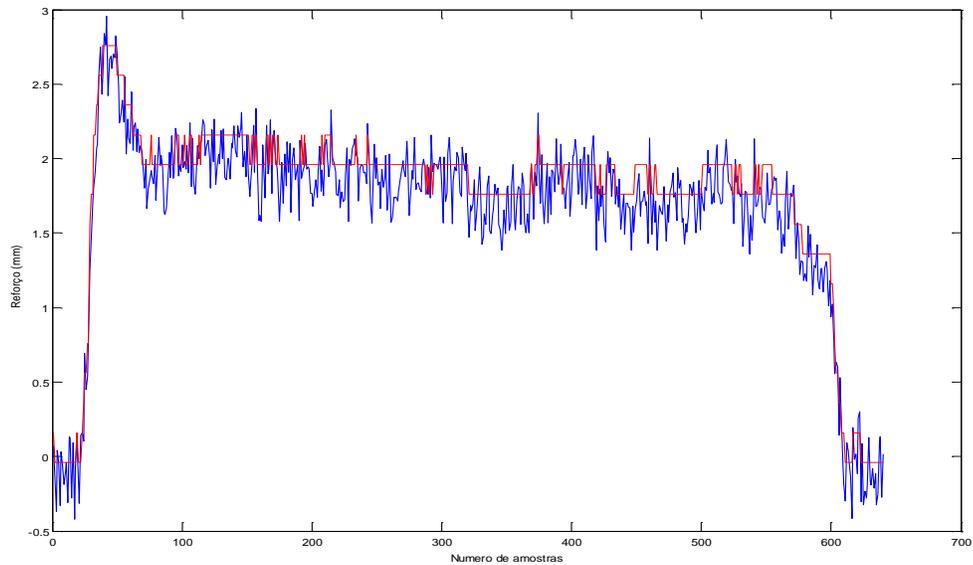


Figura 5.38: Comparação das amostras adquiridas pelo sistema de visão com as adquiridas com o *scanner* com um reforço de 2 mm.

Nas Figuras 5.39 e 5.40, a seguir, apresentam-se exemplos de sinais adquiridos durante diferentes etapas de controle. Neste caso, são apresentadas as ações de controle realizadas no cordão final obtido na velocidade de soldagem e na velocidade de alimentação do arame.

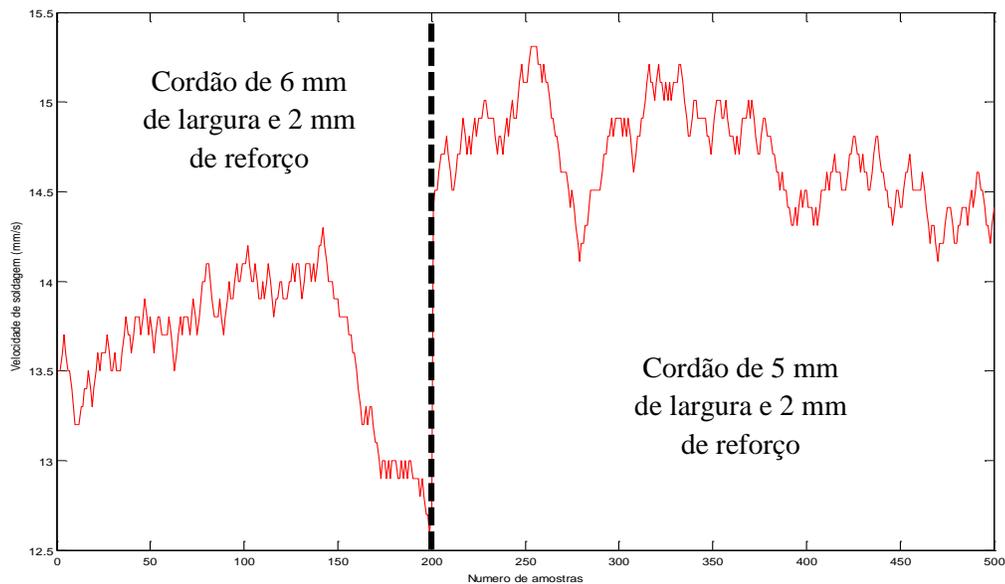


Figura 5.39: Ações de controle na velocidade de soldagem para o cordão com uma largura de 6 mm e o reforço de 2 mm, e uma largura de 5 mm e um reforço de 2 mm.

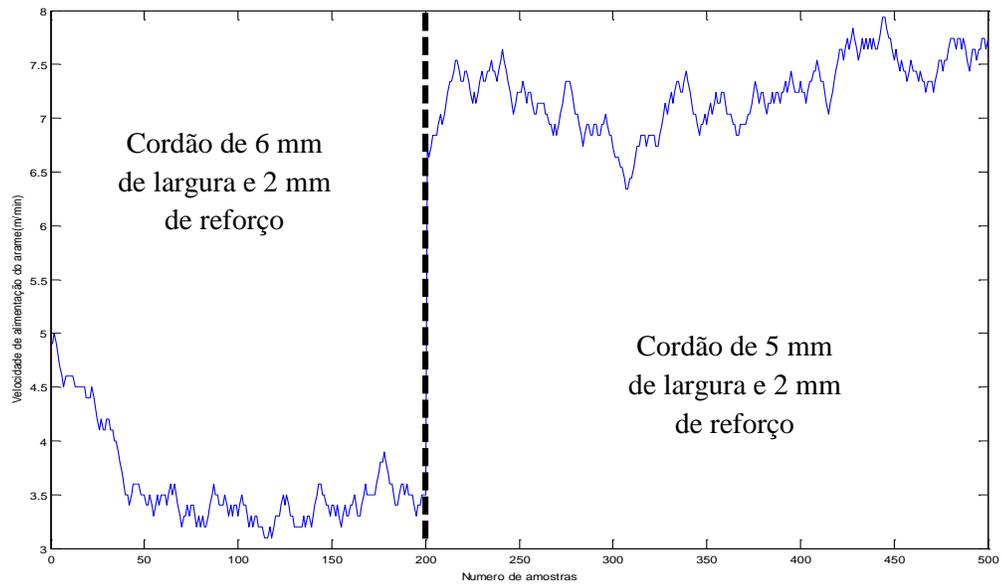


Figura 5.40: Ações de controle na velocidade de alimentação do arame para o cordão com com uma largura de 6 mm e o reforço de 2 mm, e uma largura de 5 mm e um reforço de 2 mm.

## 6 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O presente estudo teve por objetivo desenvolver e embarcar em uma FPGA (*Field-Programmable Gate Arrays*) a modelagem dos parâmetros de soldagem no processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), com base na largura e o reforço do cordão de solda, a partir de modelos de superfície de resposta e, assim, desenvolver técnicas de controle através de processamento de imagens digitais e regras de controle, visando garantir cordões de boa aparência e qualidade.

O desenvolvimento de sistemas em dispositivos embarcados visa produzir equipamentos com menor custo, menor consumo de energia, menor espaço necessário e maior flexibilidade do sistema. Em alguns casos, desenvolvem-se sistemas em dispositivos embarcados devido à necessidade de processamento em tempo real. Neste ínterim, na presente pesquisa buscou-se investigar o desenvolvimento em dispositivos com base em FPGA – um tipo de circuito lógico reprogramável. No entanto, outras arquiteturas podem também ser investigadas, como, por exemplo, os processadores digitais de sinais e a arquitetura ARM (*Advanced Risc Machine*), entre outras.

O primeiro passo para a consecução dos objetivos propostos envolveu a montagem de um sistema experimental complexo, composto por um equipamento de soldagem, um sistema de aquisição de imagens, um sistema para aquisição dos sinais elétricos, uma FPGA, uma mesa de movimentação linear e um sistema de comunicação da FPGA com a fonte de soldagem para o controle dos parâmetros em tempo real. A integração de tais elementos constituiu-se em um trabalho árduo, devido à grande quantidade de elementos necessários para serem ajustados, a fim de trabalharem simultaneamente, de modo a realizar experimentos de soldagem.

Decidiu-se trabalhar com a modelagem da largura do cordão de solda através modelos de resposta de superfície dos valores médios das características geométricas, em conformidade com os resultados encontrados em referencial bibliográfico. Os modelos lograram prever os parâmetros do processo em função de uma largura e o reforço desejados, com a ajuda dos modelos de desvio padrão e o modelo de energia de soldagem. Com base em experiência prévia, revisão bibliográfica e experimentação, determinaram-se os parâmetros mais influentes, além da respectiva faixa de valores para as diferentes provas que seriam realizadas.

Os parâmetros de soldagem selecionados foram: velocidade de alimentação do arame e tensão e velocidade de soldagem, os quais influem no tamanho e na forma do cordão, além de seu comportamento mecânico e metalúrgico. Mantiveram-se constantes o fluxo de gás de proteção (15 Lt/min) e, do mesmo modo, o *Stick Out* ou extensão livre do eletrodo (15 mm) e o ângulo de trabalho (90°).

A fim de realizar o planejamento experimental e otimizar os parâmetros de solda na largura e o reforço do cordão, tomou-se como guia o Planejamento Composto Central. Este tipo de desenho propõe os experimentos mais adequados para conhecer simultaneamente que efeito têm as variáveis de soldagem sobre a largura do cordão, valorizando a interação entre os mesmos. Neste sentido, 20 pontos de trabalho foram testados dentro de uma região de estudo adequada. As respostas dos processos foram medidas através de um sistema de *scanner*, onde foi possível a formulação da medida média das características geométricas, além de seu desvio padrão, estabelecendo-se, assim, as variáveis de entrada e saída dos modelos.

Uma das novidades obtidas a partir da investigação aqui desenvolvida foi a predição de parâmetros de solda adequados para uma largura e reforço determinados. Em grande parte dos trabalhos investigados, fizeram-se ênfases na predição da geometria do cordão de solda com base nos parâmetros do processo.

Nas Figuras 5.28 e 5.32 foi possível observar como, a partir de uma largura e reforço predeterminados, os modelos logram predizer os parâmetros adequados de soldagem. Assim, determinou-se que os modelos desenvolvidos para a predição dos parâmetros de soldagem, a partir da largura e reforço do cordão de solda, apresentam resultados satisfatórios.

Apesar de obter os parâmetros ótimos para uma determinada largura, sempre existe a possibilidade de que se apresentem defeitos durante a solda, dado que tal processo é não linear e influenciado por muitos parâmetros. Neste sentido, na presente investigação, com o objetivo de obter uma largura e o reforço estável ao longo de todo o cordão, se estabeleceu um sistema de controle em malha fechada.

Foram testadas várias técnicas para a captura das imagens, entre elas, a técnica de triangulação laser e a utilização unicamente de polarizadores com o objetivo de diminuir a luz do arco e realizar a medida das características geométricas. Porém, com a utilização destas técnicas, não

foi possível realizar as medidas. Com a técnica aqui proposta logrou-se obter as imagens adequadas para a aplicação, realizando a visualização da imagem no espectro infravermelho.

Um sistema de processamento digital de imagens foi desenvolvido estruturado em etapas, denominadas Aquisição, Processamento e Armazenamento dos resultados. A entrada do sistema é a largura e o reforço desejados e, a partir dos dados, o sistema de aquisição dá início à captura e saída de um conjunto de arquivos contendo o resultado do processamento da imagem de entrada. O *software* desenvolvido foi escrito na linguagem C, fazendo uso, inicialmente, do ambiente de desenvolvimento MATLAB e, posteriormente, adaptado para o Altera Nios II Embedded Design Suite e a linguagem verilog.

Das imagens adquiridas foi possível notar que os filtros infravermelhos, os polarizadores e o *zoom* foram capazes de atenuar o brilho do arco, logrando-se identificar a poça de fusão e o cordão de solda. Ademais, com ajuda dos espelhos lograram-se obter a largura e o reforço na mesma imagem. Os resultados apontam que o processamento e a aquisição das imagens são adequados, tomando realmente a medida onde se encontra a largura e o reforço do cordão. A taxa de amostragem atingida foi de aproximadamente 30 imagens por segundo.

A ação de controle se deu sobre a velocidade de soldagem, no caso da largura, e a velocidade de alimentação, no caso do reforço, segundo as pesquisas efetivadas em revisão bibliográfica, e os resultados obtidos nos modelos de resposta de superfície. Analisando os cordões obtidos, é possível concluir que ao exercer uma ação de regulação sobre estes parâmetros, se logre realizar o controle da largura e do reforço do cordão de solda.

As variáveis de controle são determinadas para agir na forma de um operário soldador, aumentando ou diminuindo o valor das variáveis de controle na porcentagem apropriada, conforme o erro apresentado entre o sinal monitorado e os valores de referência de cada parâmetro geométrico. Tal controlador é um sistema especialista com base em regras de produção, monitorando e controlando a largura e o reforço. Na presente pesquisa, cada ciclo de controle pode empregar uma mudança de 0.1 mm/s para a velocidade de soldagem e de 0,1 m/min para a velocidade de alimentação do arame em cada ciclo. Por outro lado, as taxas de variação dos parâmetros geométricos dependem principalmente dos materiais e consumíveis utilizados nos experimentos, onde uma generalização com mudanças máximas das variáveis

de controle de uma unidade e tempos de reação correspondentes com o tempo de reação humano permitem taxas de variação apropriadas nos parâmetros geométricos dos cordões de solda, favorecendo a estabilidade dos parâmetros no processo de controle.

Nas Figuras 5.33 e 5.37 têm-se as amostras obtidas das soldas com a ação de controle. Realizou-se ainda uma inspeção visual com o objetivo de avaliar a qualidade das mesmas. Conforme o exposto, vale destacar que os cordões de solda não apresentam defeitos, tais como: falta de fusão, acumulação lateral do material de aporte, porosidades, mordeduras ou respingos. Tais aspectos podem ser atribuídos a um adequado controle e uma boa seleção dos parâmetros operacionais.

O sistema desenvolvido em FPGA para a predição dos parâmetros de soldagem a partir da largura e o reforço desejados, bem como seu controle em tempo real, apresentou resultados satisfatórios. O nível de precisão obtido com o uso do sistema de controle tem seu destaque na Tabela 6.1, a seguir, o qual é aceitável para as aplicações industriais mais comuns, tendo em vista a precisão das medições e a natureza aleatória da deposição de material em um processo de soldagem, onde  $L$  é a largura desejada em milímetros,  $Lr$  é a largura real em milímetros,  $R$  é o reforço desejado em milímetros e  $Rr$  é o reforço real em milímetros.

Tabela 6.1: Nível de precisão obtido com o uso do sistema de controle.

$L$	Largura			$R$	Refoço		
	$Lr$	$ L - Lr $	$Erro \%$		$Rr$	$ R - Rr $	$Erro \%$
5	4,95	0,05	1,01	3	2,93	0,07	2,38
7	7,18	0,18	2,5	3	2,96	0,04	1,35
5	5,04	0,04	0,79	2	2,08	0,08	3,85
6	5,85	0,15	2,56	2	1,86	0,14	7,5

Para o cálculo de percentagem de erro, fez-se uso da Equação 6.1, a seguir.

$$\frac{Lr - L}{Lr} * 100\% \quad \frac{Rr - R}{Rr} * 100\% \quad (6.1)$$

## 7 - CONCLUSÕES

- Lougro-se tornar as fontes de soldagem inteligentes, disponibilizando-lhes monitoramento e controle *online* das características geométricas do cordão de solda no processo GMAW. Desenvolvendo um sistema embarcado que, permite modelar e controlar os parâmetros geométricos externos dos cordões de solda.
- O procedimento para a modelagem aqui desenvolvido é de grande valia como forma metodológica para a obtenção dos parâmetros em prol da largura e o reforço do cordão desejados. Foram encontrados os valores para a tensão, a velocidade de alimentação do arame e a velocidade de soldagem, que otimizam as respostas, ou seja, soldas de boa aparência e qualidade. Neste sentido, é possível afirmar que a modelagem prediz adequadamente os parâmetros do processo para uma largura e um reforço do cordão de solda.
- Os modelos desenvolvidos para prever as variáveis de entrada em função das características geométricas desejadas do cordão de solda são adequados, devido ao pequeno desvio obtido para cada caso. Ao analisar as medidas obtidas dos parâmetros geométricos, foi possível perceber que os cordões obtidos, considerando os desvios padrões dos três parâmetros geométricos, apresentam uniformidade nos três parâmetros geométricos externos.
- Logrou-se a comunicação do processo de soldagem com a FPGA (*Field-Programmable Gate Arrays*), fazendo uso do sistema de acondicionamento de sinais e a interface de comunicação, culminando no envio dos parâmetros para a fonte de soldagem e a mesa linear em tempo real.
- Foi desenvolvida a plataforma de *hardware* (assim como o *software* que, essencialmente, configura alguns dos IP cores implementados na lógica programável) que permitem a captura de imagens e o controle do processo. Foram executados alguns testes, em ambiente de simulação, que apresentaram os resultados satisfatórios. O

sistema desenvolvido apresenta vantagens na redução de custos, tanto em termos directamente monetários, como os custos com equipamento, assim como em termos de tempo de desenvolvimento, uma vez que se trata de uma solução flexível, que permite ir sendo adaptada.

- Um sistema de aquisição e captura de imagens foi desenvolvido para medir a largura e o reforço do cordão de solda no processo de soldagem por GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) em tempo real. A forte interferência de luz de arco, transferência de metal, os respingos e outras fontes no processo, foram reduzidas de modo eficiente, conforme o sistema de filtros e polarizadores, além do processamento e filtragem adequados. As imagens obtidas permitem identificar a largura e o reforço do cordão. O referido sistema demonstrou ser eficaz, viável, de baixo custo e adaptável em aplicações industriais e para fins de investigação.
- Conclui-se que as regras de produção utilizadas no controlador não representam um modelo matemático do processo, mas tem a faculdade de aumentar ou diminuir o valor das variáveis de controle na porcentagem adequada, de acordo com o erro entre o sinal monitorado e os valores de referência de cada parâmetro geométrico.

## 8 – TRABALHOS FUTUROS

- Estudar a técnica para medir as características geométricas fora da posição plana e as novas metodologias que podem ser implementadas nestes casos para realizar a medição, além de que possam ser embarcados na FPGA.
- Estudar novas metodologias para realizar a calibração do sistema sem empregar papel milimétrico, ou com objetos de valores conhecidos como base.
- Outros tipos de parâmetros de soldagem podem ser escolhidos como parâmetros de entrada do modelo, variando-se, por exemplo, o *stickout*, o fluxo de gás, a espessura de chapa etc., a fim de aperfeiçoar a metodologia aqui proposta.
- Aplicação da referida metodologia para a modelagem e controle em sistemas reconfiguráveis das características geométricas do cordão de solda pode se dar em outros processos de soldagem, como, por exemplo, o GTAW.
- Realizar a modelagem e o controle das características geométricas do cordão de solda como o reforço, a largura e a área depositada, controlando os parâmetros como a velocidade de alimentação do arame, velocidade de soldagem e tensão.
- Realizar a estimação da penetração e implementar na FPGA

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abhay, M., Sharmab, G., e Madhusudhan, R (2018). “Process parameters-weld bead geometry interactions and their influence on mechanical properties: A case of dissimilar aluminium alloy electron beam welds”. *Defence Technology*. Volume 14, Issue 2, April 2018, Pages 137-150
- Absi, S (2012). “Sensors for quality control in welding”. *Soldagem & Inspeção*. Volume: 17, Issue: 3, Pages: 192-200. ISSN: 0104-9224.
- Absi, S., e Caribé, G.(2003). “Monitoração da Poça de Fusão”. *Soldagem & Inspeção*, No.1, pages 23-29. Março 2003.
- Abdulkareem S. Aloraier, Suraj Joshi. Residual stresses in flux cored arc welding process in bead-on-plate specimens. *Materials Science and Engineering A* (2012). Volume: 534, Pages: 13-21. ISSN: 09215093.
- Akbari, M., Saedodin, S., Toghraie, D., Shoja, R., Kowsari, F (2014). “Experimental and numerical investigation of temperature distribution and melt pool geometry during pulsed laser welding of Ti6Al4V alloy”. *Optics & Laser Technology*. Volume: 59, Publisher: Elsevier, Pages: 52-59. ISSN: 00303992.
- Al-faruk, A., Hasib, A., Ahmed, N., Das, U (2010). “Prediction of Weld Bead Geometry and Penetration in Electric Arc Welding using Artificial Neural Networks”. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS* Vol:10 No:04. ISSN 105004-3232.
- Almeida, H. (2004). “Otimização e comparação de modelos matemáticos para as características geométricas de soldas GMAW e FCAW”. Monografia. Centro Federal de Educação tecnológica do Pará, Coordenação de Mecânica.

- Amit, R, Chakraborty, S, Sarathi, G., Dipankar, Bose. (2018). “Study Of Parametric Effects On Mechanical Properties Of Stainless Steel (AISI 304) And Medium Carbon Steel (45C8) Welded Joint Using GMAW”. *Materials today proceedings* Volume 5, Issue 5, Part 2, 2018, Pages 12384–12393
- Arif, N., e Chung, H (2014). “Alternating current-gas metal arc welding for application to thin sheets”. *Journal of Materials Processing Technology*. Volume: 214, Issue: 9, Publisher: Elsevier BV, Pages: 1828-1837. ISSN: 09240136.
- Arivarasu, M., Ramkumar, D., e Arivazhagan, N (2014). “Comparative Studies of High and Low Frequency Pulsing on the Aspect Ratio of Weld Bead in Gas Tungsten Arc Welded AISI 304L Plates”. *Procedia Engineering*. Volume: 97, Pages: 871-880. ISSN: 18777058.
- Ates, H (2007). “Prediction of gas metal arc welding parameters based on artificial neural networks”. *Materials and Design* 2015–2023. ISSN: 0261-3069.
- AWS. (1987). “Welding Handbook”. *Welding Technology*. 8a. edition. Volume 1.
- AWS. (2001). “Welding Handbook”. *American Welding Society*. Vol. 1, 9th edition.
- Bappa Acherjee, Subrata Mondal, Bipan Tudu, Dipten Misra. Application of artificial neural network for predicting weld quality in laser transmission welding of thermoplastics. *Applied Soft Computing Journal* (2011).Volume: 11, Issue: 2, Pages: 2548-2555. ISSN: 15684946.
- Baskoro, A., Winarto, E (2011). “Monitoring of molten pool image during pipe welding in gas metal arc welding (GMAW) using machine vision”. *2011 International Conference on Advanced Computer Science and Information Systems*. Publisher: IEEE, Pages: 381-384. ISBN: 978-979-1421-12-6.

- Bazargan-Lari, Y., Eghtesad, M., e Assadsangabi, B. (2008). “Study of internal dynamics stability and regulation of globular- Spray mode of GMAW process via MIMO feedback-linearization scheme”. 12th International Conference on Intelligent Engineering Systems – Proceedings. Pages: 31-36. ISBN: 9781424420834
- Bera, M., Bandyopadhyay, A., Paul, K (2013). “Robust Nonlinear Control of GMAW Systems-A Higher Order Sliding Mode Approach”. Systems and Control Engineering IIT Bombay Mumbai 400076. 2013 IEEE. DOI: 978-1-4673-4569-9.
- Bingul, Z e Cook, G (2006). “A real-time prediction model of electrode extension for GMAW”. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. Volume: 11, Issue: 1, Pages: 47-54. ISSN: 10834435.
- Caruso, D., e Tropea, S.(2010). “Controlador tipo pid, sobre microcontrolador embebido em fpga”. Congreso de Microelectrónica Aplicada.
- Campos, P. (2005). “Caracterização mecânica e microestrutural de juntas soldadas pelos processos MIG/MAG e Arame Tubular”. p.p 61. Dissertação de mestrado. PUC do Paraná, Curitiba, Brazil.
- Casey, P (2009). “Real-Time Estimation of MIG Welding Weld Bead Width using an IR Camera”. The university of texas at Austin, August. Thesis master of science in engineering.
- Cayo Eber Huanca. Modelagem e Controle da Soldagem Orbital Através do Processo GMAW-S. Brasília, 2013. Tese (Doutorado em Sistemas Mecatrônicos) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, 2013.
- Chan, Y., Moallem, M., Wang, W. (2004). “Implementation of pid control algorithm using fpga technology”. In Decision and Control. CDC. 43<sup>rd</sup> IEEE Conference on, volume 5, pages 4885\_4890. IEEE.

- Chen, S., Wu, J (2007). "A survey on intelligentized technologies for visual information acquirement, modeling and control of arc welding pool dynamics". ECON Proceedings (Industrial Electronics Conference). Pages: 781-785. ISSN: 1553-572X.
- Costa, D., e Scotti, A (2017). "Using either Mean or RMS values to represent current in modeling of arc welding bead geometries". Journal of Materials Processing Technology. Volume 240, February 2017, Pages 382-387
- Cronje, M. (2005). "Finite Element Modelling of Shielded Metal Arc Welding Master of Science in Mechanical Engineering". Thesis presented at the University of Stellenbosch in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering. Department of Mechanical Engineering Stellenbosch University Private Bag X1, 7602 Matieland, South Africa.
- Dorta, M., Vidal, J., Mateo, A., Fargas, G. e Camejo, F. (2011). "Modelos empíricos para la predicción de la geometría del cordón en soldaduras a tope de un acero inoxidable dúplex 2205". Dyna, vol. 78, núm. 169, 2011, pp. 206-215.
- Doumanidis, C, Kwak, Y (2002). "Multivariable adaptive control of the bead profile geometry in gas metal arc welding with thermal scanning". International Journal of Pressure Vessels and Piping, vol. 79, no. 4, 251s-262s, April 2002.
- Dutta, P., e Kumar, D (2007). "Modeling of TIG welding process using conventional regression analysis and neural network-based approaches". Journal of Materials Processing Technology. Volume: 184, Issue: 1-3, Pages: 56-68. ISSN: 09240136.
- Esme, U., Bayramoglu, M., Kazancoglu, Y., e Ozgun, S. (2011). "Optimization of weld bead geometry in TIG welding process using grey relation analysis and taguchi method". Proceedings of Materials and technology Vol. 43, p. 143-149.

- Franco, A., Romoli, L., Musacchio, A (2014). “Modelling for predicting seam geometry in laser beam welding of stainless steel”. International Journal of Thermal Sciences (2014). Volume: 79, Pages: 194-205. ISSN: 12900729.
- Fakhrulddin, H., Ali, H., e Sinan, M. (2010). “Labview fpga implementation of a pid controller for dc motor speed control”. In Energy, Power and Control (EPC-IQ), 1st International Conference on, pages 139\_144.
- Fortes, C. (2004). “Soldagem MIG / MAG – traduzido e adaptado”. ESAB.
- Ganjigatti, J, Pratihari, D., Choudhury, A (2007). “Global versus cluster-wise regression analyses for prediction of bead geometry in MIG welding process”. Journal of Materials Processing Technology. Volume: 189, Issue: 1-3, Pages: 352-366. ISSN: 09240136.
- Ganjigatti, J., Pratihari, D., Roychoudhury, A (2006). “Modeling of the MIG welding process using statistical approaches”. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Volume: 35, Issue: 11-12, Pages: 1166-1190. ISSN: 0268-3768.
- Gao, D., Ding, T., Bai, S (2011). “Weld-pool image centroid algorithm for seam-tracking vision model in arc-welding process”. IET Image Processing. Volume: 5, Issue: 5, Pages: 410. ISSN: 17519659.
- Gateau, G., Regnier, J., e Llor, A. (2010). “Vhdl code generation for fpga implementation of digital control with co-simulation step. In Industrial Technology (ICIT)”. IEEE International Conference on, pages 850\_855.
- Gautam, U., e Abbas, M (2013). “Analysis of weld bead geometry in saw”. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research 2013. ISSN 2278 – 0149 Vol. 2, No. 3, July 2013.

- Ghalib, T., Mohamad, Y., Sunhaji, K., Yupiter, H. and Bukhari, A. (2012). “Predicting the GMAW 3F T-Fillet Geometry and Its Welding Parameter”. International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors.
- Ghalib Tham, Mohamad Yazman Yaakub, Sunhaji Kiyai Abas, Yupiter H.P. Manurung, Bukhari Abu Jalil. Predicting the GMAW 3F T-Fillet Geometry and Its Welding Parameter. *Procedia Engineering* (2012). Volume: 41, Pages: 1794-1799. ISSN: 18777058.
- Golob, M., Koves, A., Puklavec, A. e Tovornik, B. (2002). “Modelling, simulation and fuzzy control of the gmaw welding process”. 15th triennial Word Congress, Barcelona, Spain.
- Gomes, J., Costa, S., Paiva, A. e Balestrassi, P. (2012). “Mathematical modeling of weld bead geometry, quality and productivity for stainless steel claddings deposited by FCAW”. *Journal of Materials Engineering and Performance*, volume 21, Issue 9, p.p 1862-1872.
- Gomes, J., Paiva, P., Costa, S., Balestrassi, P., e Paiva, E (2013). “Weighted Multivariate Mean Square Error for processes optimization: A case study on flux-cored arc welding for stainless steel claddings”. *European Journal of Operational Research*. Volume: 226, Issue: 3, Pages: 522-535. ISSN: 03772217.
- González, E., Loredó, A., Pazos, F (2005). “An optimal path-tracking algorithm for unstructured environments based on uncalibrated vision”. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Volume: 2005, Pages: 2547-2552. ISSN: 10504729.
- Guimarães, P. (2012). “Influência dos parâmetros de soldagem GMAW e GMAWCW sobre a diluição e relação reforço/largura em revestimentos”. Universidade federal do Pará, instituto de tecnologia programa de pós-graduação em engenharia mecânica. Belém, Pará.

- Hamblen, J.; Furman, M. (2001) "Rapid Prototyping of Digital Systems". Kluwer Academic Publishers. Boston, USA.
- Hamblen, J., Hall, T. e Furman M. (2011). ". Rapid prototyping of digital, systems". Springer, 2006.
- Hartley, R., e Zisserman, A (2004). "Multiple View Geometry in Computer Vision". Cambridge University Press.
- Hong, S., e Yu Z (2007). "Three-dimensional reconstruction of specular surface for a gas tungsten arc weld pool". Measurement Science and Technology. Volume: 18, Issue: 12, Pages: 3751-3767 ISSN: 0957-0233.
- Houghton, M., James, J., e Lucas, W (2007). "Vision Systems for Monitoring and Control of Arc Welding Operations". Soldagem Insp. São Paulo, Vol. 12, No. 4, p.293-299, Out/Dez.
- Huang, J., Lu, L., Shao, L., Shi, Y., Fan D (2011). "Monitoring of pulsed MIG welding process of aluminum alloy based on the LabVIEW real-time vision". Proceedings of the 30th Chinese Control Conference. Publisher: IEEE, Pages: 4457-4460. ISSN: 1934-1768.
- Hutton, M. et al. (2006). "A methodology for FPGA to structured-ASIC synthesis and verification". In: Proc. International Conference of Design, Automation and Test in Europe. Munich, Germany: IEEE, 2006. p. 64-69.
- J. E R Dhas, S. Kumanan Optimization of parameters of submerged arc weld using non conventional techniques. Applied Soft Computing Journal (2011). Volume: 11, Issue: 8, Pages: 5198-5204. ISSN: 15684946.

- Kang, M., Kim, J., Park, Y., e Woo, G (2007). “Laser vision system for automatic seam tracking of stainless steel pipe welding machine”. ICCAS 2007 - International Conference on Control, Automation and Systems. Pages: 1046-1051. ISBN: 8995003871.
- Karadeniz, E., Ozsara, U. e Yildiz, C. (2007). “The effect of process parameters on penetration in gas metal arc welding processes”. *Materials and Design* 28, p.p 649–656.
- Khanna, P.,e Maheshwari, S (2018). “Development of Mathematical Models for Prediction and Control of Weld Bead Dimensions in MIG Welding of Stainless Steel 409M”. *Journal for Materials Today: Proceedings*. Volume 5, Issue 2, Part 1, 2018, Pages 4475-4488
- Kim, C., Choi, T., Lee, J., Sun, J., Park, K., Kang, H (2008). “Development of welding profile sensor and its application”. ICSMA 2008 - International Conference on Smart Manufacturing Application. Pages: 24-29. ISBN: 899500388X.
- Kim, I., Son, J., Kim, I., Kim, J. e Kim, O. (2003). “A study on relationship between process variables and bead penetration for robotic CO2 arc welding”. *Journal of Materials Processing Technology* 136, p.p 139–145.
- Kim, I., Kim, J., Thao, D. e Jeong, J. (2008). “Predicting Lap-Joint bead geometry in GMA welding process”. *Archives of Materials Science and Engineering*, 32,121-124.
- Kim, I., Son, J., Park, C., Lee, C, Prasad, Y (2002). “A study on prediction of bead height in robotic arc welding using a neural network”. *Journal of Materials Processing Technology*. Volume: 130-131, Pages: 229-234. ISSN: 09240136.
- Kim, S., Son, J., Lee, S (2004). “Optimal design of neural networks for control in robotic arc welding”. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. Volume: 20, Issue: 1, Pages: 57-63. ISSN: 07365845.

- Kolahan, F., e Heidari, M (2010). “Modeling and optimization of MAG welding for gas pipelines using regression analysis and simulated annealing algorithm”. *Journal of Scientific & Industrial Research* Vol. 69, April 2010, pp. 177-183.
- Lenin, N., Sivakumar, M., Vigneshkumar, D. Thammasat (2010). *Int. J. Sc. Tech.*, Vol. 15, No. 3, July-September 2010.
- Li, Y., Li, Y., Wang, Q., Xu, D., Tan, M (2010). “Measurement and defect detection of the weld bead based on online vision inspection”. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. Volume: 59, Issue: 7, Pages: 1841-1849. ISSN: 00189456.
- Liao, G., e Xi, J (2009). “Image processing technology for pipe weld visual inspection”. *WASE International Conference on Information Engineering, ICIE 2009*. Volume: 1, Pages: 173-176. ISBN: 9780769536798.
- Lima, E.,Carvalho, C., Queiroz, A., Montenegro M.(2005). “Determinação da Relação Entre Parâmetros de Soldagem, Largura da Poça e Aspectos do Cordão de Solda Utilizando Câmera de Alta Velocidade”. Trabalho baseado em versão apresentada no 3º COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação de 12 a 15 de abril de 2005.
- Li, S., Chen, G., Katayama, G., Zhang, Y (2014). “Relationship between spatter formation and dynamic molten pool during high-power deep-penetration laser welding”. *Applied Surface Science*. ISSN: 01694332.
- Liu, J., Zhun, F., Olsen, S., Kim, H., Kristensen, J (2011). “Weld pool visual sensing without external illumination”. *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*. Pages: 145-150. ISSN: 21618070.

- Liu, Y., Zhang, Y (2013). “Adaptive Modeling of the Weld Pool Geometry in Gas Tungsten Arc Welding”. Institute for Sustainable Manufacturing and Department of Electrical Engineering University of Kentucky, Lexington, KY 40506. Pages: 550-555.
- Liu, X., Wang, G., Shi, Y (2006). “Image processing of welding seam based on single-stripe laser vision system”. Proceedings - ISDA 2006: Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications. Volume: 2, Pages: 463-470. ISSN: 0253360X.
- Lopera, J. E. P. (2010). “Modelagem Empírica da Transferência Goticular Projetada em Processos de Soldagem GMAW Baseada em Técnicas de Processamento de Imagens Digitais e Superfícies de Resposta”. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.DM-39A/10, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 135p.
- Lopera, J. E. P. (2016). Uso de Agentes Inteligentes no Controle Simultâneo da Largura e do Reforço dos Cordões de Solda no Processo GMAW-S. Tese de Doutorado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.TD/16, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 159p.
- Luo, H., Zeng, H., Hu, L., Hu, X., e Zhou, E (2005). “Application of artificial neural network in laser welding defect diagnosis”. Journal of Materials Processing Technology. Volume: 170, Issue: 1-2, Pages: 403-411. ISSN: 09240136.
- Ma, X., e Zhang, Y (2011). “Gas Metal Arc Weld Pool Surface Imaging: Modeling and Processing”. Welding Journal. Volume: 90, Issue: 5, Pages: 85s-94s. ISSN: 00432296.
- Mainak, S., Mukherjee, M., Kumar, S., Singh, T., e Kumar, P (2018). “Effect of double-pulsed gas metal arc welding (DP-GMAW) process variables on microstructural constituents and hardness of low carbon steel weld deposits”. Journal of Manufacturing Processes. Volume 31, January 2018, Pages 424-439

- Manikya K., e Srinivasa R (2008). “Prediction of bead geometry in pulsed GMA welding using back propagation neural network”. Journal of Materials Processing Technology. Volume: 200, Issue: 1-3, Pages: 300-305. ISSN: 09240136.
- Manish, M., Subbaraman, S., e Nilkund, P. (2010). “Iec control specication to hdl synthesis: Considerations for implementing plc on fpga and scope for research”. In Control Automation and Systems (ICCAS), International Conference on, pages 2170\_2174. IEEE, 2010.
- Meshram, S., Pohokar, N (2013). “Optimization of Process Parameters of Gas Metal Arc Welding to Improve Quality of Weld Bead Geometry”. International Journal of Engineering, Business and Enterprise Applications (IJEBEA). Pages: 46-52. ISSN: 22790020.
- Miao, Y., Xu, X., Wu, B., Li, X., e Han, D (2014). “Effects of bypass current on the stability of weld pool during double sided arc welding”. Journal of Materials Processing Technology. Volume: 214, Issue: 8, Pages: 1590-1596. ISSN: 09240136.
- Modenesi, P. (2001). “Introdução a Física do Arco”. 1.ed. Belo Horizonte - Brasil, Editora UFMG 53 p.
- Modenesi, P. (2005). “Introdução à física do arco elétrico”. UFMG, Belo Horizonte, Janeiro.
- Modenesi, P. (2009). “Introdução à Física do Arco Elétrico e sua aplicação na Soldagem dos Metais”. UFMG, Belo Horizonte, p.p 153.
- Modenesi, P., Marques, P. e Santos, D. (2012). “Introdução à Metalurgia da Soldagem”. Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais Belo Horizonte.
- Moreira, A., Gallego, J., Tokimatsu, R., e Yamakaki, W. (2006). “A caracterização de revestimentos soldados com arame tubular”. Proceedings of Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 17, Foz do Iguaçu, p.p 5330-5340.

- Mota, C., Ribeiro, M., Mendes, R., e Vilarinho, L (2013). “Sistema de visão por infravermelho próximo para monitoramento de processos de soldagem a arco”. *Soldagem e Inspecao*. Volume: 18, Issue: 1, Pages: 19-30. ISSN: 01049224.
- Mousavi, M., e Haeri, M (2011). “Welding current and arc voltage control in a GMAW process using ARMarkov based MPC”. *Control Engineering Practice*. Volume: 19, Issue: 12, Pages: 1408-1422. ISSN: 09670661.
- Mousavi, M., Mohammad, H (2012). “A new method to control heat and mass transfer to work piece in a GMAW process”. *Journal of Process Control*. Volume: 22, Issue: 6, Pages: 1087-1102. ISSN: 09591524.
- Murray, P. (2002). “Selecting parameters for GMAW using dimensional analysis”. *Welding Journal*. Pages: 125-131. ISSN: 00432296.
- Murugan, N.e Gunaraj, V (2005). “Prediction and control of weld bead geometry and shape relationships in submerged arc welding of pipes”. *Journal of Materials Processing Technology*. Volume: 168, Issue: 3, Pages: 478-487. ISSN: 09240136.
- Nadine, D., Huebner, M., e Becker, J. (2011). “Approach of an fpga based adaptive stepper motor control system. In Reconfigurable Communication-centric Systems-on-Chip (ReCoSoC)”. 6th International Workshop on, pages 1\_6. IEEE.
- Nagesh, D., e Datta, G (2002). “Prediction of weld bead geometry and penetration in shielded metal-arc welding using artificial neural networks”. *Journal of Materials Processing Technology*. Volume: 123, Issue: 2, Pages: 303-312. ISSN: 09240136.
- Nouri, M., Abdollah-zadeh, A., Malek, F. (2007). “Effect of welding parameters on dilution and weld bead geometry in cladding”. *Journal of Materials Science and Technology*. Volume: 23, Issue: 6, Pages: 817–822 ISSN: 10050302.

- Pal, S., Malviya, S., Pal, K., Samantaray, A (2009). “Optimization of quality characteristics parameters in a pulsed metal inert gas welding process using grey-based Taguchi method”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Volume: 44, Issue: 11-12, Pages: 1250-1260. ISSN: 02683768.
- Palani, P e Murugan, N (2007). “Optimization of weld bead geometry for stainless steel claddings deposited by FCAW”. *Journal of Materials Processing Technology*. Volume: 190, Issue: 1-3, Pages: 291-299. ISSN: 09240136.
- Pardo, F., e Boluda, J. (2011). “VHDL: lenguaje para síntesis y modelado de circuitos”. Editorial Ra-ma.
- Pires. I., Quintino, L., Miranda, R. (2007). “Analysis of the influence of shielding gas mixtures on the gas metal arc welding metal transfer modes and fume formation rate”. *Materials and Design*. P. 1623-1631.
- Planckaert, J.P., Djermoune, E., Brie, D., Briand, F. e Richard, F. (2010). “Modeling of MIG/MAG welding with experimental validation using an active contour algorithm applied on high speed movies”. *Applied Mathematical Modelling* 3, p.p 1004–1020.
- Podder, S., e Roy, U (2013). “Anfis Based Weld Metal Deposition Prediction System In Mag Welding Using Hybrid Learning Algorithm”. *International Journal of Fuzzy Logic Systems (IJFLS)* Vol.3, No1, January 2013.
- Queiroz, A. (2011). “Estudo da influência dos parâmetros no processo de soldagem GMAW - arco pulsado”. Ufmg pos-graduação em engenharia mecânica, Minas gerais.
- R Sudhakaran. *Effect of Welding Process Parameters on Weld Bead Geometry and Optimization of Process Parameters to Maximize Depth to Width Ratio for Stainless Steel Gas Tungsten Arc Welded Plates Using Genetic Algorithm*. R *European Journal of Scientific Research* (2011). Volume: 62, Issue: 1, Pages: 76-94. ISSN: 1450216X.

- Rakesh Malviya, Dilip Kumar Pratihari. Tuning of neural networks using particle swarm optimization to model MIG welding process. *Swarm and Evolutionary Computation* (2011). Volume: 1, Issue: 4, Pages: 223-235. ISSN: 22106502.
- Ramazani, A., Mukherjee, A., Abdurakhmanov, U., Prah, M., Schleser, U., Reisgen, W.(2014). “Micro–macro-characterisation and modelling of mechanical properties of gas metal arc welded (GMAW) DP600 steel”. *Materials Science and Engineering: A*. Volume: 589, Publisher: Elsevier, Pages: 1-14. ISSN: 09215093.
- Ramos, D., López, I., Perez, P (2013). “Effect of Process Parameters on Robotic GMAW Bead Area Estimation”. *Procedia Technology*. Volume: 7, Publisher: Elsevier B.V., Pages: 398-405. ISSN: 22120173.
- Rao, P., Gupta, O., Murty, S., Rao, B (2009). “Effect of process parameters and mathematical model for the prediction of bead geometry in pulsed GMA welding”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Volume: 45, Issue: 5-6, Pages: 496-505 ISSN: 02683768.
- Ravinder, P., Garg, R., e Dinesh, K (2016). “Mathematical modeling of effect of polarity on weld bead geometry in submerged arc welding”. *Journal of Manufacturing Processes* Volume 21, January 2016, Pages 14-22
- Reis, R., Scotti, A., Norrish, J., e Cuiuri D. (2013). “Investigation on welding arc interruptions in the presence of magnetic fields: Arc length, torch angle and current pulsing frequency influence”. *IEEE Transactions on Plasma Science*. Volume: 41, Issue: 1, Pages: 133-139. ISSN: 0093381.
- Rengifo, A. (2004). “Como obtener el mejor desempeño del equipo en el proceso de soldeo MIG/MAG y efecto de las variables en el proceso de soldadura MIG/MAG”. Instituto de soldadura West – arco. Boletín técnico No 29. p.p 1-8.

- Reza, A., Tipi, D., Kamal, D., Sani, H., e Pariz, N (2015). “Frequency control of the drop detachment in the automatic GMAW process”. *Journal of Materials Processing Tech.* Volume: 216, Publisher: Elsevier B.V., Pages: 248-259. ISSN: 0924-0136.
- Sanatan, C., Abhay, S., Uttam, K., Ryu, K., Komurac, M., e Tanakad, T. (2017). “Mathematical model of complex weld penetration profile: A case of square AC waveform arc welding”. *Journal of Manufacturing Processes* Volume 30, December 2017, Pages 483-491
- Sass, R., e Schmidt, A. (2010). “Embedded Systems Design with Platform FPGAs: Principles and Practices”. Morgan Kaufmann.
- Satheesh, J., Raja, D., Sabarinathan, R., e Kumar, S. (2012). “Modeling and analysis of weld parameters on Micro hardness in SA 516 Gr. 70 steel”. *Procedia Engineering*. Volume: 38, Publisher: Elsevier Ltd, Pages: 4021-4029. ISSN: 18777058. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.06.460.
- Satheesh, M., e Raja, E (2013). “Using fuzzy based desirability function”. *IJST, Transactions of Mechanical Engineering*, Vol. 37, No. M2, pp 175-187 Printed in The Islamic Republic of Iran.
- Sathiya, P., Aravindan, S., Jeyapaul, R., Ajith, P., Haq, N () Optimizing the weld bead characteristics of super austenitic stainless steel ( 904L ) through grey-based Taguchi method. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures* Vol. 6 No. 2, 2010 pp. 206-213. Emerald Group Publishing Limited 1573-6105.
- Scotti, A. e Ponomarev, V. (2008). “Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento, melhor desempenho”. São Paulo, Artliber Editora, p.p 284.

- Scotti, A., e Souza, L.(2012). “Uma metodologia para parametrização do processo MIG/MAG CA”. Soldagem & Inspeção. Volume: 17, Issue: 3, Pages: 271-277. ISSN: 0104-922.
- Sha, D., e Liao, X (2009). Digital control of switch-mode pulsed GMAW welding power. 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Pages: 2746-2749. ISBN: 9781424428939.
- Shahnwaz and M.I.Khan Alam Prediction of Weld Bead Penetration for Steel Using Submerged Arc Welding Process Parameters. International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST) (2011). Volume: 3, Issue: 10, Pages: 7408-7416.
- Sharma, A., Arora, N., Mishra, B (2015). “Mathematical model of bead profile in high deposition welds”. Journal of Materials Processing Tech. Volume: 220, Publisher: Elsevier B.V., Pages: 65-75. ISSN: 0924-0136.
- Shiwei Zuo, Jianping He, Fuxin Wang, Feng Xiang. Modeling and simulating of short-circuiting transferring in GMAW. Proceedings - International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring, CDCIEM 2011 (2011) Pages: 463-466. ISBN: 9780769543505.
- Silva, E., Rubens M., Scotti, A., e Oliveira, J. (2011). “Power quality analysis of gas metal ARC welding process operating under different drop transfer modes”. XI Brazilian Power Electronics Conference. Publisher: IEEE, Pages: 129-135. ISSN: 2175-8603.
- Simões, G. (2012). “Análise da influência dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão de solda por projeto de experimentos fatorial fracionado”. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Rio Grande do sul.
- Singh, V (2013). “An Investigation for Gas Metal Arc Welding optimum Parameters of Mild Steel AISI 1016 using Taguchis Method”. International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) ISSN: 2249 – 8958, Volume-2, Issue-6, August.

- Son, J., Jong-Pyo, L., Min-Ho, P., Byeong, J e Yunb, K (2017). “A Study on On-line Mathematical Model to Control of Bead Width for Arc Welding Process”. *Procedia Engineering* Volume 174, 2017, Pages 68-73.
- Souza, C., e Ferraresi, V.(2013). “Análise comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW com transferência metálica por curto-circuito posição horizontal”. *Soldagem e Inspecao*. Volume: 18, Issue: 3, Pages: 268-280. ISSN: 01049224.
- Sreeraj, P., Kannan, T. e Subhasis, M (2013). “Prediction and control of weld bead geometry in gas metal arc welding process using genetic algorithm”. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)* ISSN 2249-6890 Vol. 3, Issue 1, Mar 2013, 143-154.
- Sreeraj, P., e Kannan, T (2012). “Modelling and prediction of stainless steel clad bead geometry deposited by GMAW using regression and artificial neural network models”. *Advances in Mechanical Engineering*. Volume: 2012. ISSN: 16878132.
- Sreeraj, P., Kannan, T., e Maji, S (2013). “Prediction and optimization of weld bead geometry in gas metal arc welding process using RSM and fmincon”. *Journal of Mechanical Engineering Research*. Vol. 5(8), pp. 154-165, November 2013 ISSN 2141-2383.
- Srinivasa, R., Gupta, O., Murty, S e Koteswara, R (2009). “Effect of process parameters and mathematical model for the prediction of bead geometry in pulsed GMA welding”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Volume 45, Issue 5-6, pp 496-505.
- Starling, C., Modenesi, P., e Donizete T. (2011). “Caracterização do cordão na soldagem FCAW com um arame tubular "Metal cored"”. *Soldagem e Inspecao*. Volume: 16, Issue: 3, Pages: 285-300. ISSN: 01049224.

- Tarek, A., e Ashraf, I. (2008). "A method for on-line identi\_cation and control based on hardware-in-the-loop concept". In Systems, Signals and Devices, IEEE SSD 2008. 5th International Multi-Conference on, pages 1\_6. IEEE.
- Telsang, M., e Sapakal. V. (2012). "Parametric optimization of MIG welding using taguchi design method". International Journal of Advanced Engineering Research and Studies E-ISSN2249-8974. Volume: 1, Issue: 4, Pages: 2-4.
- Tewari, S., Gupta, A., e Prakash, J. (2010). "Effect of Welding Parameters on the Weldability of Material". International Journal of Engineering Science and Technology Volume: 2, Issue: 4, Pages: 512-516.
- Thamilarasi, P., e Rangunathan, S. (2010). "Study on the effect of machine vision in real time application: Robot welding". IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research. Publisher: Ieee, Pages: 1-5. ISBN: 978-1-4244-5965-0.
- Tipuwanpom, R., Runghimmawan, T., Intajag, S., e Krongratana, V. (2004). "Fuzzy logic pid controller based on fpga for process control". In Industrial Electronics, 2004 IEEE International Symposium on, volume 2, pages 1495\_1500. IEEE.
- Torres, E. (2013). "Uma metodologia para modelagem e controle da largura do cordão de solda no processo GMAW". Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.DM-64A/13, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 138p.
- Torres, E., Girón, A., Lopera, J., Alfaro, S (2013). "Parameter optimization in gmaw process with solid and metal-cored wires". 22nd International Congress of Mechanical Engineering November 3-7, 2013, Ribeirão Preto, SP, Brazil Copyright © 2013 by ABCM.

- Tsai, H., Hou, K., Chuang, H (2006). "Fuzzy control of pulsed GTA welds by using real-time root bead image feedback". *Journal of Materials Processing Technology*. Volume: 176, Issue: 1-3, Pages: 158-167. ISSN: 09240136.
- Vargas, J., Absi, S., e Vilarinho, L. (2006). "Avaliação das Características Geométricas e de Propriedades Mecânicas do Ponto na Soldagem por Resistência Via Planejamento Robusto". Artigo baseado em versão apresentada no XXXII CONSOLDA Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 02 a 05 de Outubro de 2006.
- Vinod Kumar. Modeling of weld bead geometry and shape relationships in submerged arc welding using developed fluxes. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering* (2011). Volume: 5, Issue: 5, Pages: 461-470. ISSN: 19956665.
- Wang, XW. e Li, RR. (2013). "Intelligent modelling of back-side weld bead geometry using weld pool surface characteristic parameters." *Journal of Intelligent Manufacturing*.
- Wei Liu, Shuang Liu, Junjie Ma, Radovan Kovacevic. Real-time monitoring of the laser hot-wire welding process. *Optics and Laser Technology* (2014). Volume: 57, Pages: 66-76. ISSN: 00303992.
- Wu, C., Gao, J., Liu, X., e Zhao, Y (2003). "Vision-based measurement of weld pool geometry in constant-current gas tungsten arc welding". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. Volume: 217, Issue: 6, Pages: 879-882 ISSN: 0954-4054.
- Wu, C., Gao, J., e Zhao, Y (2006). "A neural network for weld penetration control in gas tungsten arc welding". *Science And Technology* (2006). ) Vol. 19 No. 1 pp27-33 Feb.
- Weglowski, M., Huang, Y. e Zhang, Y. (2008). "Effect of welding current on metal transfer in GMAW". *Archives of Material Science and Engineering*. Volume 33. p.p. 49-56.

- Xiao, J., Yu, M., Zhang, A (2012). "Image Processing for Measurement of Three-Dimensional Gas Metal Arc Weld Pool Surface". IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering. Pages: 243-249. ISBN: 1467300896.
- Xiong, J., e Zhang, G (2013). "Online measurement of bead geometry in GMAW-based additive manufacturing using passive vision". Measurement Science & Technology. Volume: 24, Issue: 11. ISSN: 0957-0233.
- Xiong, J., e Zhang, G (2014). "Adaptive control of deposited height in GMAW-based layer additive manufacturing". Journal of Materials Processing Technology. Volume: 214, Issue: 4, Pages: 962-968. ISSN: 09240136.
- Xiong, J., Zhang, G., Hu, J., e Wu, L. (2012). "Bead geometry prediction for robotic GMAW-based rapid manufacturing through a neural network and a second-order regression analysis". Journal of Intelligent Manufacturing.
- Xiong, J., Zhang, G., Gao, H., e Wu, L (2013). "Modeling of bead section profile and overlapping beads with experimental validation for robotic GMAW-based rapid manufacturing". Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. Volume: 29, Issue: 2, Pages: 417-423. ISSN: 07365845.
- 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. Volume: 41, Pages: 82-88. ISSN: 09596526.
- Xua, Y, Fangb, S.,Duc, W., e Zhaoc, Z (2018)."Welding seam tracking in robotic gas metal arc welding", Journal of Materials Processing Technology. Volume 248, October 2017, Pages 18-30.
- Xue, Y., Kim, I., Son, J., Park, C., Kim, H., Sung, B., Kim, I., Kim, H, Kang, B (2005). "Fuzzy regression method for prediction and control the bead width in the robotic arc-

- welding process”. *Journal of Materials Processing Technology*. Volume: 164-165, Pages: 1134-1139. ISSN: 09240136.
- Xu, G., e Wu, C (2007). “Numerical analysis of weld pool geometry in globular-transfer gas metal arc welding”. *Frontiers of Materials Science in China* (2007). Volume: 1, Issue: 1, Pages: 24-29. ISSN: 16737377.
- Xu, Y., Fang, G., Chen, S., Jia, J (2015). “Robotics and Computer-Integrated Manufacturing Computer vision technology for seam tracking in robotic GTAW and GMAW”.*Related research*. Volume: 32, Pages: 25-36. ISBN: 2012101210118.
- Ye, G., Guo, J., Sun, Z., Li, C., e Zhong, S (2018). “Weld bead recognition using laser vision with model-based classification”.*Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* Volume 52, August 2018, Pages 9-16
- Yu, S., Cheng, X., Ding, F. e Jianhong, C. (2009). “Visual-based Intelligent Control System for Robotic Gas Metal Arc Welding”. *Global Congress on Intelligent Systems*. IEEE, DOI 10.1109/GCIS.2009.421.
- Yan, Z., Zhang, G., e Wun, L (2011). “Simulation and controlling for weld shape process in P-GMAW based on fuzzy logic”. *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA*. Pages: 2078-2082. ISSN: 2152-7431.
- Zhang, G., Yan, Z., e Wu, L (2006). “Reconstructing a three-dimensional P-GMAW weld pool shape from a two-dimensional visual image”. *Measurement Science and Technology*. Volume: 17, Issue: 7, Pages: 1877-1882. ISSN: 0957-0233.
- Zhang, W., Hua, X., Liao, W., Li F., Wang, M. (2014).” The effect of the welding direction on the plasma and metal transfer behavior of CO2 laser+GMAW-P hybrid welding processes”. *Optics and Lasers in Engineering*. Volume: 58, Pages: 102-108. ISSN: 01438166.

Zhang, W., Liu, Y., Wang, X., Zhang, Y (2012). "Characterization of Three-Dimensional Weld Pool Surface in GTAW". *Welding Journal*. Volume: 91, Issue: July, Pages: 195-203. ISSN: 00432296.

Zou, Y., Li, Y., Jiang, L., Xue, L (2011). "Weld pool image processing algorithm for seam tracking of welding robot". *Proceedings of the 2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2011*. Pages: 161-165. ISBN: 9781424487554.

Zhu, M., Li, C., Zhang, G., Shi, Y., Fan, D., e Huang., J. (2016) "Modeling and control of consumable DE-GMAW process". *Journal of Manufacturing Processes*. Volume 24, Part 1, October 2016, Pages 293-297