

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

**UMA METODOLOGIA PARA MODELAGEM E  
CONTROLE DA LARGURA DO CORDÃO DE SOLDA NO  
PROCESSO GMAW**

**EDNA MARGARITA MONCAYO TORRES**

**ORIENTADOR: SADEK CRISÓSTOMO ABSI ALFARO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS**

**PUBLICAÇÃO: ENM.DM - 64A/13**

**BRASÍLIA/DF: OUTUBRO – 2013**

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

**UMA METODOLOGIA PARA MODELAGEM E CONTROLE DA  
LARGURA DO CORDÃO DE SOLDA NO PROCESSO GMAW**

**EDNA MARGARITA MONCAYO TORRES**

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

**APROVADA POR:**

---

**Prof. Sadek Crisóstomo Absi Alfaro, PhD. (ENM - UnB)  
(Orientador)**

---

**Prof. Carlos Humberto Llanos Quintero, Dr. (ENM/UnB)  
(Examinador Interno)**

---

**Prof. Kalil Skeff Neto, Dr. (IF/UnB)  
(Examinador Externo)**

**BRASÍLIA/DF, 18 DE OUTUBRO DE 2013.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

TORRES, EDNA MARGARITA MONCAYO.

Uma metodologia para modelagem e controle da largura do cordão de solda no processo GMAW [Distrito Federal] 2013.

xvii, 138p., 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Sistemas Mecatrônicos, 2013).  
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

- |                               |                                       |
|-------------------------------|---------------------------------------|
| 1. Soldagem GMAW.             | 2. Logica Fuzzy,                      |
| 3. Redes Neurais Artificiais. | 4. Processamento de imagens digitais. |

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

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

## CESSÃO DE DEREITOS

AUTOR: Edna Margarita Moncayo Torres.

TÍTULO: Uma metodologia para modelagem e controle da largura do cordão de solda no processo GMAW.

GRAU: Mestre

ANO: 2013

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

---

Edna Margarita Moncayo Torres  
SCLN 407 Bloco A, Sala 216.  
70.855-510 – Brasília – DF – Brasil.

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais,  
meu irmão que me ensinaram a  
perseguir meu ideal com dedicação e  
coragem e a Andrés pelo amor, apoio  
e confiança incondicionais.*

## **AGRADECIMENTOS**

Quero agradecer inicialmente a Deus pela proteção, as bençãos recebidas e por ter colocado no meu caminho pessoas maravilhosas que fizeram isto possível.

Aos meus Pais, Nubia Torres e Jorge Moncayo, pelo amor e apoio em cada passo de minha vida, ao meu irmão que sempre tem estado comigo, animando-me e demonstrando-me seu carinho, a minha família, pelo seu apoio incondicional, e sua mão sempre estendida nos momentos mais difíceis,

Ao Andrés, pelo carinho, por acreditar em mim e pelo apoio em todos os momentos da minha vida.

Ao professor Sadek Absi Alfaro, pela orientação e pelo apoio durante a pesquisa.

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

Aos meus professores do mestrado, prof. Carlos e prof. Guilherme pela formação acadêmica. Ao Marrocos pela sua total disposição para resolver as minhas muitas interrogantes em soldagem.

## **RESUMO**

### **UMA METODOLOGIA PARA MODELAGEM E CONTROLE DA LARGURA DO CORDÃO DE SOLDA NO PROCESSO GMAW.**

**Autor: Edna Margarita Moncayo Torres.**

**Orientador: Sadek Crisóstomo Absi Alfaro.**

**Programa de Pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos.**

**Brasília, Outubro de 2013.**

Conceitos aplicados ao controle da soldagem estão produzindo pesquisas direcionadas ao desenvolvimento do monitoramento direto ou indireto da geometria do cordão de solda. A utilização de certos tipos de sensores proporcionou o desenvolvimento de sistemas capazes de medir diretamente a geometria do cordão. No desenvolvimento das pesquisas relacionadas ao monitoramento e controle em tempo real da soldagem, observa-se a utilização de várias abordagens que podem ser agrupadas conforme o parâmetro de monitoramento escolhido. Ao longo dos anos, a demanda de sistemas para o monitoramento e o controle nos processos de soldagem tem crescido. A necessidade de melhorar a produtividade e qualidade levou ao desenvolvimento e aperfeiçoamento de técnicas e sistemas para monitoramento e controle dos processos de soldagem. Este trabalho apresenta uma metodologia para realizar a modelagem, otimização e controle da largura do cordão de solda, permitindo ajustar os parâmetros do processo em tempo real. Desenvolveu-se um sistema integrado de aquisição de imagens, modelagem e controle do processo de soldagem, permitindo uma resposta em tempo real, através de redes neurais artificiais, onde os parâmetros de velocidade de soldagem, velocidade de alimentação do arame e a tensão são preditos em função de uma largura desejada. Para realizar o controle em malha fechada do sistema desenhou-se um controlador “fuzzy” onde se toma como referência a diferença entre a largura que se pretende obter e a largura real do cordão de solda. Este cordão é medido através de um sistema de aquisição e processamento de imagens usando-se uma câmera web de baixo custo. A ação de controle é exercida preferencialmente na velocidade de soldagem, parâmetro que apresenta a maior influência na largura do cordão. Obteve-se cordões de solda com largura pré-definida, além de boa aparência e qualidade.

## **ABSTRACT**

### **A METHODOLOGY FOR MODELING AND CONTROL OF WELD BEAD WIDTH IN THE GMAW PROCESS**

**Author: Edna Margarita Moncayo Torres.**

**Supervisor: Sadek Crisóstomo Absi Alfaro.**

**Programa de Pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos.**

**Brasília, October of 2013.**

Welding Control concepts aim to developed researches to improve the monitoring and control of weld bead geometry. The use of certain types of sensors has allowed the development of systems that are able to directly measuring the weld bead geometry. Research developments reviews related to the real-time weld monitoring and control use several approaches that could be grouped according to what sort of parameter is selected for monitoring and over the recent years, the demand for more improved welding systems are growing up. The needs for improving productivity and quality have led to the development and improvement techniques and systems for monitoring and control of welding processes. This work presents a methodology to perform modelling, optimization and control of the weld bead width, enabling to adjust process parameters in real-time. It was developed an integrated system for image acquisition, modelling and control of the welding process allowing a real-time response, through artificial neural networks. Parameters as welding speed, wire feed velocity and voltage are predicted in function of a desired weld bead width. In order to get the closed-loop control system, it was designed a controller "fuzzy" in which is taken as reference the difference between the width to be achieved and the actual width of the bead. This weld bead is measured throughout an acquisition system and images processing using a low price webcam. The control action is carried out preferably in welding speed, a parameter that has the greatest influence on the weld bead width and it has not influence in the metal transfer behaviour. It was obtained weld beads with predefined width, good appearance and quality.

## SUMARIO

<b>1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>1.1 – OBJETIVOS.....</b>	<b>20</b>
1.1.1 - Objetivo geral.....	20
1.1.2 - Objetivos específicos .....	20
<b>1.2 - MOTIVAÇÃO E POSSÍVEIS CONTRIBUIÇÕES.....</b>	<b>21</b>
<b>1.3 - ESTRUTURA DO DOCUMENTO.....</b>	<b>22</b>
<b>2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>23</b>
<b>2.1 – SOLDAGEM .....</b>	<b>23</b>
2.1.1 - Processos de soldagem .....	23
2.1.2 - Soldagem a arco elétrico.....	24
2.1.3 - Processo de soldagem GMAW.....	26
2.1.3.1 - Vantagens, limitações e aplicações do processo GMAW.....	27
2.1.3.2 - Variáveis operativas do processo de soldagem GMAW .....	29
2.1.3.3 - Modos de transferência metálica.....	37
<b>2.2 - INTELIGENCIA ARTIFICIAL .....</b>	<b>40</b>
<b>2.2.1 - Redes neurais.....</b>	<b>40</b>
2.2.1.1 - O neurônio.....	41
2.2.1.2- Características Básicas de Redes Neurais Artificiais .....	42
2.2.1.3 - Aprendizado .....	47
2.2.1.4 - Aprendizado e Generalização.....	48
2.2.1.5 - Classificação das Redes Neurais .....	48
2.2.1.6 - Modelagem em Redes Neurais artificiais.....	50
<b>2.2.2 - Logica Fuzzy.....</b>	<b>51</b>
2.2.2.1 - Conjuntos Fuzzy.....	52
2.2.2.2 - Função de pertinência.....	52



2.2.2.3 - Variáveis linguísticas .....	53
2.2.2.4 - Operações e propriedades em conjuntos Fuzzy .....	55
2.2.2.5 - Regras Fuzzy .....	55
2.2.2.6 - Estrutura do Sistema Lógico Fuzzy .....	56
<b>3 - ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>59</b>
<b>3.1 - INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS NA GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA.....</b>	<b>60</b>
<b>3.2 - MONITORAMENTO DA GEOMETRIA DO CORDAO DE SOLDA.....</b>	<b>62</b>
<b>3.3 – MODELAGEM DO PROCESSO DE SOLDAGEM E O FORMATO DO CORDÃO DE SOLDA .....</b>	<b>63</b>
<b>3.4 - CONTROLE DO PROCESSO GMAW .....</b>	<b>68</b>
<b>4 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTOS .....</b>	<b>70</b>
<b>4.1 – EQUIPAMENTO E BANCADA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>70</b>
<b>4.1.1 – Sistema de soldagem .....</b>	<b>70</b>
4.1.1.1 – Fonte de soldagem .....	70
4.1.1.2 – Computador .....	70
4.1.1.3 – Mesa de deslocamento linear.....	72
4.1.1.4 - Consumíveis utilizados nos processos .....	73
<b>4.1.2 - Sistema de comunicação com a fonte de soldagem. ....</b>	<b>73</b>
<b>4.1.3 - Sistema de aquisição de imagens .....</b>	<b>74</b>
<b>4.1.4 - Sistema de aquisição dos sinais elétricos.....</b>	<b>75</b>
<b>4.2 – METODOLOGIA .....</b>	<b>75</b>
<b>4.2.1 - Modelagem da largura por meio de redes neurais .....</b>	<b>76</b>
4.2.1.1 - Coleta de dados e separação em conjuntos .....	76
4.2.1.2 - Configuração da rede .....	82
4.2.1.3 – Treinamento.....	83

4.2.1.4 - Teste .....	84
<b>4.2.2 - Captura e processamento de imagens.....</b>	<b>84</b>
<b>4.2.3 - Desenho do controlador.....</b>	<b>89</b>
4.2.3.1 - Documentação das entradas, saídas e das especificações operacionais do sistema. ....	89
4.2.3.2 - Determinação dos conjuntos fuzzy para as entradas e saídas. ....	90
4.2.3.3 – Determinação do conjunto de regras. ....	92
4.2.3.4 - Escolha do método de defuzzificação. ....	92
<b>4.2.4 - Implementação do sistema de controle. ....</b>	<b>93</b>
<b>5 – RESULTADOS .....</b>	<b>95</b>
<b>5.1 - MODELAGEM DA LARGURA POR MEIO DE REDES NEURAIIS .....</b>	<b>95</b>
<b>5.2 - CAPTURA E PROCESSAMENTO DE IMAGENS.....</b>	<b>100</b>
<b>5.3 - DESENHO DO CONTROLADOR.....</b>	<b>103</b>
<b>5.4 - IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE.....</b>	<b>104</b>
<b>6 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>123</b>
<b>7- CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>128</b>
<b>7.1 – CONCLUSÕES.....</b>	<b>128</b>
<b>7.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>129</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>130</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Características e aplicações dos processos de soldagem por arco elétrico.....	25
Tabela 2.2: Comparação entre RNAs e RNBs. ....	42
Tabela 2.3: Funções de ativação de um neurônio artificial. ....	44
Tabela 2.4: classificação das redes neurais segundo algumas de suas características. ....	50
Tabela 2.5: Exemplos de funções de pertinência. ....	53
Tabela 2.6: Operações básicas em conjuntos Fuzzy.....	55
Tabela 4.1: Níveis y faixas dos Parâmetros de soldagem.....	79
Tabela 4.2: Experimentos selecionados.....	79
Tabela 4.3: Sequencia do processamento das imagens. ....	81
Tabela 4.4: Valores das funções de pertinência da entrada. ....	90
Tabela 4.5: Valores das funções de pertinência da saída. ....	91
Tabela 5.1: Resultado experimentos do desenho central composto. ....	95
Tabela 5.2: Vetores do valor médio e o desvio padrão da largura do cordão. ....	99
Tabela 5.3: Valor escolhido como a segunda entrada a rede neural.....	99
Tabela 5.4: Parâmetros de soldagem para diferentes larguras com arame maciço. ....	100
Tabela 5.5: Parâmetros de soldagem para diferentes larguras com arame tubular.....	100
Tabela 5.6: sequência de imagens para um cordão de 6mm com arame maciço. ....	101
Tabela 5.7: sequência de imagens para um cordão de 5mm com arame tubular. ....	102
Tabela 5.8: Procedimento realizado no controlador Fuzzy. ....	104
Tabela 6.1: Nível de precisão obtido com o uso do sistema de controle.....	126
Tabela 6.2: Medidas dos parâmetros geométricos para os cordões obtidos.....	127

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Classificação dos diferentes processos de soldagem. ....	24
Figura 2.2: Processo de soldagem GMAW (Modificado de Modenesi <i>et. al.</i> , 2012). ....	27
Figura 2.3: Características geométricas do cordão (modificado Torres <i>et al.</i> 2013).....	29
Figura 2.4: Terminologia do processo de solda GMAW (modificado Modenesi <i>et. al.</i> , 2012).....	30
Figura 2.5: Efeito da tensão na geometria do cordão de solda. a) 21V, b) 24 V e c) 27 V. ....	31
Figura 2.6: Efeito do amperagem no cordão de solda, a) 100A, b) 150 A e c) 200 A. ....	32
Figura 2.7: Efeito da velocidade de avanço no cordão de solda, a) velocidade de avanço demasiado baixa, b) velocidade de avanço correta.....	33
Figura 2.8: Efeito das diferentes longitudes livres do eléctrodo sobre o cordão de solda... ..	34
Figura 2.9: Efeito da posição do eléctrodo e a técnica de solda sobre o cordão (a) ângulo de empurre. (b) ângulo perpendicular (c) ângulo de arrastre. ....	35
Figura 2.10: Zonas de transferência metálica na soldagem GMAW (Lopera, 2010).....	37
Figura 2.11: Sequência modo de transferência por curto circuito. ....	38
Figura 2.12: Sequência modo de transferência globular. ....	39
Figura 2.13: Sequência modo de transferência por spray.....	40
Figura 2.14: Neurônio Biológico.....	41
Figura 2.15: Modelo de um Neurônio Artificial (Modificado de HAYKIN, 2001).....	42
Figura 2.16: Modelo de uma RNA com uma única camada (Modificado de Haykin, 2001) .....	45
Figura 2.17: Modelo de uma RN de Múltiplas Camadas .....	45
Figura 2.18: Modelo de uma RN Recorrente (modificado Haykin, 2001).....	46
Figura 2.19: Conjuntos fuzzy exemplo de temperatura.....	54
Figura 2.20: Estrutura do Sistema Lógico Fuzzy. (Modificado de Cox, 1995). ....	56
Figura 2.21: Inferência Fuzzy.....	57
Figura 3.1: Classificação das investigações relacionadas com a geometria do cordão de solda.....	60
Figura 4.1: Distribuição e Localização do Sistema Computacional, Hardware e Equipamentos Utilizados.....	71
Figura 4.2: Mesa de deslocamento linear .....	72
Figura 4.3: Sistema de aquisição de imagens .....	74

Figura 4.4: Esquema da metodologia desenvolvida para o trabalho .....	76
Figura 4.5: Planejamento Composto Central para três variáveis.....	78
Figura 4.6: Sistema de scanner.....	80
Figura 4.7: Reconstrução do cordão de solda em 3D.....	81
Figura 4.8: Medidas dos parâmetros geométricos.....	82
Figura 4.9: Imagem adquirida pela webcam.....	85
Figura 4.10: (a) Imagem escala de cinzas e filtro de mediana, (b) Imagem Binarizada. ....	86
Figura 4.11: Elipse que representa a poça de fusão.....	86
Figura 4.12: Imagem em 4 seções.....	86
Figura 4.13: Seleção da zona do cordão da imagem.....	87
Figura 4.14: Processamento da imagem para obter a largura do cordão de solda.....	88
Figura 4.15: Seleção da fila onde será medido o cordão.....	88
Figura 4.16: Entradas e saídas controlador fuzzy.....	89
Figura 4.17: Variável de entrada e suas funções de pertinência.....	90
Figura 4.18: Variável de saída e suas funções de pertinência.....	91
Figura 4.19: Reglas para a estratégia de controle.....	92
Figura 4.20: Exemplo método de defuzzificação.....	93
Figura 4.21: Arquitetura do sistema desenvolvido.....	94
Figura 5.1: Desenho da rede neural.....	96
Figura 5.2: Treinamento da rede neural (a) Para o arame maciço, (b) Para o arame tubular .....	96
Figura 5.3: Medida do erro (a) Rede para arame maciço, (b) Rede para arame tubular. ....	97
Figura 5.4: Ajuste conseguido pela rede neural para o arame maciço.....	98
Figura 5.5: Ajuste conseguido pela rede neural para o arame tubular.....	98
Figura 5.6: Calibração do sistema de aquisição.....	101
Figura 5.7: interfase gráfica para o controle da largura do cordão de solda.....	105
Figura 5.8: Medidas para um cordão de 5 mm com arame maciço.....	106
Figura 5.9: Comportamento da velocidade de soldagem durante o controle da largura de 5mm com arame maciço.....	107
Figura 5.10: Cordão final obtido depois do controle para uma largura de 5mm com arame maciço.....	107
Figura 5.11: Reconstrução e 3D do cordão de 5 mm de largura com arame maciço.....	108
Figura 5.12: Medidas das características geométricas do cordão de 5mm com arame maciço.....	108

Figura 5.13: Medidas dos sinais do processo para um cordão de 5 mm de largura com arame maciço.....	109
Figura 5.14: Medidas para um cordão de 6 mm com arame maciço.....	110
Figura 5.15: Comportamento da velocidade de soldagem durante o controle da largura de 6mm com arame maciço.....	110
Figura 5.16: Cordão final obtido depois do controle para uma largura de 6mm com arame maciço.....	111
Figura 5.17: Reconstrução e 3D do cordão de 6mm de largura com arame maciço. ....	111
Figura 5.18: Medidas das características geométricas do cordão de 6mm com arame maciço.....	112
Figura 5.19: Medidas dos sinais do processo para um cordão de 6mm de largura com arame maciço.....	112
Figura 5.20: Medidas para um cordão de 7 mm com arame maciço.....	113
Figura 5.21: Comportamento da velocidade de soldagem durante o controle da largura de 7 mm com arame maciço.....	114
Figura 5.22: Cordão final obtido depois do controle para uma largura de 7 mm com arame maciço.....	114
Figura 5.23: Reconstrução e 3D do cordão de 7 mm de largura com arame maciço. ....	115
Figura 5.24: Medidas das características geométricas do cordão de 7 mm com arame maciço.....	115
Figura 5.25: Medidas dos sinais do processo para um cordão de 7 mm de largura com arame maciço.....	116
Figura 5.26: Medidas para um cordão de 6 mm com arame tubular. ....	117
Figura 5.27: Comportamento da velocidade de soldagem durante o controle da largura. de 6 mm com arame tubular. ....	117
Figura 5.28: Cordão final obtido depois do controle para uma largura de 6 mm com arame tubular.....	118
Figura 5.29: Reconstrução e 3D do cordão de 6 mm de largura com arame tubular. ....	118
Figura 5.30: Medidas das características geométricas do cordão de 6 mm com arame tubular.....	118
Figura 5.31: Medidas dos sinais do processo para um cordão de 6 mm de largura com arame tubular. ....	119
Figura 5.32: Medidas para um cordão de 7 mm com arame tubular. ....	120

Figura 5.33: Comportamento da velocidade de soldagem durante o controle da largura de 7 mm com arame tubular. ....	120
Figura 5.34: Cordão final obtido depois do controle para uma largura de 7 mm com arame tubular. ....	121
Figura 5.35: Reconstrução e 3D do cordão de 7 mm de largura com arame tubular. ....	121
Figura 5.36: Medidas das características geométricas do cordão de 7 mm com arame tubular. ....	122
Figura 5.37: Medidas dos sinais do processo para um cordão de 7 mm de largura com arame tubular. ....	122
Figura 6.1: Velocidade de soldagem e tensão em função da largura para o processo utilizando arame tipo maciço. ....	124
Figura 6.2: velocidade de soldagem e tensão em função da largura para o processo utilizando arame tipo tubular. ....	125

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ANFIS	- Neuro-Fuzzy adaptativo
ANN	- Artificial Neural Networks (Redes neurais artificiais)
B	- Baixar (Variável Linguística)
BM	- Baixar muito (Variável Linguística)
DBCP	- Distancia bico de contato peça
FCAW	- Flux Cored Arc Welding (Soldagem a arco elétrico com arames tubulares)
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
IA	- Inteligência Artificial
M	- Manter (Variável Linguística)
MAG	- Metal Active Gas (Solda a eletrodo consumível com gás inerte)
MCP	- Modelo de Mc Culloch e Pitts.
MIG	- Metal Inert Gas (Solda a eletrodo consumível com gás ativo)
MSE	- Mean Square Error (Erro quadrático médio)
NA	- Negativo alto (Variável Linguística)
NI	- National Instruments
NM	- Negativo médio (Variável Linguística)
NMA	- Negativo muito alto (Variável Linguística)
PA	- Positivo alto (Variável Linguística)
PCC	- Planejamento Composto Central (Central Composite Design)
PI	- Proporcional integral (Controlador)
PID	- Proporcional-integral-derivativo (Controlador)
PM	- Positivo médio (Variável Linguística)
PMA	- Positivo muito alto (Variável Linguística)
RNAs	- Redes Neurais Artificiais
RNBs	- Redes Neurais Biológicas
S	- Subir (Variável Linguística)
SM	- Subir muito (Variável Linguística)



SMAW	- Shielded Metal Arc Welding (Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido)
$x_1$	- Velocidade de arame (m/min)
$x_2$	- Tensão (V)
$x_3$	- Velocidade de soldagem (mm/s)
$\sigma$	- Desvio padrão
$\mu$	- Valor Médio

## 1 - INTRODUÇÃO

O processo de soldagem por *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) se faz 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. O processo 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, tais como largura, reforço e profundidade de penetração, encontram-se fortemente influenciadas pelos parâmetros operacionais, incluindo aspectos como, por exemplo, a corrente, a tensão e a velocidade de soldagem – entre os mais importantes. Recentemente, muitos estudos se fizeram concretos a fim de analisar o efeito dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão, por meio da utilização das mais variadas técnicas.

Uma das variáveis mais importantes da geometria do cordão de solda que depende das variáveis do processo é a largura do cordão, uma vez que, ao obter uma largura apropriada para uma união soldada, não se tem desperdício e tampouco acumulação de material, além de não incrementar a zona termicamente afetada. O aumento da zona termicamente afetada pode ser prejudicial, mudando as propriedades do metal de base e podendo ocasionar defeitos na solda. Além disso, a largura do cordão tem uma influência importante na qualidade final da união, onde, em conjunto ao reforço e à penetração, produzirão determinadas geometrias ao cordão de solda e, portanto, certas propriedades mecânicas.

Diversos estudos destacam a possibilidade da determinação dos parâmetros de soldagem mais adequados para uma determinada largura por meio de 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.

Diante do exposto, no presente estudo, efetua-se a modelagem da largura do cordão de solda a partir de redes neurais artificiais. O treinamento da rede foi possível devido aos resultados obtidos de um planejamento experimental, com o objetivo de determinar a influência de diversas variáveis do processo na largura do cordão. Com a arquitetura da rede encontrada e com as características apropriadas de treinamento, logrou-se, a partir de uma largura pré-definida, prever de maneira adequada os valores ótimos da velocidade de alimentação do arame, a velocidade de soldagem e a tensão.

Mesmo com as margens dos parâmetros que influenciaram o processo de soldagem bem definidos, existe sempre a possibilidade do surgimento de novos defeitos na soldagem. Portanto, um sistema de controle em tempo real foi estabelecido a fim de detectar possíveis defeitos ocasionados nos cordões, visando detectar o mais rápido possível os defeitos na largura 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.

Objetivando a necessidade de que o sistema atue em tempo real, tem-se a elaboração de uma estratégia para sua implementação, na qual o sistema proposto utiliza a informação proporcionada por uma câmera *web* instalada de forma que seja possível à visão da poça de fusão e a formação do cordão durante o processo de soldagem, permitindo, a partir da filtragem e do processamento das imagens obtidas, a obtenção da medida da largura do cordão. A diferença entre a largura pré-definida e a informação obtida a partir das referidas imagens aplica-se a um controlador *fuzzy*, a fim de ajustar a velocidade de soldagem, garantindo, assim, que o cordão apresente a largura desejada ao longo do tempo, por meio de uma ação corretiva constante.

## **1.1 – OBJETIVOS**

### **1.1.1 - Objetivo geral**

Desenvolver uma metodologia para modelagem e controle da largura do cordão de solda no processo GMAW em tempo real, a partir de redes neurais, processamento de imagens digitais e lógica *fuzzy*, a fim de garantir a produção de cordões de boa aparência e qualidade.

### **1.1.2 - Objetivos específicos**

1. Realizar a comunicação entre a fonte de soldagem e um sistema computacional com o propósito de realizar a variação de parâmetros de soldagem em tempo real.
2. Modelar, a partir de redes neurais, a largura do cordão de solda e, assim, encontrar os parâmetros da tensão, a velocidade de alimentação do arame e a velocidade de soldagem ótimos.
3. Desenhar um controlador *fuzzy* visando o controle da largura do cordão de solda em tempo real.
4. Implementar um sistema de aquisição de imagens de baixo custo e de fácil aplicação com o propósito de obtenção da medida do cordão.
5. Realizar o processamento de imagens, a fim de obter a medida da largura do cordão em tempo real.
6. Validar a metodologia proposta, realizando a implementação no processo GMAW com dois tipos de arame.

## **1.2 - MOTIVAÇÃO E POSSÍVEIS CONTRIBUIÇÕES**

Existem diversos sistemas automatizados de soldagem, estes são auxiliados por sistemas de monitoramento dos parâmetros. No entanto são reduzidos os sistemas de controle dos processos, que em sua maioria são desenhados para o processo TIG. Nota-se que o processo de soldagem GMAW encontra-se em fase de expansão nas aplicações para a indústria sendo observado pouca divulgação de trabalhos com base no controle das características geométricas do mesmo no Brasil. Por isso a principal motivação para o presente trabalho foi gerar uma metodologia para a modelagem e controle da largura do cordão de solda no processo GMAW, visando obter cordões de boa aparência e qualidade.

Uma contribuição tecnológica bastante significativa é o desenho de um sistema o qual visa estabelecer os parâmetros de soldagem, como função da largura do cordão desejada; além disso, o sistema possui um sistema de aquisição de imagens de baixo custo para a medição da largura do cordão em tempo real, para seu posterior uso no controle do processo, realizando uma ação corretiva constante. Desta forma ao estudar o processo, este trabalho procura ampliar o conhecimento de técnicas de modelagem e controle dos parâmetros geométricos do processo visando uma maior utilização do mesmo pelo setor produtivo nacional.

### **1.3 - 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 da inteligência artificial, principalmente nas redes neurais artificiais e lógica *fuzzy*.

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, o modelado, o monitoramento e o controle na geometria do cordão.

O Capítulo Quatro descreve os equipamentos e a metodologia utilizados para realizar a modelagem e o controle da largura do cordão de solda.

No Capítulo Cinco tem-se a apresentação dos resultados obtidos nas fases de modelagem por meio de redes neurais, o processo de captura e processamento de imagens e os resultados obtidos no controle da largura em tempo real.

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**

O presente capítulo apresenta uma revisão bibliográfica, por meio de uma introdução referente à soldagem e seus processos. Em seguida, faz-se uma revisão de conceitos que envolvem o processo de soldagem por *Gas Metal Arc Welding* (GMAW). Finalmente, tem-se a apresentação de noções básicas da inteligência artificial, onde são abordados os temas de redes neurais e lógica difusa.

### **2.1 – SOLDAGEM**

A soldagem é tão antiga como o trabalho com metais. Os antigos soldadores utilizavam a solda forjada ou fundida para unir suas mercadorias. No entanto, o crescimento real da indústria do metal teve início com o processo Bessemer em meados de 1850, quando o aço chega a ser o material com mais baixo custo utilizado para a construção de ferrovias, pontes e edifícios. Em 1801, Humphrey Davy descobriu o arco elétrico, o qual despertou a curiosidade científica. Em 1885, Bernardos recebeu a patente para trabalhar metais fazendo uso da eletricidade. Desde então, tem-se um processo de pesquisa de novas fontes e técnicas para melhorar os processos de soldagem (EAGAR, 1999).

A Sociedade Americana de Solda (AWS, 1987) define uma solda como uma coalescência localizada de metais ou não metais, produzida pelo aquecimento dos materiais até a temperatura de solda, com ou sem a aplicação de pressão e com ou sem o uso de material de aporte. Na atualidade, a soldagem é o mais importante processo industrial de fabricação de peças metálicas. Constitui um dos recursos tecnológicos de vital importância para o desenvolvimento industrial a nível global. As indústrias de diferentes ramos não poderiam ter atingido seu desenvolvimento atual sem a tecnologia de soldagem.

#### **2.1.1 - Processos de soldagem**

O processo de soldagem é o conjunto de elementos operacionais básicos utilizados para fazer a união soldada, que devem cumprir com os seguintes requisitos: fornecer a energia necessária para criar a união (térmica, mecânica ou uma combinação de ambas); evitar a contaminação atmosférica ou seus efeitos sobre o metal fundido; fornecer o metal de adição (opcional com alguns processos e configurações da junta); e, controlar a metalurgia dos metais envolvidos (GIRALDO, 1997).

Como processo de união, de proteção e de recuperação de materiais, a soldagem se destaca por sua versatilidade tanto no aspecto tecnológico como no económico. Durante as últimas décadas, esta tecnologia tem recebido importantes esforços em recursos humanos e económicos destinados a promover sua investigação e desenvolvimento. Os processos de soldagem podem ser classificados a partir da natureza da união, conforme representação na Figura 2.1, a seguir.

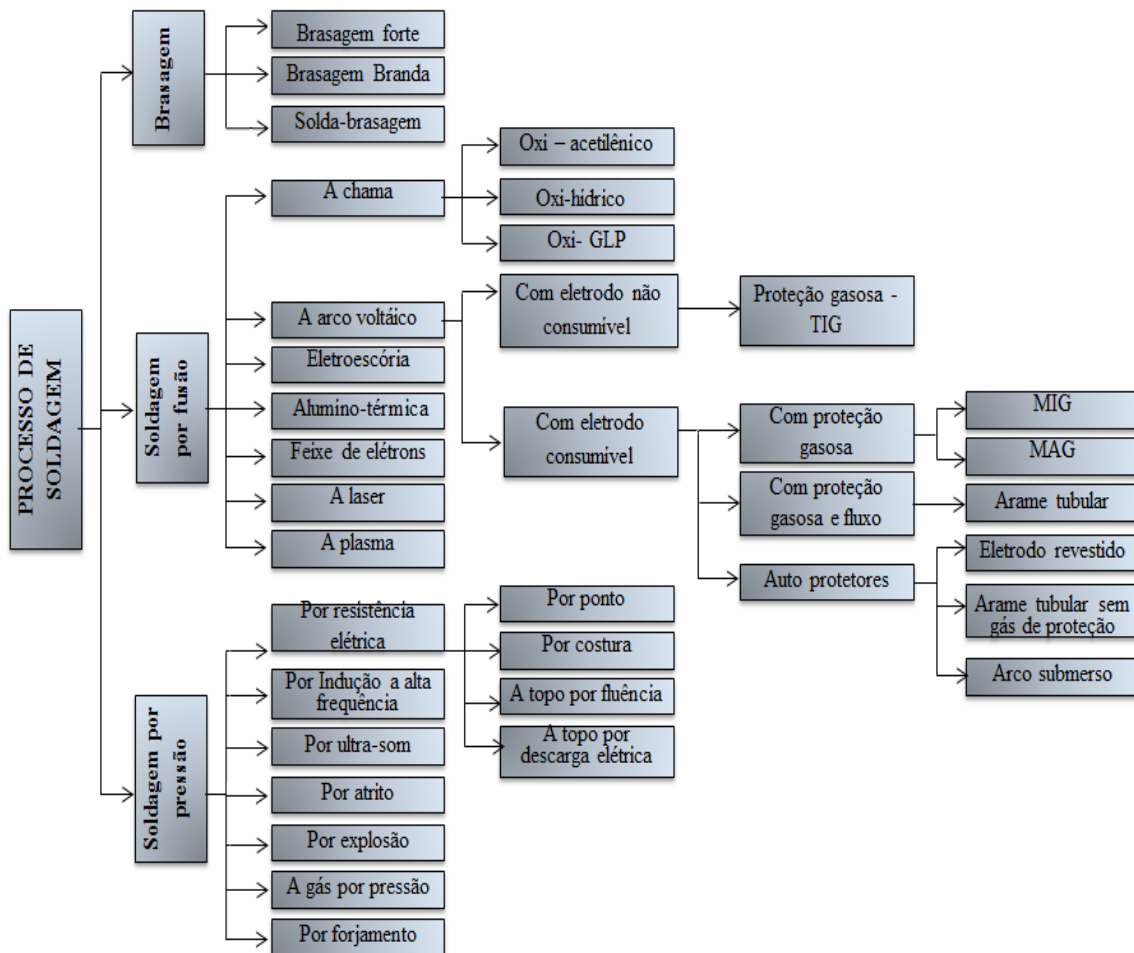


Figura 2.1: Classificação dos diferentes processos de soldagem.

### 2.1.2 - Soldagem a arco eléctrico

A soldagem por arco eléctrico ou voltaico se aplica a um longo e diverso grupo de processos que utilizam um arco eléctrico como fonte de calor para fundir e unir metais (AWS, 1987). Adicionalmente, lograram-se avanços na automatização destes processos, que têm gerado grandes melhoras e têm ajudado a reduzir os custos e a melhorar a qualidade e a fiabilidade das uniões soldadas.



A união dos processos de automação, controle e modelagem têm se mostrado de vital importância no contexto atual, quando da aquisição de amplo conhecimento sobre os fenômenos que ocorrem. O conhecimento e a caracterização da transferência de massa e de calor em um processo de solda são bastantes complexos devido à alta intensidade luminosa, às altas temperaturas, frequências e velocidades com que operam. Os desenvolvimentos recentes focaram-se na caracterização dos fenômenos de transferência de massa, calor, processos de fusão, velocidades de aplicação, entre outros aspectos, a fim de desenvolver fontes de potência, eletrodos, gases de proteção e demais elementos fundamentais nos processos de solda (MODENESI; REIS, 2007; GOUMING; SHAOHUI, 2003; HU; TSAI, 2006). A Tabela 2.1, a seguir, apresenta os processos de solda por arco elétrico com algumas de suas características e aplicações.

Tabela 2.1: Características e aplicações dos processos de soldagem por arco elétrico.

<b>PROCESSO</b>	<b>TIPO DE CORRENTE E POLARIDADE</b>	<b>AGENTE PROTETOR OU DE CORTE</b>	<b>OUTRAS CARACTERÍSTICAS</b>	<b>APLICAÇÕES</b>
<b>Soldagem ao Arco Submerso</b>	Contínua ou Alternada.  Eletrodo +	Escória e gases gerados	Automática/mecanizada ou semiautomática.  O arco arde sob uma camada de fluxo granular.	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga. Espessura 10 mm. Posição plana ou horizontal de peças estruturais, tanques, vasos de pressão, etc.
<b>Soldagem com Eletrodos Revestidos</b>	Contínua ou alternada.  Eletrodo + ou -	Escória e gases gerados	Manual. Vareta metálica recoberta por camada de fluxo.	Soldagem de quase todos os metais, exceto cobre puro, metais preciosos, reativos e de baixo ponto de fusão. Utilizado na soldagem em geral.
<b>Soldagem com Arame Tubular</b>	Contínua.  Eletrodo +	Escória e gases gerados ou fornecidos por fonte externa. Em geral, o CO <sub>2</sub>	O fluxo está contido dentro de um arame tubular de pequeno diâmetro. Automático ou semiautomático.	Soldagem de aços carbono com espessura 1 mm. Soldagem de chapas.

Tabela 2.1: Características e aplicações dos processos de soldagem por arco elétrico.  
(Continuação).

PROCESSO	TIPO DE CORRENTE E POLARIDADE	AGENTE PROTETOR OU DE CORTE	OUTRAS CARACTERÍSTICAS	APLICAÇÕES
<b>Soldagem a Plasma</b>	Contínua. Eletrodo -	Argônio, Hélio ou Argônio + Hidrogênio.	Manual ou automática. O arame é adicionado separadamente. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arco é constrito por um bocal.	Todos os metais importantes em engenharia, exceto Zn, Be e suas ligas, com espessura de até 1,5 mm. Passes de raiz.
<b>Soldagem TIG</b>	Contínua ou alternada. Eletrodo -	Argônio, Hélio ou misturas destes.	Manual ou automática. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arame é adicionado separadamente	Soldagem de todos os metais, exceto Zn, Be e suas ligas, espessura entre 1 e 6 mm.  Soldagem de não ferrosos e aços inox.  Passe de raiz de soldas em tubulações
<b>Soldagem MIG/MAG</b>	Contínua. Eletrodo +	Argônio ou Hélio,  Argônio + O <sub>2</sub> , Argônio  + CO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>	Automática/mecaniz. Ou semiautomática.  O arame é sólido.	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, não ferrosos, com espessura 1 mm. Soldagem de tubos, chapas, etc. Qualquer posição.

### 2.1.3 - 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 solvabilidade (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 2.2, a seguir, ilustra esquematicamente o referido processo.

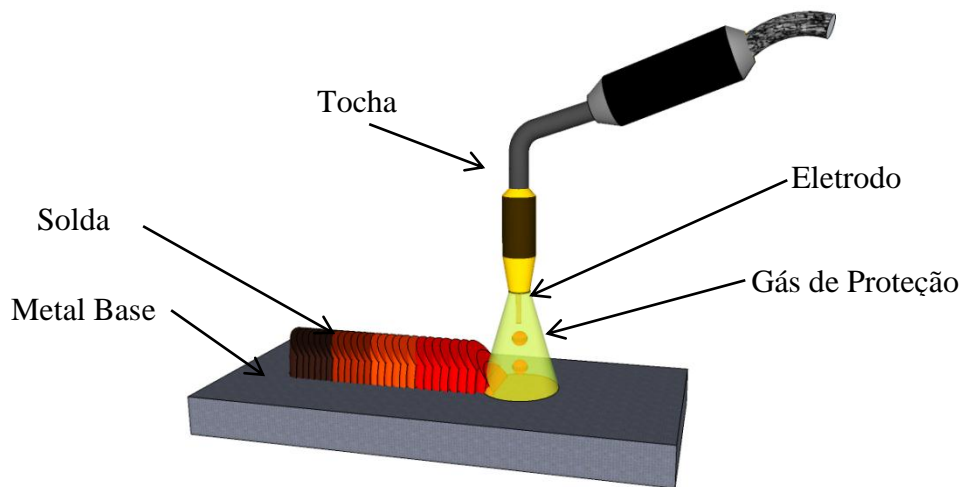


Figura 2.2: Processo de soldagem GMAW (Modificado de Modenesi *et. al.*, 2012).

Os componentes básicos para o processo de soldagem GMAW são: a fonte de potência, o sistema de alimentação, o mecanismo de impulsão do eletrodo, 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.

#### 2.1.3.1 - Vantagens, limitações e aplicações do processo GMAW.

- Vantagens

1. É o único processo de solda por arco com eletrodo consumível que pode ser empregado para a solda 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. Maior velocidade de depósito e alimentação contínua do eletrodo do que aquela obtida nos processos por SMAW ou GTAW;
6. Depositam-se costuras longas sem pontos intermediários de início e parada.

7. Mínima necessidade de limpeza pós-soldagem, uma vez que não se tem a formação de uma escoria grossa.
8. Redução de fumaças e gases com respeito ao processo SMAW.
9. Grande aproveitamento do metal de aporte.
10. Solda de espessuras pequenas (até 6 mm) sem necessidade de chanfro.
11. 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 enfreamento 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.

### 2.1.3.2 - Variáveis operativas do processo de soldagem GMAW

No campo da solda, a qualidade de solda depende principalmente das propriedades mecânicas do metal de solda e a zona afetada pelo calor, que, por sua vez, é influenciada pelas características metalúrgicas e composições químicas da solda. Destarte, tais características mecânico-metalúrgicas dependem da geometria do cordão de solda, que estão diretamente relacionadas com os parâmetros de solda de processo (ESME *et al.*, 2011). Algumas das características geométricas importantes dos cordões de solda mostram-se na Figura 2.3, a seguir.

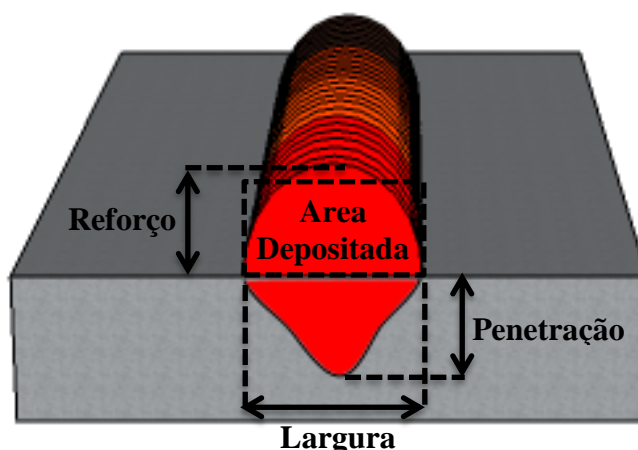


Figura 2.3: Características geométricas do cordão (modificado Torres *et al.* 2013).

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 2.4, a seguir.

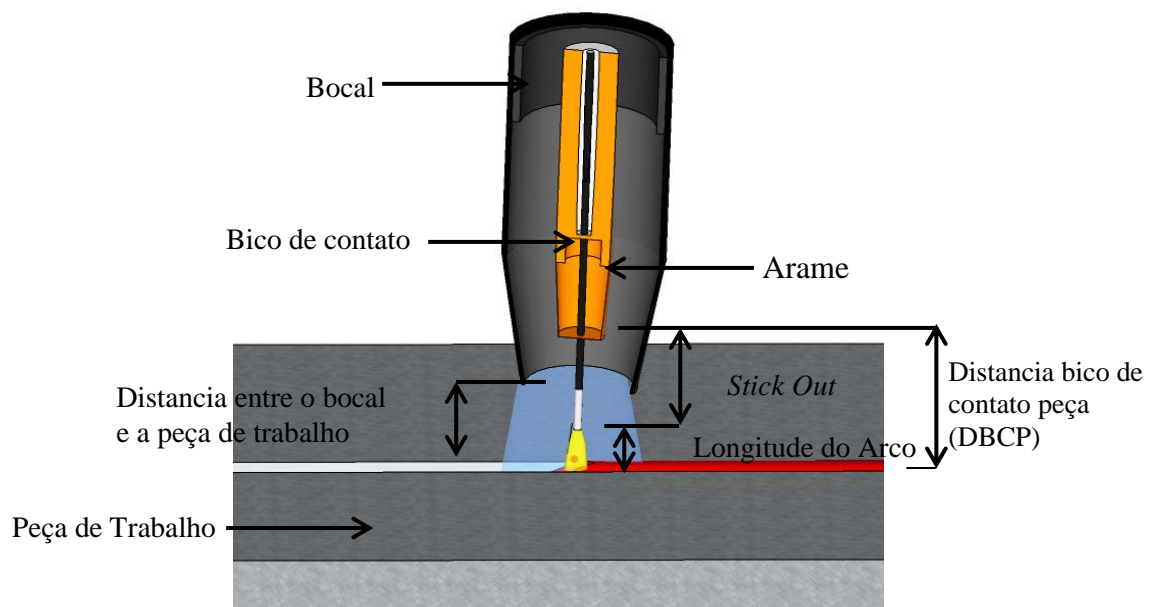


Figura 2.4: Terminologia do processo de solda GMAW (modificado Modenesi *et. al.*, 2012).

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 2.5, a seguir.

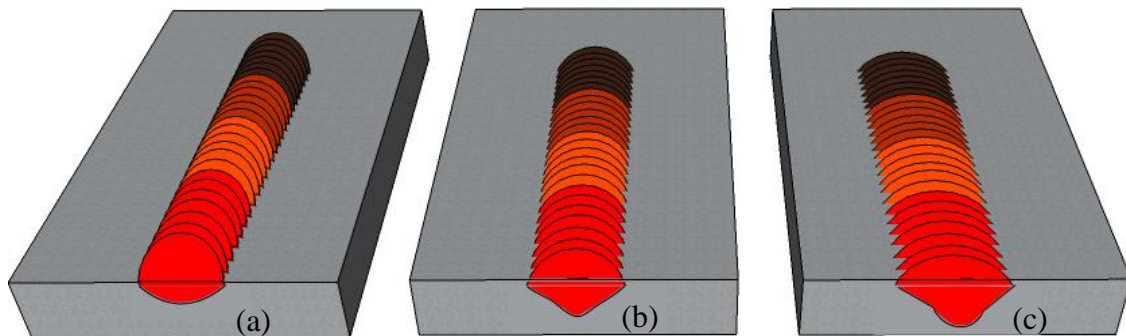


Figura 2.5: Efeito da tensão na geometria do cordão de solda. a) 21V, b) 24 V e c) 27 V.

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 2.6 (FORTES, 2004).

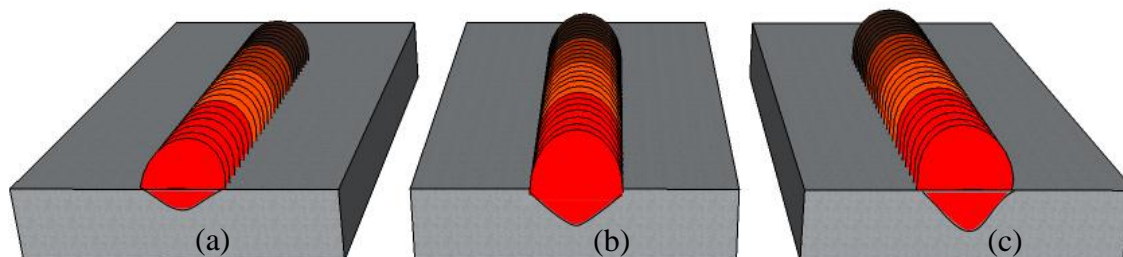


Figura 2.6: Efeito do amperagem no cordão de solda, a) 100A, b) 150 A e c) 200 A.

- **Velocidade de Soldagem**

A velocidade de soldagem é a velocidade linear da deslocação 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 2.7(a) e Figura 2.7(b), apresentadas a seguir, tem-se os efeitos da velocidade em uma união. Quando se reduz a velocidade, se aumenta a deposição do metal de aporte por unidade de longitude. 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 longitude 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 longitude 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 socavado ao longo das bordas do cordão de solda, devido à insuficiência de deposição de metal de aporte para encher o trajeto fundido pelo arco.



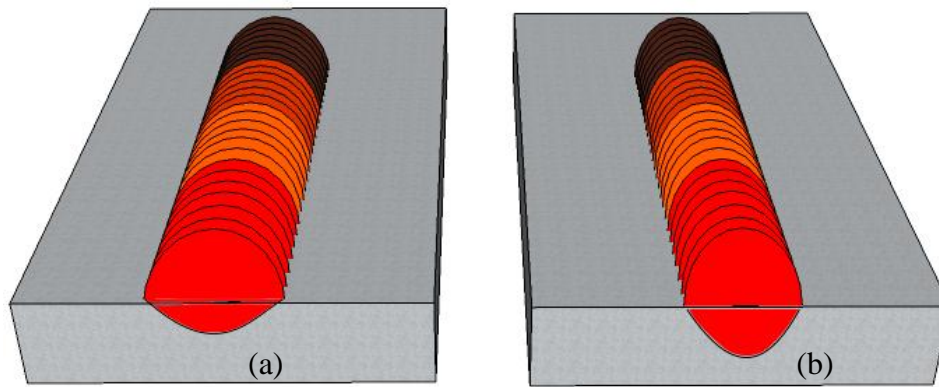


Figura 2.7: Efeito da velocidade de avanço no cordão de solda, a) velocidade de avanço demasiado baixa, b) velocidade de avanço correta.

- **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 2.4. 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 a longitude 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 2.8, 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.

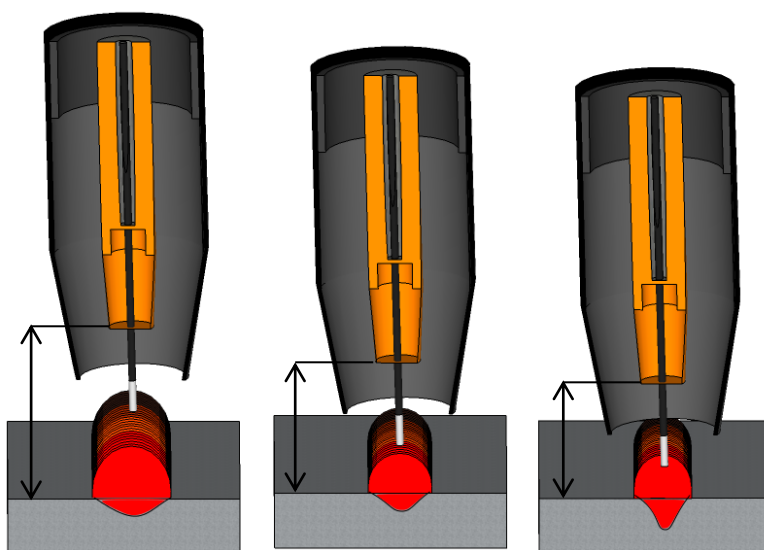


Figura 2.8: Efeito das diferentes longitudes livres do eléctrodo sobre o cordão de solda.

- **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 a topo em posição plana, geralmente o ângulo de trabalho é de  $90^\circ$ , tal como se pode observar na Figura 2.8, 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 direção de deslocação da solda. Quando este aponta na direção oposta à direção da deslocação, a técnica se denomina “solda de revés com ângulo de arraste”. Quando o eletrodo aponta na direção da deslocação, a técnica é conhecida como “solda à direita ou avanço com ângulo de empurre”. Tais ângulos e técnicas podem proporcionar em solda diferentes resultados que são determinantes nos características finais da união. Seu uso está relacionado com os resultados que se queiram atingir. A orientação do eletrodo e seu efeito sobre o largo e a penetração da solda são apresentados na Figura 2.9, a seguir.

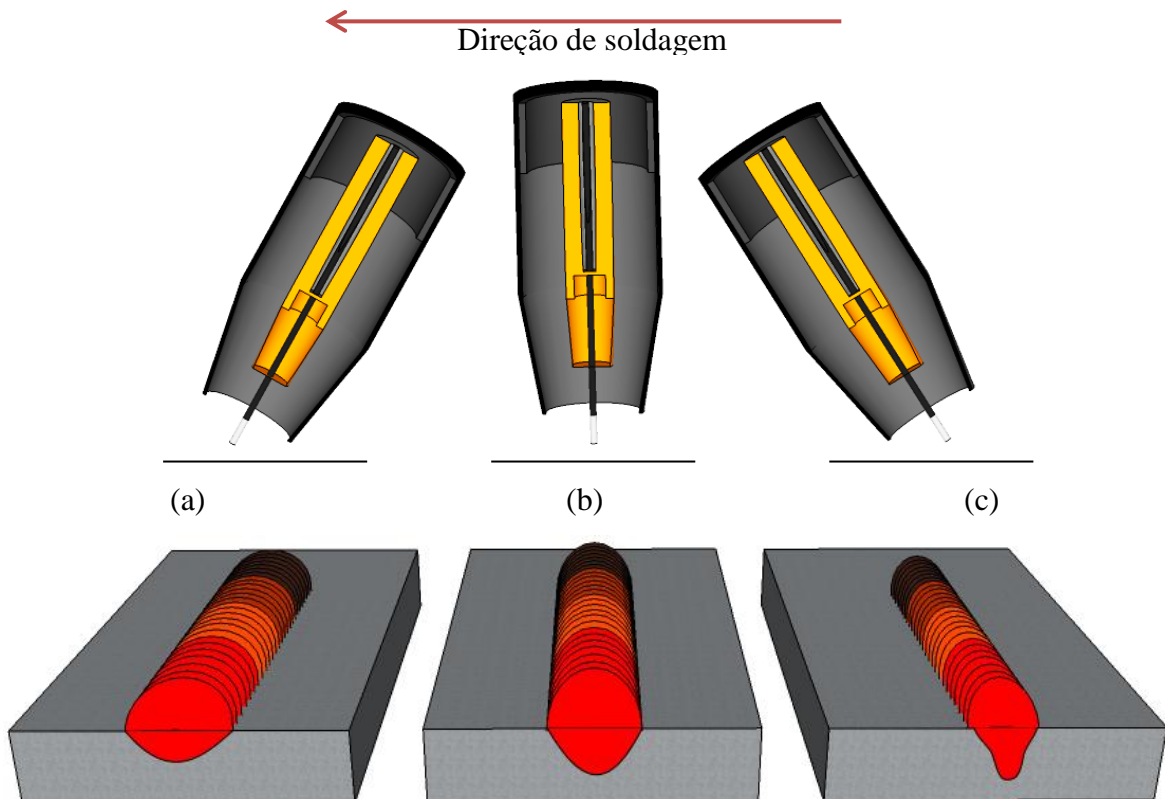


Figura 2.9: Efeito da posição do eléctrodo e a técnica de solda sobre o cordão (a) ângulo de empurre. (b) ângulo perpendicular (c) ângulo de arrastre.

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.

- **Tamanho 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: aço carbono, aço de alta liga, alumínio, cobre e aço 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: aço carbono, aço de alta resistência e baixos liga, e aço 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 (BARHORST, 2000).

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 (LUCAS, 1999).

### 2.1.3.3 - Modos de transferência metálica

O processo GMAW atua com múltiplas variáveis, e a interação destas têm 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 2.10, a seguir, apresenta esquematicamente os campos operacionais das principais formas de transferência metálica na soldagem GMAW.

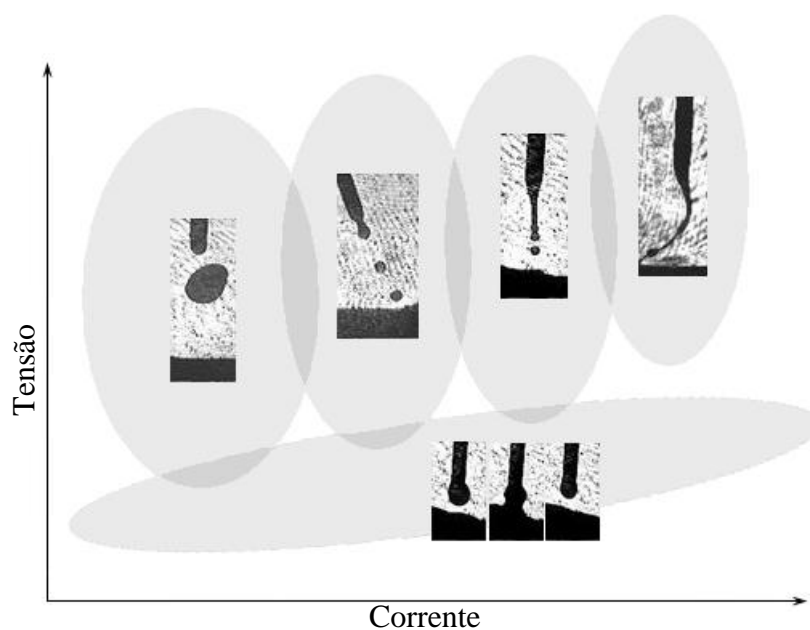


Figura 2.10: Zonas de transferência metálica na soldagem GMAW (Lopera, 2010).

- **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 2.11, 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.

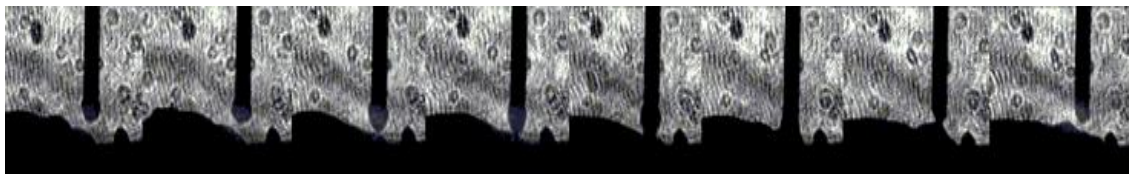


Figura 2.11: Sequência modo de transferência por curto circuito.

- **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 2.12, a seguir.



Figura 2.12: Sequência modo de transferência globular.

- **Transferência Goticular**

Na transferência goticular ou *spray* (vide Figura 2.13, 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 2.10. 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).

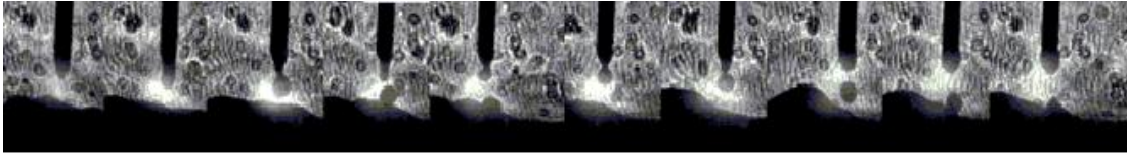


Figura 2.13: Sequência modo de transferência por spray.

## 2.2 - INTELIGENCIA ARTIFICIAL

A Inteligência Artificial (IA) é um ramo da ciência da computação que se propõe a elaborar dispositivos que simulem a capacidade humana de raciocinar, perceber, tomar decisões e resolver problemas. Existente há décadas, esta área da ciência é enormemente impulsionada com o rápido desenvolvimento da informática e da computação, permitindo que novos elementos sejam rapidamente ali agregados. Neste ramo científico, têm-se alguns métodos para a solução de problemas como, por exemplo, redes neurais, lógica difusa, visão artificial, algoritmos genéticos, entre outros. A seguir, abordar-se-ão somente os métodos de redes neurais e lógica difusa utilizados na presente pesquisa.

### 2.2.1 - Redes neurais

Segundo Braga *et al.* (2000), em sistemas inteligentes, as Redes Neurais Artificiais (RNAs) são modelos matemáticos que se assemelham às estruturas neurais biológicas (Redes Neurais Biológicas (RNBs)) e que tem capacidade computacional adquirida por meio de aprendizado e generalização. O aprendizado em RNAs consiste na fase onde a rede neural absorve os dados e, a partir destes, modifica seus parâmetros de entrada. Esta etapa pode ser considerada como uma adaptação da RNA às características intrínsecas de um problema, onde se procura cobrir um grande espectro de valores associados às variáveis pertinentes. Tal fato se dá para que a RNA adquira, por meio de uma melhora gradativa, uma boa capacidade de resposta para o maior número de situações possíveis. Por sua vez, a generalização de uma RNA está associada à sua capacidade de dar respostas coerentes para dados não apresentados a esta durante o treinamento.

Espera-se que uma RNA treinada tenha uma boa capacidade de generalização, independentemente de ter sido controlada durante o treinamento. No entanto, atualmente, boa parte das atuais pesquisas na área tem como objetivo o desenvolvimento de modelos e técnicas de aprendizado que tenham algum controle de generalização. O conceito atual é



que o aprendizado e a generalização são ações conjuntas, ao passo da ideia de que a generalização surge naturalmente como consequência do aprendizado.

Segundo Kovács (1996), o processamento da informação em RNAs é feito por meio de RNAs em que o armazenamento e o processamento da informação são realizados de maneira paralela e distribuída, por elementos processadores relativamente simples. Cada elemento processador corresponde a um neurônio artificial, também conhecido como modelo de Mc Culloch e Pitts, ou simplesmente modelo MCP.

Ainda de acordo com Braga *et al.* (2000), uma das características mais importantes das RNAs é que as mesmas são aproximadoras universais de funções multivariáveis contínuas. Em outras palavras, qualquer problema de aproximação de funções contínuas pode ser resolvido por meio de RNAs, independente do número de variáveis envolvidas.

#### 2.2.1.1 - O neurônio

Uma rede neural busca inspiração na estrutura do cérebro. A unidade básica do cérebro humano, o neurônio, apresenta uma região onde as informações são processadas (corpo celular ou soma), algumas entradas (os dendritos) e uma saída (o axônio), conforme apresentado na Figura 2.14, a seguir. Os impulsos elétricos recebidos nos dendritos são processados e o resultado deste processamento é localizado no axônio.

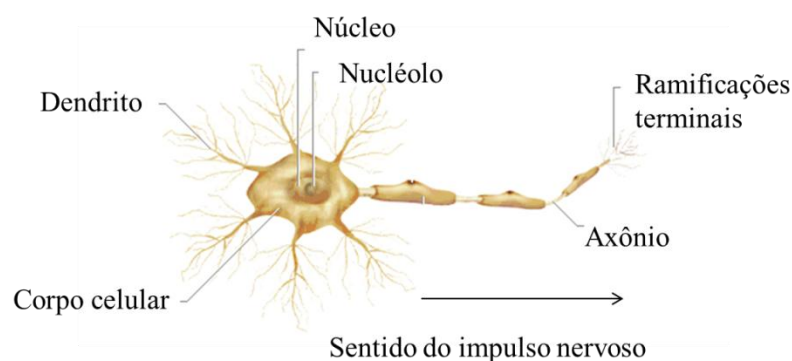


Figura 2.14: Neurônio Biológico.

O modelo de neurônio no qual se baseiam as redes neurais possui uma estrutura idêntica. A Figura 2.15, a seguir, ilustra um modelo de um neurônio  $k$ , identificando os três elementos básicos para o projeto de redes neurais, a saber: um conjunto de sinapses – cada uma

caracterizada por um peso ou força própria; um somador para somar os sinais de entrada – ponderado pelas respectivas sinapses do neurônio, constituindo um combinado linear; e, uma função de ativação para restringir o intervalo permissível de amplitude do sinal de saída do neurônio a um valor finito.

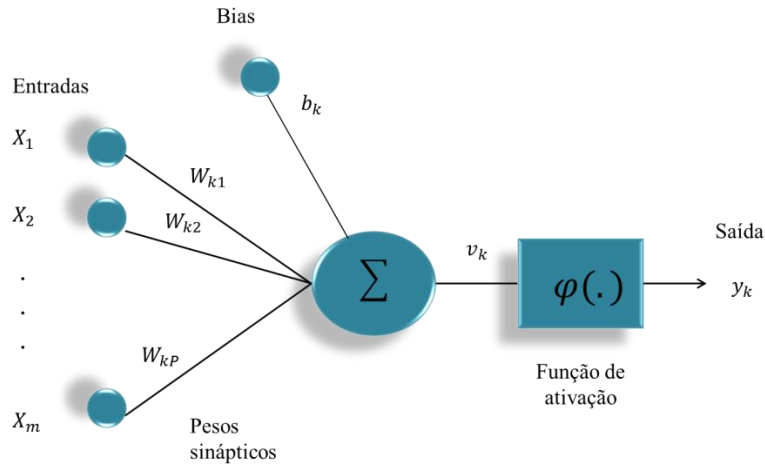


Figura 2.15: Modelo de um Neurônio Artificial (Modificado de HAYKIN, 2001).

A Tabela 2.2, a seguir, apresenta uma analogia da comparação entre o cérebro humano e as redes neurais artificiais.

Tabela 2.2: Comparação entre RNAs e RNBs.

<b>Redes Neurais Artificiais</b>	<b>Cérebro Humano</b>
Neurônio Artificial	Neurônio Biológico
Entradas	Dendritos
Pesos	Sinapse
Função de Ativação ou Limiar	Disparo
Função soma	Soma

### 2.2.1.2- Características Básicas de Redes Neurais Artificiais

Ao se tratar de RNAs, é possível distinguir pelo menos dois componentes físicos, a saber: conexões e elementos de processamento. A combinação destes cria uma RNA. Neste sentido, concretiza-se uma analogia com um grafo, onde os nodos são os elementos de processamento e as arestas são as conexões.

Têm-se ainda outros componentes (não físicos) das redes neurais, a saber: padrões e funções (SIMPSON, 1990). Os padrões são dados de entrada da rede; são uma codificação que corresponde a certa modelagem da realidade de uma aplicação definida para a RNA. As funções são modelos matemáticos utilizados no treinamento e reconhecimento de padrões.

- Padrões

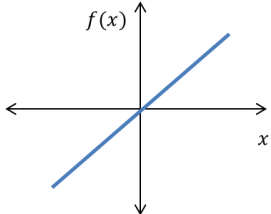
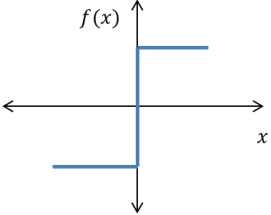
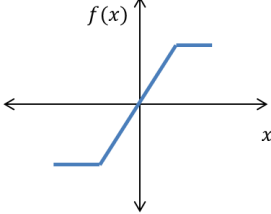
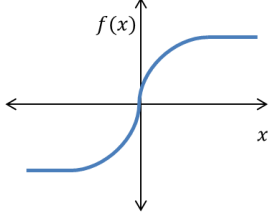
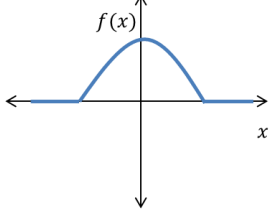
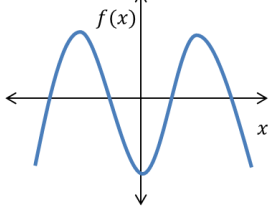
As RNAs não podem operar sem dados. Estes são os padrões apresentados a uma RNA. Podem ser valores numéricos ou mesmo caracteres que serão posteriormente transformados em números. Faz-se importante salientar que um determinado padrão de entrada corresponde um sinal de saída, sendo que a dimensão (tipo) do padrão de entrada pode ser diferente do padrão de saída.

Uma das principais aplicações de RNAs é o reconhecimento (classificação) de padrões. Como exemplo, em reconhecimento da fala, existem diferentes tipos de características envolvidas. Em tal aplicação, o padrão de entrada pode ser uma matriz que contém o caráter, e a saída, apenas um número que indica se o caráter foi reconhecido ou não. Assim, tem-se um padrão de entrada com dimensão diferente do padrão de saída. E ainda, neste caso, torna-se essencial um pré-processamento de informações, o que significa que a seleção e representação correta das características do padrão a ser aplicado pode afetar o desempenho da rede. Criar o melhor conjunto possível de características como padrão é o primeiro passo para o sucesso de qualquer aplicação em RNAs.

- Funções

Das funções utilizadas em RNAs, é possível distinguir basicamente em dois tipos, a saber: funções para transferência de sinais entre neurônios e funções para aprendizado de padrões. As funções de transferência, também chamadas funções de limiar, são aquelas responsáveis por determinar a forma e a intensidade de alteração dos valores transmitidos de um neurônio a outro. Tem-se as funções de ativação de cada neurônio na Tabela 2.3, a seguir.

Tabela 2.3: Funções de ativação de um neurônio artificial.

	Função	Faixa	Gráfico
Identidade	$y = x$	$[-\infty, \infty]$	
Degrau	$y = \text{sign}(x)$ $y = H(x)$	$[-1, 1]$ $[0, 1]$	
Linear a trechos	$y = \begin{cases} -1 & \text{se } x < -1 \\ x & \text{se } -1 \leq x \leq 1 \\ 1 & \text{se } x > 1 \end{cases}$	$[-1, 1]$	
Sigmoide	$y = \frac{1}{1 + e^{-x}}$ $y = \text{tgh}(x)$	$[0, 1]$ $[-1, 1]$	
Gaussiana	$y = Ae^{-Bx^2}$	$[0, 1]$	
Sinusoidal	$y = A \text{sen}(\omega x + \varphi)$	$[-1, 1]$	

- Conexões

A maneira como os neurônios encontram-se arranjados em camadas e o conjunto de suas respectivas conexões definem a topologia ou arquitetura da RN. Segundo Haykin (2001), existem três tipos de arquiteturas de rede fundamentalmente diferentes, a saber:

- a) Redes alimentadas adiante com camada única (*feedforward*): a designação “camada única” se refere à camada de saída. A camada de entrada não é considerada por não realizar nenhum cálculo ou computação (vide Figura 2.16, a seguir).

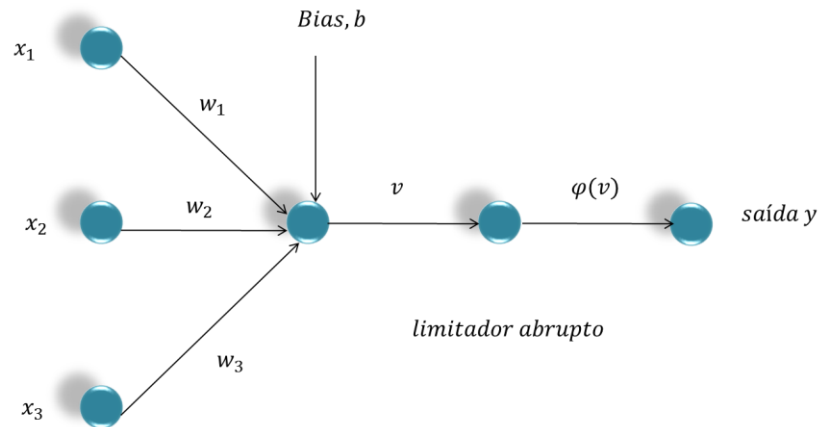


Figura 2.16: Modelo de uma RNA com uma única camada (Modificado de Haykin, 2001)

- b) Redes alimentadas adiante com múltiplas camadas (*feedforward*): estas se distinguem da primeira classe pela presença de uma ou mais camadas ocultas, cujos nós computacionais são chamados de neurônios ocultos ou unidades ocultas, os quais tem função de intervir entre a camada externa e a camada de saída da rede (vide Figura 2.17, a seguir).

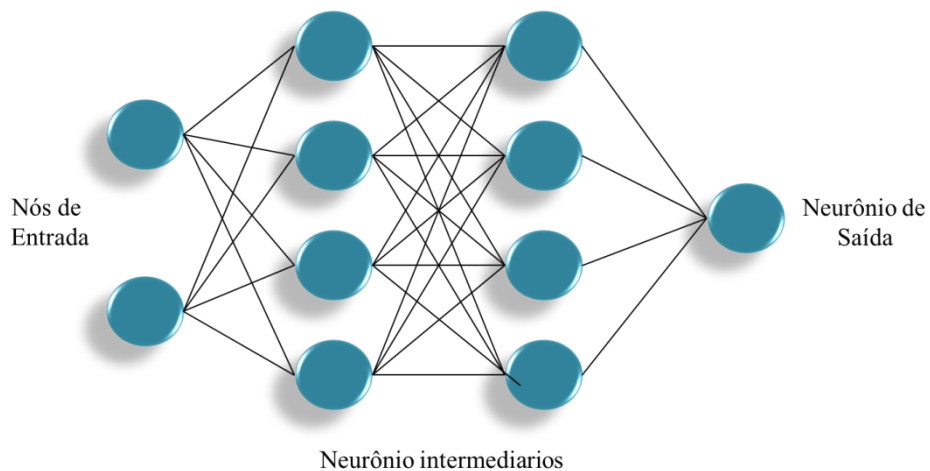


Figura 2.17: Modelo de uma RN de Múltiplas Camadas

- c) Redes recorrentes: distinguem-se das outras duas classes por possuir pelo menos um laço de realimentação (vide Figura 2.18, a seguir).

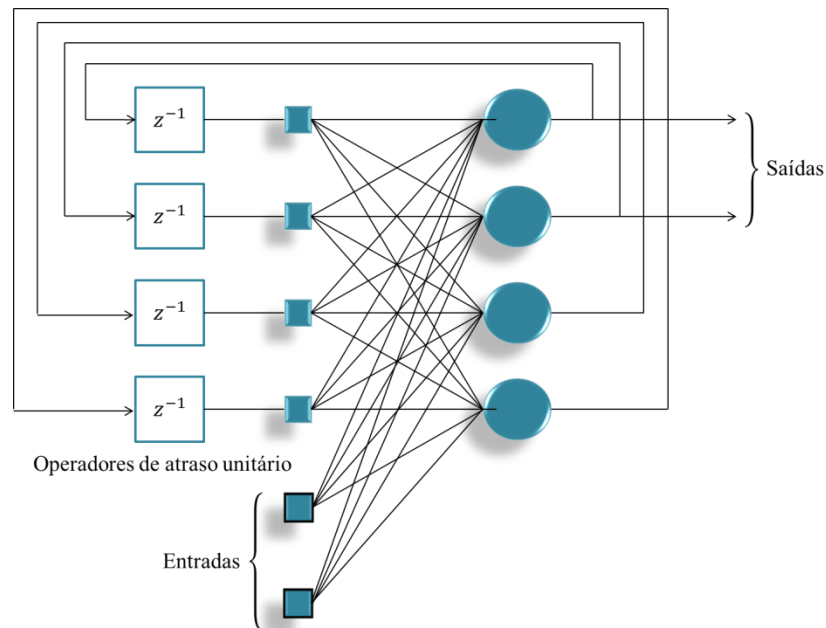


Figura 2.18: Modelo de uma RN Recorrente (modificado Haykin, 2001).

- Elementos de Processamento

O elemento de processamento, também chamado de “neurônio”, é a parte da RNA onde se dá todo o processamento. Um elemento de processamento de uma camada de entrada recebe apenas um valor do padrão de entrada correspondente, mas possui diversas conexões com os neurônios das camadas seguintes (que podem ter várias entradas).

Cada elemento de processamento coleta a informação que lhe foi enviada e produz um único valor de saída. Existem duas importantes qualidades que um elemento de processamento deve possuir, a saber:

1. Elementos de processamento necessitam apenas de informações locais. A saída do elemento de processamento é uma função dos pesos e das entradas.
2. Elementos de processamento produzem apenas um valor de saída. Este valor único é propagado através das conexões do elemento emissor para o receptor, ou para fora da rede, quando for um elemento da camada de saída.

Tais qualidades permitem que as RNAs operem em paralelo. Existem vários mecanismos para obter-se a saída de um elemento de processamento. Em geral, tem-se uma função das saídas da camada anterior e os pesos das conexões entre a camada anterior e a atual.

Matematicamente, a saída de um elemento de processamento é uma função das entradas e dos pesos (vide Equação 2.1, a seguir).

$$Entradas_i = F(Padrão, Peso_j) \quad (2.1)$$

O modo mais comum de função de um elemento de processamento é a combinação linear. Desta forma tem-se a Equação 2.2, expressa a seguir.

$$Entradas_i = f\left(\sum (padrão_{ij} peso_{ij})\right) = f(Padrão, Peso_j) \quad (2.2)$$

Com  $i$  variando de 1 a  $n$  (número de conexões).

### 2.2.1.3 - Aprendizado

As RNAs caracterizam-se pelo aprendizado por meio de exemplos. Para um determinado conjunto de dados, o algoritmo de aprendizado deve ser responsável pela adaptação dos parâmetros da rede, de maneira que, em um número finito de iterações do algoritmo, haja convergência para uma solução. O critério de convergência varia de acordo com o algoritmo e com o paradigma de aprendizado, mas pode envolver, por exemplo, a minimização de uma função-objetivo, a variação do erro de saída ou mesmo a variação das magnitudes dos vetores de peso da rede.

Basicamente, considera-se que o processo de aprendizado tem como característica a ocorrência de estímulo da rede pelo meio externo através da apresentação do conjunto de dados. Como consequência do referido estímulo, o algoritmo de aprendizado provoca mudança nos parâmetros da rede e, finalmente, a mudança nos parâmetros acarreta em mudança no comportamento da RNA. Espera-se que a mudança gradual no comportamento da rede resulte em melhoria gradativa do seu desempenho.

Segundo Kovács (1996), a modificação do processamento ou da estrutura de conhecimento de uma rede neural envolve a alteração do seu padrão de interconexão. Em princípio, tal fato pode se dar de três maneiras, a saber: desenvolvimento de novas conexões; perda de conexões existentes na rede; e, modificação dos pesos das conexões já existentes.

#### 2.2.1.4 - Aprendizado e Generalização

Segundo Braga *et al.* (2000), o objetivo principal do aprendizado em RNs é a obtenção de modelos com boa capacidade de generalização, tendo como base o conjunto de dados. Em problemas de aproximação, classificação e predição, o conjunto de treinamento é composto por pares de entrada e saída  $(x, y_d)$ , sendo caracterizada previamente a saída desejada  $y_d$  para um determinado valor de entrada  $x$ . O ajuste de pesos deve modificar a saída  $y$  de forma que se dê a diferença entre  $y$  e  $y_d$ , ou seja, o erro diminui a cada iteração. No entanto, a minimização pura e simples do erro pode não levar a resultados satisfatórios. Portanto, é preciso fazer mais do que simplesmente minimizar o erro do conjunto de treinamento para obter-se boa resposta de generalização. O objetivo dos algoritmos de treinamento deve ser o de aproximar funções geradoras  $f_g$  dos dados, e não simplesmente o de minimizar o erro do conjunto de treinamento.

#### 2.2.1.5 - Classificação das Redes Neurais

Apesar de não haver uma norma taxonômica para os modelos de RNs, tem-se algumas diferenças entre estes (LIPPMAN, 1987; KOHONEN, 1990). Neste sentido, é possível realizar uma distinção entre os modelos através de suas características básicas, por meio dos tipos de entradas, das formas de conexão e dos tipos de aprendizado.

1. Por tipos de entrada, pode ser binária ou intervalar:

- Binário: modelo que aceita entrada discreta, ou seja, somente na forma de 0 e 1. Neste caso, têm-se os modelos de Hopfield e ART.
- Intervalar: modelo que aceita qualquer valor numérico como entrada (forma contínua). Tem-se os modelos de Backpropagation e Kohonen.

2. Por forma de conexão, define-se a maneira como os elementos da rede estão conectados e, por conseguinte, como o modelo matemático representa a transmissão dos sinais na rede. Existem três formas de conexão, a saber:

- Alimentação à frente: os sinais de entrada são simplesmente transformados em sinais de saída.



- Retroalimentação: os sinais sofrem alterações em diversas transições de estado, sendo a saída também alimentadora da entrada.
  - Competitiva: realiza a interação lateral dos sinais recebidos na entrada entre os elementos dentro de uma zona de vizinhança.
3. O tipo de aprendizado (treinamento) refere-se à existência ou não de um sinal de saída pré-definido para a rede.
- Conforme Rezende (2003), no aprendizado supervisionado tem-se junto à rede, conjuntos de padrões de entrada e seus correspondentes padrões de saída. Durante tal processo, a rede realiza um ajustamento dos pesos das conexões entre os elementos de processamento, segundo uma determinada lei de aprendizagem, até que o erro entre os padrões de saída gerados pela rede alcance um valor mínimo desejado. Como exemplo, tem-se: *perceptron*, *adaline* e *madaline*, *backpropagation*, que são algumas entre as dezenas de leis de aprendizagem supervisionada.
  - No aprendizado não-supervisionado, a rede “analisa” os conjuntos de dados que lhe são apresentados, determina algumas propriedades dos conjuntos de dados e “aprende” a refletir tais propriedades em sua saída. A rede faz uso de padrões, regularidades e correlações para agrupar os conjuntos de dados em classes. As propriedades que a rede “aprenderá” sobre os dados podem variar em função do tipo de arquitetura utilizada e da lei de aprendizagem. Como exemplo, tem-se: Mapa Auto-Organizável de Kohonen, Redes de Hopfield e Memória Associativa Bidirecional, que são alguns métodos de aprendizado não-supervisionado.

Uma possível classificação dos modelos de redes neurais é apresentado na Tabela 2.4, a seguir.

Tabela 2.4: classificação das redes neurais segundo algumas de suas características.

MODELO	Tipo de entradas		Forma de conexão			Tipo de aprendizado.	
	Binárias	Intervalar	Alimentação à frente	Retro-alimentação	Competitiva	Supervisionado	Não-supervisionado
Perceptron / Adaline							
Backpropagation							
Hopfield							
Kohonen							
ART							

#### 2.2.1.6 - Modelagem em Redes Neurais artificiais

Para o desenvolvimento de um modelo ou projeto com base em redes neurais artificiais, são necessárias diversas etapas, a saber: definição do problema; coleta dos dados de treinamento e de teste; pré e pós-processamento dos dados; projeto da estrutura da rede; treinamento; teste e validação.

Na elaboração do projeto da RNA ideal para solucionar um determinado problema, uma das tarefas mais difíceis é determinar o número de elementos de processamento da camada oculta, bem como o número de camadas ocultas (camadas intermediárias ou ocultas são as camadas onde se tem a maior parte do processamento, através de conexões ponderadas. Podem ser consideradas extratoras de características). Mesmo sem a existência de regras específicas, estudos como o Teorema de Kolmogorov demonstraram que uma única camada oculta é suficiente para representar qualquer função ou para resolver a maioria dos problemas de generalização. Todavia, estes não indicam o número de elementos de processamento que a referida camada deve conter.

Os tipos de RNs mais adequadas são as redes multicamadas do tipo *feedforward* com método de aprendizagem supervisionado (utilizando o algoritmo de *backpropagation*). A parte principal do algoritmo de *backpropagation* é a maneira interativa pela qual os erros

utilizados para adaptar os pesos são propagados para trás, isto é, a partir da camada de saída para as camadas anteriores.

### **2.2.2 - Logica Fuzzy**

Lidar com fatores como, por exemplo, a ambiguidade, a incerteza e as informações vagas na resolução de problemas é uma característica do pensamento humano, que faz uso do conhecimento adquirido e experiências diversas (MUKAIDONO, 2001). A modelagem computacional convencional não trabalha com ambiguidades, pois utiliza o conceito de verdadeiro ou falso (MUKAIDONO, 2001). A precisão computacional também é limitada, deixando sempre uma margem, por mínima que seja, para a incerteza (KLIR *et al.*, 1997). Em meio a tanta imprecisão e incertezas, Zadeh (1988) desenvolveu Teoria dos Conjuntos Fuzzy, ou Conjuntos Nebulosos, onde se permite tratar os referidos níveis de incertezas e ambiguidade.

Os Conjuntos Fuzzy e a Lógica Fuzzy provêm à base para geração de técnicas poderosas para a solução de problemas, com uma vasta aplicabilidade, em especial, nas áreas de controle e tomada de decisão.

A força da Lógica Fuzzy deriva da sua habilidade em inferir conclusões e gerar respostas a partir de informações vagas, ambíguas e qualitativamente incompletas e imprecisas. Neste aspecto, os sistemas de base Fuzzy têm habilidade de raciocinar de forma semelhante à dos humanos. Seu comportamento é representado de maneira muito simples e natural, levando à construção de sistemas compreensíveis e de fácil manutenção. É importante notar que no referido tipo de sistema, não é necessário conhecer-se o modelo matemático do processo, o que se constitui em uma vantagem sobre outros procedimentos em que é fundamental a descrição matemática do sistema a controlar.

Segundo Del Brio e Sanz (2002), a Lógica Fuzzy é baseada na Teoria dos Conjuntos Fuzzy. Esta é uma generalização da teoria dos conjuntos tradicionais para resolver os paradoxos gerados a partir da classificação “verdadeira ou falsa” da Lógica Clássica. Tradicionalmente, uma proposição lógica possui dois extremos, a saber: ou “completamente verdadeiro” ou “completamente falso”. Entretanto, na Lógica Fuzzy, uma

premissa varia em grau de verdade de 0 a 1, o que leva a ser parcialmente verdadeira e parcialmente falsa.

Com a incorporação do conceito de “grau de verdade”, a Teoria dos Conjuntos Fuzzy estende a teoria dos Conjuntos Tradicionais. Os grupos são rotulados qualitativamente (com a utilização de termos linguísticos, tais como: alto, morno, ativo, pequeno, perto, etc.) e os elementos de tais conjuntos são caracterizados variando o grau de pertinência (valor que indica o grau em que um elemento pertence a um conjunto).

#### 2.2.2.1 - Conjuntos Fuzzy

Os Conjuntos Fuzzy são uma extensão dos clássicos, onde se acrescenta uma função de pertinência, definida esta como um número real entre 0 e 1. Neste sentido, se introduz o conceito de conjunto ou subconjunto Fuzzy, associando a um determinado valor linguístico, definido por uma palavra ou etiqueta linguística, onde se tem o nome do conjunto ou subconjunto. Para cada conjunto, é possível definir uma função de pertinência chamada  $\mu_A(x)$ , que indica o grau em que a variável  $x$  está incluída no conceito representado pela etiqueta  $A$  ( $0 \leq \mu_A(x) \leq 1$ ), se esta função que toma o valor 0 significa que tal valor de  $x$  não está incluído em  $A$  e se toma o valor 1, que correspondente valor de  $x$ , está absolutamente incluído em  $A$  (Del Brio e Sanz, 2002).

Seja  $X$  uma coleção de objetos, expressa genericamente por  $x$ . Em seguida, um conjunto difuso  $A$  em  $X$ , define-se como um conjunto de pares ordenados (vide Equação 2.3, a seguir).

$$A = \{(x, \mu_A(x))/x \in X\} \quad (2.3)$$

Onde  $\mu_A(x)$  é uma função de pertinência cuja etiqueta é  $A$  e seu domínio é  $x$ .

#### 2.2.2.2 - Função de pertinência

O primeiro passo na representação de Conjuntos Fuzzy é a escolha da função de pertinência. A escolha de tal função depende do problema a ser modelado e também da capacidade computacional disponível para processar o que se deseja, conforme expresso na Tabela 2.5, a seguir, se apresentam alguns exemplos de funções de pertinência. As funções não lineares podem ser mais eficientes para problemas mais complicados, porém,

demandam um poder computacional muito maior do que as funções lineares (YING, 2000).

Tabela 2.5: Exemplos de funções de pertinência.

Nome da função	Função de pertinência	Gráfico
Triangular	$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a} & \text{se } x \in (a, m] \\ \frac{b-x}{b-m} & \text{se } x \in (m, b) \\ 1 & \text{se } x \geq b \end{cases}$	
Sinusoidal	$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ 2 \left\{ \frac{x-a}{b-a} \right\}^2 & \text{se } x \in (a, m] \\ 1 - 2 \left\{ \frac{x-a}{b-a} \right\}^2 & \text{se } x \in (m, b) \\ 1 & \text{se } x \geq b \end{cases}$	
Trapezoidal	$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } (x \leq a) \text{ ou } (x \geq d) \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } x \in (a, b] \\ 1 & \text{se } x \in (b, c) \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{se } x \in (c, d) \end{cases}$	
Degrau	$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x = a \\ 1 & \text{se } x \neq a \end{cases}$	

### 2.2.2.3 - Variáveis linguísticas

Uma variável linguística é uma variável cujos valores são nomes de Conjuntos Fuzzy, como, por exemplo, a temperatura de um dado processo poderia ser uma variável

linguística assumindo valores baixa, média, alta etc. Estes são descritos por intermédio de Conjuntos Fuzzy (vide Figura 2.19).

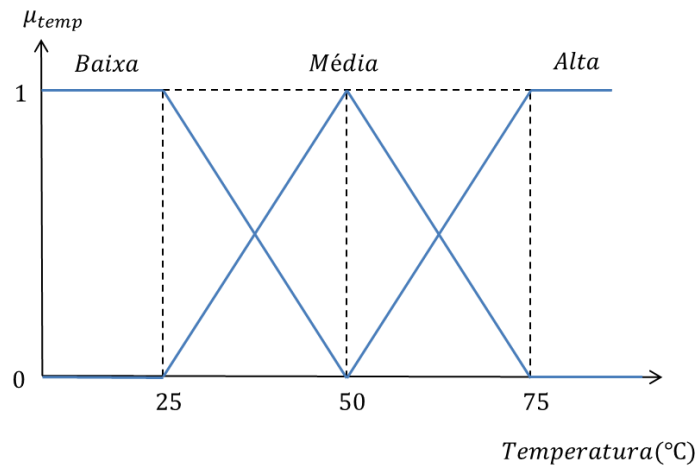


Figura 2.19: Conjuntos fuzzy exemplo de temperatura.

Em geral, os valores de uma variável linguística podem ser sentenças em uma linguagem especificada (BRANCO; DENTE, 2001). De modo ilustrativo, os valores da variável linguística temperatura poderiam ser expressos como alta, não alta, muito alta, bastante alta, não muito alta, alta mas não muito alta. Neste caso, os valores da referida variável se dão por sentenças formadas a partir do nome alta, da negação não, dos conectivos e é, mas, e dos modificadores muito e bastante. Para gerar os valores compostos, utilizam-se diversos termos, que podem ser divididos nas seguintes categorias:

- Termos Primários: nomes de Conjuntos Fuzzy especificados em um determinado universo (como, por exemplo, alto, baixo, pequeno, médio, grande, zero).
- Conectivos Lógicos: A negação NÃO e os conectivos E e OU podem ser definidos em termos das operações de complementação, intersecção e união, respectivamente.
- Modificadores: servem para modificar o Conjunto Fuzzy associado a um termo linguístico, por meio de uma composição de funções, como, por exemplo, muito, pouco, levemente, extremamente.
- Delimitadores: são utilizados para evitar ambiguidades, como, por exemplo, {a E b OU c E d} pode ser ambíguo, ou seja, pode significar {(a E B) OU (c E D)} ou então {a E (b OU c) E d}. Para determinar com precisão a ordem em que os operadores lógicos devem ser considerados, utilizam-se os delimitadores. Quando


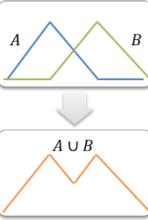
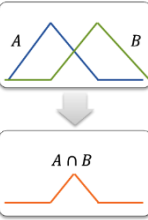
esta ordem puder ser determinada sem ambiguidade, os delimitadores podem ser omitidos.

#### 2.2.2.4 - Operações e propriedades em conjuntos Fuzzy

Como na teoria clássica, os Conjuntos Fuzzy obedecem a certas propriedades e podem ser operados de diversas maneiras. As operações entre conjuntos são extremamente importantes para os sistemas que se utilizam de tal lógica, pois os cálculos proposicionais, por exemplo, são baseados nas referidas operações.

Definem-se, a seguir, três operações básicas a realizar sobre conjuntos, a saber: complemento, união e interseção (CASTILLO; MELIN, 2008). Sejam as etiquetas A e B as que identificam a dois Conjuntos Fuzzy associados com uma variável linguística x, as operações se definem conforme evidenciado na Tabela 2.6, a seguir.

Tabela 2.6: Operações básicas em conjuntos Fuzzy

<p>Complemento: Operador lógico NOT</p>	$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$	
<p>União: Operador lógico OR de Zadeh (max)</p>	$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$	
<p>Interseção: Operador lógico AND de Zadeh (min)</p>	$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$	

#### 2.2.2.5 - Regras Fuzzy

As regras fuzzy são regras normais utilizadas para operar, da maneira correta, conjuntos Fuzzy e descrever uma relação entre variáveis linguísticas. Para criar tais regras e preciso

de um raciocínio coerente com o que se deseja manusear e obter. Segundo Castillo e Melin (2008), este raciocínio deve ser dividido em duas etapas: (1) avaliar o antecedente da regra e (2) aplicar o resultado no conseqüente.

Consideremos dois conjuntos fuzzy  $A$  e  $B$ , representando valores linguísticos nos universos  $X$  e  $Y$ , respectivamente. Uma declaração condicional fuzzy da forma SE  $A$  ENTÃO  $B$  é definida matematicamente a equação 2.4:

$$R: SE A ENTÃO B = A \rightarrow B = A \times B \quad (2.4)$$

#### 2.2.2.6 - Estrutura do Sistema Lógico Fuzzy

A estrutura de todo o sistema lógico Fuzzy tem por base três operações, conforme exposto na Figura 2.20, a seguir.

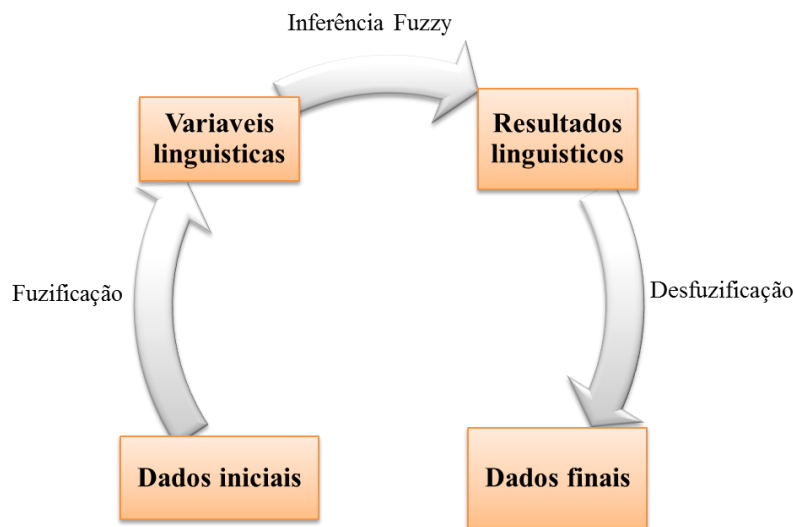


Figura 2.20: Estrutura do Sistema Lógico Fuzzy. (Modificado de Cox, 1995).

- Fuzificação

Este primeiro passo do sistema lógico Fuzzy, corresponde à transformação dos dados de entrada iniciais em suas respectivas variáveis linguísticas. Nesta etapa, todas as informações relativas à imprecisão ou incerteza associada às referidas variáveis devem ser consideradas. Pinho (1999) destaca a necessidade de que especialistas da área estudada sejam consultados durante a atribuição de valores relacionados aos graus de pertinência



para cada uma das variáveis em estudo, contribuindo, assim, para maior precisão nos resultados.

- Inferência Fuzzy

Uma vez feita a adequação dos valores iniciais em variáveis linguísticas, segue-se com a fase denominada inferência Fuzzy, cuja finalidade é relacionar as possíveis variáveis entre si, por meio de regras pré-estabelecidas, cumprindo, assim, com os objetivos do algoritmo.

Segundo Von Altrock (1996), é possível separar tal fase em dois componentes, denominados “Agregação” e “Composição”, conforme ilustra a Figura 2.21, a seguir. O primeiro diz respeito à chamada parcela “Se” das regras que irão reger o processo de inferência; e, o segundo, refere-se à parcela “Então” do conjunto de regras, assim chamadas “Se-Então”.

Tais componentes compõem o chamado processo de inferência lógica Fuzzy, controlando as relações entre variáveis linguísticas por meio de seus respectivos operadores lógicos.

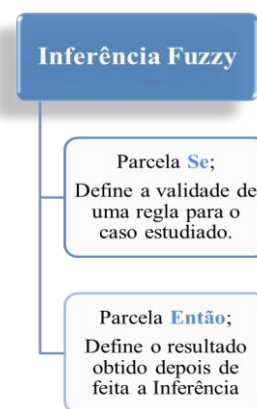


Figura 2.21: Inferência Fuzzy.

- Defuzzificação

A terceira e última etapa do sistema lógico Fuzzy é chamada defuzzificação, e compreende, segundo Von Altrock (1996), a tradução do resultado linguístico do processo de inferência Fuzzy, em um valor numérico. Porém, Cox (1995) fornece outra interpretação para o termo “defuzzificação”, compreendendo o processo de conversão de um número Fuzzy em um número real.

Existem algumas diferentes técnicas de defuzzificação presentes nas literaturas. Cox (1995), ao se referir a esta etapa e aos diferentes métodos, afirma que este é mais próximo da própria heurística do que dos algoritmos baseados nos “Primeiros Princípios”. Alguns dos métodos citados por Cox (1995) são:

- *Centroid* – é o método onde a saída precisa ser considerada; é o centro de gravidade do conjunto Fuzzy.
- *Maximum height* – é o método onde a saída precisa se obtém tomando a média entre os dois elementos extremos no universo de discurso que correspondem aos maiores valores da função de pertinência do conjunto Fuzzy de saída.

### 3 - ESTADO DA ARTE

A geometria do cordão de solda no processo de arco metálico com proteção gasosa, igualmente a outros processos, é um fator importante na determinação das características mecânicas da solda. Determinadas variáveis da geometria do cordão, tais como: largura, reforço e profundidade de penetração, estão fortemente influenciados pelos parâmetros operacionais, incluindo a corrente de solda, a tensão, a velocidade de soldagem, o gás de proteção, entre outras.

Levaram-se a cabo sucessivas e numerosas investigações de estudos sobre os resultados obtidos nos processos de soldagem. Os primeiros trabalhos estatísticos (CHANDEL; BALA, 1986) estão focados na seleção e avaliação de relações entre as variáveis da soldagem por arco submerso e a geometria do cordão. Outros pesquisadores (DOUMANIDIS *et al.*, 1986) centram-se na geração de simples modelos em um esforço por controlar a largura do cordão, a penetração e o *ratio* de enfiamento da solda. No entanto, Chandel (1988) é o primeiro que particulariza estes trabalhos pela primeira vez para a soldagem por *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), pesquisando as relações entre os parâmetros do processo e a geometria do cordão resultante.

Recentemente, levaram-se a cabo grandes quantidades de investigações para estudar o efeito dos parâmetros de solda sobre a geometria do cordão utilizando diferentes tecnologias. Ademais, ocorreram ainda investigações no monitoramento e ações de modelagem e o controle das características geométricas do cordão, dado que a seleção correta dos parâmetros do processo é requerida para obter uma geometria do cordão ótima, a qual tem uma influência muito grande na qualidade da união. Na Figura 3.1, a seguir, tem-se a relação das investigações divididas em três níveis, relacionados com o grau de dificuldade da investigação.

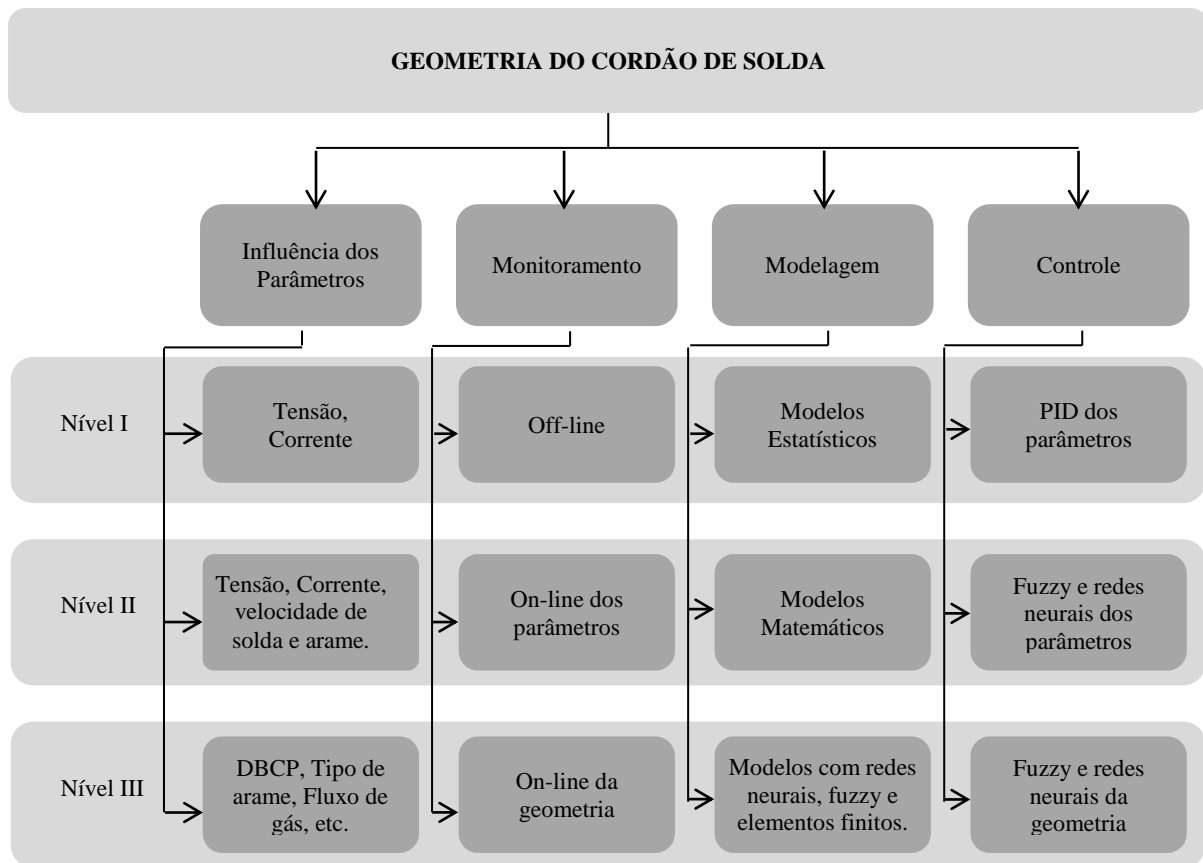


Figura 3.1: Classificação das investigações relacionadas com a geometria do cordão de solda.

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

Em relação à influência dos parâmetros de solda, realizaram-se diversas investigações. Lima *et al.* (2005), por exemplo, estuda as relações entre parâmetros de qualidade e variáveis observáveis, como tensão, corrente, velocidade de soldagem e geometria da poça de solda, com foco na última, para determinar matematicamente se a geometria da poça traz informações relevantes para a determinação da qualidade do cordão, ou se são suficientes as medições de corrente, tensão e velocidade de soldagem.

Diversos autores analisam a relação existente entre os parâmetros do processo de solda com a geometria dos cordões obtidos, propondo modelos para as funções de resposta. Karandenziz *et al.*, (2007) determinam um tipo de modelo, também denominado ajuste curvilíneo, considerando como variáveis de influência a tensão e a intensidade do arco eléctrico e a velocidade de solda. Aqueles autores consideraram unicamente o estudo da penetração por solda MAG (*Metal Active Gas*) em aço de baixo conteúdo em carbono e limitam-se a obter a variação do referido parâmetro em função das variáveis indicadas.

Wahab e Painter, (1997) consideram como variáveis do processo a tensão e intensidade do arco, a velocidade de solda e o volume de gás empregado, se limitando a obter um modelo similar ao indicado. Kim *et al.* (2001) também tomam por base o modelo curvilíneo, obtendo como funções de resposta a penetração, o reforço e a largura do cordão. Aqueles autores estabelecem que a exatidão dos modelos encontrados varie desde 0 a 25%. Em todos os trabalhos mencionados até o momento, tem-se como denominador comum não somente o modelo empregado, mas também o fato de que não se estabelece nenhuma metodologia de otimização com as variáveis de resposta.

Karadeniz *et al.* (2007) pesquisaram os efeitos da corrente de solda, tensão de arco e velocidade de solda na penetração.

Queiroz (2011) investigou a influência da polaridade do eletrodo na transferência do metal, o efeito da autocorreção na modulação da corrente de pulso tensão de base, a influência dos parâmetros principais da pulsação e as limitações do processo. As características geométricas foram analisadas pelas seções transversais de cordões.

Em Simões (2012), o objetivo do trabalho foi analisar a influência dos parâmetros de um sistema mecanizado de soldagem, composto por uma tocha TIG (*Tungsten Inert Gas*) e outra MAG em tandem, sobre a geometria do cordão de solda. Os parâmetros analisados foram: a corrente de soldagem e a distância da ponta do eletrodo a peça no processo TIG, a velocidade de alimentação de arame e a tensão do arco no processo MAG, a velocidade de soldagem e a distância entre as tochas.

Ghalib *et al.* (2012) pesquisaram a correlação entre os parâmetros de solda e a geometria do cordão no processo GMAW utilizando como parâmetros de solda a tensão do arco, a corrente de solda e a velocidade de solda, inspecionando a qualidade e medindo a geometria da união.

Gomes *et al.* (2012) analisaram como os parâmetros da solda no processo FCAW (Flux-Cored Arc Welding) influíam na geometria, na produtividade e na qualidade superficial dos revestimentos de aço inoxidável. Os parâmetros eleitos foram: a velocidade de alimentação do arame, a tensão, a velocidade de solda e a distância bico de contato-peça. Para analisar a influência dos parâmetros, desenvolveram-se modelos matemáticos baseados na metodologia de superfície de resposta. Os resultados evidenciaram que todos

os parâmetros foram significativos. Os graus de importância entre os mesmos variam de acordo com as respostas de interesse. Fato que também demonstrou ser significativo foi a interação entre os parâmetros.

Em Guimarães (2012), fez-se uma análise comparativa, em soldas de revestimento, dos níveis de diluição e relação R/L (reforço/largura) depositados pelos processos GMAW e GMAW-CW (*Gas Metal Arc Welding – Coupled Wire*), com variação dos valores de corrente e tensão em três níveis e velocidade de soldagem em dois níveis. Foram analisados também os aspectos de sanidade e descontinuidades superficiais, bem como dos parâmetros geométricos e econômicos.

### **3.2 - MONITORAMENTO DA GEOMETRIA DO CORDAO DE SOLDA**

A necessidade da garantia de qualidade e produtividade dos processos de soldagem está em constante crescimento. Sendo o monitoramento um processo especial, muitos trabalhos de pesquisa são desenvolvidos com o intuito de alcançar um melhor entendimento dos fenômenos envolvidos. Millau *et al.* (1997), por exemplo, utilizaram redes neurais (RNs) na supervisão dos processos de soldagem.

Di *et al.* (2000) conseguiram fazer o monitoramento *on line* de defeitos em soldagem para o processo GMAW, com base em técnicas de classificação por redes neurais, a partir da caracterização dos histogramas da voltagem e da corrente do processo.

Lanzetta *et al.* (2001) analisaram imagens *on line* procedentes de duas câmaras instaladas na tocha de solda: o arco e a observação da poça permitem o rastreamento do processo de solda; um laser pode ser utilizado para a inspeção do cordão de solda. Os algoritmos de análises de imagens desenvolvidas baseiam-se na extração de características, que têm sido selecionadas após uma longa série de experimentos. Além de pré-processamento, implementaram-se diferentes filtros para o aumento da confiabilidade do sistema, pelo alto ruído nas imagens.

Absi e Carvalho (2003) descrevem a primeira fase de desenvolvimento de métodos de monitoração da poça de fusão no processo de soldagem GMAW, utilizando técnicas de visão computacional e algoritmos de processamento de imagem. O método de monitoração utilizado tem por base a análise da imagem da poça de forma a extrair parâmetros, tais

como: a largura máxima do cordão, a largura da abertura na raiz da junta (*gap*) e seu alinhamento em relação ao arame. Tais parâmetros podem ser relacionados com os parâmetros de soldagem (tensão, corrente, velocidade de alimentação do arame e distância do tubo de contato ao metal base – "*stand-off*"), produzindo uma estimativa da qualidade do cordão resultante. Os testes práticos mostraram que o ajuste da câmara afeta a qualidade da imagem obtida e, conseqüentemente, influencia os resultados produzidos na análise. O algoritmo desenvolvido nesta primeira fase apresentou bons resultados, sendo ainda sensível à qualidade da imagem.

O monitoramento em tempo real da qualidade do processo de soldagem é muito importante para evitar o tempo e os custos das inspeções pós-soldagem, bem como as operações de reparação. São poucos os trabalhos realizados no controle de qualidade baseado no monitoramento de parâmetros não convencionais como, por exemplo, a luminosidade, temperatura ou a pressão acústica (CAYO, 2008).

Em Chen e Wu (2009), tem-se a apresentação de dois métodos de processamento de imagens em 2D e 3D. O processamento de imagens direciona-se à obtenção da informação apropriada mediante a melhora das características da imagem e do cálculo das características geométricas da piscina de solda.

Wang e Li (2013) propõem um sistema de detecção de visão tridimensional para imitar o sistema de visão humana e observar a superfície de poça de solda em três dimensões no processo de GTAW. A variação dos parâmetros principais e sua relação com os parâmetros secundários foram estudados por meio de experimentos em diferentes condições de solda.

### **3.3 – MODELAGEM DO PROCESSO DE SOLDAGEM E O FORMATO DO CORDÃO DE SOLDA**

Têm sido desenvolvidos diversos modelos que relacionem os parâmetros do processo de soldagem e o formato do cordão de solda. O modelo pode ser matemático ou estadístico. O modelo matemático tem por base equações de conservação que descrevem os fenômenos físicos envolvidos no processo. O modelo estadístico utiliza técnicas de regressão, redes neurais artificiais, lógica Fuzzy e outros algoritmos de aproximação de funções.

Apesar do importante número de investigações realizadas para analisar o processo de solda por arco, atualmente, tem-se uma carência de modelos precisos e generalistas que relacionem as entradas e a geometria do cordão – algo que está relacionado com a considerável novidade da técnica e a vertiginosa evolução deste método de produção.

Lima *et al.* (2005) desenvolve o modelo matemático que permite inferir parâmetros de qualidade do cordão (como, por exemplo, largura, reforço, penetração e zona termicamente afetada) a partir dos parâmetros de soldagem e largura da poça de solda. O modelo obtido é bastante preciso e permite concluir que a medição da largura da poça de solda traz informações relevantes para a determinação dos parâmetros de qualidade do cordão. No entanto, requer-se de uma grande quantidade de provas e pessoal experimentado para determinar os parâmetros ótimos de solda. Portanto, requer-se de um método mais eficiente para a determinação de ditos parâmetros.

Murray e Scotti (1999) desenvolveram um método para selecionar os parâmetros de solda para um cordão desejado. Aqueles autores estabeleceram uma relação analítica entre os parâmetros de soldagem e as variáveis do processo GMAW através de uma análise dimensional e de regressão de dados experimentais obtidos após uma grande quantidade de provas de solda, onde os parâmetros foram precisamente controlados e as variáveis do processo exatamente medidas e correlacionadas. Obtendo relações analíticas exatas entre os parâmetros de solda, variáveis do processo e a geometria do cordão e, encontrando uma faixa de parâmetros específicos que asseguravam um tamanho ideal de cordão de solda e uma adequada penetração.

J. E. Torres (2000) realizou uma investigação com o objetivo de otimizar um procedimento de solda GMAW para uma liga de Al-Mg-Se através do controle do calor fornecido. A fim de lograr tal objetivo, aquele autor estudou minuciosamente o efeito do controle do calor fornecido pelos parâmetros operacionais e aplicação de tratamentos térmicos posteriores à solda de alumínio 6061-T6, realizando uma avaliação dos níveis de precipitação, coerente e incoerente, mediante microscopia eletrônica de transmissão e óptica, e respaldado por uma análise térmica diferencial dos fenômenos metalúrgicos e a variação das propriedades mecânicas que se geraram na ZAT, zona fundida e zona de transição. Mediante o cálculo por elementos finitos, obteve-se a modelização dos ciclos térmicos, originados pela solda da liga de alumínio, com a concretização de predições com margens de desvio de 3%.



Em Kim *et al.* (2003), tem-se o desenvolvimento de vários modelos matemáticos lineares para prever a altura, a largura e a penetração do cordão, onde os coeficientes utilizados são valores logarítmicos com base em medidas experimentais. Os próprios pesquisadores melhoraram posteriormente a precisão e o desempenho dos modelos estatísticos de predição de geometria do cordão, ampliando o campo de trabalho para aplicação aos processos GMAW em tempo real (KIM *et al.*, 2008).

Em Srinivasa *et al.* (2009), 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. Aplicou-se o método *Taguchi* para planejar os experimentos. É preciso destacar cinco parâmetros do processo, a saber: a velocidade de alimentação de arame, a espessura da placa, a frequência e a amplitude do pulso, e a velocidade de solda – todos desenvolvem os modelos fazendo uso das análises de regressão múltipla. Os resultados dos experimentos demonstram que os modelos podem prever a geometria da união com uma precisão razoável. De maneira similar, Son *et al.* (2007) obtêm modelos a partir de análises de regressão múltipla. Estes têm sido empregados para a predição dos parâmetros ótimos de solda, no que tange o procedimento experimental com base em um método *Taguchi* e identificando-se os diversos problemas que se derivam do processo de solda GMAW.

Em Planckaert *et al.* (2010), apresentam-se alguns problemas na modelagem física do processo GMAW em relação ao modo de transferência por curto-circuito. Devido à complexidade dos fenômenos físicos que intervêm no processo de solda, se realizam simplificações para obter um modelo para os principais fenômenos físicos – que pode ser utilizado para a aplicação em diferentes estratégias de controle.

Em Dorta *et al.* (2011), tem-se dois modelos empíricos que permitem prever a geometria do cordão de solda em aço inoxidável dúplex tipo 2205. Para obtenção dos referidos modelos, empregou-se uma metodologia que permite a utilização dos parâmetros operacionais mais importantes da solda, a saber: a intensidade de corrente, a tensão, a velocidade de solda e o calor contribuído.

Ghalib *et al.* (2012) desenvolveram uma metodologia para mostrar os valores da geometria do cordão de solda para qualquer valor de parâmetro de solda e vice-versa, conseguindo um desvio entre geometria do cordão de solda predito e resultado experimental real menor que 1,0 mm.

Outras linhas de estudo tem por base técnicas de inteligência artificial. A utilização de redes neurais artificiais, conhecidas como ANN (do inglês “*Artificial Neural Networks*”), é o caso mais comum. O objetivo é ajustar a rede para a melhora da predição dos parâmetros ótimos de configuração do processo. Neste sentido, Srikanthan e Chandel (1988) propõem uma metodologia sistêmica para construir um primeiro modelo baseado em ANN. Modelos mais precisos foram propostos posteriormente, focados, em sua maioria, em prever a geometria do cordão de solda (KIM *et al.*, 2004). O sucesso das referidas técnicas deve-se ao desconhecimento inicial do valor de um número elevado de parâmetros ao processo que influem na qualidade do cordão.

D. S. Nagesh e G. L. Datta (2002) utilizaram as RNs para modelar o processo de solda por arco. As redes serviram para associar as variáveis de processo de solda com as características da geometria de cordão. O treinamento e a implementação das redes têm brindado uma aplicação satisfatória. Neste sentido, aqueles autores chegaram à conclusão de que uma RN poderia ser efetivamente implementada para estimar os parâmetros geométricos do cordão de solda.

Edwin e Kumanan (2007) propõem uma técnica inteligente – Neuro-Fuzzy adaptativo (ANFIS) – para prever a largura do cordão de solda no processo por arco submerso (SAW) para um dado conjunto de parâmetros de solda. Os experimentos estão desenhados de acordo com princípios de Taguchi, e seus resultados foram utilizados para desenvolver um modelo de regressão múltipla e treinar a rede inteligente. A rede treinada serviria para prever a qualidade da solda. A proposta ANFIS, desenvolvida com funções de MATLAB, é flexível, precisa, e apresenta um monitoramento em linha.

Um enfoque com base no uso de Desenho de Experimento (DOE), Redes Neurais Artificiais (ANN) e Algoritmos Genéticos (GA) para a modelagem do processo da solda por arco metálico com gás (GMAW) foi demonstrado por Nagesh e Datta (2008). As RNs *Backpropagation* são utilizadas para associar as variáveis do processo de soldadura com as características da geometria do cordão de solda. Vale ressaltar que a RN para estimar os parâmetros geométricos do cordão de solda pode ser eficazmente implementada, com uma pequena diferença na percentagem de erro entre os resultados previstos e experimentais. Os algoritmos genéticos são capazes de otimizar os parâmetros de soldagem para os parâmetros geométricos do cordão desejado.

Edwin e Kumanan (2010) apresentaram o desenvolvimento de um modelo híbrido neural para prever a largura do cordão de solda na solda por arco submerso. Os experimentos foram desenhados utilizando os princípios e resultados de Taguchi para o desenvolvimento de um modelo de regressão múltipla. O conjunto de dados gerados a partir da análise de regressão múltipla (MRA) foi utilizado no modelo de RNA, que foi treinado com o algoritmo de *Backpropagation* na plataforma MATLAB, utilizado para desenvolver NHM com vistas à previsão da qualidade da soldadura. O NHM é mais flexível e preciso do que os modelos existentes para melhor sistema de monitoramento *on line*.

Em Xiong *et al.* (2012), tem-se a aplicação dos aspectos mais destacados de uma rede neural e uma análise de regressão de segunda ordem para prever a geometria da união na solda por arco elétrico. Desenvolveu-se uma série de experimentos mediante a aplicação de um desenho central composto. Os resultados demonstraram que não somente os modelos propostos podem prever a largura e o reforço com uma precisão razoável do cordão, mas também o modelo de rede neural tem um melhor rendimento que o modelo de regressão de segunda ordem devido a sua grande capacidade de aproximar os processos não lineares.

Ramos *et al.* (2013) apresentaram uma metodologia para o entendimento das relações entre os parâmetros do processo e da geometria do cordão de solda. O objetivo da primeira parte deste estudo foi encontrar a geometria ótima do cordão no processo GMAW. Aqui, fez-se uso da função de RN para prever a área da seção transversal do cordão de solda utilizando um desenho fatorial de três níveis de experimentos para treinamento da referida rede.

Wang e Li (2013), visando obter o estado da penetração em tempo real, estabeleceram modelos de RNs para estimar a penetração com base nos parâmetros característicos propostos. Neste sentido, os modelos foram capazes de prever o estado da penetração em tempo real mediante a observação da poça de fusão em três dimensões.

O formato e as dimensões do cordão de solda são fatores importantes que asseguram as propriedades mecânicas de determinada junta soldada. Logo, para simular um processo de soldagem de forma mais realista, é necessário o desenvolvimento de modelos cada vez mais precisos e capazes de representar a geometria do cordão de solda. Em geral, o principal parâmetro a prever na maioria das investigações é a geometria do cordão de solda (RAVEENDRA; PARMAR, 1987). Alguns trabalhos com lógica Fuzzy e métodos de elementos finitos foram desenvolvidos a fim de se modelar o cordão de solda e determinar qual o seu formato real.

Carrino *et al.* (2007) centram-se em um estudo visando aumentar a produtividade no processo GMAW, mediante a modelagem do sistema baseado na lógica difusa, cujos elementos se determinaram mediante a formação de uma ANN com dados experimentais. Ao mesmo tempo, foram desenvolvidos modelos matemáticos, com base na análise de regressão múltipla, visando proporcionar um período de comparação e avaliar a eficácia do enfoque neuro-difuso em frente aos métodos matemáticos.

Outro enfoque analisado por McDill e Oddy (1995) tem por base a formulação de um modelo de elementos finitos, conhecido como FEM (do inglês “*Finite Element Model*”), da formação do cordão de solda em três dimensões para um processo GMAW. Esta linha de trabalho tem conseguido recentes sucessos desenvolvendo modelos FEM com diferentes geometrias, procurando otimizar a diminuição de tensões residuais (JIANG *et al.*, 2010), predizendo a distribuição de temperaturas e a deformação durante todo o processo (KHOSHRAVAN; SETOODEH, 2010).

### **3.4 - CONTROLE DO PROCESSO GMAW**

O processo de soldagem GMAW convencional é o mais estudado e desenvolvido no Brasil, mas a qualidade e quantificação, bem como o controle e a automatização em soldagem são as áreas menos pesquisadas (SCOTTI; PONOMAREV, 2008). Golob *et al.* (2002), por exemplo, realizam um modelo matemático do processo GMAW e encontram a relação matemática entre o largo do cordão da solda com a corrente e a velocidade de solda. Aqueles autores implementaram um sistema de controle para a corrente de solda por meio de um controlador PI Fuzzy, para, então, obterem uma largura estável.

Yu *et al.* (2009) pesquisaram um sistema de detecção de visão especial, com a assistência de um filtro de banda estreita – que poderia superar a influência da forte luz de arco de GMAW. Aqueles autores propõem um controlador inteligente com base no sistema Fuzzy para o largo da poça de solda. Os experimentos mostraram que os requisitos de tempo real e a precisão da detecção e o controle do largo da piscina de solda do processo GMAW robótica poderiam ser satisfeitas pelo sistema estabelecido.

Em Wanga *et al.* (2012), desenvolve-se um modelo de controle adaptativo na superfície da poça de solda no processo de GMAW pulsado. Aqui, tem-se que o processo resultante é variável no tempo, ruidoso e não linear. Após a simplificação em um sistema linear,

desenhou-se um modelo do sistema de controle adaptativo. Os resultados experimentais confirmaram a eficácia do algoritmo de controle de intervalo de modelo adaptativo e o sistema de controle desenvolvido.

Mousavi e Haeri (2011) desenharam um controlador preditivo funcional com base na estrutura do modelo ARMarkov, para controlar a corrente de solda e a tensão de arco em um processo GMAW, e realizar comparações com controladores PI e PID.

Com base na revisão bibliográfica, pode-se identificar que os estudos dos processos de soldagem aplicados seguem principalmente dois tipos de metodologias. Uma primeira seria a observação da solda acabada, isto é, uma análise *offline*. Outro tipo de metodologia persegue a medida dos parâmetros de soldagem durante sua execução. Os segundos precisam um maior investimento de recursos para sua determinação, já que não só devem registrar os parâmetros de soldagem, senão também capturar as imagens do processo. Para a realização deste trabalho se selecionou o controle *online* da largura do cordão de solda com base num sistema de aquisição de imagens de baixo custo e determinar os parâmetros de configuração do processo GMAW que mais influem na geometria da peça acabada, foi selecionado este trabalho já que são reduzidos as publicações relacionadas com a modelagem e controle das características geométricas do cordão, sendo isto muito importante já que mediante ditas características são determinadas a propriedades mecânico- metalúrgicas de uma união e por tanto a qualidade do produto final.

## **4 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTOS**

O presente capítulo destaca o processo metodológico desenvolvido para a realização do controle em tempo real da largura do cordão de solda, bem como a modelagem e seleção de parâmetros ótimos, visando bons resultados depois da estratégia de controle. Também apresenta uma descrição dos materiais de consumo empregados com suas respectivas especificações, os equipamentos e acessórios, e ainda, a montagem geral das bancadas experimentais para a realização de todos os experimentos necessários.

### **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, detalha-se brevemente cada um dos dispositivos do sistema utilizados, as 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 (SMAW, GTAW e GMAW). A fonte trabalha no processo de soldagem por *Gas Metal Arc Welding* (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**

Todo o processo de modelagem e controle foi feito através do computador, que possui uma placa de aquisição de dados *PCI Eagle 703s*, encarregada de adquirir os sinais elétricos do processo. Tem-se ainda a conexão com duas placas NI USB 6009, para a realização da comunicação com a fonte de soldagem e a mesa linear. Os programas instalados para a realização destas tarefas são: Labview e MATLAB.

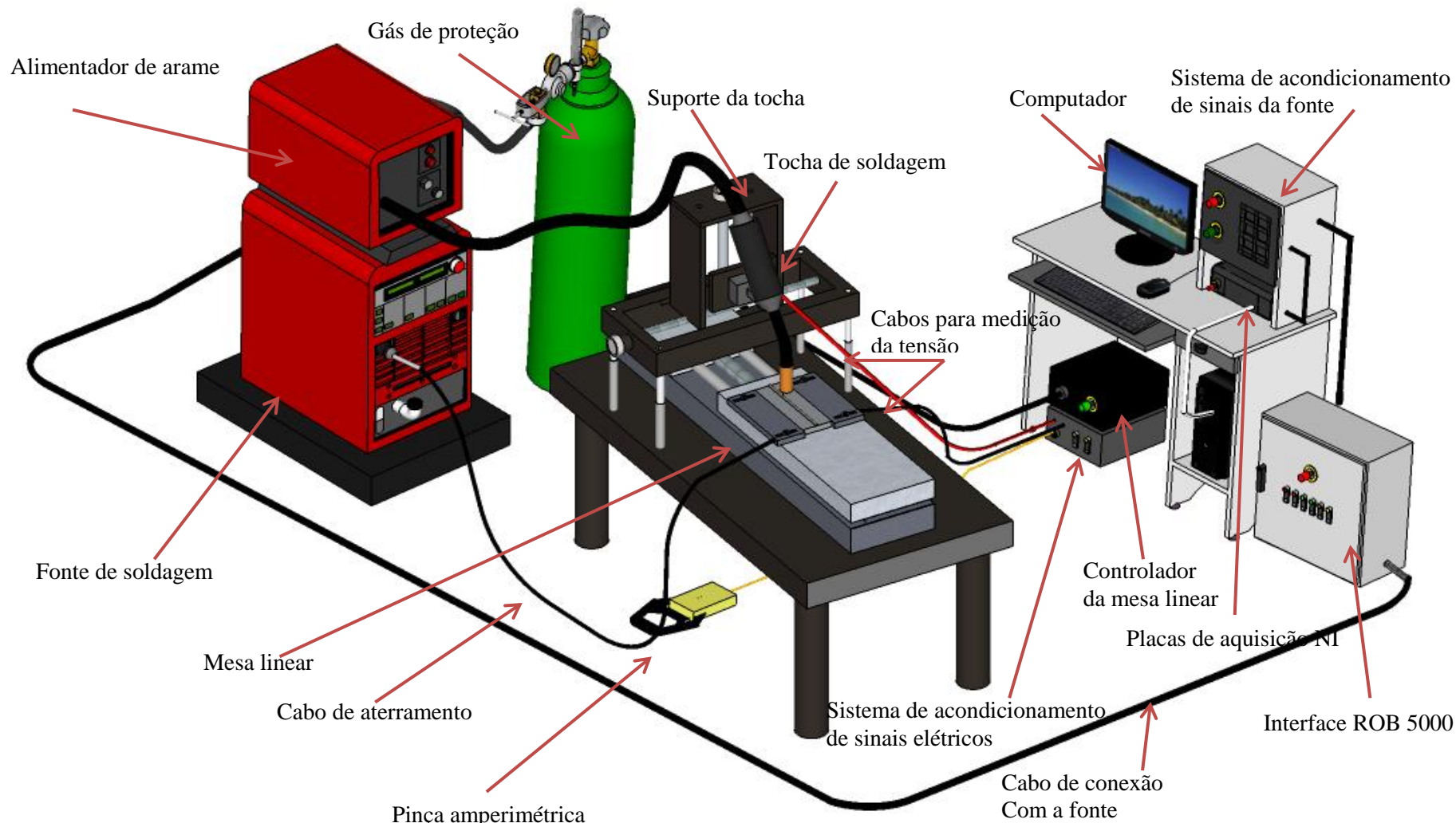


Figura 4.1: Distribuição e Localização do Sistema Computacional, Hardware e Equipamentos Utilizados.

#### 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.

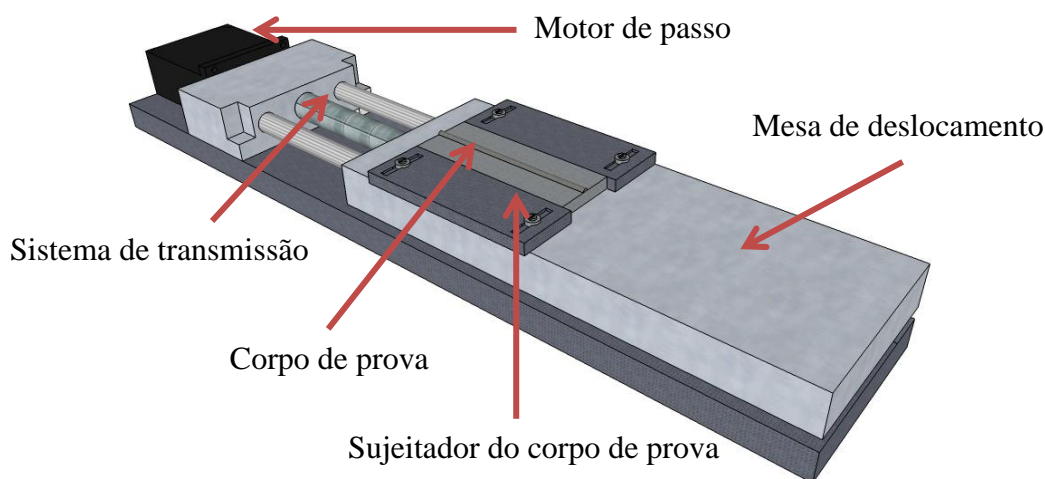


Figura 4.2: Mesa de deslocamento linear

A mesa suporta uma carga de até 15 kg. O motor de passo usado na mesa é do fabricante BERGER LAHR, modelo ICIA IDS91. Para seu controle, são necessários dois sinais. 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, utilizou-se um microcontrolador (PIC16C63A). Em primeira instância, foram definidas as velocidades máximas e mínimas existentes nos tipos de soldagem trabalhados no laboratório. O sistema permite a utilização da velocidade em uma faixa de 1 a 20 mm/s, que atende as velocidades requeridas no processo GMAW.

A placa de controle da mesa linear foi desenvolvida para ser utilizado em conjunto com um computador. O envio de sinais à placa é feito por meio de uma placa *National Instrument* (NI) USB 6009, recebendo do computador determinados tipos de comando, tais como: sentido, velocidade de soldagem e tempo de execução ou distância (comprimento do cordão a realizar-se).



A vantagem de se utilizar a placa de aquisição da NI é a possibilidade do uso de programas desenvolvidos em C, C++, MATLAB, LabVIEW, entre outros.

#### 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>. Aquela tipo de gás foi utilizado por ser item frequentemente 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

A fim de realizar comparações e validar a metodologia aqui proposta, fez-se uso de dois tipos de metal de adição, a saber: arame maciço da classe AWS A5.18 ER70S, com diâmetro igual a 1 mm, e arame tubular (*metal cored*) da classe 410NiMo MC, com diâmetro igual a 1.2 mm.

- Metal de base

O material do metal de base utilizado para a realização da soldagem dos testes exploratórios e também para a confecção das placas de teste definitivas foi o aço carbono AISI 1020, em formato de chapa plana, com dimensões 6,35 mm de espessura, e 200 mm x 50 mm de comprimento e largura, respectivamente, previamente limpos e esmerilados.

#### **4.1.2 - Sistema de comunicação com a fonte de soldagem.**

Para controlar as variáveis da fonte de soldagem em tempo real e ativar o processo em estudo, desenvolveu-se um sistema de comunicação entre a fonte e um computador. Tal comunicação realiza-se mediante a interface ROB 5000, marca *Fronius*. Esta 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 serão 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.

Para realizar a comunicação entre o computador e o ROB 5000, utilizou-se uma placa de aquisição NI USB 6009 e um *software* desenvolvido em MATLAB – placa formada por 08 entradas analógicas de 0 a 10 volts, 02 saídas analógicas de 0 a 05 volts e 12 entradas/saídas digitais de 0 a 05 volts, a uma taxa de amostragem de 10KHz. Para a comunicação, desenvolveu-se um sistema de acondicionamento de sinais, que possui amplificadores operacionais e um conjunto de relés de estado sólido.

#### 4.1.3 - Sistema de aquisição de imagens

O sistema de aquisição de imagens é utilizado para a medição de largura do cordão de solda; é composto por uma câmera *web* Wc045, marca Multilaser, com uma resolução de 16 MP e com conexão USB 2.0, além de um filtro escuro n.º 10 utilizado nos capacetes de solda para a diminuição do brilho gerado pelo arco elétrico. A Figura 4.3, a seguir, apresenta a posição da câmera para determinar a largura do cordão e a posição do filtro, além do sistema de proteção do aparato, dado que o ambiente onde os equipamentos ópticos estão instalados é bastante hostil e apresenta muitos respingos.

A câmera é ligada ao computador e, mediante um programa desenvolvido em MATLAB, são adquiridas as imagens.

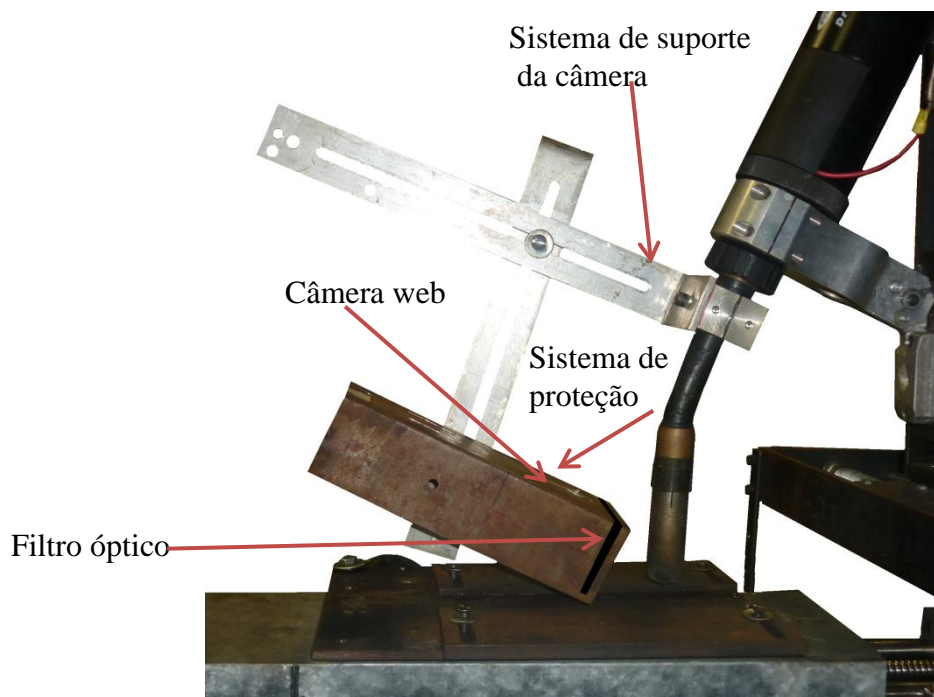


Figura 4.3: Sistema de aquisição de imagens

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

O monitoramento dos parâmetros, tais como: 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 mostrar 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 a 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.

#### **4.2 – METODOLOGIA**

A metodologia para a realização do presente estudo apresenta três etapas, conforme detalhamento na Figura 4.4, a seguir. A primeira, relaciona-se com a modelagem através de redes neurais. A segunda, com o processamento digital de imagens. E, a terceira, descreve o desenho do controlador. Uma vez realizadas, estas concretizam a implementação do sistema de controle para a largura do cordão.

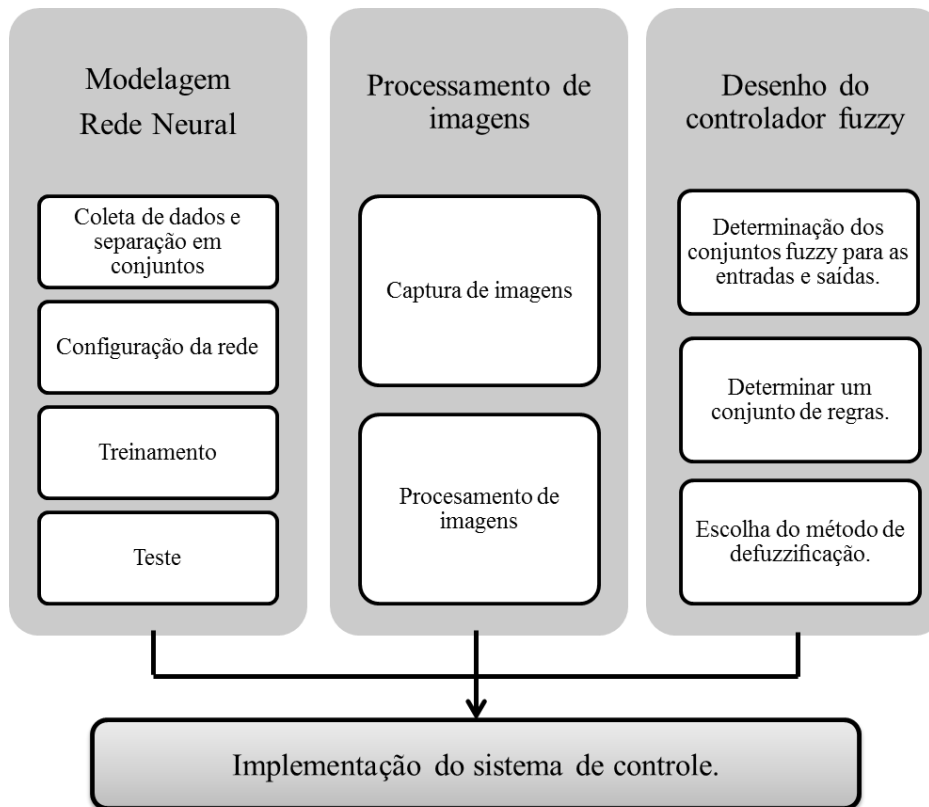


Figura 4.4: Esquema da metodologia desenvolvida para o trabalho

#### 4.2.1 - Modelagem da largura por meio de redes neurais

Estudos com base no uso das redes neurais na modelagem e predição da geometria dos cordões de solda têm apresentado resultados satisfatórios. Porém, o desempenho da rede neural é fortemente influenciado não somente pela estrutura da rede e seu processo de aprendizagem, mas também pela escolha das variáveis a serem consideradas. Assim, a vantagem do modelo neural é que a rede pode ser continuamente atualizada com novos dados que otimizam seu desempenho e sua habilidade em relacionar muitas variáveis rapidamente, filtrar e interpolar dados incompletos. Além disso, as redes neurais são capazes de estabelecer qualquer tipo de relação entre as variáveis.

A obtenção da rede neural deu-se através dos passos apresentados a seguir.

##### 4.2.1.1 - Coleta de dados e separação em conjuntos

O primeiro passo do processo para o desenvolvimento de redes neurais artificiais é a coleta de dados e a sua separação em um conjunto de treinamento e um conjunto de testes. Esta tarefa requer uma análise cuidadosa sobre o problema para minimizar ambiguidades e erros

nos dados. Além disso, os dados coletados devem ser significativos e cobrir amplamente o domínio do problema; não devem cobrir apenas as operações normais ou rotineiras, mas também as exceções e as condições nos limites do domínio do problema.

Normalmente, os dados coletados são separados em duas categorias, a saber: dados de treinamento, que serão utilizados para o treinamento da rede; e, dados de teste, que serão utilizados para verificar seu desempenho sob condições reais de utilização. Além da referida divisão, pode-se utilizar também uma subdivisão do conjunto de treinamento, criando um conjunto de validação, utilizado para verificar a eficiência da rede quanto à sua capacidade de generalização durante o treinamento, podendo ainda ser empregado como critério de parada do treinamento.

No presente estudo, a coleta de dados foi dividida em três etapas:

- **Identificação das variáveis do processo GMAW**

De fato, são muitas as variáveis que, de um modo ou outro, afetam em maior ou menor grau a solda. Neste sentido, na presente pesquisa, levou-se em consideração àquelas variáveis e sua interação que influam notavelmente na geometria do cordão de solda. Assim, decidiu-se tomar como variáveis os seguintes itens:

- ✓ Velocidade de soldagem.
- ✓ Tensão.
- ✓ Velocidade de alimentação do arame.

Deixando fixas as variáveis: distância de bico no contato com a peça de 15 mm, e um ângulo de trabalho de 90°.

- **Planejamento experimental**

A escolha de um desenho adequado em relação ao experimento a ser realizado é fundamental para o treinamento das redes neurais utilizadas para ajustar um modelo ao conjunto de dados recolhidos nos pontos do desenho. Por conseguinte, uma vez que as redes neurais não apresentam uma metodologia para definir o número de experimentos, no presente estudo se fez uso de um Planejamento Composto Central (PCC) (em inglês, *Central Composite Design*), para o treinamento da rede neural, dado que o desenho

demandado gera 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 4.5, destacada a seguir, apresenta uma representação do planejamento experimental baseado 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  $\alpha = (8)^{1/4} = 1.682$ .

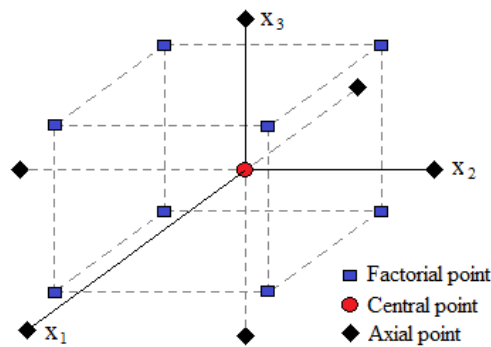


Figura 4.5: Planejamento Composto Central para três variáveis.

As unidades apresentadas anteriormente na Figura 4.5 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. É necessário que aqueles níveis estejam codificados, pois, caso 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, apresentada 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;

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

Fazem-se diversos teste a fim de encontrar a faixa máxima e mínima das variáveis de solda selecionadas, procurando-se evitar a existência de problemas como, por exemplo, a não

abertura e extinção do arco, a queimadura do bico, o excesso de respingos e porosidades, sempre objetivando a obtenção de soldas de boa aparência e qualidade.

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 y 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

Conforme a combinação dos valores das variáveis apresentados anteriormente na Tabela 4.1, realizou-se a matriz de experimentos. Na Tabela 4.2, a seguir, tem-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	16.3	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

- **Desenvolvimento dos experimentos**

Uma vez que o presente estudo tem como objetivo realizar a modelagem e o controle da largura do cordão de solda com os arames tubular e maciço, realizando ações comparativas e comprovado a validade da metodologia proposta, tem-se a realização dos mesmos experimentos indicados anteriormente na Tabela 2, para cada um dos arames mencionados, obtendo-se a medida da largura do cordão para a cada uma das combinações ofertadas.

Para a medição da largura, fez-se uso de um sistema de *scanner*, o qual foi possível a reconstrução em 3D do cordão de solda, que simula a forma de um veículo (vide Figura 4.6, a seguir) que, através de uma câmara *web* e um laser, é capaz de seguir a forma de um cordão de solda. O sistema é controlado por uma placa “*Arduino*” que consta de 14 pinos digitais e 6 analógicos. O mecanismo percorre o cordão soldado gerando diversas imagens. As imagens geradas são transferidas ao computador para ser processadas no MATLAB. A Tabela 4.3 mostra a sequencia do processamento das imagens.

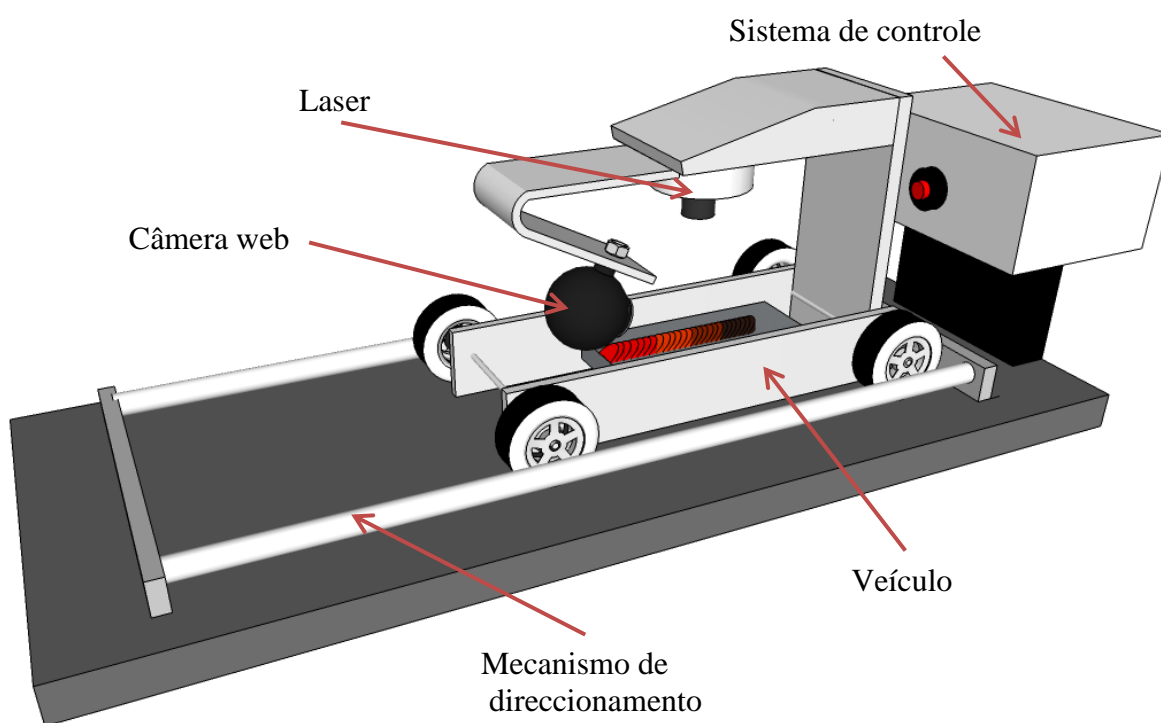
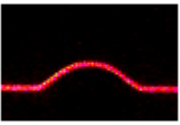

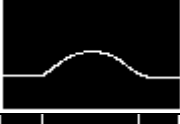
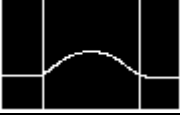


Figura 4.6: Sistema de scanner.



Tabela 4.3: Sequencia do processamento das imagens.

<p>1. Obtenção da imagem original</p>	
<p>2. Conversão da imagem a tomos cinza e aplicação do filtro de Mediana para eliminar pixels isolados.</p>	
<p>3. Binarização da imagem, para uma imagem representada em preto e branco (0 e 1).</p>	
<p>4. Medição dos pixels e conversão das medidas em milímetros.</p>	

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 4.7, a seguir. E ainda, conforme a Figura 4.8, 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).

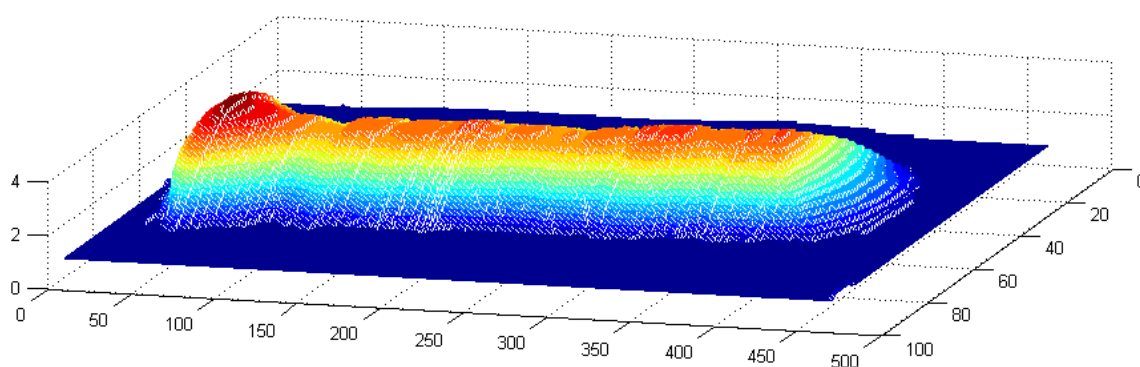


Figura 4.7: Reconstrução do cordão de solda em 3D.

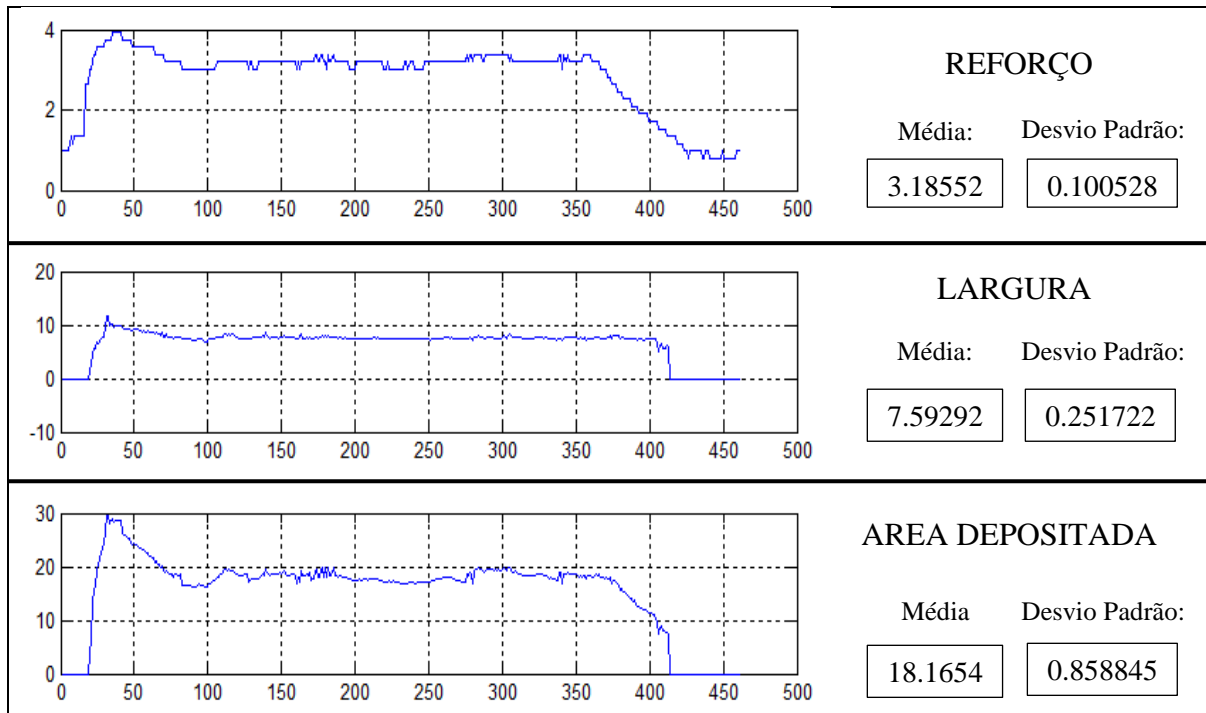


Figura 4.8: Medidas dos parâmetros geométricos.

#### 4.2.1.2 - Configuração da rede

O segundo passo foi a definição da configuração da rede, assim, dividida:

- **Seleção do paradigma neural apropriado à aplicação.**

Para realizar a otimização e modelagem da largura em relação às variáveis selecionadas, escolhem-se como entradas à rede neural os valores médios obtidos para a largura e sua medida de seu desvio padrão. Neste sentido, obtém-se o valor da largura desejada, garantindo com que o erro em relação à não uniformidade do cordão de solda seja o mínimo possível; as saídas da rede são a velocidade de soldagem, tensão e velocidade de alimentação do arame.

O tipo de rede selecionado para o desenvolvimento do referido modelo foi o *Backpropagation*, uma vez que apresenta grande variedade de opções de configuração, dependendo da necessidade de aprendizagem e da aplicação que se esteja desenvolvendo. E ainda, pode aproximar qualquer função ao escolher uma adequada configuração para a rede e um número preciso de neurônios na camada oculta e, mesmo que não exista um procedimento único para determinar a configuração exata da rede, tudo dependerá da experiência do desenvolvedor do modelo.

- **Determinação da topologia da rede, parâmetros do algoritmo de treinamento e funções de ativação.**

A rede selecionada apresenta uma topologia *feedforward* (rede de alimentação para adiante), que consiste em um conjunto de neurônios organizados em camadas. O presente estudo fez uso de uma camada de entrada constituída por dois neurônios, três camadas ocultas formadas por 50, 100 e 50 neurônios, respectivamente, e uma camada de saída formada por três neurônios.

Os valores das constantes que representam os pesos se ajustam através de processo de treinamento ou aprendizagem, no qual a saída desejada e a entrada são apresentadas à rede, bem como por meio de um algoritmo de ajuste – os pesos se calculam, a fim de que a correspondência entre a saída e a entrada contenha o mínimo erro. Tais constantes ajustam-se mediante o *Neural Network Toolbox* de MATLAB.

Na pesquisa aqui desenvolvida, todas as camadas têm a função de transferência tangencial. O método de treinamento: *trains*, no qual a sequência das entradas se apresenta à rede e as atualizações se produzem após cada passo de tempo. A função de atualização dos pesos utilizada é a *learnngdm*, que tem por base o descenso do gradiente; a função *mse* calcula o erro quadrático médio, e é utilizada para avaliar a precisão da rede neural e para avaliar o desempenho da rede.

#### 4.2.1.3 – Treinamento

O terceiro passo é o treinamento da rede. Nesta fase, seguindo o algoritmo de treinamento escolhido, foram ajustados os pesos das conexões. Aqui faz-se importante considerar alguns aspectos, a saber: a inicialização da rede, o modo de treinamento e o tempo de treinamento.

Quanto ao modo de treinamento, utilizou-se o erro quadrático médio (em inglês, *Mean Square Error -MSE*). O *MSE* mede a média do quadrado do “erro”, sendo o erro o valor que o estimador difere da quantidade a ser estimada.

Quanto ao tempo de treinamento, vários fatores podem influenciar a sua duração, porém, será necessário a utilização de critério de parada. O critério de parada do algoritmo *backpropagation*, em geral, não é bem definido; utiliza-se aqui um número máximo de ciclos (neste caso, de 10.000 iterações). Mas, é preciso ainda considerar a taxa de erro

médio por ciclo e a capacidade de generalização da rede. Pode ocorrer que em um determinado instante do treinamento, a generalização comece a degenerar, causando o problema de *over-training*, ou seja, a rede se especializa no conjunto de dados do treinamento e perde a capacidade de generalização.

O treinamento deve ser interrompido quando a rede apresentar uma boa capacidade de generalização e quando a taxa de erro for suficientemente pequena. Assim, deve-se encontrar um ponto ótimo de parada com erro mínimo e capacidade de generalização máxima.

#### 4.2.1.4 - Teste

O conjunto de testes é utilizado para determinar o desempenho da rede com dados que não foram previamente utilizados. Faz-se importante salientar que o desempenho da rede – ação de medição presente nesta fase – é uma boa indicação de seu desempenho real.

É preciso considerar ainda outros testes, tais como: análise do comportamento da rede utilizando entradas especiais; e, análise dos pesos atuais da rede, pois, se existirem valores muito pequenos, as conexões associadas podem ser consideradas insignificantes e, assim, serem eliminadas (*prunning*). De modo inverso, valores substantivamente maiores que do que outros poderiam indicar que houve *over-training* da rede.

#### **4.2.2 - Captura e processamento de imagens.**

A aquisição da imagem realiza-se através de uma *webcam*. Para a captura e o processamento da imagem, fez-se uso de *Image Acquisition toolbox* em MATLAB – a imagem adquirida pode ser observada na Figura 4.9, a seguir. Ali é possível identificar a zona da poça de fusão e a zona onde se encontra o cordão de solda.

Antes da aquisição das imagens, a câmara é localizada de tal maneira que se foca na zona onde se encontra o cordão de solda. Durante tal processo, o arco elétrico apresenta uma intensidade forte de luz, ocasionando as imagens desfocadas, isto é, imagens com foco da câmara na zona mais iluminada – ainda que tal aspecto não se mostra como impedimento para se lograr um processamento e medida adequados.

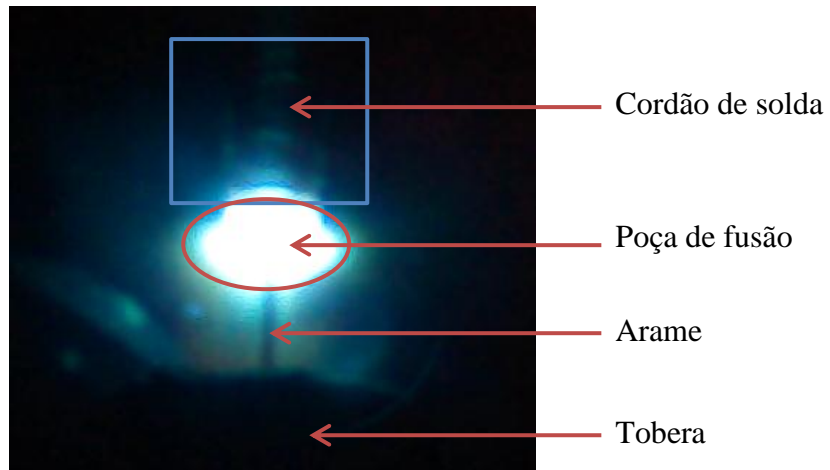


Figura 4.9: Imagem adquirida pela webcam.

O *toolbox* armazena a imagem como uma matriz, cujos índices de fila e coluna identificam um ponto na imagem, e cujo valor coincide com o nível de intensidade de luz em tal ponto. Cada elemento da matriz corresponde a um elemento na imagem denominado “pixel”.

Na presente pesquisa, foram utilizadas técnicas de processamento digital de imagens para reduzir os efeitos do ruído, melhorar o contraste e selecionar a área de trabalho. Para tanto, realizou-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 4.10(a); também se realizou 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 4.10(b), a seguir. Neste sentido, aplicou-se a equação 4.2, exposta a seguir.

$$g(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{se } f(x, y) < T \\ 1 & \text{se } f(x, y) \geq T \end{cases} \quad (4.2)$$



Figura 4.10: (a) Imagem escala de cinzas e filtro de mediana, (b) Imagem Binarizada.

Na Figura 4.11, a seguir, é possível observar como a poça de fusão pode ser aproximada a uma elipse.

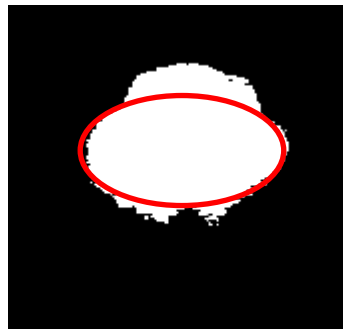


Figura 4.11: Elipse que representa a poça de fusão.

Uma vez binarizada a imagem, procedeu-se encontrar o diâmetro maior da referida elipse. Para tanto, realizou-se a soma de todos os pixels por cada uma das filas – a fila na qual se tem a maior soma é onde se encontra o diâmetro maior da elipse. Dividindo tal distância em duas partes iguais, tem-se a divisão da imagem em 4 seções, conforme evidenciado na Figura 4.12, a seguir.

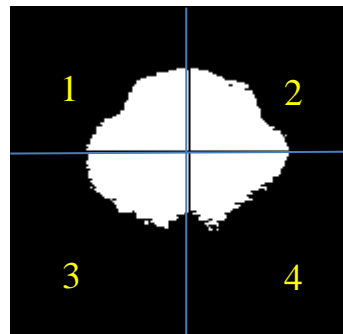


Figura 4.12: Imagem em 4 seções.

Conforme apresentado na Figura 4.12, o cordão de solda se encontra nas seções 1 e 2. Neste sentido, para encontrar a medida da largura, é preciso achar a linha reta que descreve as bordas do cordão. Assim, tem-se um novo processamento da imagem em cada uma das seções: inicialmente, foi preciso dividir a zona da poça de fusão da zona do cordão de solda. Para a delimitação da zona do cordão de solda, se estabeleceu uma fila a uma distância igual a um quarto do valor do diâmetro maior da elipse, assegurando o fato de que realmente é preciso tomar a largura do cordão e não a poça de fusão, conforme apresentado na Figura 4.13, a seguir.

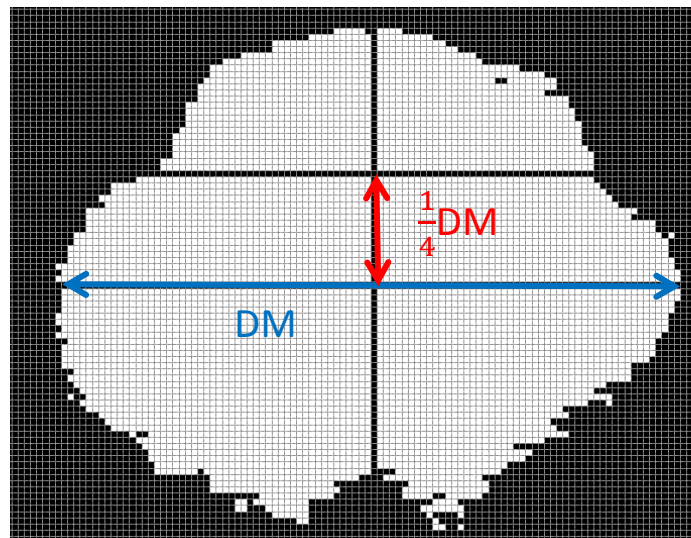


Figura 4.13: Seleção da zona do cordão da imagem.

Obtida tal distância, procede-se a soma de todos os pixels das filas dentro da cada seção, obtendo-se dois vetores de somas. De cada vetor de somas, seleciona-se o valor mais frequente, encontrando-se, posteriormente, as filas relacionadas à dita repetição.

Em relação à Figura 4.14, exposta a seguir, tem-se a seção 1. À coluna da direita da imagem encontra-se o vetor de somas dos pixels das filas; a linha verde representa a fila que delimita a zona adequada para a posterior medida da largura do cordão, e as linhas azuis apresentam as filas de maior repetição. Encontrando-se múltiplos conjuntos de somas repetidas, seleciona-se aquele conjunto que se localiza na parte superior da imagem.

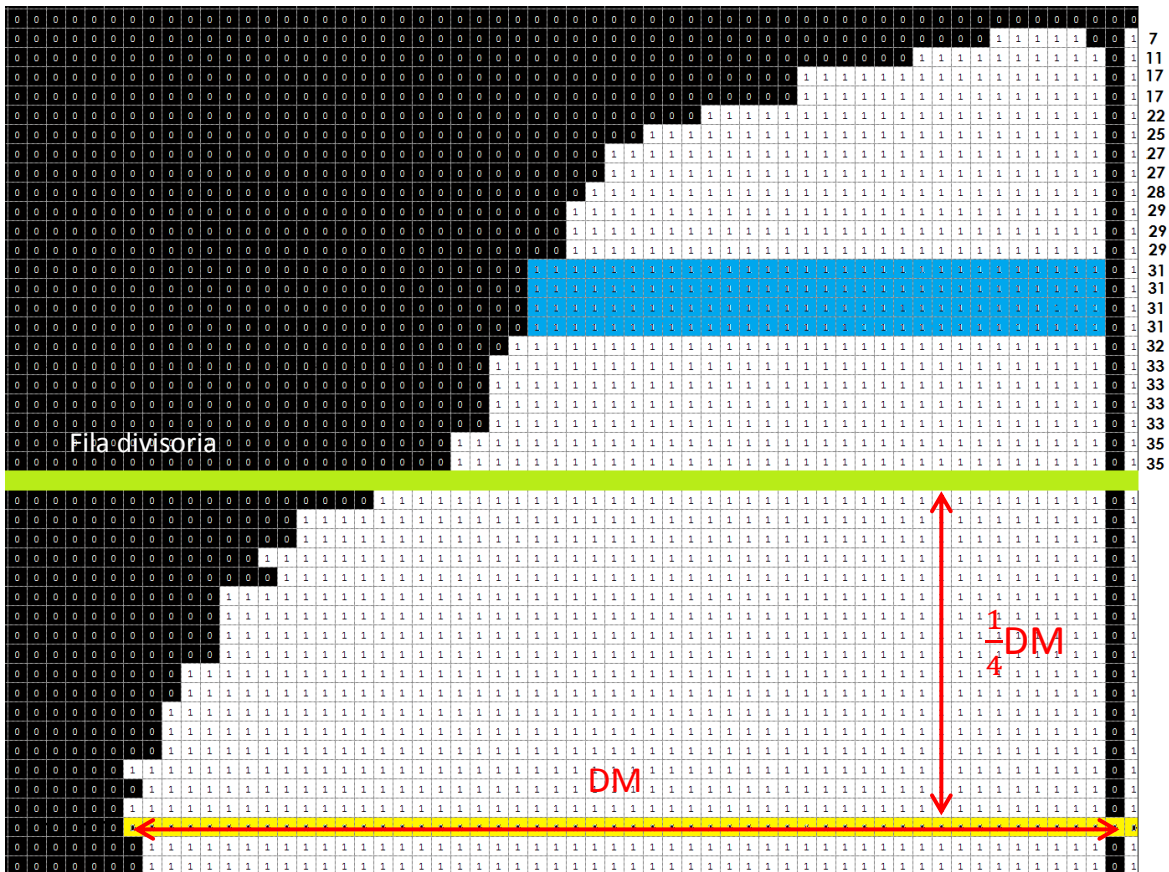


Figura 4.14: Processamento da imagem para obter a largura do cordão de solda.

Encontradas as filas relacionadas das repetições de cada seção, procede-se a comparação e a concordância entre as filas da seção 1 com as filas da seção 2, a fim de estabelecer a linha que descreverá a largura do cordão (vide Figura 4.15, a seguir). No caso da inexistência de uma concordância, seleciona-se a seção que tiver mais repetições, gerando a linha que representa a largura do cordão como uma média dos índices das filas.

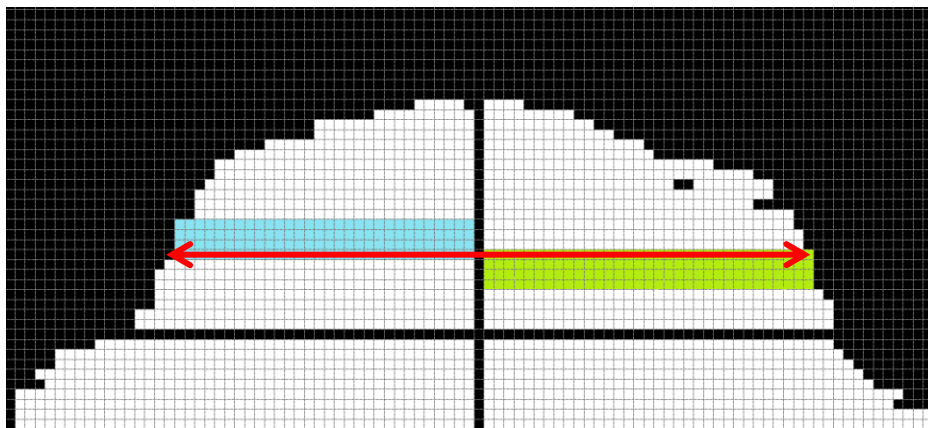


Figura 4.15: Seleção da fila onde será medido o cordão.



### 4.2.3 - Desenho do controlador

O controlador *fuzzy* foi projetado no *Fuzzy logic Toolbox* do MATLAB. O processo geral pode ser caracterizado pelos passos descritos a seguir.

#### 4.2.3.1 - Documentação das entradas, saídas e das especificações operacionais do sistema.

A variável de entrada é aquela gerada na medida, a partir da diferença entre o sinal de referência (largura desejada) e a saída (largura medida). A variável de saída é a velocidade de soldagem, uma vez que se tem aí o parâmetro de maior influência na largura do cordão de solda, conforme preconizaram Lee e Um (2000). A Figura 4.16, a seguir, apresenta a entrada e a saída do controlador *fuzzy*. Vale destacar a utilização, como método de inferência, o modelo de *Mamdani*. Tal método inclui módulos de *interface* que transformam as variáveis de entrada em conjuntos *fuzzy* equivalentes e, posteriormente, as variáveis *fuzzy* geradas em variáveis numéricas proporcionais, adequadas para o sistema.

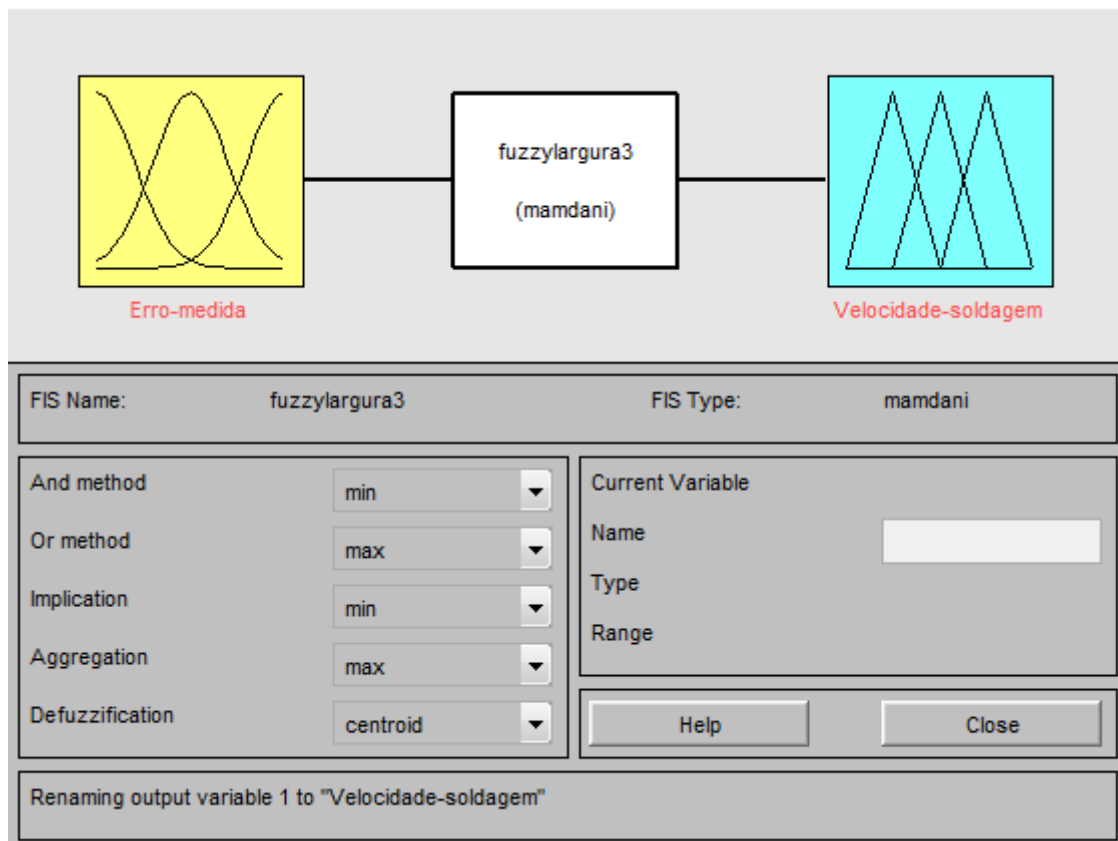


Figura 4.16: Entradas e saídas controlador fuzzy.

#### 4.2.3.2 - Determinação dos conjuntos fuzzy para as entradas e saídas.

Para a variável de entrada, foram utilizadas sete funções de pertinência (vide Figura 4.17, a seguir): cinco funções de forma triangular, nomeadas negativo alto (NA), negativo médio (NM), média (M), positivo médio (PM), positivo alto (PA); e, duas funções de forma trapezoidal, nomeadas negativo muito alto (NMA) e positivo muito alto (PMA). Os parâmetros de cada função tem por base a experiência gerada a partir dos diferentes testes experimentais (vide Tabela 4.4, a seguir).

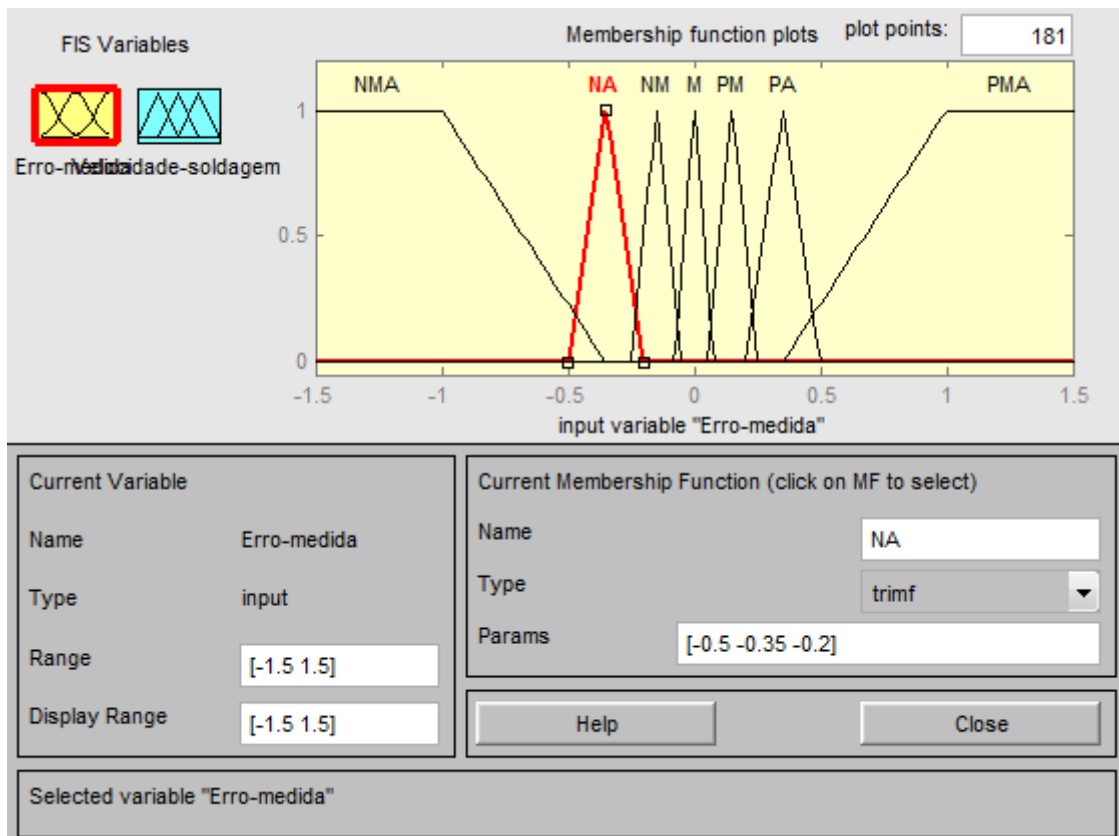


Figura 4.17: Variável de entrada e suas funções de pertinência.

Tabela 4.4: Valores das funções de pertinência da entrada.

NMA	[-1.5 -1.5 -1 -0.35]
NA	[-0.5 -0.35 -0.2]
N	[-0.25 -0.15 -0.05]
M	[-0.075 0 0.075]
P	[0.05 0.15 0.25]
PA	[0.2 0.35 0.5]
PMA	[0.35 1 1.5 1.5]

Para a variável de saída, foram utilizadas cinco funções de pertinência: quatro funções de forma trapezoidal; e, uma função de forma triangular (vide Figura 4.18, a seguir), nomeadas baixar muito (BM), baixar (B), manter (M), subir (S) e subir muito (SM). Os parâmetros de cada função de pertinência tem por base a experiência realizada e se encontram em uma faixa de -0.2 a 0.2, ou seja, o controlador aumenta ou diminui a velocidade de soldagem determinada pela rede neural em um valor dentro da referida faixa. Neste sentido, os parâmetros são apresentados na Tabela 4.5, a seguir.

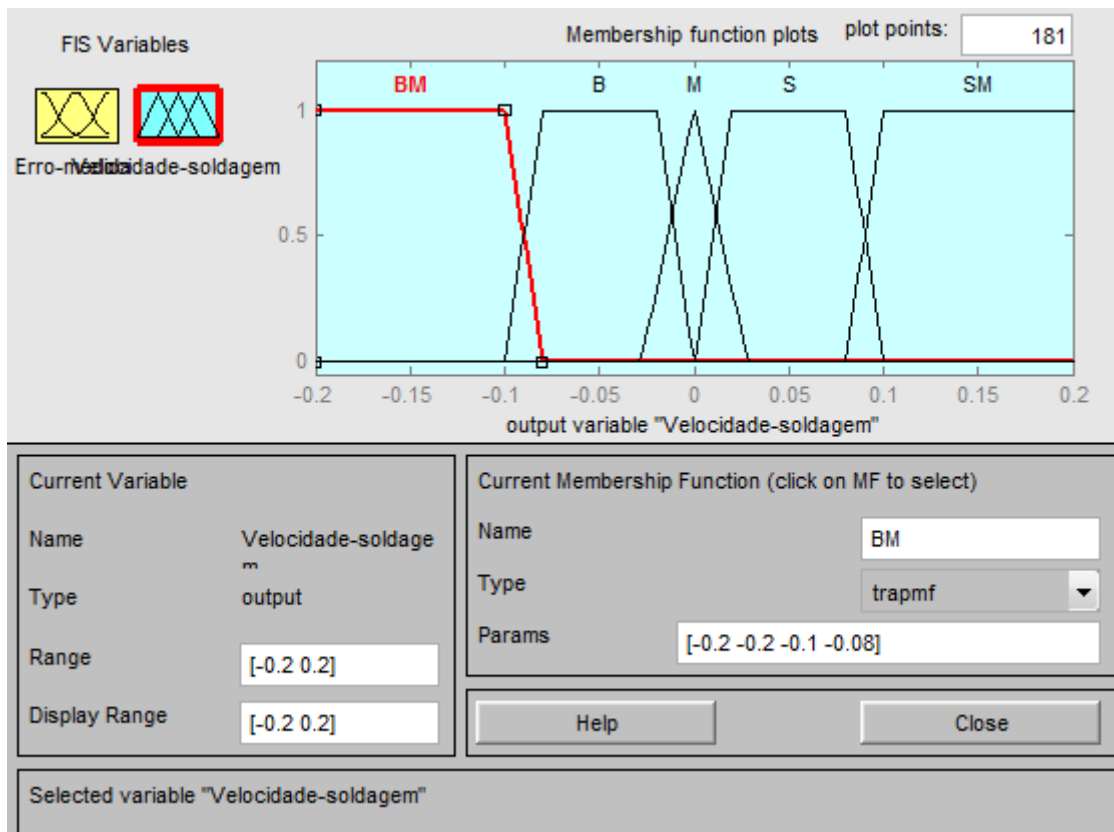


Figura 4.18: Variável de saída e suas funções de pertinência.

Tabela 4.5: Valores das funções de pertinência da saída.

BM	[-0.2 -0.2 -0.1 -0.08]
B	[-0.1 -0.08 -0.02 0]
M	[-0.028 0 0.028]
S	[0 0.02 0.08 0.1]
SM	[0.08 0.1 0.2 0.2]

#### 4.2.3.3 – Determinação do conjunto de regras.

A estratégia de controle é descrita por um conjunto de regras linguísticas, ou seja, uma entrada é considerada para uma saída. Assim, o conjunto de regras apresenta-se na Figura 4.19, a seguir.

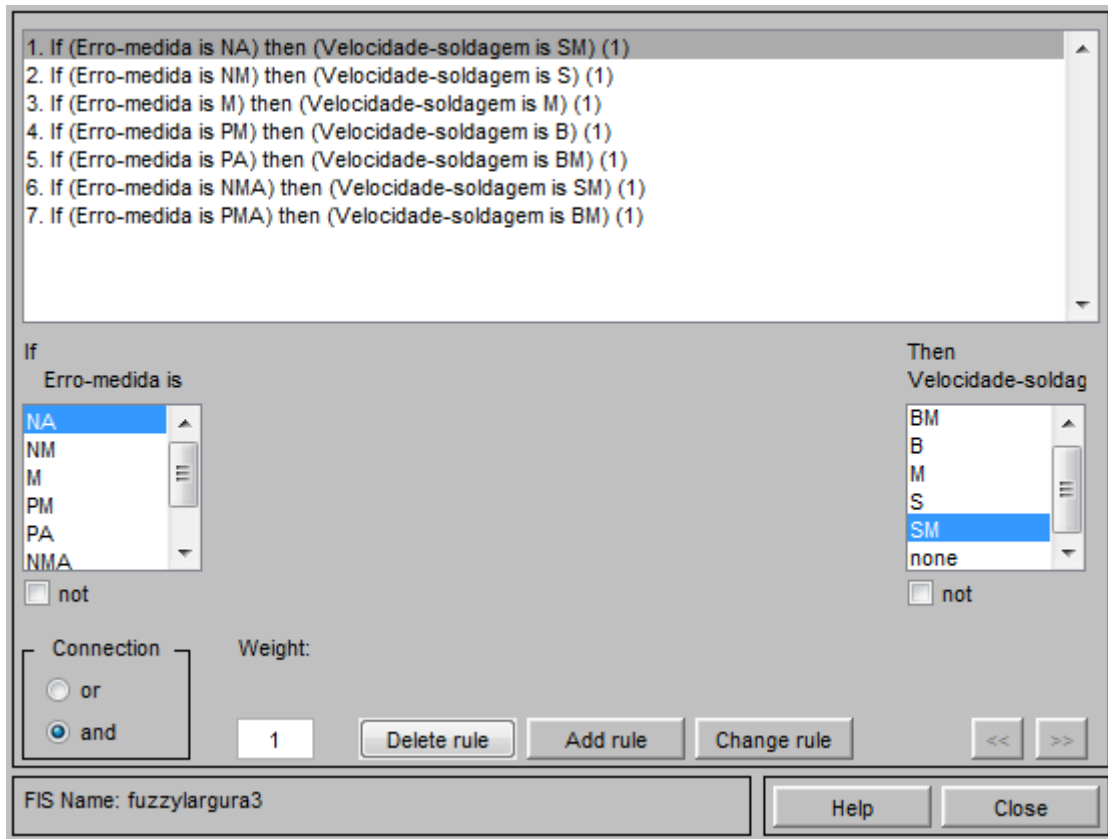


Figura 4.19: Reglas para a estratégia de controle.

#### 4.2.3.4 - Escolha do método de defuzzificação.

O método de defuzzificação selecionado foi o método do centroide, onde o valor numérico obtido representa o centro de gravidade da distribuição de probabilidade de saída do sistema *fuzzy*. Como exemplo, tem-se a Figura 4.20, a seguir, que evidencia que quando se tem um erro na medida de 0.5mm, aplicando-se o método, a saída da velocidade de soldagem diminui em -0.142 mm/s. Vale salientar que a medida que diminui a velocidade de soldagem aumenta a largura do cordão.

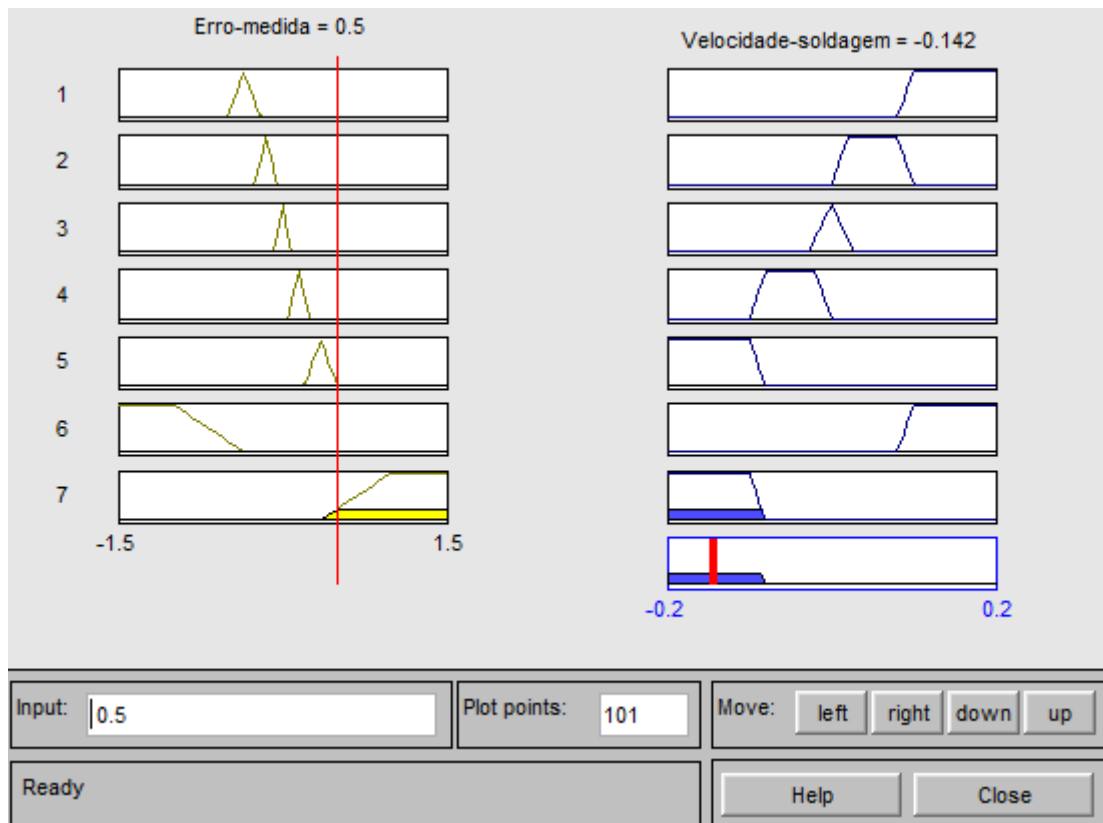


Figura 4.20: Exemplo método de defuzzificação.

#### 4.2.4 - Implementação do sistema de controle.

Finalmente, a rede treinada e avaliada, o processamento de imagens e o controle são integrados em um sistema do ambiente operacional da aplicação. Para maior eficiência da solução, o referido sistema contém facilidades de utilização, como, por exemplo, uma *interface* gráfica desenvolvida no MATLAB.

Para a implementação da estratégia de controle em tempo real, tem-se um sistema realimentado, onde o sinal de saída possui um efeito direto sobre a ação do controle, conforme evidenciado na Figura 4.21, a seguir: o sinal de erro na medida – que é a diferença entre o sinal de entrada (largura desejada) e o sinal realimentado (largura medida através da câmera *web*), realimenta o controlador, de forma 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.

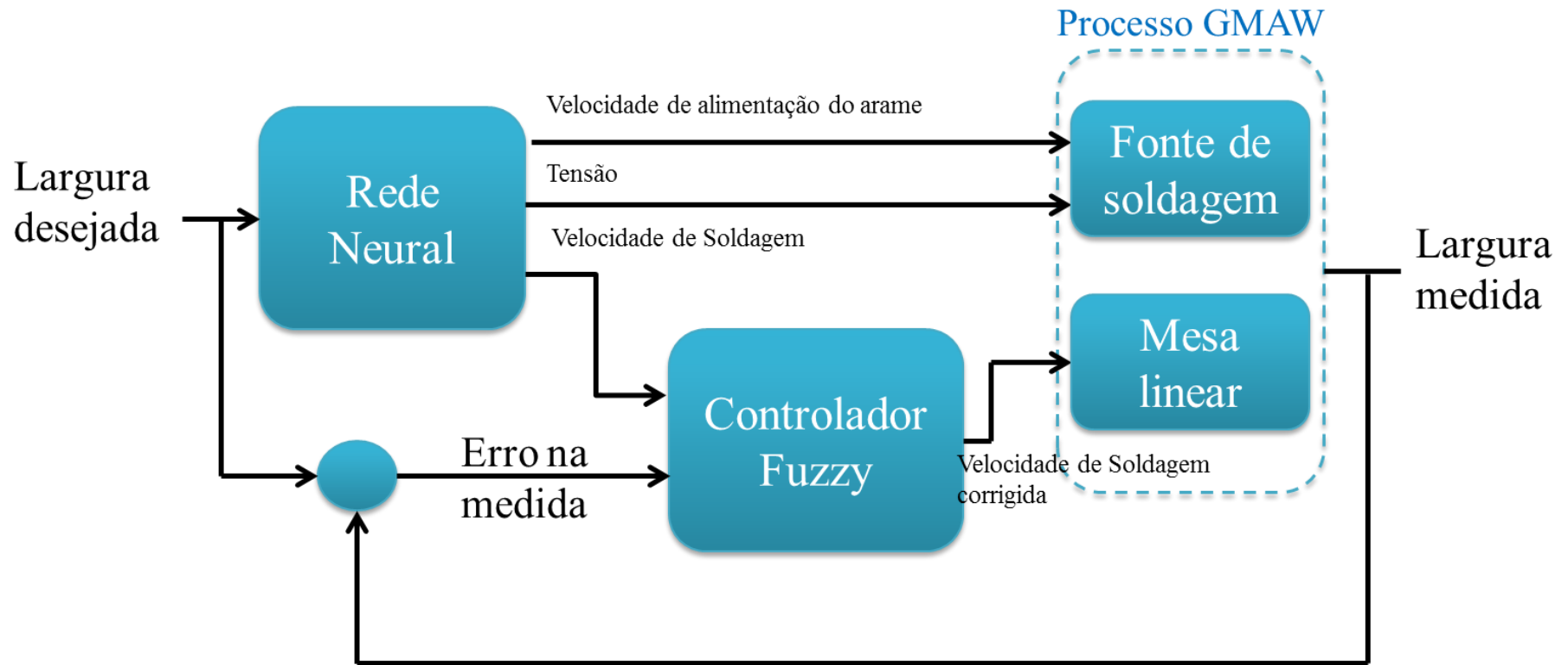


Figura 4.21: Arquitetura do sistema desenvolvido.

## 5 – RESULTADOS

O presente capítulo aborda a descrição dos resultados alcançados na implementação do sistema de controle, bem como dos resultados obtidos em cada uma das etapas apresentadas na metodologia, visando determinar os parâmetros ótimos na modelagem com redes neurais, para a obtenção de cordões com boa aparência e qualidade.

### 5.1 - MODELAGEM DA LARGURA POR MEIO DE REDES NEURAIIS

A Tabela 5.1, a seguir, destaca os resultados dos experimentos indicados na Tabela 4.2, apresentada anteriormente, com a obtenção das medidas para a largura, tanto para o arame maciço como para o arame tubular.

Tabela 5.1: Resultado experimentos do desenho central composto.

No Exp	Níveis			Arame Maciço		Arame Tubular	
				Largura (mm)		Largura (mm)	
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
1	-1	-1	-1	5.98	0.21	4.98	0.30
2	1	-1	-1	6.78	0.23	5.55	0.65
3	-1	1	-1	7.62	0.61	7.79	0.54
4	1	1	-1	8.83	0.55	8.77	0.50
5	-1	-1	1	5.01	0.28	4.82	0.25
6	1	-1	1	5.39	0.39	5.39	0.42
7	-1	1	1	5.77	0.73	6.10	0.48
8	1	1	1	6.70	0.45	7.00	0.40
9	-1.682	0	0	5.67	0.58	6.20	0.48
10	1.682	0	0	7.21	0.49	7.58	0.22
11	0	-1.682	0	4.94	0.93	4.65	0.60
12	0	1.682	0	7.69	0.42	7.73	0.56
13	0	0	-1.682	8.63	0.47	8.39	0.49
14	0	0	1.682	5.49	0.50	6.07	0.35
15	0	0	0	6.57	0.65	6.20	0.46

Com os dados referentes aos resultados obtidos, criou-se uma rede neural para os arames. Neste sentido, cada rede utiliza como parâmetros de entrada as medidas da largura média e seu desvio padrão, e possui como parâmetros de saída: a tensão, a velocidade de alimentação do arame e a velocidade de soldagem. Para a criação da rede, utilizou-se o MATLAB, que apresenta a topologia ofertada na Figura 5.1, a seguir.

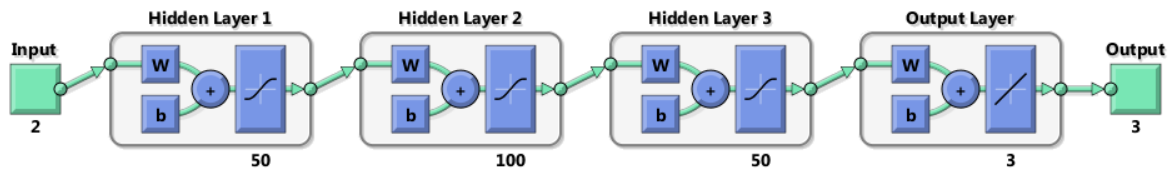
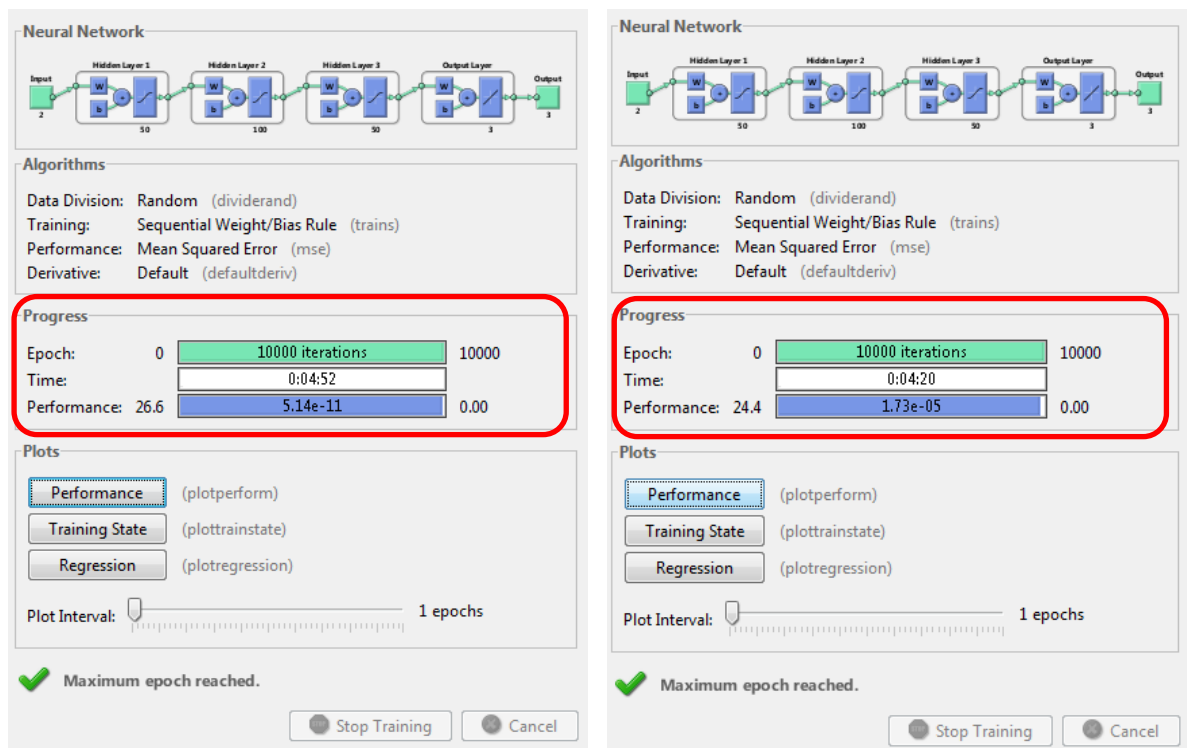


Figura 5.1: Desenho da rede neural.

Como os valores dos erros de treinamento e de simulação variaram muito em função do número de neurônios, foi escolhida a topologia da rede que ofertasse os menores erros de simulação. A Figura 5.2, a seguir, apresenta o treinamento da rede tanto para o arame maciço como para o arame tubular, com suas respectivas iterações, seu tempo de treinamento e erro de validação.



(a)

(b)

Figura 5.2: Treinamento da rede neural (a) Para o arame maciço, (b) Para o arame tubular



Conforme apresentado na Figura 5.2, foi possível observar que o arame maciço atingiu um erro de  $5.14e-11$  em 10.000 iterações, e o arame tubular atingiu um erro de  $1.73e-05$  em igual número de iterações. Neste sentido, é possível perceber que utilizando a mesma topologia da rede, logram-se alguns baixos erros, adequados para a modelagem.

Dos 15 dados experimentais, o MATLAB realiza a referida divisão, aleatoriamente, em três conjuntos, a saber: 60% dos dados são utilizados para o treinamento, 20% dos dados para validação e 20% dos dados para teste. A Figura 5.3, a seguir, destaca a medida do erro em função das iterações para o treinamento, validação e teste, para os dois tipos de arame estudados.

Comparando os erros de treinamento, validação e teste nas Figura 5.3a e Figura 5.3b, destacadas a seguir, observa-se que o erro tende a diminuir nos três conjuntos de dados, indicando que a rede está treinada adequadamente e encontra-se em condições de prever os parâmetros de solda para uma largura específica do cordão.

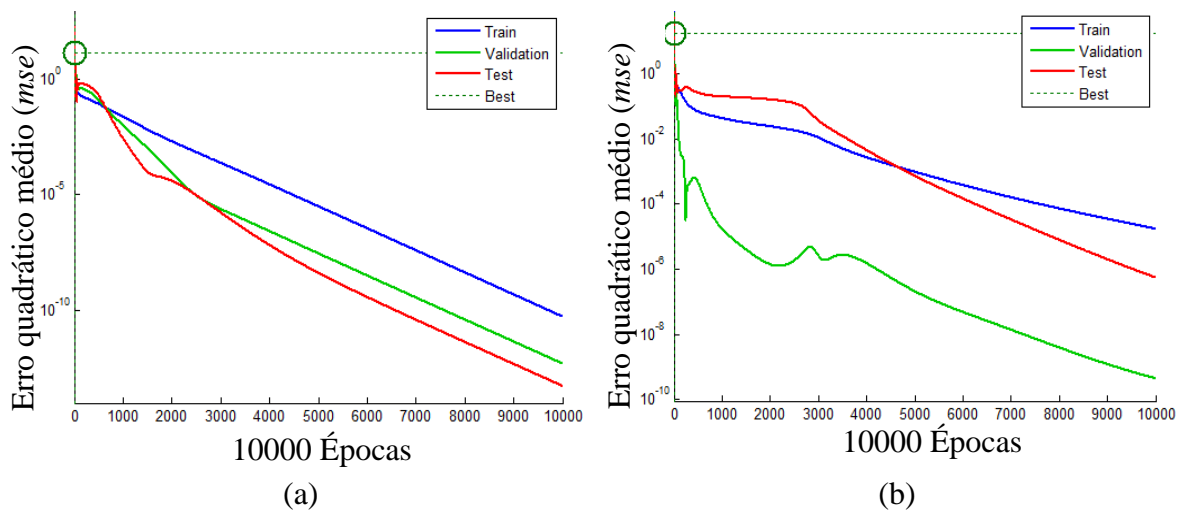


Figura 5.3: Medida do erro (a) Rede para arame maciço, (b) Rede para arame tubular.

Na Figura 5.4, a seguir, tem-se o ajuste obtido pela rede neural artificial para o arame maciço nas fases de treinamento ( $R=0.96$ ), validação ( $R=0.95$ ) e teste ( $R=0.98$ ). Na Figura 5.5, também expressa a seguir, mostra-se o ajuste conseguido para o arame tubular de treinamento ( $R=0.94$ ), validação ( $R=0.97$ ) e teste ( $R=0.95$ ). Os referidos dados apontam a relação que existe entre a saída real e a saída estimada da rede neural, uma vez que o coeficiente de correlação é aproximadamente igual a 1 nos dois casos. Então, tem-se uma correlação linear positiva, isto é, os dados se ajustam perfeitamente a uma reta de inclinação positiva.

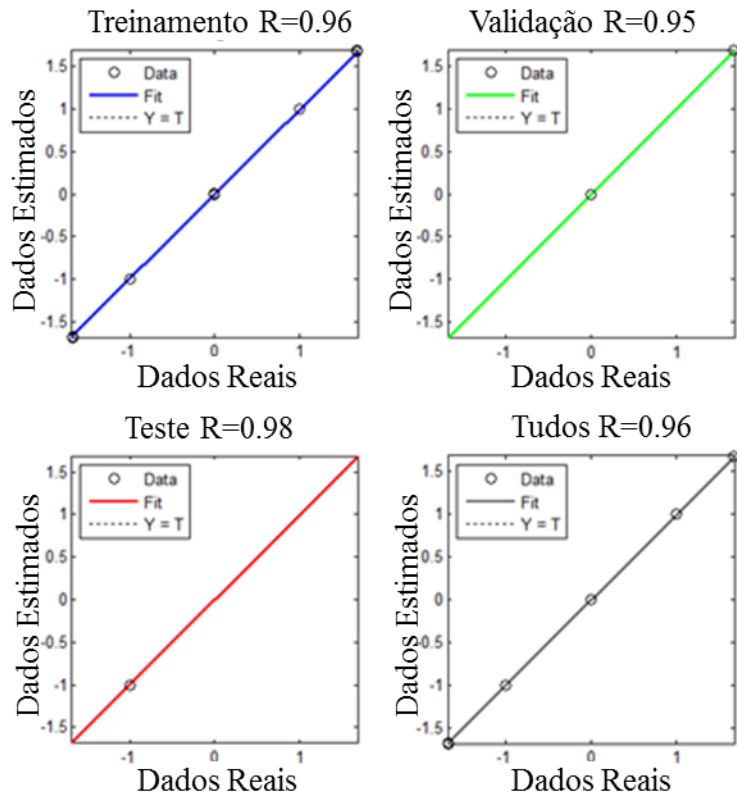


Figura 5.4: Ajuste conseguido pela rede neural para o arame maciço.

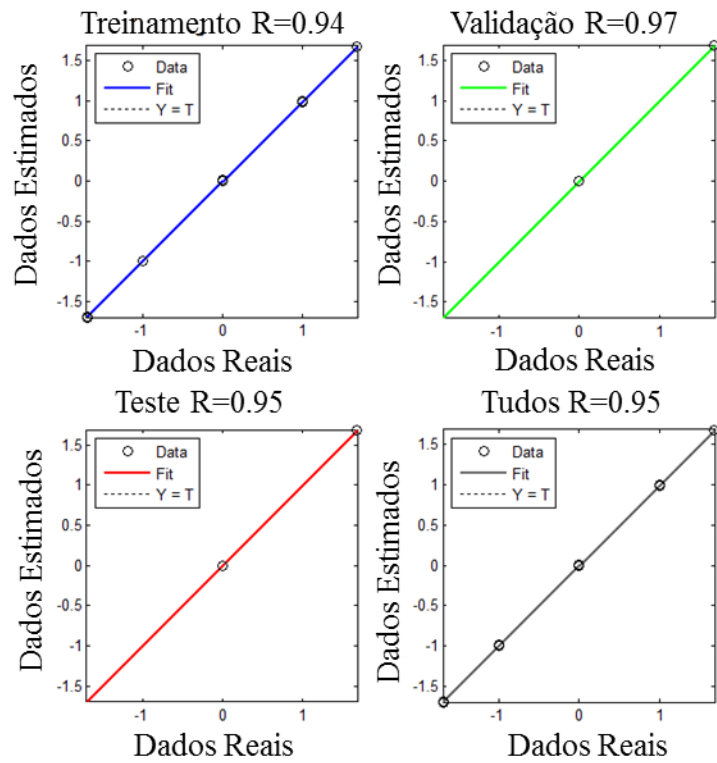


Figura 5.5: Ajuste conseguido pela rede neural para o arame tubular.

Conforme destacado anteriormente, a rede necessita de duas entradas para seu funcionamento: a primeira entrada é a largura desejada – ingressada pelo usuário em uma interface gráfica desenvolvida no MATLAB. O sistema internamente contém dois vetores que foram obtidos na parte experimental: o valor médio e o desvio padrão (vide Tabela 5.2, a seguir).

Tabela 5.2: Vetores do valor médio e o desvio padrão da largura do cordão.

<b>Vetor 1: Largura média (mm)</b>														
5.98	6.78	7.62	8.83	5.01	5.39	5.77	6.70	5.67	7.21	4.94	7.69	8.63	5.49	6.57
<b>Vetor 2: Desvio padrão (mm)</b>														
0.21	0.23	0.61	0.55	0.28	0.39	0.73	0.45	0.58	0.49	0.93	0.42	0.47	0.50	0.65

Uma vez que o usuário já ingressou a largura desejada (L), o sistema escolhe no primeiro vetor os valores existentes em uma faixa de  $L-0.4 < L < L+0.4$ . Assim, com a obtenção de tais valores, realiza-se uma comparação de cada valor com seu respectivo desvio padrão. O menor valor deste desvio é escolhido como a segunda entrada. Por exemplo, o usuário ingressa uma largura de 5 mm; então, tem-se a faixa de valores entre  $4.6 < 5 < 5.4$ . A Tabela 5.3, a seguir, apresenta em cor azul os valores da largura selecionada com seus respectivos desvios padrão; o valor 0.28 mm foi escolhido como a segunda entrada da rede. No caso em que não se encontre um valor específico, o sistema, por defeito, escolhe um desvio padrão de 0.4 mm.

Tabela 5.3: Valor escolhido como a segunda entrada a rede neural.

<b>Vetor 1: Largura média (mm)</b>														
5.98	6.78	7.62	8.83	5.01	5.39	5.77	6.70	5.67	7.21	4.94	7.69	8.63	5.49	6.57
<b>Vetor 2: Desvio padrão (mm)</b>														
0.21	0.23	0.61	0.55	0.28	0.39	0.73	0.45	0.58	0.49	0.93	0.42	0.47	0.50	0.65

Faz-se importante salientar que a saída de rede neural se dá em função dos valores codificados das variáveis, conforme os níveis existentes (-1, 0, 1). Para obtenção dos valores reais das variáveis, fez-se uso da Equação 4.1, apresentada anteriormente. A Equação 5.1, exposta a seguir, apresenta a conversão dos valores codificados aos valores reais dos parâmetros de soldagem.

$$\zeta_1 = x_1 + 6.5 \quad \zeta_2 = 4x_2 + 23 \quad \zeta_3 = 2x_3 + 10 \quad (5.1)$$

Na Tabela 5.4 e na Tabela 5.5, apresentadas a seguir, tem-se os valores de tensão, velocidade de alimentação do arame e velocidade de soldagem, determinados pelas redes neurais para diferentes valores de larguras com os arames maciço e tubular.

Tabela 5.4: Parâmetros de soldagem para diferentes larguras com arame maciço.

Largura (mm)	Tensão (Volt)	Velocidade de alimentação do arame (m/min)	Velocidade de soldagem (mm/s)
5	18.9746	5.50268	12.0635
5.5	19.135	7.60921	12.0054
6	18.9915	5.52899	7.9505
6.5	17.9702	7.27835	7.43862
7	20.893	7.27103	8.78508

Tabela 5.5: Parâmetros de soldagem para diferentes larguras com arame tubular.

Largura (mm)	Tensão (Volt)	Velocidade de alimentação do arame (m/min)	Velocidade de soldagem (mm/s)
5	19.4081	5.61671	12.6376
5.5	19.9219	7.56851	11.9244
6	22.7414	6.31873	13.2677
6.5	22.4952	7.18553	9.86238
7	27.0126	7.50618	12.0368

## 5.2 - CAPTURA E PROCESSAMENTO DE IMAGENS

Para a calibração do sistema de aquisição de imagens, fez-se uso de papel milimétrico, conforme evidenciado na Figura 5.6, a seguir, tomando-se a medida de onde vai estar localizado o cordão de solda. Neste sentido, tem-se a linha vermelha que aponta tal posição, que serve como base para a conversão de pixels a milímetros.

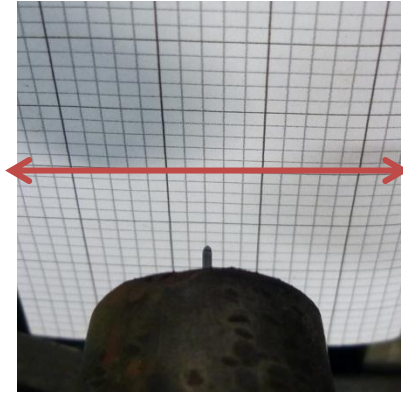


Figura 5.6: Calibração do sistema de aquisição.

Na Tabela 5.6, a seguir, tem-se uma sequência de imagens para um cordão de 6mm com arame maciço, com seu respectivo processamento de imagem e sua medida.

Tabela 5.6: sequência de imagens para um cordão de 6mm com arame maciço.


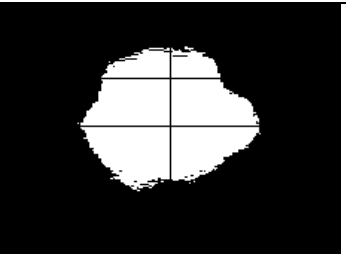

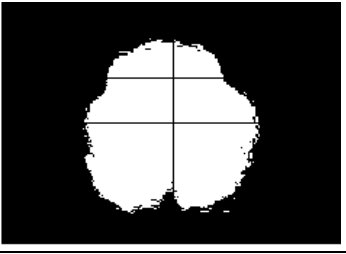

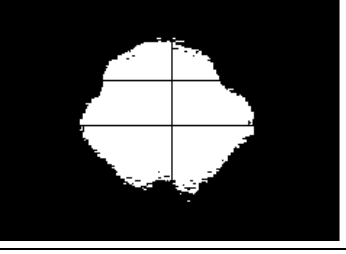

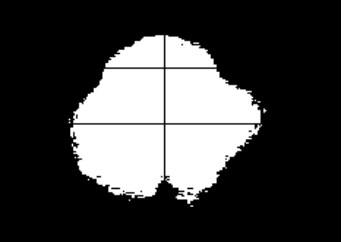

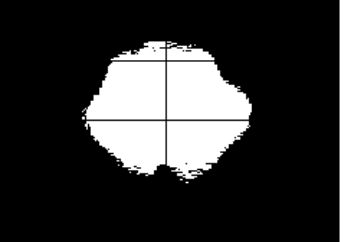
Imagem Original	Imagem Processada	Medida (mm)
		6.0656
		6.0656
		6.0656

Tabela 5.6: sequência de imagens para um cordão de 6mm com arame maciço.  
(Continuação).

		5.7377
		5.4098

Na Tabela 5.7, a seguir, apresenta-se uma sequência de imagens para um cordão de 5mm com arame tubular.

Tabela 5.7: sequência de imagens para um cordão de 5mm com arame tubular.


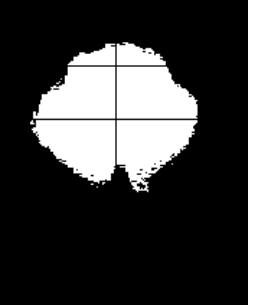

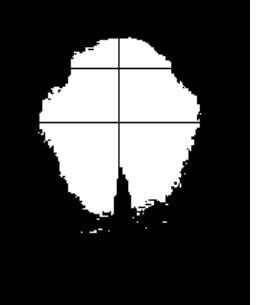

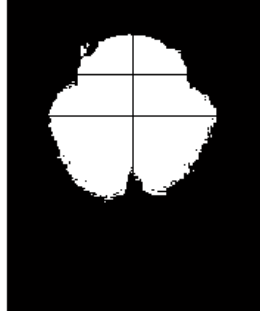

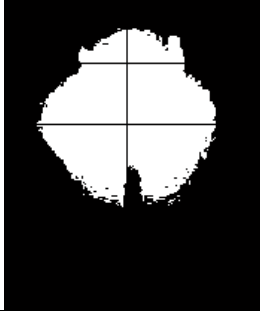

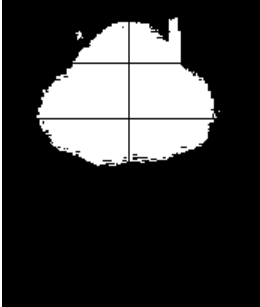
Imagem Original	Imagem Processada	Medida (mm)
		5.0820
		5.2459

Tabela 5.7: sequência de imagens para um cordão de 5mm com arame tubular.  
(Continuação).

		5.5738
		5.3820
		5.4098

### 5.3 - DESENHO DO CONTROLADOR

A ideia básica em controle *fuzzy* 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 *fuzzy*. Os testes do referido controlador foram realizados diretamente no processo. Conforme o mencionado anteriormente, a variável linguística para a entrada do controlador *fuzzy* foi o “erro na medida” da largura do cordão de solda. A variável linguística “erro na medida” é obtida através da diferença

entre o valor desejado da largura 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”.

O procedimento realizado no controlador *fuzzy*, representado na Tabela 5.8, a seguir, evidencia como a entrada é modificada por meio da etapa de fuzzificação, seguindo-se a etapa de inferência, onde se dá a tomada de decisão do sistema, com base em regras pré-determinadas definidas anteriormente, a partir dos valores difusos de saída que serão decodificados na etapa de defuzzificação.

Tabela 5.8: Procedimento realizado no controlador Fuzzy.

<b>Erro na medida (mm)</b>	<b>Etapa de fuzzificação</b>	<b>Inferência</b>	<b>Valores difusos de saída</b>	<b>Etapa de defuzzificação.</b>
-1.5	NMA	—————→	SM	0.146
-1.3	NMA	—————→	SM	0.146
-1	NMA	—————→	SM	0.146
-0.7	NMA	—————→	SM	0.144
-0.5	NMA	—————→	SM	0.142
-0.3	NA	—————→	SM	0.144
-0.15	NM	—————→	S	0.05
0	M	—————→	M	3.97 e-18
0.2	PM	—————→	B	-0.05
0.4	PA	—————→	BM	-0.144
0.8	PMA	—————→	BM	-0.144
1.2	PMA	—————→	BM	-0.146
1.4	PMA	—————→	BM	-0.146

#### 5.4 - IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE

Uma vez descrito e desenvolvido o conjunto de etapas que conformam o sistema proposto, tem-se a valoração do mesmo. O sistema de controle foi implementado em MATLAB, o qual permite controlar a largura do cordão de solda em tempo real, fazendo com que o sistema se adapte a variações durante todo o processo. A Figura 5.7, disposta a seguir, apresenta a interfase gráfica desenvolvida que facilita a interação do usuário.



### Largura - Red Neural

*Tipo de Arame*

Tipo Maciço

Tipo Tubular

Largura Desejada

mm

Tensão =	<input type="text" value="19.135"/>	Volts
Velocidade do Arame =	<input type="text" value="7.60921"/>	m/min
Velocidade de Soldagem =	<input type="text" value="12.0054"/>	mm/s

### Controle da mesa linear

*Seleção da posição*

Para Frente

Para Tras (Sentido motor)

Encender Mesa

Apagar Mesa

### Soldagem

INICIO DA SOLDAGEM

Visualização dos sinais da fonte

### Parametros Iniciais

*Tamanho do cordão*

cm

*Fonte*

*Sistema de Controle*

Sim Controle

Com Controle

Figura 5.7: interfase gráfica para o controle da largura do cordão de solda.

Na referida *interface*, o usuário seleciona o tipo de arame com o qual vai trabalhar, para, posteriormente, ingressar no sistema a largura desejada. No momento em que o usuário realiza a ação “calcular”, a rede seleciona os parâmetros ótimos para aquela largura. Nesta *interface*, também é possível o controle da mesa linear. 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 do cordão em tempo real. 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. Uma vez terminado o processo de soldagem, é possível visualizar as imagens adquiridas, as variações realizadas sobre a velocidade de soldagem e os sinais da tensão, corrente e velocidade de alimentação do arame dispostos pela fonte de soldagem.

Internamente, o programa desenvolvido realiza a comunicação com as placas de aquisição de dados NI USB 6009 e a mesa linear.

Os resultados obtidos para os cordões de solda utilizando-se arame de tipo maciço foram:

- Para uma largura de 5mm

Os valores dos parâmetros calculados pela rede neural são tensão de 18.9746 volts, velocidade de alimentação do arame de 5.50268 m/min e velocidade de soldagem de 12.0635 mm/s.

Na Figura 5.8, a seguir, tem-se o conjunto de medidas da largura obtidas do processamento das imagens.

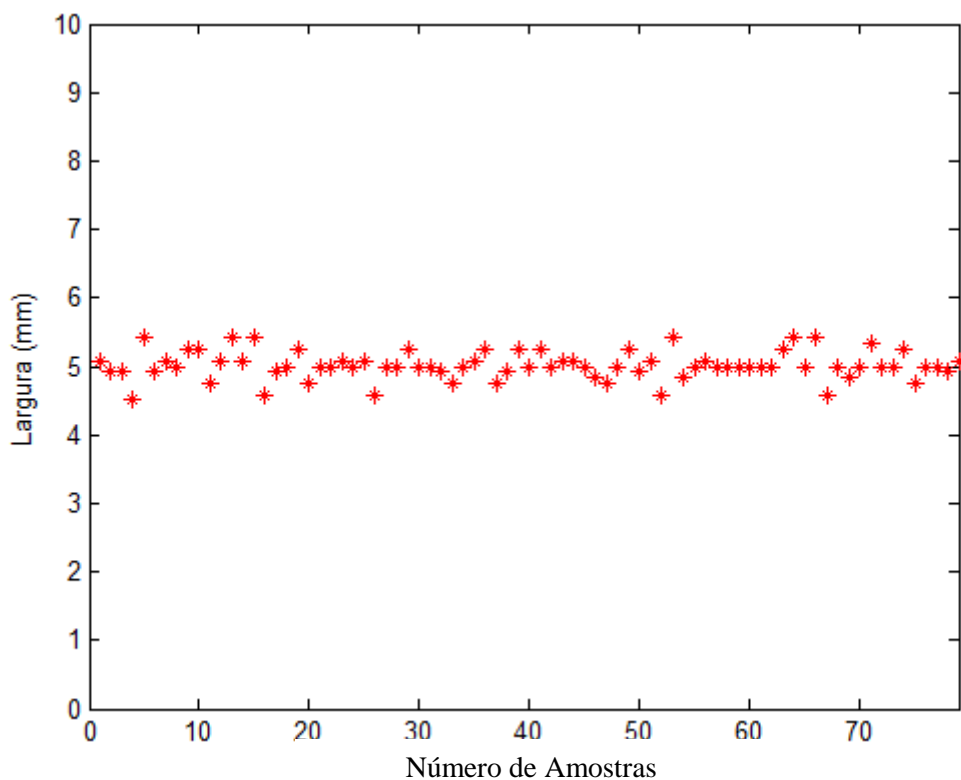


Figura 5.8: Medidas para um cordão de 5 mm com arame maciço.

A ação de controle exercida sobre a velocidade de soldagem para o cordão de 5mm de largura apresenta-se a na Figura 5.9, disposta a seguir.

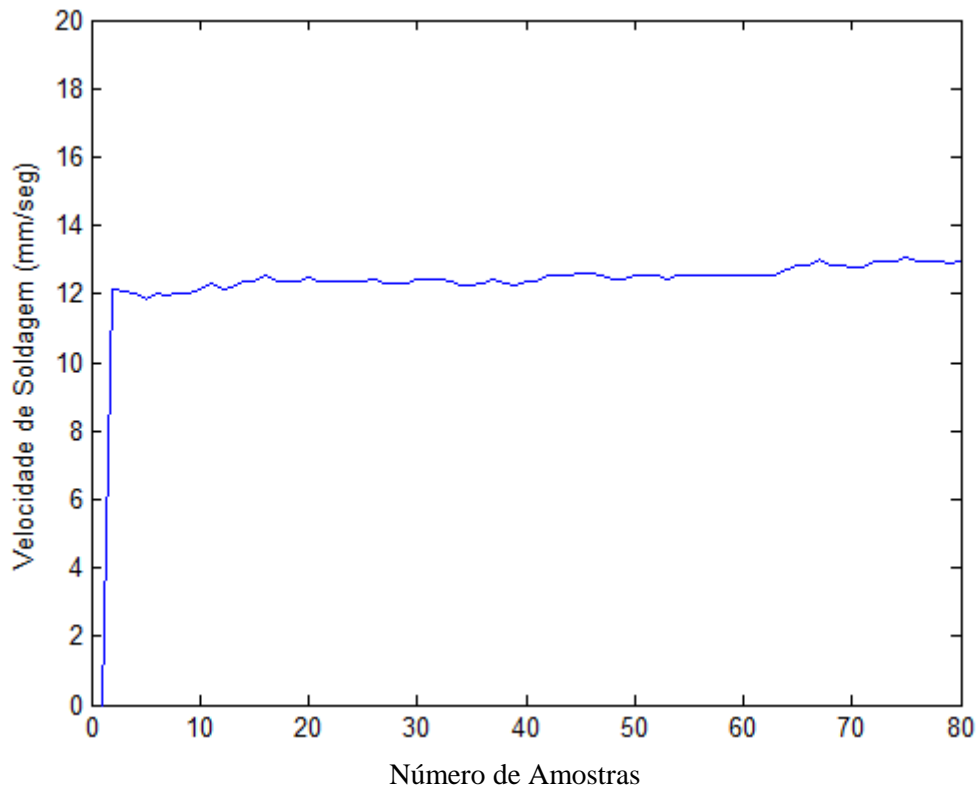


Figura 5.9: Comportamento da velocidade de soldagem durante o controle da largura de 5mm com arame maciço.

O cordão de solda obtido tem seu destaque na Figura 5.10, a seguir.



Figura 5.10: Cordão final obtido depois do controle para uma largura de 5mm com arame maciço.

Na Figura 5.11, a seguir, apresenta-se a reconstrução em 3D do cordão. Na Figura 5.12, a seguir, tem-se as medidas das características geométricas do cordão, obtendo-se uma largura média de 5,03 mm com um desvio padrão de 0,47 mm, um reforço de 2,03 mm com um desvio padrão 0,095 mm e uma área total depositada de 8,03 mm<sup>2</sup> com um desvio padrão de 0,674 mm<sup>2</sup>.

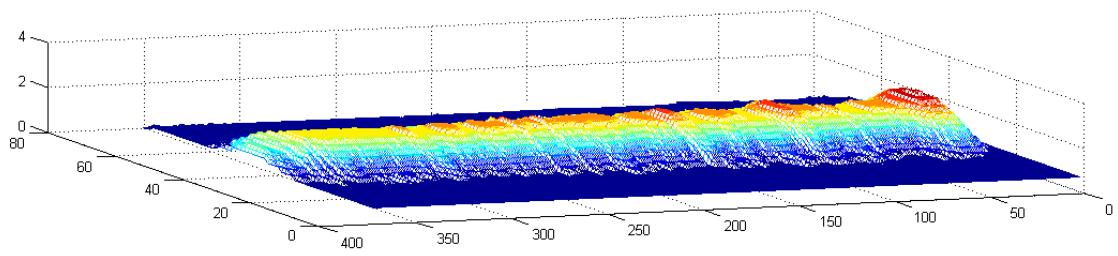


Figura 5.11: Reconstrução e 3D do cordão de 5 mm de largura com arame maciço.

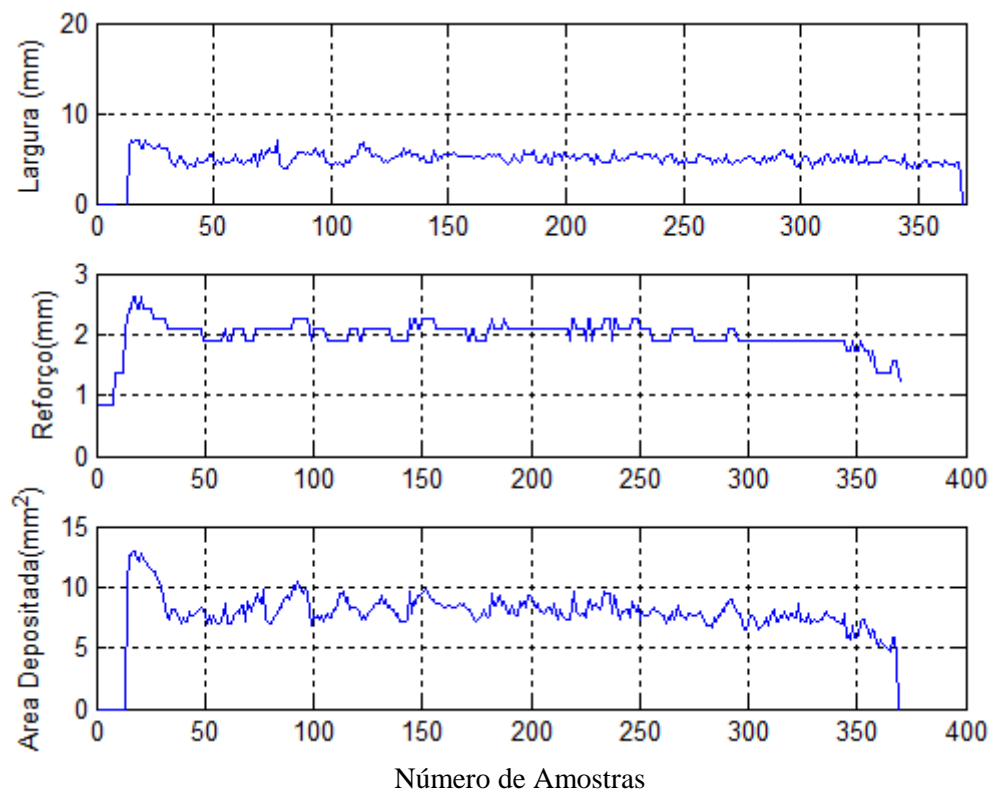


Figura 5.12: Medidas das características geométricas do cordão de 5mm com arame maciço.

Na Figura 5.13, a seguir, tem-se os sinais de corrente e tensão obtidos do processo. Neste sentido, é possível observar que a transferência de massa se deu por curto circuito, com uma corrente média de aproximadamente 150 amperes e uma tensão média de aproximadamente 19.22 volts.

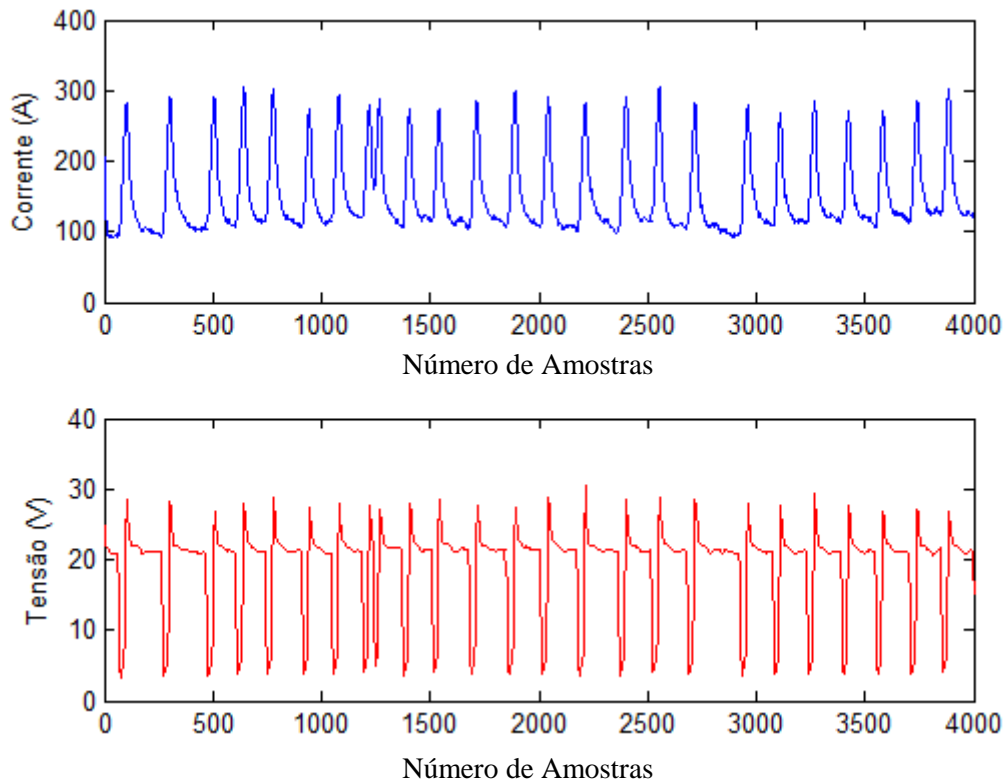


Figura 5.13: Medidas dos sinais do processo para um cordão de 5 mm de largura com arame maciço.

- Para uma largura de 6 mm

Os valores dos parâmetros calculados pela rede neural são tensão de 18.9915 volts, velocidade de alimentação do arame de 5.52899 m/min e velocidade de soldagem de 7.9505 mm/s.

Na Figura 5.14, a seguir, tem-se o conjunto de medidas da largura obtidas do processamento das imagens.

A ação de controle exercida sobre a velocidade de soldagem para o cordão de 6 mm de largura apresenta-se a na Figura 5.15, disposta a seguir.

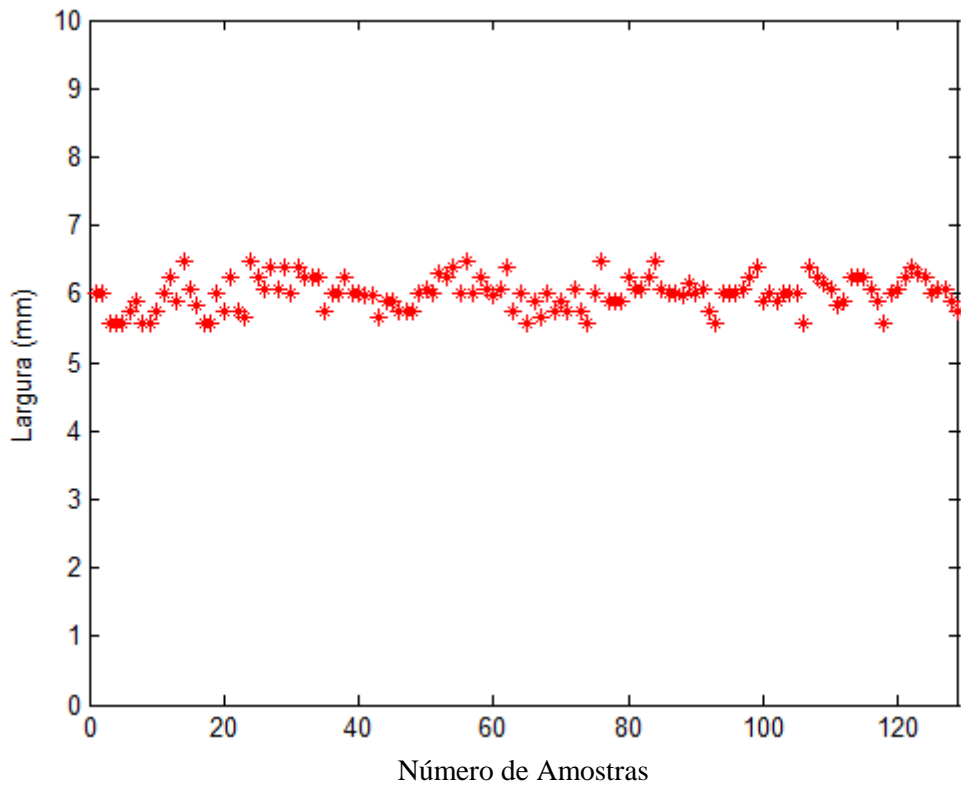


Figura 5.14: Medidas para um cordão de 6 mm com arame maciço.

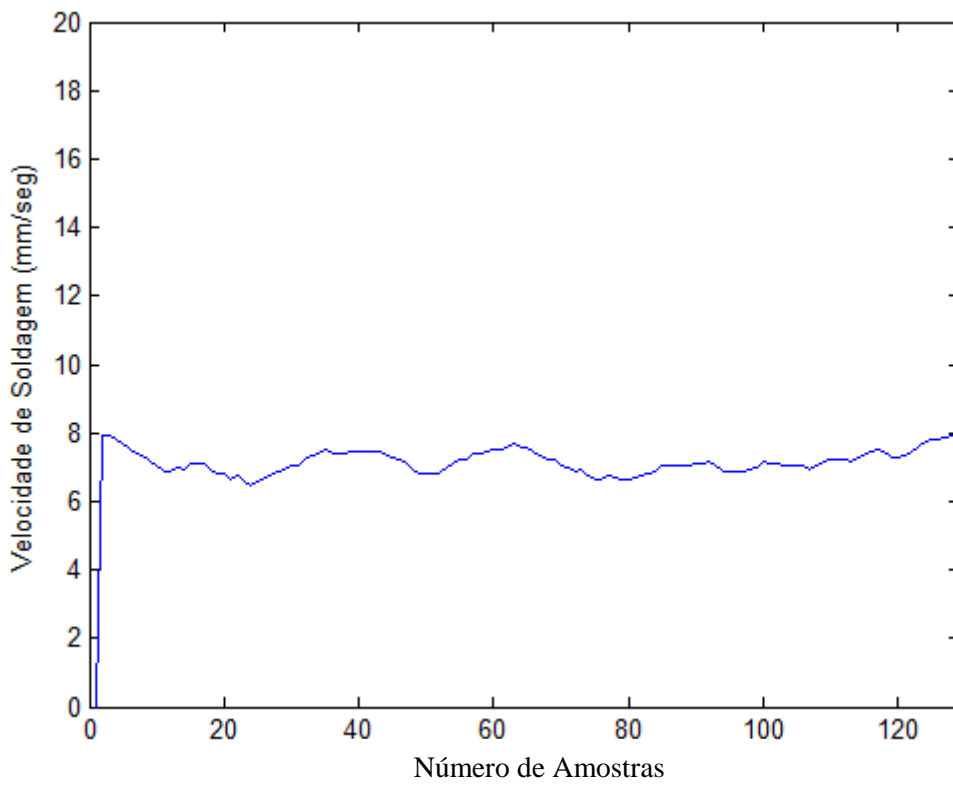


Figura 5.15: Comportamento da velocidade de soldagem durante o controle da largura de 6mm com arame maciço.

O cordão de solda obtido tem seu destaque na Figura 5.16, a seguir.



Figura 5.16: Cordão final obtido depois do controle para uma largura de 6mm com arame maciço.

Na Figura 5.17, a seguir, apresenta-se a reconstrução em 3D do cordão. Na Figura 5.18, a seguir, tem-se as medidas das características geométricas do cordão, obtendo-se uma largura média de 6,01 mm com um desvio padrão de 0,37 mm, um reforço de 2,7 mm com um desvio padrão 0,1 mm e uma área total depositada de 12,77 mm<sup>2</sup> com um desvio padrão de 0,91 mm<sup>2</sup>.

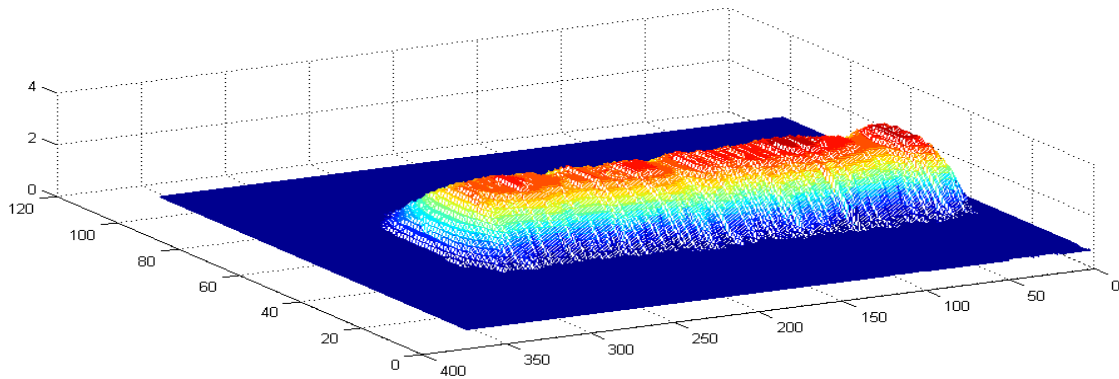


Figura 5.17: Reconstrução e 3D do cordão de 6mm de largura com arame maciço.

Na Figura 5.19, a seguir, tem-se os sinais de corrente e tensão obtidos do processo. Neste sentido, é possível observar que a transferência de massa se deu por curto circuito, com uma corrente média de aproximadamente 151 amperes e uma tensão média de aproximadamente 19.36 volts.

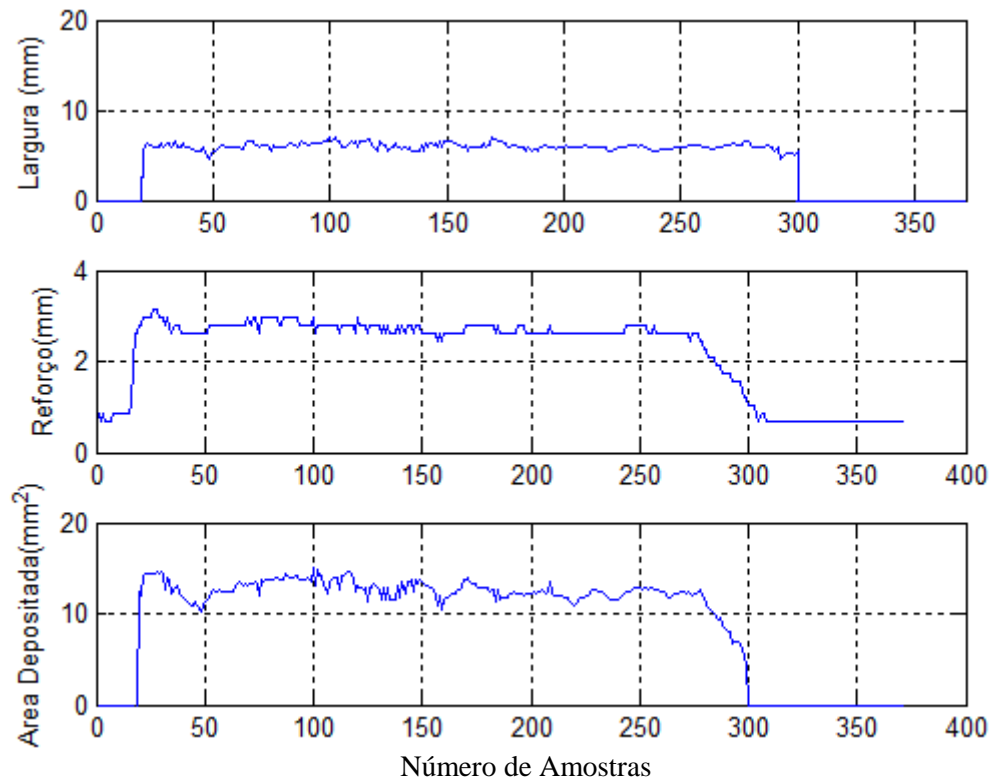


Figura 5.18: Medidas das características geométricas do cordão de 6mm com arame maciço.

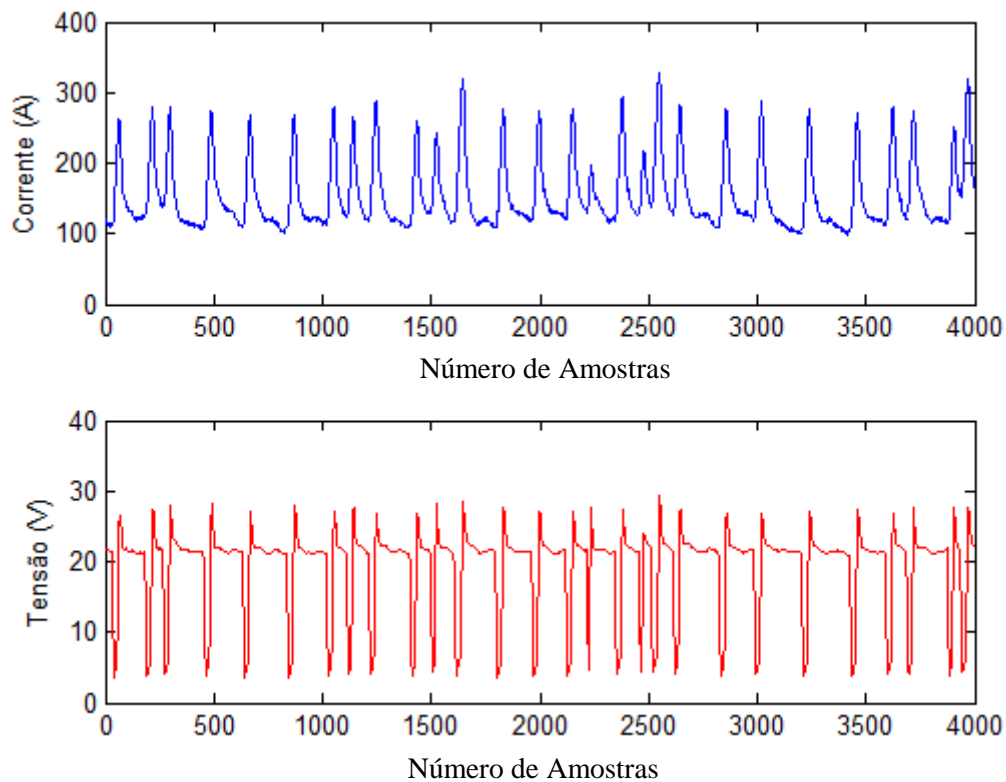


Figura 5.19: Medidas dos sinais do processo para um cordão de 6mm de largura com arame maciço.



- Para uma largura de 7 mm

Os valores dos parâmetros calculados pela rede neural são tensão de 20.893 volts, velocidade de alimentação do arame de 7.27103 m/min e velocidade de soldagem de 8.78508 mm/s.

Na Figura 5.20, a seguir, tem-se o conjunto de medidas da largura obtidas do processamento das imagens.

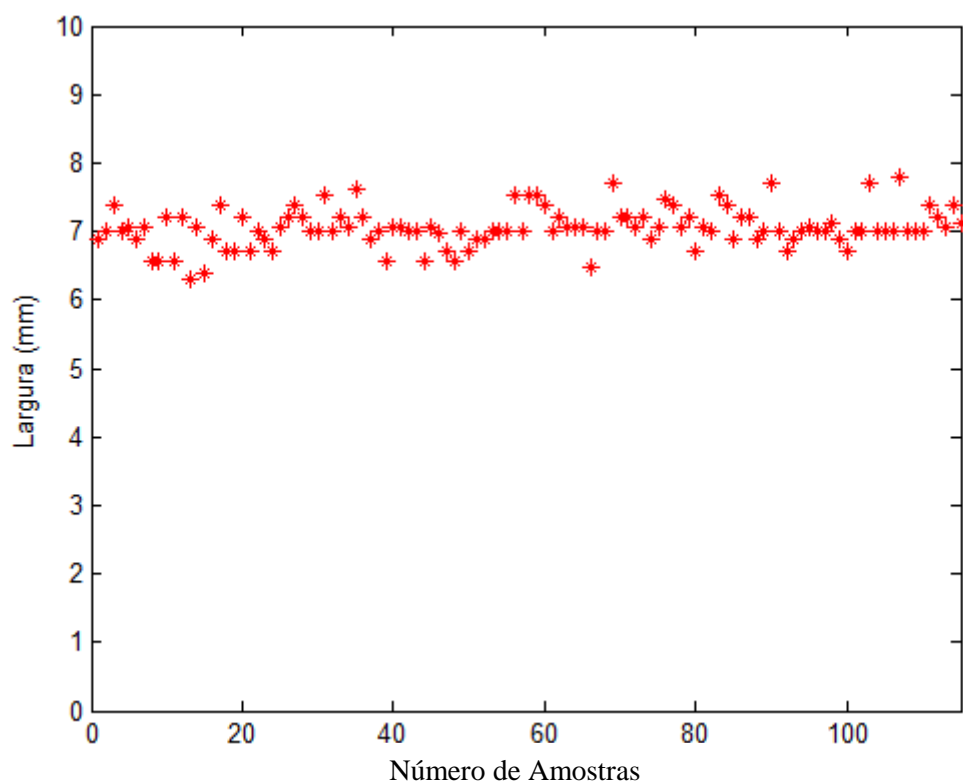


Figura 5.20: Medidas para um cordão de 7 mm com arame maciço.

A ação de controle exercida sobre a velocidade de soldagem para o cordão de 7 mm de largura apresenta-se a na Figura 5.21, disposta a seguir.

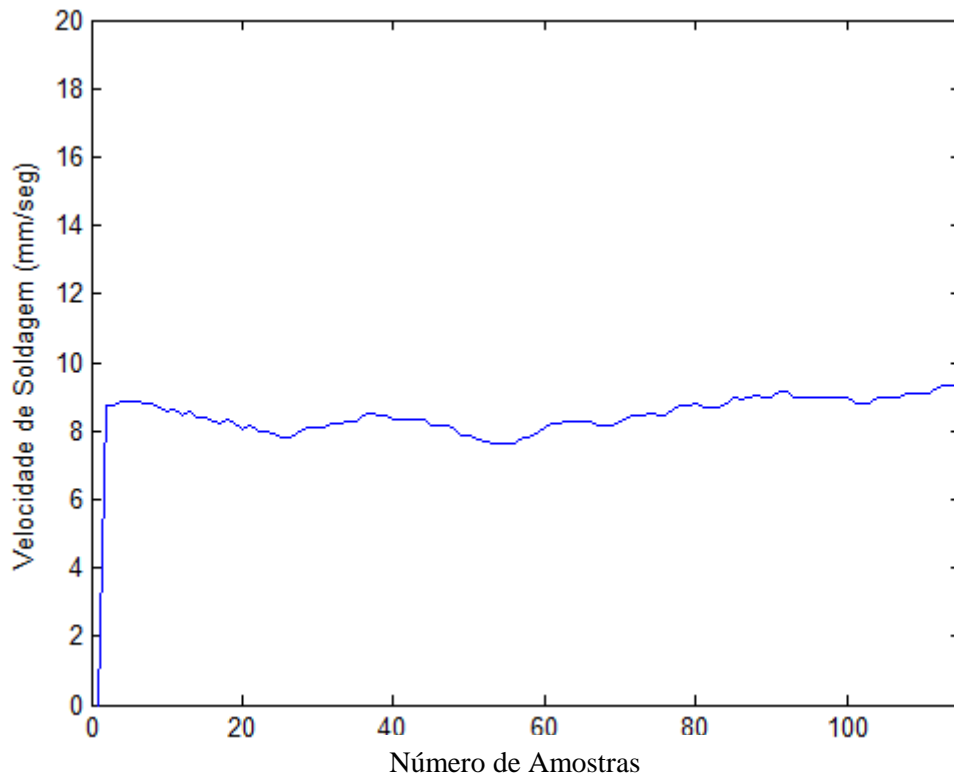


Figura 5.21: Comportamento da velocidade de soldagem durante o controle da largura de 7 mm com arame maciço.

O cordão de solda obtido tem seu destaque na Figura 5.22, a seguir.



Figura 5.22: Cordão final obtido depois do controle para uma largura de 7 mm com arame maciço.

Na Figura 5.23, a seguir, apresenta-se a reconstrução em 3D do cordão. Na Figura 5.24, a seguir, tem-se as medidas das características geométricas do cordão, obtendo-se uma largura média de 6,93 mm com um desvio padrão de 0,48 mm, um reforço de 2,62 mm com um desvio padrão 0,08 mm e uma área total depositada de 13,71 mm<sup>2</sup> com um desvio padrão de 0,87 mm<sup>2</sup>.

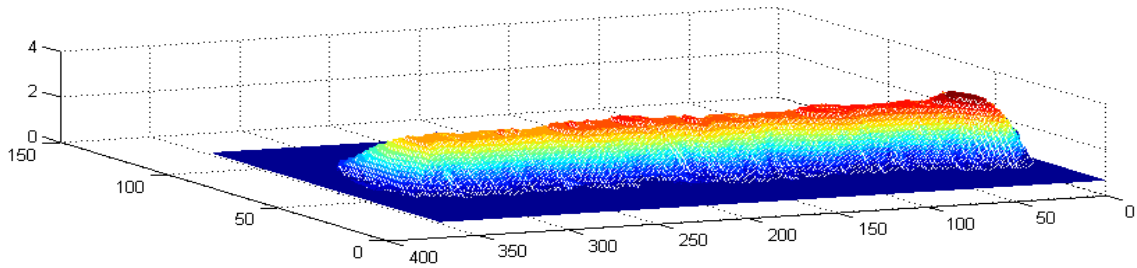


Figura 5.23: Reconstrução e 3D do cordão de 7 mm de largura com arame maciço.

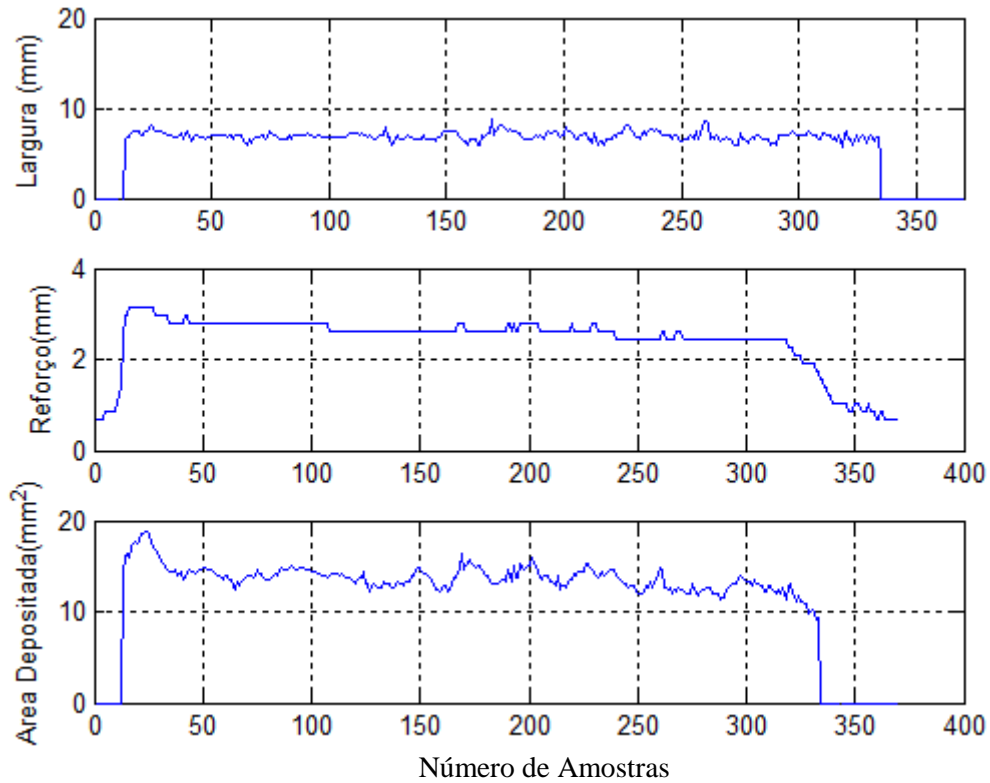


Figura 5.24: Medidas das características geométricas do cordão de 7 mm com arame maciço.

Na Figura 5.25, a seguir, tem-se os sinais de corrente e tensão obtidos do processo. Neste sentido, é possível observar que a transferência de massa se deu por curto circuito, com uma corrente média de aproximadamente 195,8 amperes e uma tensão média de aproximadamente 20,66 volts.

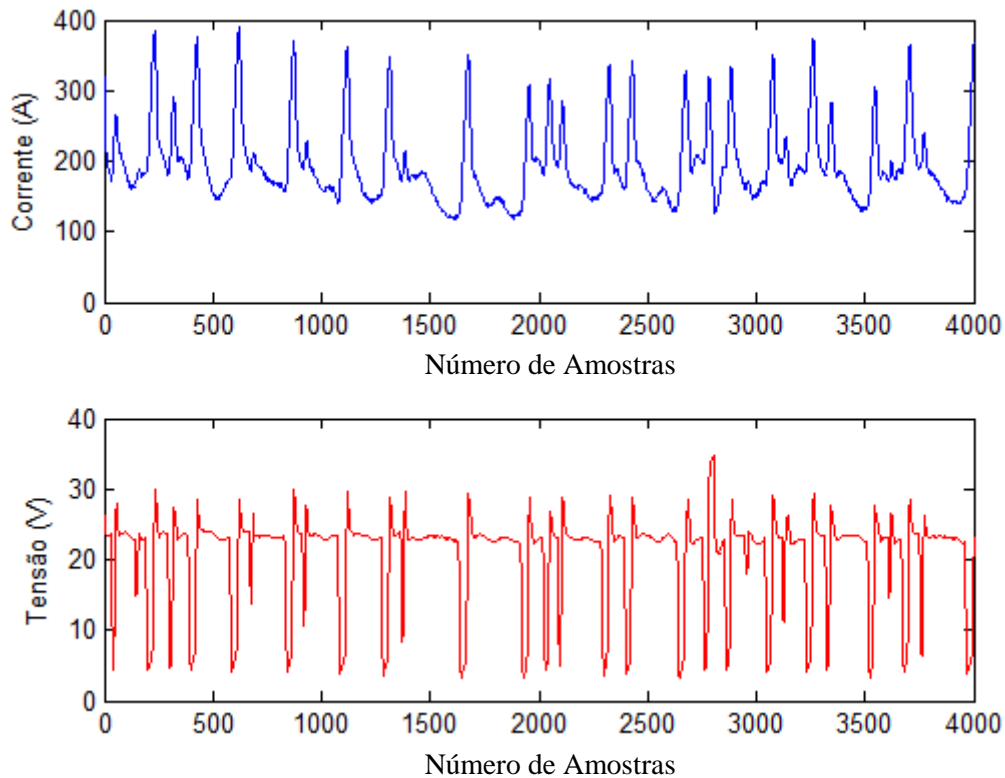


Figura 5.25: Medidas dos sinais do processo para um cordão de 7 mm de largura com arame maciço.

Os resultados obtidos para os cordões de solda utilizando arame de tipo tubular foram:

- Para uma largura de 6 mm

Os valores dos parâmetros calculados pela rede neural são tensão de 22.7414 volts, velocidade de alimentação do arame de 6.31873 m/min e velocidade de soldagem de 13.2677 mm/s.

Na Figura 5.26, a seguir, tem-se o conjunto de medidas da largura obtidas do processamento das imagens.

A ação de controle exercida sobre a velocidade de soldagem para o cordão de 6 mm de largura apresenta-se a na Figura 5.27, disposta a seguir.

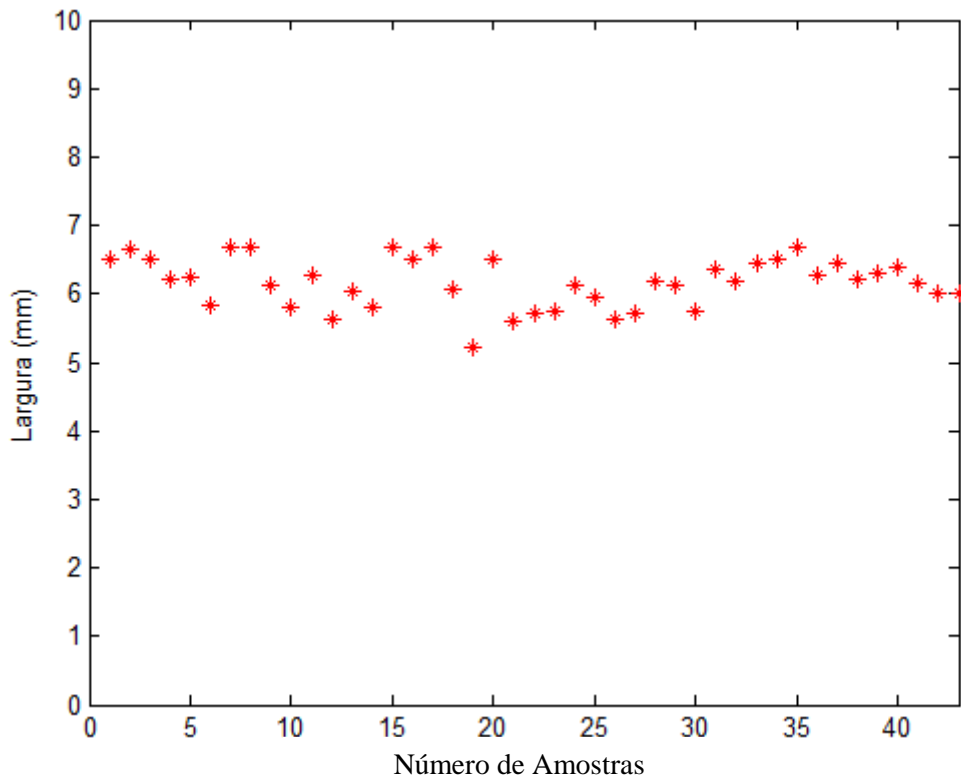


Figura 5.26: Medidas para um cordão de 6 mm com arame tubular.

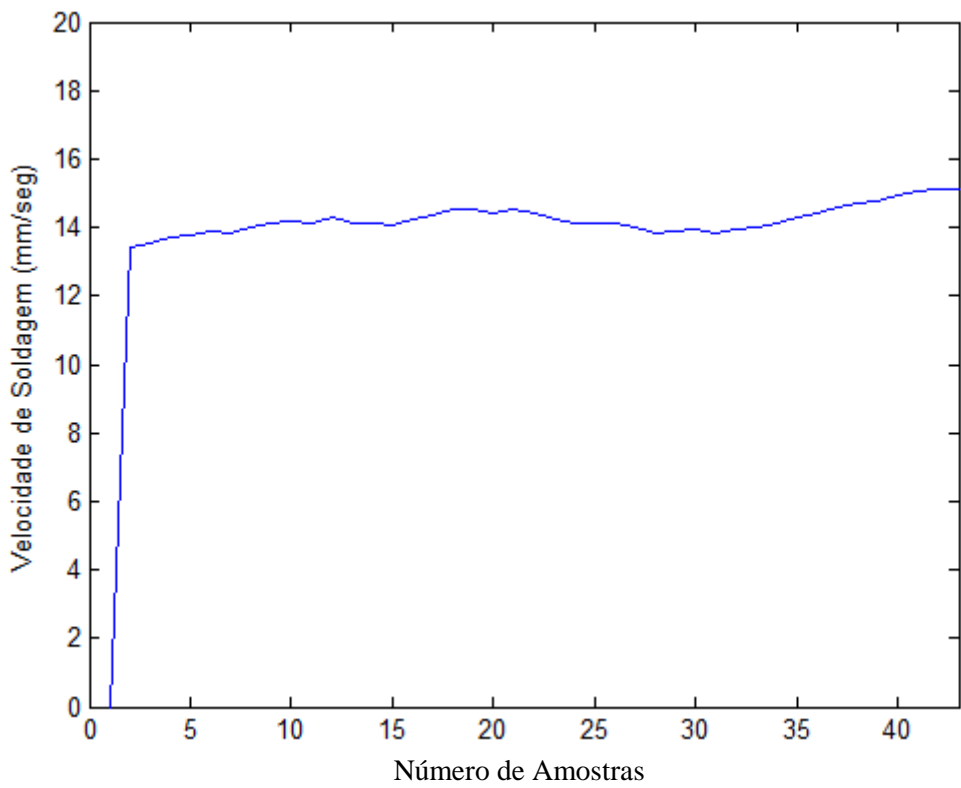


Figura 5.27: Comportamento da velocidade de soldagem durante o controle da largura, de 6 mm com arame tubular.

O cordão de solda obtido tem seu destaque na Figura 5.28, a seguir.



Figura 5.28: Cordão final obtido depois do controle para uma largura de 6 mm com arame tubular.

Na Figura 5.29, a seguir, apresenta-se a reconstrução em 3D do cordão. Na Figura 5.30, a seguir, tem-se as medidas das características geométricas do cordão, obtendo-se uma largura média de 6,14 mm com um desvio padrão de 0,36 mm, um reforço de 2,31 mm com um desvio padrão 0,16 mm e uma área total depositada de 10,64 mm<sup>2</sup> com um desvio padrão de 0,88 mm<sup>2</sup>.

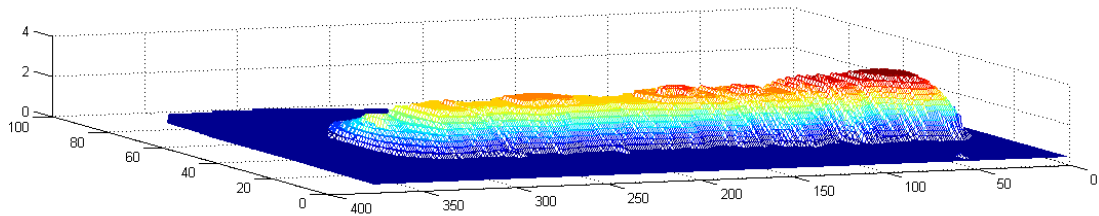


Figura 5.29: Reconstrução e 3D do cordão de 6 mm de largura com arame tubular.

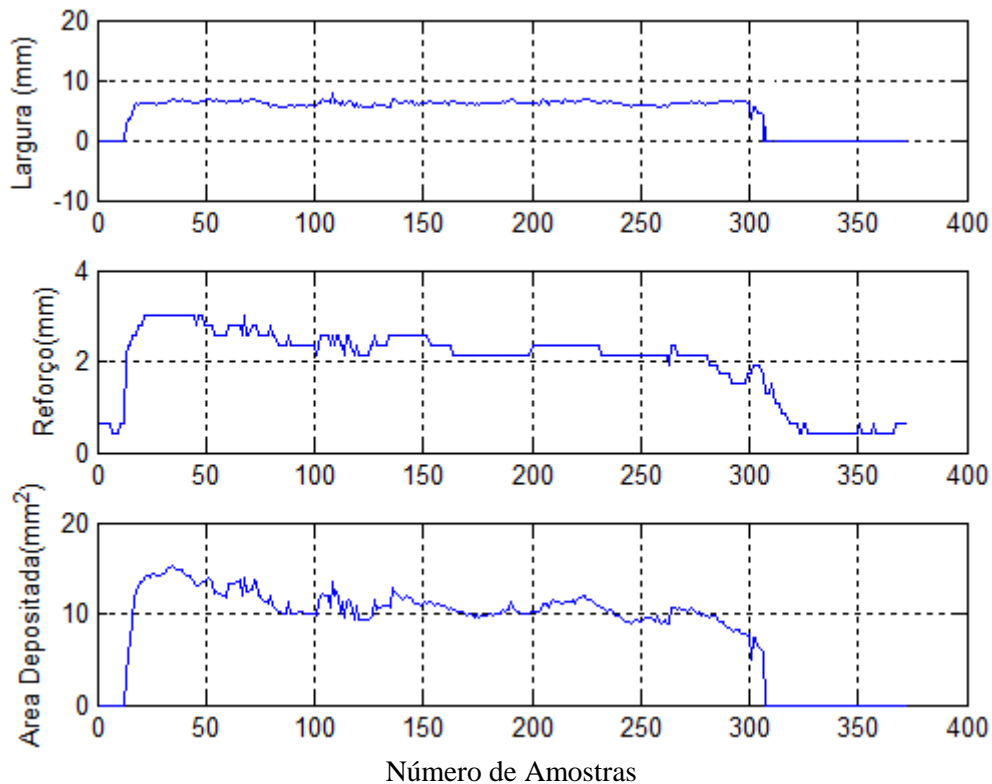


Figura 5.30: Medidas das características geométricas do cordão de 6 mm com arame tubular.

Na Figura 5.31, a seguir, tem-se os sinais de corrente e tensão obtidos do processo. Neste sentido, é possível observar que a transferência de massa foi globular, com uma corrente média de aproximadamente 238,5 amperes e uma tensão média de aproximadamente 23,19 volts.

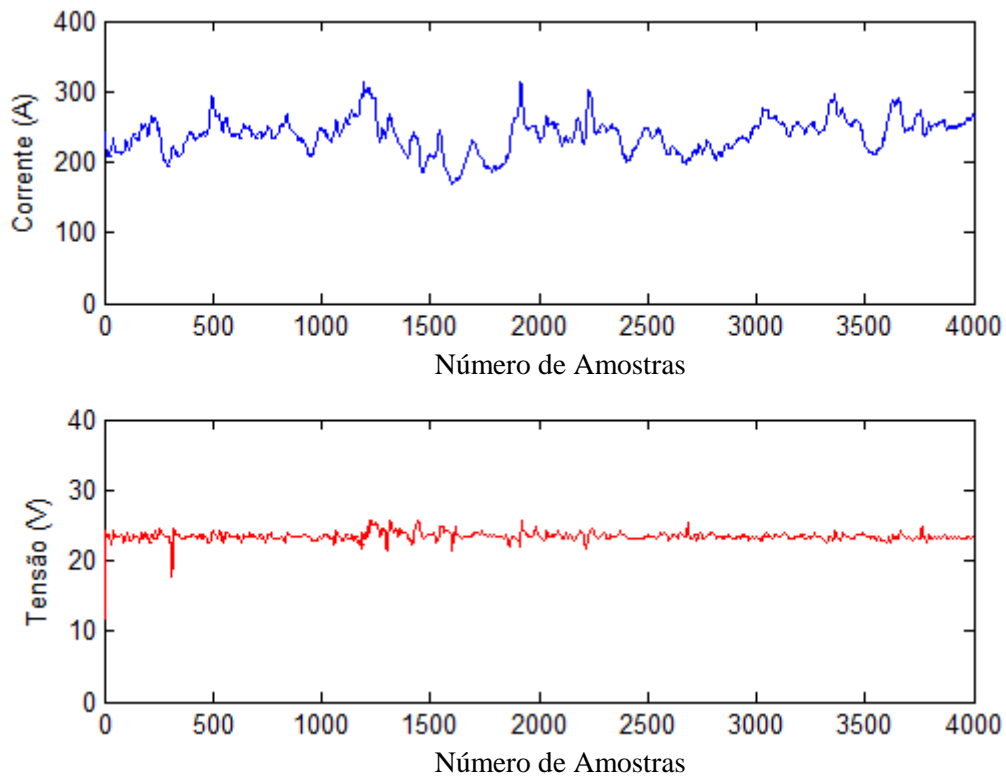


Figura 5.31: Medidas dos sinais do processo para um cordão de 6 mm de largura com arame tubular.

- Para uma largura de 7 mm

Os valores dos parâmetros calculados pela rede neural são tensão de 27.0126 volts, velocidade de alimentação do arame de 7.50618 m/min e velocidade de soldagem de 12.0368 mm/s.

Na Figura 5.32, a seguir, tem-se o conjunto de medidas da largura obtidas do processamento das imagens.

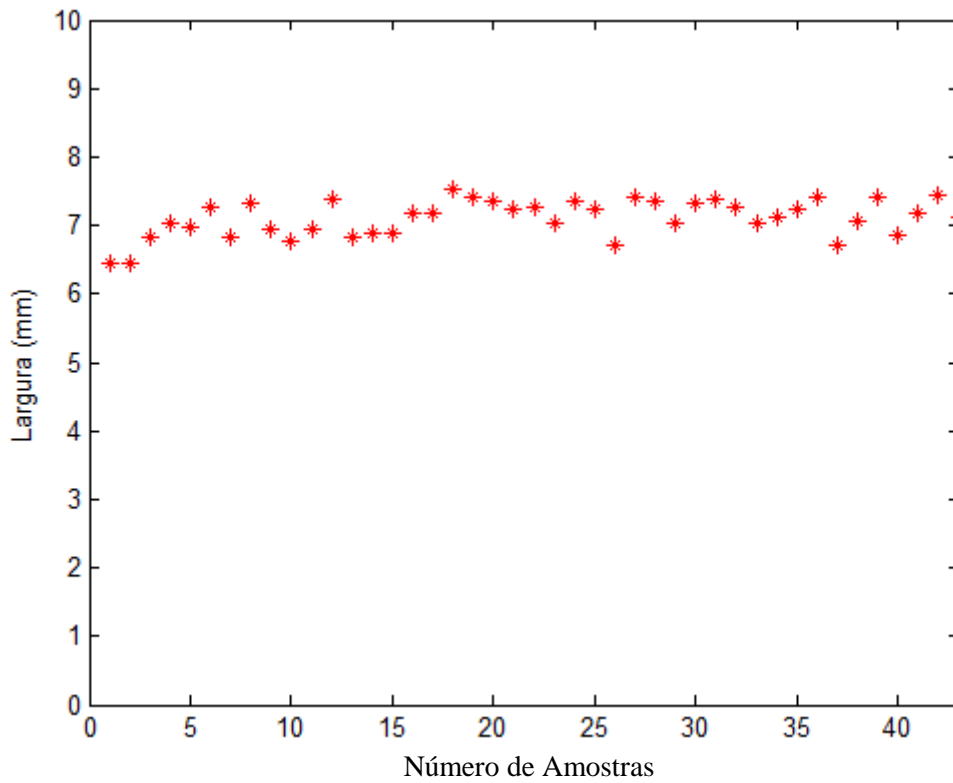


Figura 5.32: Medidas para um cordão de 7 mm com arame tubular.

A ação de controle exercida sobre a velocidade de soldagem para o cordão de 7 mm de largura apresenta-se a na Figura 5.33, disposta a seguir.

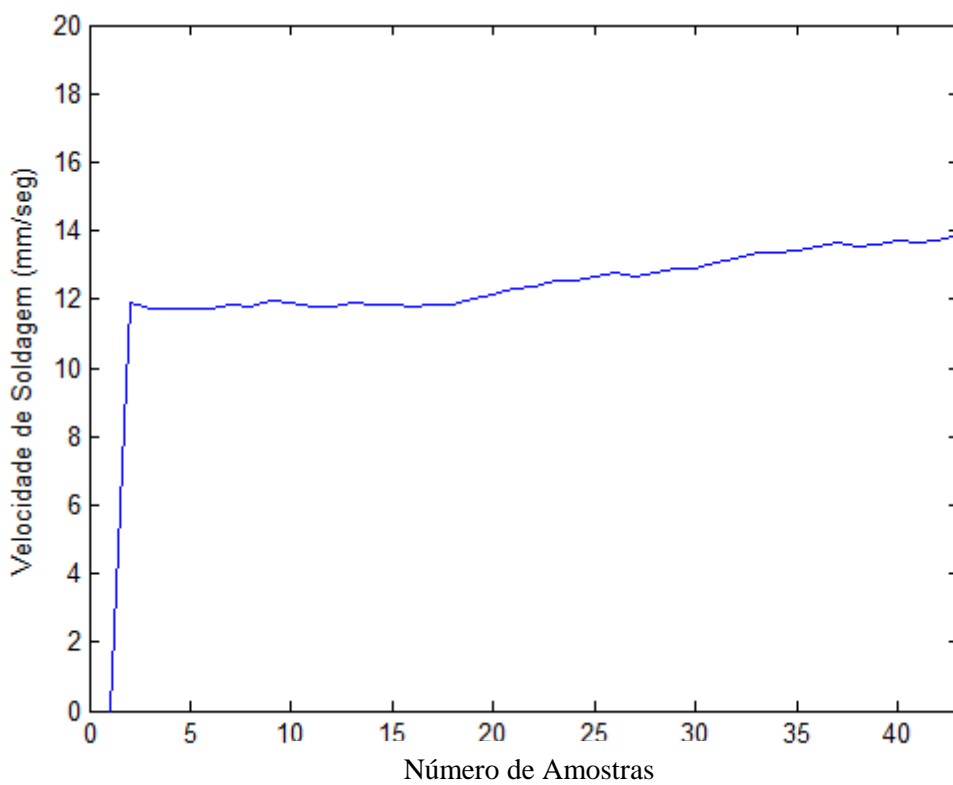


Figura 5.33: Comportamento da velocidade de soldagem durante o controle da largura de 7 mm com arame tubular.



O cordão de solda obtido tem seu destaque na Figura 5.34, a seguir.



Figura 5.34: Cordão final obtido depois do controle para uma largura de 7 mm com arame tubular.

Na Figura 5.35, a seguir, apresenta-se a reconstrução em 3D do cordão. Na Figura 5.36, a seguir, tem-se as medidas das características geométricas do cordão, obtendo-se uma largura média de 6,9 mm com um desvio padrão de 0,58 mm, um reforço de 2,65 mm com um desvio padrão 0,19 mm e uma área total depositada de 12,93 mm<sup>2</sup> com um desvio padrão de 1,47 mm<sup>2</sup>.

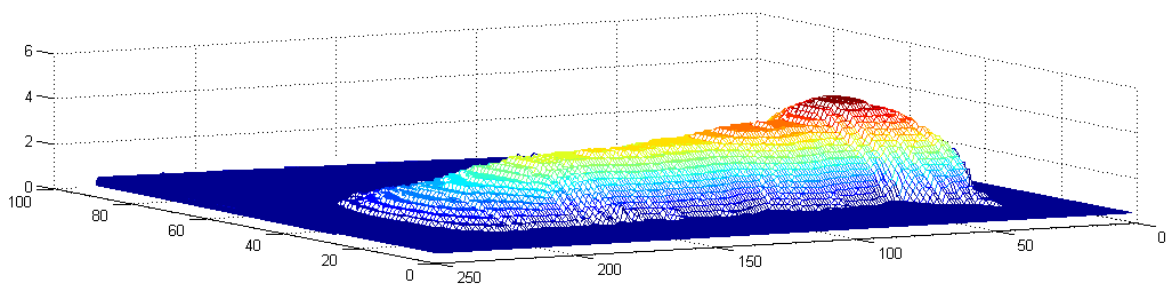


Figura 5.35: Reconstrução e 3D do cordão de 7 mm de largura com arame tubular.

Na Figura 5.37, a seguir, tem-se os sinais de corrente e tensão obtidos do processo. Neste sentido, é possível observar que a transferência de massa foi globular, com uma corrente média de aproximadamente 294,28 amperes e uma tensão média de aproximadamente 27,7 volts.

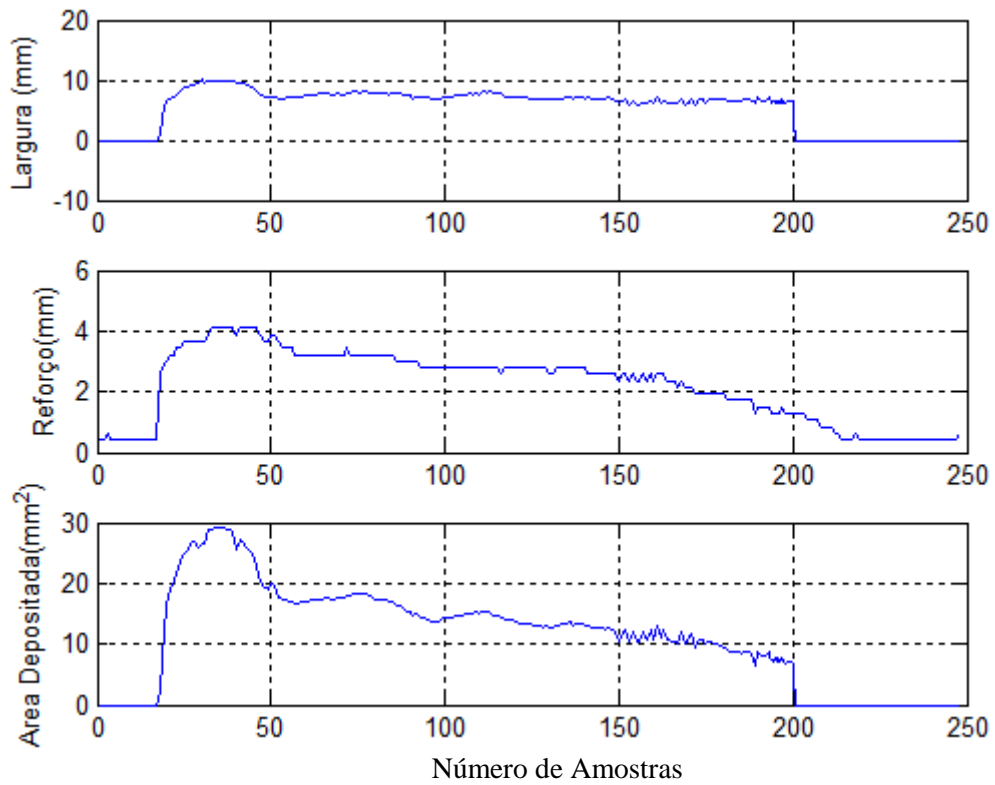


Figura 5.36: Medidas das características geométricas do cordão de 7 mm com arame tubular.

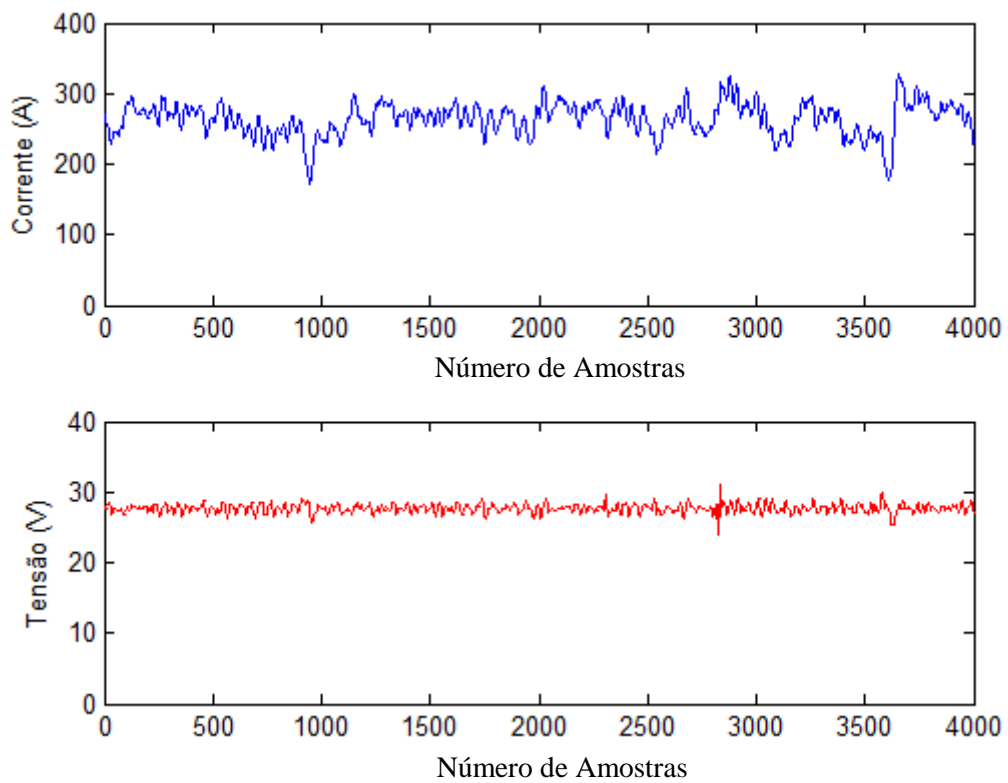


Figura 5.37: Medidas dos sinais do processo para um cordão de 7 mm de largura com arame tubular.

## 6 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O presente estudo teve por objetivo desenvolver a modelagem dos parâmetros de soldagem no processo GMAW, baseado na largura do cordão de solda a partir de redes neurais e, assim, desenvolver técnicas de controle através de processamento de imagens digitais e lógica fuzzy, visando garantir cordões de boa aparência e qualidade.

O primeiro passo para a consecução dos objetivos propostos envolveu a montagem de um sistema experimental complexo, composto por um equipamento computacional, um sistema de aquisição de imagens, um sistema para aquisição dos sinais elétricos, uma mesa de movimentação linear e um sistema de comunicação do equipamento computacional 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 de redes neurais artificiais, em conformidade com os resultados encontrados em referencial bibliográfico. A rede neural prediz os parâmetros do processo em função de uma largura desejada. 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: a velocidade de alimentação do arame, a tensão e a velocidade de soldagem, os quais influem no tamanho, 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°).

Para realizar o treinamento da rede neural e otimizar os parâmetros de solda na largura 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. Quinze 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 da largura, além de seu desvio padrão, estabelecendo-se, assim, as variáveis de entrada e saída do modelo.

Uma das novidades obtidas a partir da investigação aqui desenvolvida é a predição de parâmetros de solda ótimos para uma largura determinada. Na maioria dos trabalhos investigados, fizeram-se ênfases na predição da geometria do cordão de solda com base nos parâmetros do processo.

A Figura 6.1, apresentada a seguir, destaca a relação da tensão e a velocidade de soldagem em função da largura para o processo, utilizando-se arame tipo maciço, de pontos azuis. Tem-se aí os dados obtidos do desenho experimental e de círculos vermelhos – dados estimados pela rede neural. Igualmente, na Figura 6.2, a seguir, é possível observar a mesma relação para o processo com arame tipo tubular. Diante do exposto, é possível determinar o modelo desenvolvido para a predição dos parâmetros de soldagem a partir da largura do cordão de solda, apresentando resultados satisfatórios.

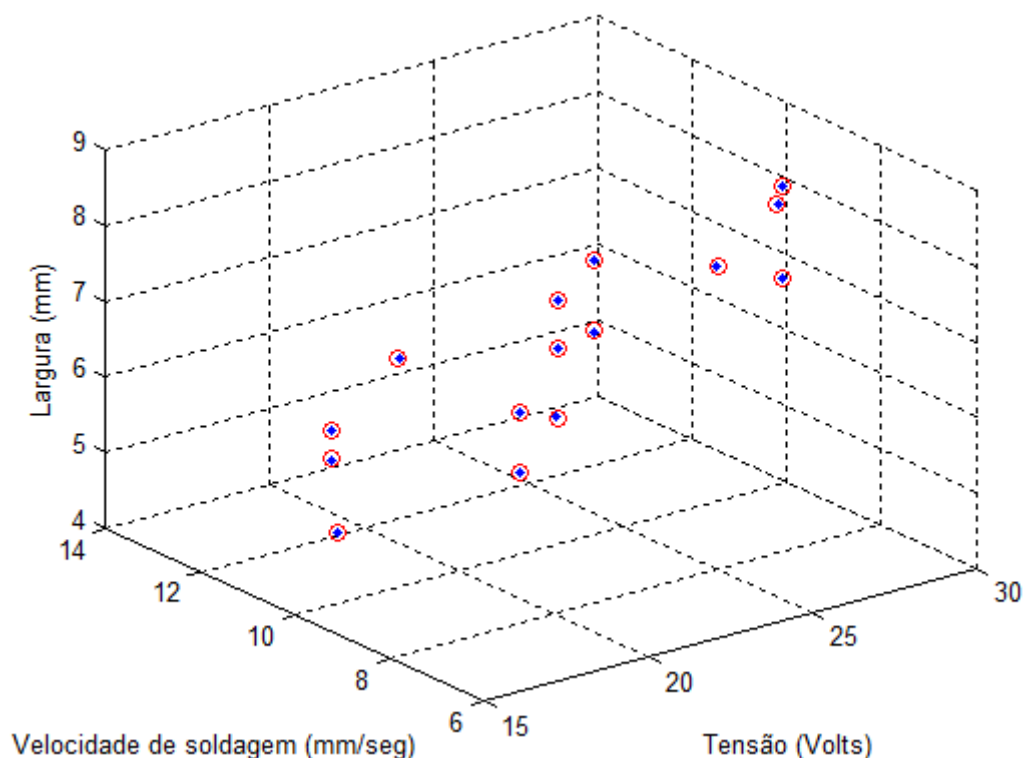


Figura 6.1: Velocidade de soldagem e tensão em função da largura para o processo utilizando arame tipo maciço.

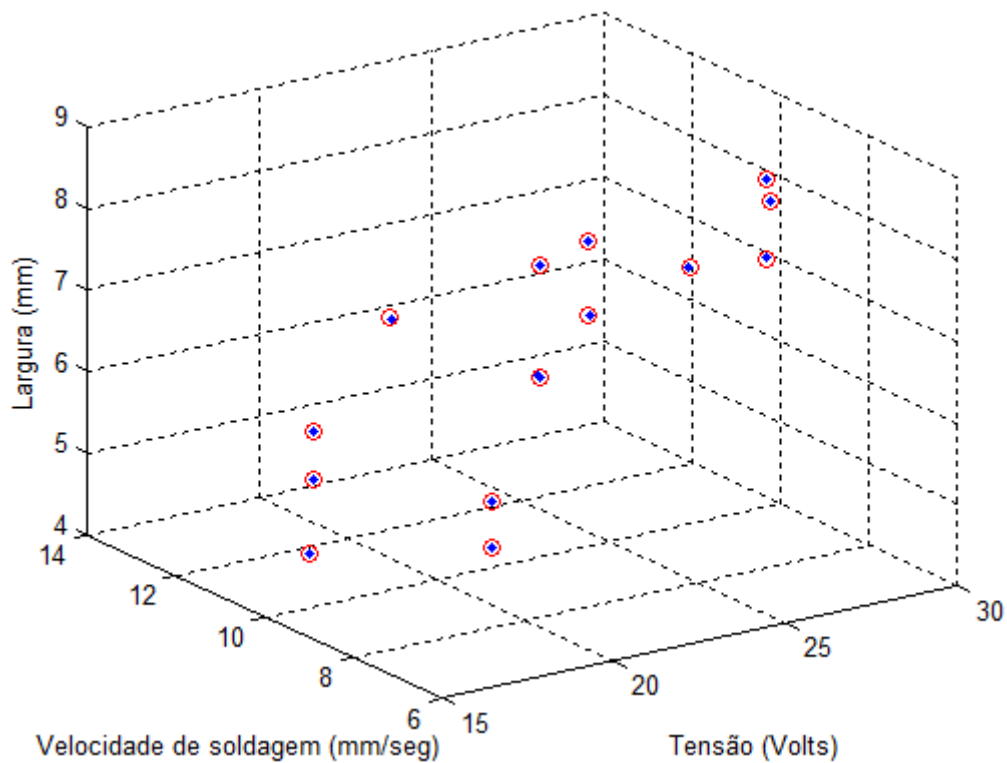


Figura 6.2: velocidade de soldagem e tensão em função da largura para o processo utilizando arame tipo tubular.

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 estável ao longo de todo o cordão, se estabeleceu um sistema de controle em malha fechada.

Das imagens adquiridas no processo tanto com arame maciço como com arame tubular, foi possível notar que o filtro foi capaz de atenuar o brilho, logrando-se identificar a poça de fusão e o cordão de solda. Ademais, o processamento e a aquisição das imagens mostraram-se adequados, tomando realmente a medida onde se encontra a largura do cordão. A taxa de amostragem atingida foi de aproximadamente 10 imagens por segundo.

A ação de controle se deu sobre a velocidade de soldagem, segundo as pesquisas efetivadas em revisão bibliográfica – fator determinante na largura do cordão. Analisando os cordões obtidos, é possível concluir que ao exercer uma ação de regulação sobre este parâmetro, se consegue realizar o controle da largura do cordão de solda.

Na Figura 5.10, Figura 5.16 e Figura 5.22, apresentadas anteriormente, tem-se as amostras obtidas das soldas com arame maciço de 5, 6 e 7 mm, respectivamente. 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.

Na Figura 5.28 e Figura 5.34, apresentadas anteriormente, tem-se os cordões de solda obtidos com arame tubular. Neste sentido, foi possível observar que no início do processo, os cordões apresentaram muita variação, mas, com o efeito do controlador, a largura vai melhorando à medida que avança o cordão. Com respeito à inspeção visual, os cordões não apresentaram descontinuidades, falta de fusão, porosidade e respingos. Tal comportamento foi observado em todos os cordões realizados com este tipo de arame.

De acordo com a inspeção visual realizada nas diferentes placas soldadas, as uniões que apresentaram um melhor acabamento superficial e uma melhor geometria do cordão foram àquelas realizadas com o arame maciço.

O sistema desenvolvido para a predição dos parâmetros de soldagem a partir da largura desejada, bem como seu controle em tempo real, apresentou resultados satisfatórios. O nível de precisão obtido com o uso do sistema de controle encontra-se destacado 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 e  $LR$  é a largura real em milímetros.

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

$L$	Arame Maciço			Arame Tubular		
	$LR$	$ L - LR $	$Erro \%$	$LR$	$ L - LR $	$Erro \%$
5	5,03	0,03	0,6	4,93	0,07	1,42
6	6,01	0,01	0,16	6,14	0,14	2,28
7	6,93	0,07	1,01	6,9	0,1	1,45

Para o cálculo de percentagem de erro, utilizou-se a equação 6.1, disposta a seguir.

$$\frac{LR - L}{LR} * 100\% \quad (6.1)$$

Na Tabela 6.2, a seguir, tem-se as medidas obtidas dos parâmetros geométricos, referentes ao reforço, à largura e à área depositada. Ao analisar os referidos dados, foi possível perceber que os cordões obtidos não somente apresentam uniformidade em sua largura, mas, considerando os desvios padrões dos três parâmetros geométricos, os cordões obtidos após a etapa de controle, apresentam uniformidade nos três parâmetros geométricos externos.

Tabela 6.2: Medidas dos parâmetros geométricos para os cordões obtidos.

	<i>Largura (mm)</i>		<i>Reforço(mm)</i>		<i>Area depositada (mm)</i>	
	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
<b>Arame Maciço</b>	5,03	0,47	2,03	0,095	8,03	0,674
	6,01	0,37	2,7	0,1	12,77	0,91
	6,93	0,48	2,62	0,08	13,71	0,87
<b>Arame Tubular</b>	6,14	0,36	2,31	0,16	10,64	0,88
	6,9	0,58	2,65	0,19	12,93	1,47
	4,93	0,38	2,64	0,24	9,63	1.32

## 7 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 7.1 – CONCLUSÕES

- O procedimento para a modelagem aqui desenvolvido é de grande valia como forma metodológica para a obtenção dos parâmetros ótimos em prol da largura do cordão desejada. Foram encontrados os valores para a tensão, a velocidade de alimentação do arame e a velocidade de soldagem, que otimizam a resposta, ou seja, soldas de boa aparência e qualidade com os dois tipos de arame. Neste sentido, é possível afirmar que a modelagem a partir de redes neurais bem desenhadas e desenvolvidas, prediz adequadamente os parâmetros do processo para uma largura do cordão de solda.
- A partir dos resultados obtidos, tem-se que a lógica *fuzzy* fornece desempenho satisfatório ao tentar controlar a largura do cordão de solda. No presente estudo, apresentaram-se os detalhes sobre a implementação do controlador *fuzzy*. A obtenção do controlador eficiente para a pesquisa aqui apresentada só foi possível devido ao conhecimento do funcionamento do processo.
- Um sistema de aquisição de imagens foi desenvolvido para medir a largura do cordão de solda no processo de soldagem por *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) em tempo real, através de uma câmera *web*. A forte interferência de luz de arco, transferência de metal, os respingos e outras fontes no processo, foram reduzidas de maneira eficiente conforme o processamento e filtragem adequados. As imagens obtidas permitem identificar a largura do cordão. O referido sistema demonstrou ser eficaz, viável, de baixo custo e adaptável em aplicações industriais e para fins de investigação.
- Apesar do controle do sistema em questão apresentar-se de modo variável no tempo – não linear e incerto –, logrou-se a obtenção de resultados satisfatórios em sua aplicação experimental.



- Para comprovar a metodologia aqui proposta, fez-se uso de dois tipos de arame, onde se pode verificar que ao variar um parâmetro no processo, os resultados com respeito à largura do cordão são diferentes. O sistema de controle proposto foi aplicável aos dois tipos de arame. O arame tubular apresentou mais variações ao início do cordão, não obstante, foi possível o seu controle de maneira adequada, comprovando àquilo descrito pela metodologia: este pode ser adaptável e trabalha ante muitas mudanças nas condições do processo.

## 7.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 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 da largura 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.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Absi, S. e Carvalho, G. C. (2003). “Monitoração da Poça de Fusão”. Faculdade de Tecnologia Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade de Brasília. Soldagem & Inspeção, Ano 8, No.1.
- 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.
- AWS. (1987). “Welding Handbook”. Welding Technology. 8a. edition. Volume 1.
- AWS. (2001). “Welding Handbook”. American Welding Society. Vol. 1, 9th edition.
- Barhorst, S. (2000). “Metal Cored Electrode Basics”. The American Welder, p.p. 13-15.
- Braga, A., Ludemir, T. e Carvalho, A. (2000). “Redes Neurais Artificiais - Teoria e Aplicações”. Rio de Janeiro, Editora LTC.
- Branco, P. e Dente, J. (2001). “Fuzzy systems modeling in practice, fuzzy sets and systems”. n. 121, p.p 73-93.
- 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.
- Carrino, L., Natale, U., Nele, L., Sabatini, M. e Sorrentino, L. (2007). “A neuro-fuzzy approach for increasing productivity in gas metal arc welding processes”. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Volume 32, Issue 5-6, pp 459-467.
- Castillo, O. e Melin, P. (2008). “Type-2 Fuzzy Logic: Theory and applications”. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Cayo, Eber H. (2008). “Monitoramento, Detecção e Localização de Defeitos na Solda Baseada no Sensoriamento da Pressão Acústica do Arco Elétrico no Processo GMAW-S”. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.DM-02A/08, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

- Chandel, R. (1988). "Mathematical modeling of gas metal arc weld features". Proceedings of the Fourth International Conference on Modeling of Casting and Welding Processes, 109–120.
- Chandel, R. e Bala, S. (1986). "Effect of welding parameters and groove angle on the soundness of root beads deposited by the SAW process". Proceedings of an International Conference on Trends in Welding Research, 379-385.
- Chen, S. e Wu, J. (2009). "Information Acquirement of Arc Welding Process". Intelligentized Methodology for Arc Welding Dynamical Processes. Lecture Notes in Electrical Engineering Volume 29, p.p 57-111.
- Cox, E. (1995). "The fuzzy systems handbook: a practitioner's guide to building, using, and maintaining fuzzy systems". New York: AP Professional.
- Del Brio, B. e Sanz, A. (2002). "Redes neuronales y sistemas difusos". 2a Edición. RA-MA Editorial.
- Di, L., Yonglun, S. e Feng, Y. (2000). "On Line Monitoring of Weld Defects for Shortcircuit Gas Metal Arc Welding Based on the Self-organize Feature Map Neural Networks". Proceedings of the IEEE-INNSENNS International Joint Conference on.
- 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, G., Hale, M. e Hart, D. (1986). "Multivariable control of arc welding processes". Proceedings of an International Conference on Trends in Welding Research, 18-22. Gatlinburg, USA.
- Eagar, T.W. (1999). "In search of the perfect weld". Proceedings of Trends in welding research, ASM International, Materials Park.
- Edwin Raja, J. e Kumanan, S. (2007). "ANFIS for prediction of weld bead width in a submerged arc welding process". Journal of Scientific & Industrial Research Vol. 66, pp. 335-338.

- Edwin Raja, J. and Kumanan, S. (2010). “Neuro hybrid model to predict weld bead width in submerged arc welding process”. *Journal of Scientific & Industrial Research* Vol. 69, p.p 350-355.
- 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.
- Fortes, C. (2004). “Soldagem MIG / MAG – traduzido e adaptado”. ESAB.
- Franco, F. D. (2008). “Monitorização e Localização de Defeitos na Soldagem TIG através do Sensoriamento Infravermelho”. *Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.DM-026A/08, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 125p.*
- 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.*
- Giraldo, J. (1997). “Aspectos básicos del control de calidad de estructuras metálicas soldadas”. *Proceedings of Aciem. ISSN: 0120-4904 ed: v.1 fasc.1 pp.10 - 15.*
- Golob, M., Koves, A., Puklavec, A. e Tovornik, B. (2002). “Modelling, simulation and fuzzy control of the gmaw welding process”. *15<sup>th</sup> 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.*
- Gouming, H. e Shaohui, Y. (2003). “Acquisition and pattern recognition of spectrum information of welding metal transfer”. *Materials and Design. p.p 699-703.*
- 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.*

- Haykin, S. (2001). “Redes Neurais: Princípios e Prática”. 2.<sup>a</sup> edição, Porto Alegre: Bookman.
- Hu, J., e Tsai, H. (2006). “Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Part I e Part II: The arc”. Proceedings of International Journal of heat and mass transfer”. p.p 808-846.
- Jiang, W., Fan, Q., e Gong, J. (2010). “Optimization of welding joint between tower and bottom flange based on residual stress considerations in a wind turbine”. Energy, 35, 461-467.
- 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.
- Khoshravan, M. R., e Setoodeh, M. A. (2010). “Numerical and experimental analysis of welding deformation in thin plates”. Computers, Materials and Continua, 16 (3), 195-228.
- Kim, I. S., Kim, J. W., Thao, D. T. e Jeong, J. W. (2008). “Predicting Lap-Joint bead geometry in GMA welding process”. Archives of Materials Science and Engineering, 32,121-124.
- Kim, I. S., Park, C., Jeong, Y. e Son, J. (2001). “International Journal of Advanced Manufacture Technology”. Vol 18, p.p 98–102.
- Kim, I. S., Son, J.S., Kim, I.G., Kim, J.Y. e Kim, O.S. (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.S., Son, J.S., Park, C.E., Kim, I.J. e Kim, H.H. (2004). “An Investigation into an Intelligent System for Predicting Bead Geometry in GMA Welding Process”. Journal of Materials Processing Technology. p. (113-118).
- Klir, G., Clair, U. e Yuan, B. (1997). “Fuzzy Set Theory –Foundations and Applications”. Estados Unidos : ed. Prentice Hall.
- Kohonen, T. (1990). “The self-organizing map”. Proceedings of the IEEE, V.78, n. 9.

- Kovács, Z. (1996). “Redes Neurais Artificiais: Fundamentos e aplicações”. São Paulo, Livraria da Física Editora.
- Lanzetta, M., Santochi, M. e Tantussi, G. 2001. “On-line control of robotized Gas Metal Arc Welding”. Department of Mechanical, Nuclear and Production Engineering. University of Pisa, Italy.
- Lee, J. e Um, K. (2000). “A comparison in a back-bead prediction of gas metal arc welding using multiple regression analysis and artificial neural network”. J. of Optics and Lasers in Engineering, Vol. 34, pp. 149-158.
- Lima II, E., Castro, C., Bracarense, A. e Campos, M. (2005). “Determinação da Relação Entre Parâmetros de Soldagem, Largura da Poça e Aspectos do Cordão de Solda Utilizando Câmera de Alta Velocidade”. Soldagem Insp., Vol. 10, No. 4, Out/Dez.
- Lippman, R. (1987). “An introduction to computing with neural nets”. IEEE ASSP Magazine, v. 3, n. 4.
- 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.
- Lucas, W. (1999). “Choosing shielding gas – Part 2”. Welding & Metals Fabrication. N°7, p.p 269-276.
- Mcill, J. M., e Oddy, A. S. (1995). “A nonconforming eight to 26-node hexahedron for three-dimensional thermal-elasto-plastic finite element analysis”. Computers & structures, 54. n° 2, 183-189.
- Millau, R., Quero, J. e Franquelo, L. (1997). “On-line continuous weld monitoring using neural networks”. Biological and Artificial Computation: From Neuroscience to Technology. Lecture Notes in Computer Science Volume 1240, p.p 1315-1323.
- 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.
- Modenesi, P. e Reis, R. (2007). “A model for melting rate phenomena in GMA welding”. Proceedings of Journal of Materials Processing Technology. p.p 199-205.
- 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.
- Mousavi, M., Haeri, M. (2011). “Welding current and arc voltage control in a GMAW process using ARMarkov based MPC”. Control Engineering Practice 19, p.p 1408–1422.
- Mukaidono, M. (2001). “Fuzzy Logic for beginners”. Singapore: ed. World Scientific.
- Murray, P.E. e Scotti, A. (1999). “Sci. Tech. Welding and Joining”. p.p 112-117.
- Nagesh, D.S. e Datta, G.L. (2002). “Prediction of weld bead geometry and penetration in shielded metal-arc welding using artificial neural networks”. Journal of Materials Processing Technology 123, p.p 303–312.
- Nagesh, D. S. e Datta, G. L. (2008). “Modeling of fillet welded joint of GMAW process: integrated approach using DOE, ANN and GA”. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM). Volume 2, Issue 3, p.p 127-136.
- Pinho, A. (1999). “Uma contribuição para a resolução de problemas de programação de operações em sistemas de produção intermitentes flow-shop: A consideração de incertezas”. Dissertação de Mestrado em Engenharia – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

- 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.
- Queiroz, A. (2011). “Estudo da influência dos parâmetros no processo de soldagem GMAW - arco pulsado”. Ufmg pos-graduação em engenharia mecânica, Minas gerais.
- Ramos, D., López, I. e Perez, P. (2013). “Effect of process parameters on robotic GMAW bead area estimation”. *The 2013 Iberoamerican Conference on Electronics Engineering and Computer Science. Procedia Technology* 7, p.p 398 – 405.
- Raveendra, J., e Parmar, R. S. (1987). “Mathematical models to predict weld bead geometry for flux cored arc welding”. *Metal Construction* 19/2, 31-35.
- 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.
- Rezende, Solange O. (2003). “Sistemas Inteligentes – Fundamentos e aplicações”. Barueri, SP. Editora Manole.
- Scotti, A. e Ponomarev, V. (2008). “Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento, melhor desempenho”. São Paulo, Artliber Editora, p.p 284.
- 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.
- Simpson, P. (1990). “Artificial Neural Systems: Foundations, Paradigms, applications, and implementations”. Pergamon Press.



- Son, J. S., Kim, I. S., Kim, H. H., Kim, I. J., Kang, B. Y. e Kim, H. J. (2007). "A study on the prediction of bead geometry in the robotic welding system". *Journal of Mechanical Science and Technology*. Volume 21, Issue 10, p.p 1726-1731.
- Srikanthan, L. T. e Chandel, R. S. (1998). "Neural network based modelling of GMA welding process using small data sets". *Proceedings of the Fifth International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, Singapore*. p.p. 474–478.
- Srinivasa, Rao P., Gupta, O. P., Murty, S. S. N. e Koteswara, Rao A. B. (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.
- Torres, S.J.E. (2000). "Optimización de un Procedimiento de Soldadura MIG para la Aleacion de Aluminio AA 6061-T6 a Través del Control del Calor Suministrado".
- Von Altrock, C. (1996). "Fuzzy logic and neuro-Fuzzy applications in business and finance". New Jersey: Prentice Hall PTR.
- Wahab, M. e Painter, M. (1997). "Ves. & Piping". 73, p.p 153-159.
- Wang, XW. e Li, RR. (2013). "Intelligent modelling of back-side weld bead geometry using weld pool surface characteristic parameters." *Journal of Intelligent Manufacturing*.
- Wanga, Z., Zhanga, Y. e Wua, L. (2012). "Adaptive interval model control of weld pool surface in pulsed gas metal arc welding". *Automatica* 48, p.p 233–238.
- 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.
- 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*.
- Ying, H. (2000). "Fuzzy Control and modeling: Analytical foundations and applications". *IEEE Press Series on Biological Engineering*.

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.

Zadeh, L. (1988). “Fuzzy Logic”. IEEE Computer, April, pp. 83-92.