

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

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

JORGE ANDRES GIRON CRUZ

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

PUBLICAÇÃO: ENM.DM - 66A/14

BRASÍLIA/DF: MARÇO – 2014

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

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

JORGE ANDRES GIRON CRUZ

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

APROVADA POR:

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

**Prof. José Maurício S. T. Motta, PhD. (ENM/UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Evandro Leonardo S. Teixeira, Dr. (FGA/UnB)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 7 DE MARÇO DE 2014.

FICHA CATALOGRÁFICA

CRUZ, JORGE ANDRES GIRON.

Uma metodologia para modelagem e controle da altura do reforço e da largura do cordão de solda no processo GMAW. [Distrito Federal] 2014.

xvii, 153p., 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Sistemas Mecatrônicos, 2014).
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

CRUZ, J. A. G. (2014). Uma metodologia para modelagem e controle da altura do reforço e da largura do cordão de solda no processo GMAW. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.DM-66A/14, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 153p.

CESSÃO DE DEREITOS

AUTOR: Jorge Andrés Girón Cruz.

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

GRAU: Mestre

ANO: 2014

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.

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

RESUMO

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

Autor: Jorge Andrés Girón Cruz.

Orientador: Sadek Crisóstomo Absi Alfaro.

Programa de Pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos.

Brasília, Março de 2014.

Novas metodologias que possibilitem a redução do tempo e custo na soldagem, além da melhoria da qualidade das soldas são de grande interesse para o meio científico e industrial. Ao longo dos anos, a necessidade de melhorar a produtividade e qualidade levou ao desenvolvimento e aperfeiçoamento de técnicas e sistemas automatizados para o monitoramento e controle dos processos de soldagem. No desenvolvimento das pesquisas relacionadas ao monitoramento e controle em tempo real da soldagem, observa-se a utilização de várias abordagens direcionadas à aplicação e melhor entendimento do monitoramento direto ou indireto da geometria do cordão de solda. Este trabalho apresenta uma metodologia para modelagem, otimização e controle da altura do reforço e da largura do cordão de solda, permitindo ajustar os parâmetros do processo em tempo real. Desenvolveu-se para cada parâmetro geométrico estudado 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, em que os parâmetros de velocidade de soldagem, velocidade de alimentação do arame e a tensão são preditos em função de uma altura do reforço ou largura desejada. Projetou-se um controlador “fuzzy” para realizar o controle em malha fechada do sistema, onde se toma como referência a diferença entre o valor desejado do parâmetro geométrico que se pretende controlar e o valor real do parâmetro no 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. As ações de controle são exercidas preferencialmente na velocidade de alimentação do arame para a altura do reforço e na velocidade de soldagem para a largura do cordão, parâmetros escolhidos por apresentar a maior influência em cada um dos parâmetros geométricos do cordão estudados respectivamente. Obtiveram-se satisfatoriamente cordões de solda com altura do reforço e largura pré-definida, além de boa aparência e qualidade.

ABSTRACT

Author: Jorge Andrés Girón Cruz.

Supervisor: Sadek Crisóstomo Absi Alfaro.

Programa de Pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos.

Brasília, March of 2014.

New methodologies that make possible the reduction of time and cost in welding, besides the improvement of the welding bead quality have shown to be the great interest for scientists and industries. Along the years, the needs of improving the productivity and quality carry out to the development and improvement of techniques and automated systems for monitoring and control of welding processes. The use of several approaches in researches related to the monitoring and control in real time of the welding is addressed to the application and understanding of direct or indirect monitoring of weld bead geometry. This work presents a methodology for modeling, optimization and control of the weld height reinforcement and bead width, allowing adjusting the parameters of the process in real time. It was developed for each welding geometric parameter an integrated system of images acquisition, modeling and control of the welding process, allowing a response in real time, through artificial neural networks, where the parameters of welding speed, wire feed speed and the voltage are predicted in function of the desired height reinforcement or bead width. It was designed a controller "fuzzy" to accomplish the control of the system in closed loop, where it is taken as reference the difference between the desired value of the geometric parameter to be controlled and the actual value of the parameter in the weld bead produced. This weld bead is measured through an acquisition system and processing of images using a low cost web cam. The control actions are preferentially implemented in the wire feed speed for height reinforcement and in welding speed for bead width, parameters chosen for presenting the most influence in each one of the geometric parameters studied respectively. It was obtained weld bead with acceptably height reinforcement and predefined width, and good appearance and quality.

SUMARIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS.....	18
1.1.1 Objetivo geral	18
1.1.2 Objetivos específicos	18
1.2 JUSTIFICATIVA	19
1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM	21
2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW	22
2.2.1 Definição do Processo GMAW	22
2.2.2 Equipamentos no processo de soldagem GMAW	22
2.2.2.1 Fonte de soldagem	23
2.2.2.2 Alimentadores de arame.	24
2.2.2.3 Tocha de soldagem GMAW e mangueiras para o transporte de gás de proteção e o eletrodo.....	25
2.2.2.4 Dispositivos para a blindagem de gás.....	27
2.2.3 Parâmetros do Processo de Soldagem GMAW	28
2.2.3.1 Corrente de soldagem	29
2.2.3.2 Tensão de soldagem.....	29
2.2.3.3 Velocidade de soldagem.....	30
2.2.3.4 Diâmetro do arame	30
2.2.3.5 Extensão livre do eletrodo ou stick-out	30
2.2.3.6 Inclinação da tocha de soldagem	31
2.2.3.7 A polaridade da soldagem	32
2.2.3.8 Tipo de gás	32
2.2.4 Modos de Transferência	33

2.2.4.1 Modo de transferência por Curto Circuito.....	33
2.2.4.2 Modo de transferência Globular	33
2.2.4.3 Modo de transferência por Spray ou Goticular	34
2.3 A QUALIDADE EM PROCESSOS DE SOLDAGEM GMAW	35
2.3.1 Geometria do cordão de solda.....	36
2.3.1.1 Reforço	37
2.3.1.2 Largura	38
2.4 FUNDAMENTOS DE SISTEMAS INTELIGENTES	38
2.4.1 Redes neurais	39
2.4.1.1 Dados de treinamento e verificação.....	40
2.4.1.2 Topologia da rede	40
2.4.1.3 Função de Ativação	42
2.4.1.4 Estratégia de aprendizado.....	44
2.4.1.5 Modelagem de sistemas mediante redes neurais	45
2.4.2 Logica fuzzy	46
2.4.2.1 Conjuntos fuzzy.....	46
2.4.2.2 Estrutura dos sistemas fuzzy	48
2.4.2.3 Funções de pertinência fuzzy	49
3. O ESTADO DA ARTE NA OTIMIZAÇÃO, MODELAGEM, MONITORAMENTO E CONTROLE DA GEOMETRIA DO CORDÃO NO PROCESSO DE SOLDAGEM.....	51
3.1 ESTUDO DOS EFEITOS DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE SOLDAGEM SOBRE AS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS CORDÃO....	51
3.2 APLICAÇÃO DAS REDES NEURAS ARTIFICIAIS EM SOLDAGEM NA MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DO PROCESSO.....	54
3.3 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA <i>FUZZY</i> NOS PROCESSOS DE SOLDAGEM.....	60
3.4 VISÃO GERAL DO MONITORAMENTO NA SOLDAGEM	62

4. METODOLOGIA.....	66
4.1.1 Sistema de soldagem	68
4.1.1.1 Fonte de soldagem.....	68
4.1.1.2 Computador	68
4.1.1.3 Mesa de deslocamento linear.....	68
4.1.1.4 Materiais e consumíveis	69
4.1.2 Sistema de comunicação e controle da fonte de soldagem.....	69
4.1.3 Sistema de aquisição de imagens.....	70
4.1.4 Sistema de aquisição dos sinais elétricos	71
4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	72
4.2.1 Modelagem do processo GMAW utilizando redes neurais	72
4.2.1.1 Identificação dos parâmetros e respostas no processo GMAW	72
4.2.1.2 Obtenção dos limites dos parâmetros de processo	73
4.2.1.3 Desenvolvimento da matriz de experimentos.....	73
4.2.1.4 Realização dos experimentos como base na matriz de experimentos	75
4.2.1.5 Aquisição dos parâmetros geométricos obtidos dos experimentos	76
4.2.1.6 Desenvolvimento dos modelos baseados em redes neurais artificiais	79
4.2.2 Captura e processamento de imagens	83
4.2.2.1 Processamento de imagens e medição da altura do reforço	85
4.2.2.2 Processamento de imagens e medição da largura do cordão.....	88
4.2.3 Projeto do controlador fuzzy.....	92
4.2.3.1 Representação da entrada e saída difusa do controlador da altura do reforço	93
4.2.3.2 Representação da entrada e saída difusa do controlador da largura do cordão	94
4.2.3.3 Estabelecimento do Sistema de Inferência	95
4.2.4 Implementação do sistema de controle e da interface de usuário	97
5. RESULTADOS	99

5.1 RESULTADOS DO PROJETO	99
5.1.1 Obtenção dos modelos da altura do reforço e da largura do cordão de solda	99
5.1.2 Resultados da captura e processamento de imagens.....	109
5.1.3 Desenvolvimento do controlador <i>fuzzy</i>	114
5.2 RESULTADOS DE IMPLEMENTAÇÃO	117
6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	138
7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	143
7.1 CONCLUSÕES.....	143
7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	144
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 4. 1: Valores limites dos parâmetros de soldagem.	73
Tabela 4. 2: Níveis codificados e os valores reais para cada parâmetro de processo.....	75
Tabela 4. 3: Matriz de experimentos.	75
Tabela 4. 4: Processamento das imagens obtidas da etapa de escaneamento.....	78
Tabela 5.1: Resultados experimentos do desenho central composto para o reforço.	99
Tabela 5.2: Resultados experimentos do desenho central composto para largura do cordão.	100
Tabela 5.3: Parâmetros de soldagem preditos pelas redes neurais artificiais para diferentes alturas do reforço do cordão com arame tipo maciço e tubular.....	106
Tabela 5.4: Parâmetros de soldagem preditos pelas redes neurais artificiais para diferentes larguras do cordão com arame tipo maciço e tubular.....	106
Tabela 5.5: Avaliação da exatidão das medidas realizadas pelo sistema de aquisição de imagens.	113
Tabela 5.6: base de conhecimento definida para o controlador <i>fuzzy</i> da altura do reforço.	115
Tabela 5.7: base de conhecimento definida para o controlador <i>fuzzy</i> da largura do cordão	115
Tabela 5.8: Informação obtida nos testes de avaliação das regras e saídas dos controladores.	116
Tabela 5.9: Testes selecionados para avaliar o controle da altura do reforço do cordão. .	120
Tabela 5.10: Testes selecionados para avaliar o controle da largura do cordão de solda.	120
Tabela 5. 11: Medidas obtidas durante o processo de controle para altura do reforço e largura do cordão.	124
Tabela 5. 12: Comportamento da variável manipulada durante o controle da altura do reforço e da largura do cordão.	126
Tabela 5. 13: Cordões finais obtidos depois do controle para altura do reforço e largura do cordão.	129
Tabela 5. 14: Reconstrução e 3D dos cordões para altura do reforço e largura do cordão.	129
Tabela 5. 15: Medidas das características geométricas dos cordões para altura do reforço e largura do cordão.	131
Tabela 5. 16: Medidas das características geométricas extraídas dos cordões produzidos.	133
Tabela 5. 17: Medidas dos sinais do processo dos cordões para altura do reforço e largura do cordão.	135

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1: Equipamentos básicos de soldagem GMAW (Modificado Nadzam, 2011). ...	23
Figura 2. 2: Fonte de soldagem. (Modificado Nadzam, 2011).....	24
Figura 2. 3: Alimentador de arame. (Modificado Nadzam, 2011).	24
Figura 2. 4: Tocha de soldagem GMAW. (Modificado Nadzam, 2011).	25
Figura 2. 5: Tocha com configuração <i>push pull</i> . (Modificado Nadzam, 2011).	27
Figura 2. 6: Cilindro que contém o gás de proteção.	27
Figura 2. 7: Características geométricas do cordão de solda.	28
Figura 2. 8: Extensão livre do eletrodo ou <i>stick out</i>	31
Figura 2. 9: Inclinação da tocha de soldagem.	31
Figura 2.10: Modo de transferência de metal por curto circuito. Modificado (BOC, 2007).	33
Figura 2.11: Modo de transferência Globular.	34
Figura 2. 12: Modo de transferência por Spray ou Goticular.	35
Figura 2. 13: Componentes dos neurônios artificiais.	39
Figura 2. 14: Topologia de redes diretas.	41
Figura 2. 15: Topologia de uma red Hopfield.	41
Figura 2. 16: Função Linear.	42
Figura 2. 17: Função Logística.	43
Figura 2. 18: Função tangente hiperbólica.	43
Figura 2. 19: Função arco tangente.	44
Figura 2. 20: Formatos mais frequentemente das funções de pertinência <i>fuzzy</i>	50
Figura 4. 1: Esquema do procedimento experimental desenvolvido para o trabalho.....	66
Figura 4. 2: distribuição do sistema computacional e hardware utilizado neste trabalho. ..	67
Figura 4. 3: Mesa de deslocamento linear.	69
Figura 4. 4: Distribuição e localização do sistema de aquisição de imagens utilizado para determinar a altura do reforço.	71
Figura 4. 5: Distribuição e localização do sistema de aquisição de imagens utilizado para determinar a largura do cordão.	71
Figura 4. 6: Desenho Central composto para três variáveis.	74
Figura 4. 7: Sistema de <i>scanner</i>	76
Figura 4. 8: Técnica de triangulação laser.	77
Figura 4. 9: Reconstrução do cordão de solda em 3D.	78
Figura 4. 10: Medidas das características geométricos do cordão.	79
Figura 4. 11: Imagem adquirida com forte influência da luz do arco.	85
Figura 4. 12: Imagem adquirida e recortada.	86
Figura 4. 13: Imagem em escala de cinzas e filtro de mediana.	86
Figura 4. 14: Imagem Binarizada.	86
Figura 4. 15: Fila de <i>pixels</i> onde se encontra o metal de base.	87
Figura 4. 16: Limites horizontais.	87
Figura 4. 17: Localização da zona para a medida da altura do reforço.	88
Figura 4. 18: Medida do Reforço.	88

Figura 4. 19: Imagem adquirida pela webcam da poça de fusão e da zona do cordão de solda.....	89
Figura 4. 20: (a) Imagem escala de cinzas e filtro de mediana, (b) Imagem Binarizada. ...	89
Figura 4. 21: Elipse que representa a poça de fusão.....	89
Figura 4. 22: Imagem em 4 seções.	90
Figura 4. 23: Seleção da zona do cordão da imagem.	90
Figura 4. 24: Processamento da imagem para obter a largura do cordão de solda.....	91
Figura 4. 25: Seleção da fila onde será medido o cordão.	92
Figura 4. 26: Variável de entrada e suas funções de pertinência no controle da altura do reforço.....	93
Figura 4. 27: Variável de saída e suas funções de pertinência no controle da altura do reforço.....	94
Figura 4. 28: Variável de entrada e suas funções de pertinência no controle da largura do cordão.	94
Figura 4. 29: Variável de saída e suas funções de pertinência no controle da largura do cordão.	95
Figura 4. 30: Regras de Inferência Difusa para o controlador da altura do reforço.	96
Figura 4. 31: Regras de Inferência Difusa para o controlador da largura do cordão.....	96
Figura 4. 32: Arquitetura do sistema desenvolvido para o controle da altura do reforço. ..	97
Figura 4. 33: Arquitetura do sistema desenvolvido para o controle da largura do cordão. .	98
Figura 4. 34: Interface gráfica de usuário para o monitoramento, configuração e controle da altura do reforço.....	98
Figura 5.1: Desenho esquemático das redes neurais utilizadas no modelo para o reforço e a largura do cordão.....	100
Figura 5.2: Monitor de progresso do treinamento altura do reforço (a) Rede neural para o arame tipo maciço, (b) Rede neural para o arame tipo tubular.....	101
Figura 5.3: Monitor de progresso do treinamento largura do cordão (a) Rede neural para o arame tipo maciço, (b) Rede neural para o arame tipo tubular.....	102
Figura 5.4: Medida para a altura do reforço do mse da (a) Rede para arame tipo maciço, (b) Rede para tipo arame tubular.....	103
Figura 5.5: Medida para a largura do cordão do mse da (a) Rede para arame tipo maciço, (b) Rede para tipo arame tubular.	103
Figura 5.6: Ajuste conseguido pela rede neural na altura do reforço para o arame tipo maciço.....	104
Figura 5.7: Ajuste conseguido pela rede neural na altura do reforço para o arame tipo tubular.....	104
Figura 5.8: Ajuste conseguido pela rede neural na largura do cordão para o arame tipo maciço.....	105
Figura 5.9: Ajuste conseguido pela rede neural na largura do cordão para o arame tipo tubular.....	105
Figura 5. 10: Comportamento dos parâmetros do processo com respeito a diferentes alturas do reforço do cordão com o arame tipo maciço.	107
Figura 5. 11: Comportamento dos parâmetros do processo com respeito a diferentes alturas do reforço do cordão com o arame tipo tubular.....	107

Figura 5. 12: Comportamento dos parâmetros do processo com respeito a diferentes larguras do cordão com o arame tipo maciço.	108
Figura 5. 13: Comportamento dos parâmetros do processo com respeito a diferentes larguras do cordão com o arame tipo tubular.	108
Figura 5.14: Zona da imagem para a aquisição das imagens da altura do reforço.	109
Figura 5.15: Peça de calibração para a medição da altura do reforço no cordão de solda.	109
Figura 5.16: Calibração do sistema de aquisição para a medição da largura do cordão. ..	110
Figura 5.17: Sequências de imagens para um cordão de 2.5mm de altura do reforço com arame tipo tubular.	111
Figura 5.18: Sequências de imagens para um cordão de 5mm de largura com arame tipo maciço.	112
Figura 5.19: Exemplo de um cenário factível para o análise dos valores obtidos para a variável de saída.	116
Figura 5.20: Interface de usuário com as diferentes características de processo definidas para o controle da altura do reforço de 3 mm com arame tipo tubular.	118
Figura 5.21: Interface de usuário com as diferentes características de processo definidas para um cordão de 5.5 mm de largura com arame tipo maciço.	119
Figura 5.22: Medidas obtidas durante o processo de controle para um cordão com altura do reforço 2.5 mm com arame tipo maciço.	121
Figura 5.23: Comportamento da velocidade de alimentação do arame durante o controle da altura do reforço de 2.5 mm com arame tipo maciço.	121
Figura 5.24: Cordão final obtido depois do controle para uma altura do reforço de 2.5 mm com arame tipo maciço.	121
Figura 5.25: Reconstrução e 3D do cordão de 2.5 mm de altura do reforço com arame tipo maciço.	122
Figura 5.26: Medidas das características geométricas do cordão de 2.5 mm de altura do reforço com arame tipo maciço.	122
Figura 5.27: Medidas dos sinais do processo para um cordão de 2.5 mm de altura do reforço com arame tipo maciço.	123

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ANN	- Artificial Neural Networks (Redes neurais artificiais)
AWS	- American Welding Society (Sociedade Americana de Solda)
B	- Baixar (Variável Linguística)
BM	- Baixar muito (Variável Linguística)
CO2	- Dióxido de carbono
CTWD	- Distância bico de contato à peça de trabalho
DBCP	- Distancia bico de contato peça
DC	- Corrente direta
DCEN	- Conexão de corrente contínua ao eletrodo negativo
DCEP	- Conexão de corrente contínua ao eletrodo positivo
EBW	- Electron beam welding (Soldagem por feixe de elétrons)
FCAW	- Flux Cored Arc Welding (Soldagem a arco elétrico com arames tubulares)
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)
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)
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)
SAW	- Submerged arc welding (Soldagem por arco submerso)
SMAW	- Shielded Metal Arc Welding (Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido)
TIG	- Tungsten Inert Gas (soldagem a arco elétrico com eletrodo não consumível de tungstênio)
x_1	- Velocidade de arame (m/min)
x_2	- Tensão (V)
x_3	- Velocidade de soldagem (mm/s)
σ	- Desvio padrão
μ	- Valor Médio

1. INTRODUÇÃO

A união de peças metálicas por soldagem a arco elétrico com gás de proteção é um dos processos de manufatura mais utilizados na indústria da construção metálica. Nos últimos anos, inúmeras aplicações e processos de soldagem foram desenvolvidos com base na inovação tecnológica e demandas do mercado, atingindo sua consolidação na indústria automotiva, no setor de óleo, gás e na fabricação e recuperação de peças e estruturas. É preciso destacar ainda os critérios, as normas e os métodos desenvolvidos e aprimorados em prol da determinação e do cumprimento das exigências e requerimentos de qualidade.

O monitoramento de algumas variáveis físicas geradas pelo arco elétrico, a monitorização da poça, a análise de parâmetros operacionais do processo (como, por exemplo, a tensão, a corrente e a velocidade de alimentação), as inspeções visuais e a definição de controles sobre os aspectos da operação e as características geométricas do cordão, tem sido considerados fatores importantes nos esforços de monitoramento e controle da execução do processo de soldagem, bem como na supervisão e no melhoramento da qualidade da solda.

O presente estudo faz parte de um projeto com base no monitoramento de algumas variáveis físicas geradas pelo arco elétrico e os parâmetros geométricos do cordão de solda no processo de soldagem por arco metálico com gás (GMAW), visando a análise e pesquisa das suas potencialidades e restrições para usa-las como variáveis de realimentação no controle do processo. A finalidade da pesquisa aqui delineada é apresentar uma metodologia que serve de guia para a modelagem e controle de duas características geométricas externas do cordão, além da possibilidade do monitoramento destas no momento de formação da solda. Para tanto, seguiram-se determinados passos, a saber: o estudo e a determinação adequada dos parâmetros do processo, procurando-se a obtenção de um cordão de solda com boa aparência e qualidade. A fim de se encontrar os melhores parâmetros, fez-se importante a utilização de modelos que permitissem encontrar respostas determinadas a partir de diferentes variáveis de entrada. A concepção dos modelos é realizada utilizando uma determinada abordagem, como, por exemplo, no caso das redes neurais artificiais.

O entendimento de regras empíricas – utilizadas pelo operador especializado para a avaliação e modificação das dimensões dos cordões – serviu para desenvolver, com

base na lógica *fuzzy*, os controladores *online* das características geométricas: altura do reforço e largura do cordão de solda, conforme o monitoramento das imagens adquiridas da formação do cordão. De acordo com as estratégias de controle adotadas nos controladores, é preciso mudar a velocidade de alimentação do arame ou a velocidade de soldagem com o objetivo de manter as dimensões das características geométricas dos cordões estudadas e a estabilidade do arco elétrico. Tal fato oferece a possibilidade do desenvolvimento de estratégias de controle semelhantes às utilizadas pelo pessoal técnico especializado em soldagem, ofertando, assim, certo grau de realismo à automatização dos processos de soldagem, visando incrementar a qualidade da solda.

Para realizar as medições das características geométricas correspondentes, que foram comparadas com as medidas desejadas e tomadas como entradas dos controladores encontrados, fez-se a filmagem (por meio de câmera *web*) de cada uma das características geométricas estudadas nos diferentes experimentos de soldagem. Assim, foi possível o estudo do processo de formação das soldas e a quantificação e o controle do tamanho dos cordões em tempo real com sistemas de aquisição de imagens de baixo custo.

A partir dos modelos encontrados e dos sistemas de monitoramento e controle desenvolvidos, gerou-se uma *interface* gráfica de usuário, que proporcionou a informação geral para o domínio e configuração do processo, além da visualização das características importantes das respostas dos sistemas. Tal ferramenta permitiu analisar e manipular o processo de soldagem GMAW para a obtenção das características desejadas, constituindo-se em uma base de futuros trabalhos que apontem à concepção de processos automatizados de soldagem.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver uma metodologia para modelagem e controle da altura do reforço e da largura do cordão de solda no processo de soldagem por arco metálico com gás (GMAW), em tempo real, a partir de redes neurais, processamento de digital de imagens e lógica *fuzzy*, visando garantir a produção de cordões de boa aparência e qualidade com as dimensões desejadas.

1.1.2 Objetivos específicos

- 1.** Estabelecer a comunicação entre a fonte de soldagem e um sistema computacional com o propósito de realizar as ações de controle sobre os parâmetros de soldagem em tempo real.
- 2.** Determinar os modelos, a partir de redes neurais, da altura do reforço e da largura do cordão de solda e, assim, encontrar os parâmetros da velocidade de alimentação do arame, da velocidade de soldagem e da tensão ótimos.
- 3.** Desenvolver um sistema de aquisição de imagens de baixo custo e de fácil aplicação, com o propósito de obtenção das medidas das características geométricas externas do cordão.
- 4.** Realizar o processamento digital de imagens que permita medir a altura do reforço e a largura do cordão em tempo real, a partir das filmagens obtidas dos processos de soldagem.
- 5.** Projetar dois controladores com base na lógica *fuzzy*, para o controle da altura e da largura do cordão de solda em tempo real.
- 6.** Validar a metodologia proposta, realizando a implementação do conjunto de procedimentos e técnicas expostas para dois tipos de arame.

1.2 JUSTIFICATIVA

A soldagem é um dos recursos tecnológicos de maior importância para o desenvolvimento industrial em nível global. As indústrias de diferentes ramos (aeroespacial, eletrônica, construções, petróleo, geração de energia, transporte, alimentar, agrícola, automotriz etc.) não poderiam ter atingido seu desenvolvimento atual sem os processos de soldagem atualmente existentes. Como técnica de união, de proteção e de recuperação de materiais, a soldagem se destaca por sua versatilidade tanto no aspecto tecnológico como no âmbito econômico. Durante as últimas décadas, geraram-se inovações tanto no campo dos processos e equipamentos como no setor de bens dos consumíveis, que têm transformado uma atividade – que, em suas origens, era artesanal – em uma disciplina tecnológica de alta complexidade.

A incorporação da soldagem como tecnologia de fabricação no campo de união de metais como resposta à grande diversidade de requerimentos que impõe o serviço necessita de um rigoroso conhecimento e adequado controle dos processos, procedimentos, equipamentos e variáveis que influem em seu correto funcionamento.

As novas metodologias que possibilitam a redução de custo da soldagem e a melhoria da qualidade do processo são de grande interesse para o meio científico e industrial. Neste sentido, o presente estudo decidiu desenvolver uma metodologia para a modelagem e o controle de dois parâmetros geométricos dos cordões (altura do reforço e largura), além de rejeitar perturbações ocasionadas pelos problemas de operação do processo, otimizando a qualidade da solda e minimizando o custo. O sistema de controle obtido da metodologia elimina e previne muitas imperfeições de qualidade, tais como: soldas com cordões não uniformes em sua altura e largura, extinção do arco por falta de alimentação do arame, distorções na solda pela variação da quantidade de material introduzido no sistema, fissuras, porosidades, entre outras perturbações que afetam a qualidade. A partir das referidas expectativas e da constatação da eficaz compatibilidade entre a inteligência artificial e a aplicação nos sistemas de soldagem por arco metálico com gás (GMAW), decidiu-se planejar o desenvolvimento do sistema de controle com base nos sistemas inteligentes capazes de propiciar um alto desempenho, aproveitando as vantagens que as técnicas supramencionadas fornecem no campo da modelagem e controle de processos complexos.

1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

A presente Dissertação contém sete capítulos, em detalhes:

Capítulo 2 – apresenta a revisão bibliográfica necessária para o desenvolvimento da pesquisa; tem-se uma abordagem nas áreas de processos de soldagem GMAW, redes neurais artificiais e lógica *fuzzy*.

Capítulo 3 – apresenta uma análise da informação relevante da bibliografia disponível, permitindo identificar o avanço da investigação no campo das análises dos efeitos dos parâmetros do processo sobre as características geométricas do cordão, da aplicação das redes neurais artificiais e a lógica *fuzzy* na área da soldagem, além de uma visão geral dos avanços no monitoramento nos processos de soldagem.

Capítulo 4 – trata do procedimento experimental, com a descrição dos equipamentos e a metodologia utilizada para a obtenção dos modelos, o desenho dos controladores, a aquisição das imagens e o desenvolvimento dos programas que permitem garantir o controle e a obtenção das medidas da altura do reforço e da largura desejadas.

Capítulo 5 – tem-se os resultados obtidos nos processos de modelagem, nas etapas de desenho dos controladores e nas medições realizadas no processo de soldagem das características geométricas estudadas; e ainda, apresenta-se as *interfaces* de usuário desenvolvidas para a integração das diferentes etapas realizadas, visando a obtenção do sistema de controle em tempo real.

Capítulo 6 – apresenta a discussão dos resultados obtidos no procedimento experimental.

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

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta uma revisão bibliográfica aos temas envolvidos nesta pesquisa. Inicialmente é feita uma introdução aos processos que envolvem o processo de soldagem por *Gas Metal Arc Welding* (GMAW). Em seguida é realizada uma revisão de conceitos que definem a qualidade e as características geométricas no cordão de solda, Finalmente, tem-se a apresentação de noções básicas da inteligência artificial, onde são abordados os temas de redes neurais e lógica difusa.

2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM

O processo de soldagem é o conjunto de elementos operacionais básicos utilizados para fazer a união soldada, que devem cumprir com os seguintes requisitos: fornecer a energia necessária para criar a união (térmica, mecânica ou uma combinação de ambas); evitar a contaminação atmosférica ou seus efeitos sobre o metal fundido; 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. Os processos de soldagem mais empregados são os que utilizam a eletricidade como geração de energia para realizar a união. A soldagem por resistência envolve as seguintes variantes de processo: soldagem a ponto, soldagem com costura, soldagem topo-a-topo e soldagem com ressalto. A soldagem com arco eléctrico pode ser subdividida entre soldagem com eletrodo consumível e soldagem com eletrodo não consumível. No primeiro caso estão englobados os processos de soldagem com eletrodo revestido, processo de soldagem GMAW, processo de soldagem com eletrodo tubular e processo de soldagem com arco submerso. Os processos que utilizam eletrodo não consumível são soldagem TIG e soldagem com plasma.

2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW

2.2.1 Definição do Processo GMAW

A soldagem por arco metálico com gás (GMAW) é um processo de soldagem por arco que produz a coalescência de metais ao aquecer com um arco um eletrodo de metal alimentado continuamente e a peça de trabalho. A proteção do arco, a poça de fusão e o material de aporte contra o acesso dos gases da atmosfera, são obtidos com os gases fornecidos simultaneamente com o metal de adição. Existem duas classificações neste processo: conforme o tipo de gás protetor, a) o processo MIG, que emprega um gás inerte puro (hélio, argônio, etc.), e, b) o processo MAG (Metal Active Gas), que faz uso de dióxido de carbono (CO₂) ou a mistura de Argônio/CO₂ como gás protetor (Villani *et al*, 2005). Devido às suas características, o processo GMAW permite: um arco e uma poça de fusão claramente visíveis; facilidade de trabalho em todas as posições – que depende do diâmetro do arame e das variáveis do processo; alta velocidade de soldagem; pouca geração de escoria, obtendo-se excelente qualidade de solda em quase todos os metais e ligas empregados pela indústria.

2.2.2 Equipamentos no processo de soldagem GMAW

A necessidade do aumento da produtividade e da qualidade, juntamente com a falência dos equipamentos de segurança, tem levado ao desenvolvimento do processo de soldagem automatizado e/ou robotizado, com o objetivo de fazer frente a muitos problemas atuais da fabricação e na saúde do trabalhador. Nas últimas décadas, obtiveram-se processos eficazes e viáveis de soldagem em máquinas de soldagem mecanizada, que incluem fontes de soldagem, alimentadores de arame e unidades de controle de solda (Kim, 1995). Soldadores robóticos têm substituído os soldadores humanos em muitas aplicações. Ademais, muitos sistemas de monitoramento e de controle de processos têm sido desenvolvidos visando automatizar completamente o processo de soldagem. O desenho básico de um sistema GMAW inclui quatro componentes principais (vide Figura 2. 1), a saber:

1. Fonte de soldagem.
2. Alimentadores do arame.

3. Tocha de soldagem GMAW e mangueiras para o transporte do gás de proteção e o eletrodo.
4. Dispositivos para a blindagem com gás.

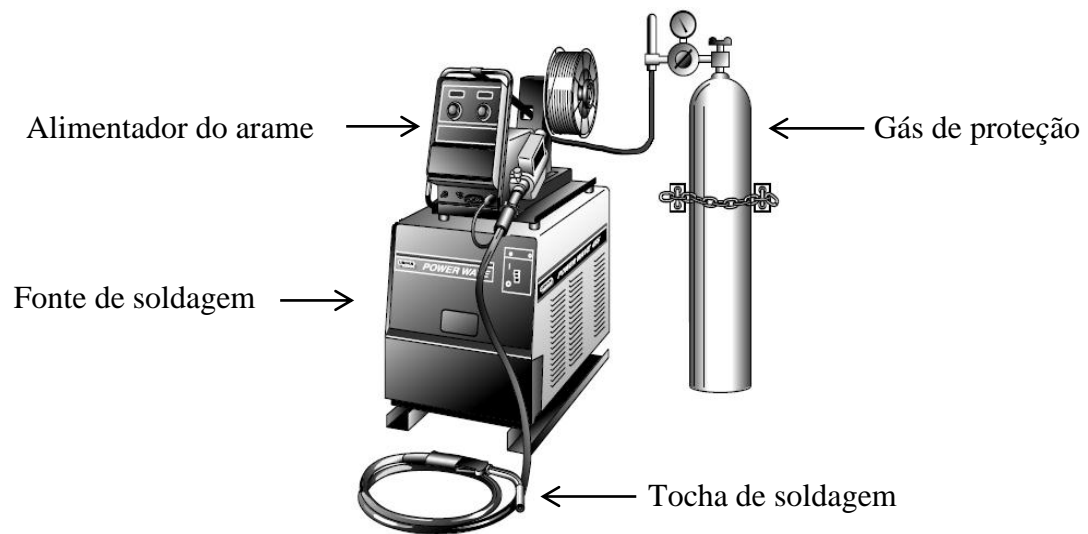


Figura 2. 1: Equipamentos básicos de soldagem GMAW (Modificado Nadzam, 2011).

2.2.2.1 Fonte de soldagem

As fontes de soldagem possuem características de saída projetada para otimizar o rendimento do arco em um determinado processo de soldagem (vide Figura 2. 2). Na GMAW, as características de saída dividem-se em duas categorias principais, a saber:

- Corrente constante.
- Tensão constante.

Muitas fontes de soldagem de corrente constante foram utilizadas no passado, sendo que seu uso dá-se ainda na soldagem de alumínio. Em corrente constante, a CTWD (distância bico de contato à peça de trabalho) determina o comprimento do arco. À medida que a referida distância aumenta a longitude de arco incrementa, e quando o CTWD diminui o comprimento do arco diminui. (Nadzam, 2011). Tal fato denota um problema nos processos de soldagem, já que é difícil manter a mesma CTWD. Em geral, as aplicações de corrente constante limitaram-se às aplicações GMAW para a soldagem no alumínio ou do aço ao carbono.

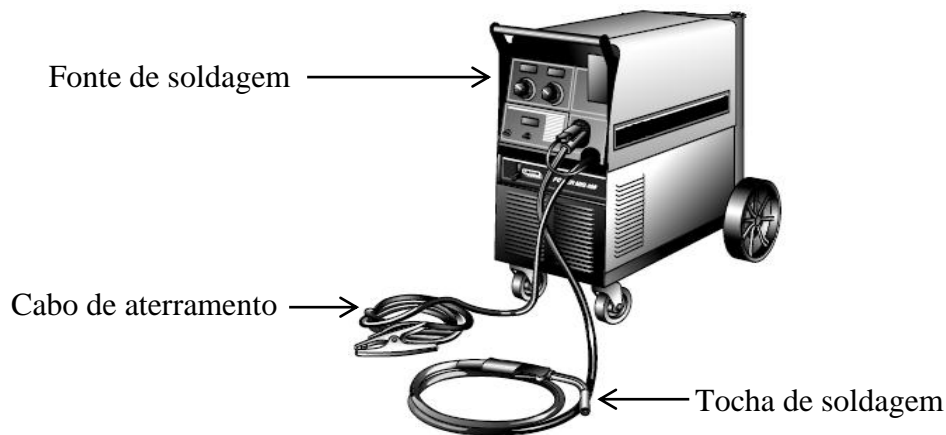


Figura 2. 2: Fonte de soldagem. (Modificado Nadzam, 2011).

As fontes de soldagem de tensão constante proporcionam uma tensão de arco específica para uma velocidade de alimentação de arame pré-selecionada. A curva de característica volt-ampere é relativamente plana. À medida que aumenta a CTWD com estes tipos de fontes, a máquina repassa menos corrente, uma vez que o eletrodo queima lentamente. Ao queimar o arame a uma velocidade mais lenta, a longitude do arco e a tensão mantêm-se constantes. De outro modo, à medida que diminui a CTWD, a longitude do arco também diminui, a máquina entrega mais corrente para queimar o eletrodo de forma mais rápida, mantendo a longitude do arco e a tensão constantes.

2.2.2.2 Alimentadores de arame.

O eletrodo utilizado na soldagem por arco metálico com gás se apresenta em bobinas ou tambores, que contêm centenas de metros de arame. Neste sentido, tem-se a necessidade de equipamentos especializados para um processo eficiente de soldagem (Althouse *et al*, 2004). Os alimentadores de arame consistem em um dispositivo de montagem para a bobina, um conjunto de rodas de tração para o arame e um motor ajustável de velocidade constante para girar as rodas de tração (vide Figura 2. 3).

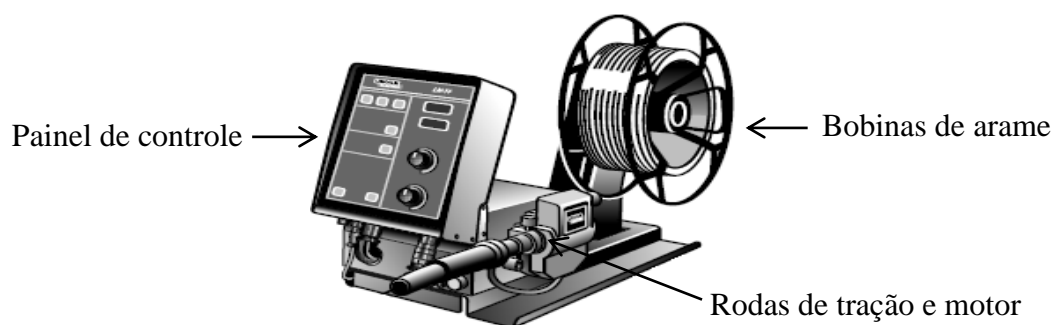


Figura 2. 3: Alimentador de arame. (Modificado Nadzam, 2011).

As bobinas de arame estão montadas em eixos de giro livre próximo ao mecanismo de alimentação de arame. O arame pode ser extraído da bobina ou do tambor através das rodas de tração. Tais rodas possuem dentes na circunferência exterior para a execução de movimento sincronizado entre as mesmas, gerando, assim, o fornecimento de arame ao processo. A roda motriz é acionada pelo motor que, por sua vez, move as demais rodas através dos dentes das engrenagens. A pressão no arame que passa entre as rodas supramencionadas pode ser ajustada utilizando-se um dispositivo tensor.

Um interruptor no painel de controle do mecanismo de alimentação é utilizado para fazer girar o motor lentamente, isto já que em ocasiões, é necessário mudar as bobinas de arame, substituir as peças ou solucionar um problema na unidade de alimentação. O tubo de gás de proteção pode ter ar antes de utilizá-lo pela primeira vez ou após um longo período de inatividade. Para purgar a mangueira e a pistola, o gás de proteção ativa-se durante um curto período de tempo antes da solda. Pode-se realizar isto manualmente com o interruptor de purga na unidade de controle de alimentação de arame.

2.2.2.3 Tocha de soldagem GMAW e mangueiras para o transporte de gás de proteção e o eletrodo.

A seguir, na Figura 2. 4, tem-se a apresentação de uma pistola típica de soldagem por arco metálico com gás e as mangueiras de transporte do gás de proteção e o elétrodo. A tocha possui um cabo completamente isolado, um interruptor de gatilho, um tubo de contato, um revestimento e um bocal.



Figura 2. 4: Tocha de soldagem GMAW. (Modificado Nadzam, 2011).

- O interruptor, quando acionado, permite a condução de corrente através do arame, fluindo, em seguida, o gás de proteção.
- O tubo de contato é a parte que transfere a corrente elétrica a partir da pistola de solda para o arame de eletrodo. Os tubos de contato, também são conhecidos como bicos de contato.

- Bocais são utilizados para o envio direto do gás de proteção à zona de solda. Os bocais estão expostos a muito altas temperaturas durante longos períodos de tempo.
- Um revestimento é instalado no cabo que leva o eletrodo do alimentador de arame à pistola de solda. O arame de eletrodo move-se constantemente através deste e para protegê-lo se instalam para a maioria das aplicações um revestimento de aço, este revestimento é também chamado condutor do eletrodo. Quando se utiliza arame de eletrodo de alumínio, se utiliza um forro de nylon.

Tochas de soldagem por arco metálico com gás costumam ser refrigeradas por água quando utilizam gases como o argônio ou o hélio misturado com CO₂, para soldas acima dos 300 amperes ou para serviço contínuo. Além do cabo que conduz o arame e a mangueira de gás de proteção, uma pistola refrigerada por água deve ter uma mangueira para levar a água à tocha. A água volta à fonte através de outra mangueira dentro do pacote de mangueiras que conformam a tocha de soldagem.

As tochas têm evoluído devido aos diferentes inconvenientes e às necessidades mutantes na soldagem, solucionando problemas como a contorção ao tentar alimentar de longas distâncias ou o desgaste do arame devido a grandes atritos, mediante a inclusão de novos mecanismos ou configurações no fornecimento do eletrodo. As tochas modernas como a do tipo tração têm um motor na mesma, que puxa o arame, enquanto a unidade de alimentação empurra o arame (vide Figura 2. 5). Esta é uma configuração *push pull*, e permite que a solda se possa fazer até de 16 metros de distância do alimentador de arame.

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

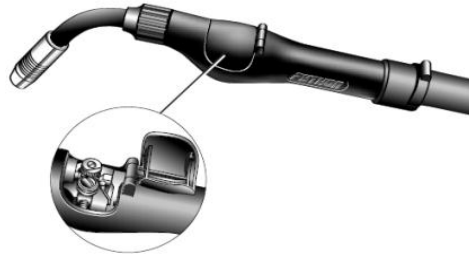


Figura 2. 5: Tocha com configuração *push pull*. (Modificado Nadzam, 2011).

2.2.2.4 Dispositivos para a blindagem de gás.

A entrega do gás de proteção para o arco é importante para a qualidade da solda. No processo GMAW requer um regulador para medir a taxa de fluxo de gás que se incorpora do cilindro que contém o gás a pressão às células de trabalho de soldagem (vide Figura 2. 6). O desenho do regulador oferece duas leituras para o soldador: a primeira leitura mede a pressão interna do cilindro, e permite ao soldador reconhecer quanto gás fica no cilindro. A segunda mede a taxa de fluxo de gás de proteção à medida que sai do cilindro. A taxa de fluxo de gás mede-se em pés cúbicos por hora (CFH) ou litros por minuto (L/min). Uma mangueira é ligada do dispositivo de regulação ao solenoide de gás contido no mecanismo de alimentação de arame. Uma mangueira de conexão estende-se desde a parte frontal da unidade de alimentação de arame a um “niple” de latão situado na tocha de soldagem.



Figura 2. 6: Cilindro que contém o gás de proteção.

Além de compreender as características assinaladas anteriormente, deve-se assegurar que os equipamentos reúnam condições de resistência e solidez, que permitam a correta aplicação do arco elétrico à solda, também é necessário conhecer certos princípios fundamentais relacionados com a eletricidade, como são os parâmetros do processo de soldagem.

2.2.3 Parâmetros do Processo de Soldagem GMAW

Os parâmetros do processo são os fatores que podem ser ajustados para controlar uma solda, por isto é necessário conhecer o efeito da cada variável sobre as diversas características ou propriedades do processo, bem como a forte influência sobre a qualidade global e geometria da solda (vide Figura 2. 7). Frequentemente classificaram-se os parâmetros do processo de solda em três categorias: Parâmetros ajustáveis primários, parâmetros ajustáveis secundários e parâmetros pré-selecionados (Kim, 1995).

Os parâmetros pré-selecionados consideram-se como fatores que só podem ser mudados em intervalos grandes de tempo e são desfavoráveis para o controle. Algumas destas variáveis, às que se denomina pré-selecionadas são o diâmetro do arame, o tipo de arame, o tipo de gás, a taxa de fluxo do gás de proteção, a polaridade da soldagem, a composição do material de base e a espessura do material de base.

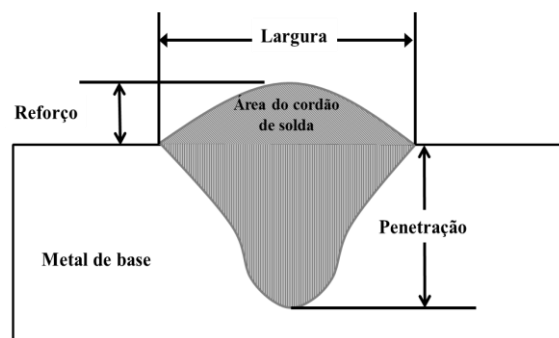


Figura 2. 7: Características geométricas do cordão de solda.

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

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

No processo de soldagem GMAW o ajuste dos parâmetros de soldagem está relacionado com a forma como se transfere o metal através do arco elétrico (Bingul e Cook, 2006), apresentando esta uma grande importância na estabilidade e no desempenho operacional do processo, além de estar ligada à geometria do cordão de solda. Em seguida são descritas as implicações de alguns desses parâmetros nas características geométricas da solda.

2.2.3.1 Corrente de soldagem

A corrente é o parâmetro mais influente na soldagem já que afeta a forma do cordão, controla a velocidade à qual o eletrodo se funde e, portanto também controla a velocidade de deposição, a zona termicamente afetada, a penetração, e a quantidade de metal de base fundido (Kumar, 2011). A penetração e o reforço aumentam com o aumento da corrente de soldagem (aumento na velocidade de alimentação do arame). Se a corrente é demasiado alta, a uma velocidade de soldagem constante, a penetração também será demasiado alta fazendo que a solda resultante possa tender a fundir através do metal de base. Alta corrente também conduz à perda de eletrodo em forma de reforço excessivo, produzindo excesso de solda aumentando a contração da solda e causando uma maior deformação da peça. Para um mesmo fluxo de gás, a zona afetada pelo calor também aumenta com o aumento da corrente. Se a corrente é demasiado baixa, podem resultar reforço muito pequeno e penetração inadequada ou incompleta, ademais conduz a um arco instável.

2.2.3.2 Tensão de soldagem

A tensão varia com o comprimento do arco entre o eletrodo e o metal de solda fundido. Com o aumento da longitude do arco, a tensão de arco aumenta pela necessidade de uma maior exigência de potencial para a manutenção dos portadores de carga apropriados entre o eletrodo e a placa base (Weiman, 1981). A tensão determina principalmente a forma da seção transversal do cordão de solda e seu aspecto externo. O aumento da tensão de solda, com uma corrente e velocidade de soldagem constante, produz cordões de solda mais largos, mas achatados, com menos penetração e tende a reduzir a porosidade causada pelo óxido, este aumento incrementa também o consumo do fluxo que intensifica a perda dos elementos de liga e portanto afeta às propriedades mecânicas e metalúrgicas do metal (Pandey e Mohan, 2003). A excessiva tensão produz um cordão muito largo que está sujeito a fissuração, incorporação de mordeduras e dificuldades na eliminação de escoria.

A redução da tensão produz arcos mais rígidos, o que melhora a penetração, mas uma tensão demasiado baixa produz cordões muito estreitos e com muita presença de escoria ao longo das bordas.

2.2.3.3 Velocidade de soldagem

A velocidade de soldagem é a velocidade linear na que o arco elétrico se move ao longo da junta de solda. Se se aumenta a velocidade de solda, reduz-se a entrada de energia ou calor à peça e menos metal de recheio aplica-se por unidade de longitude à solda, A penetração para velocidades excessivamente lentas vê-se mais afetada pela velocidade de soldagem que por qualquer outra variável. O excesso de velocidade causa mordeduras, porosidade, forma do cordão irregular, fissuração e maior inclusão de escoria no metal de solda. Velocidades de solda relativamente lentas provêm tempo para que os gases escapem desde o metal fundido, o que reduz a porosidade, ainda que uma velocidade excessivamente baixa produzisse uma forma do cordão convexa com inclusão de escoria e é possível atravessar o metal a soldar.

2.2.3.4 Diâmetro do arame

Este parâmetro afeta a forma do cordão de solda e a penetração com uma corrente fixa, também influi na velocidade de deposição do material. Para os mesmos valores de corrente, tensão e velocidade de soldagem, um aumento no diâmetro do arame resulta em um leve aumento na propagação do cordão.

2.2.3.5 Extensão livre do eletrodo ou stick-out

O comprimento do arame livre depois de ter passado pelo bico de contato, chamado extensão livre do eletrodo ou *stick out* (vide Figura 2. 8), tem um efeito considerável sobre a geometria do cordão de solda. Normalmente, a distância entre a ponta de contato e a peça varia entre os 12-40 mm. O aumento na taxa de fusão do eletrodo como resultado de aumento do *stick out* é proporcional ao produto da densidade da corrente e a distância do bico de contato à peça de trabalho.

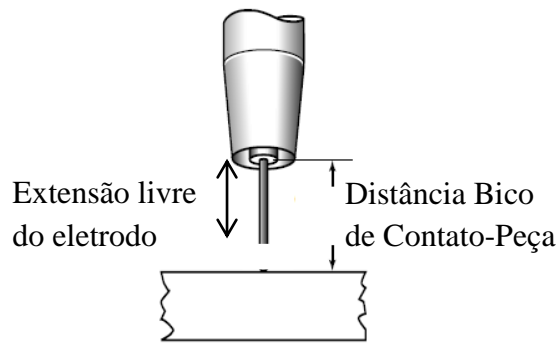


Figura 2. 8: Extensão livre do eletrodo ou *stick out*.

A velocidade de fusão do eletrodo aumenta com o aumento no stick-out, este efeito é particularmente mais significativo com os eletrodos de diâmetro menor (Chandel *et al*, (1997)). O contrário ocorre com a penetração, que diminui com o aumento do stick-out, se devendo ser tido devidamente em conta este parâmetro quando se requer uma penetração mais profunda.

2.2.3.6 Inclinação da tocha de soldagem

A tocha de solda pode ser mantida perpendicular à peça de trabalho ou, inclinada para adiante ou para trás com respeito à poça de fusão. À medida que o arco alinha-se ao eixo central do eletrodo, a forma da poça de solda é diferente na cada caso, e assim é a forma final do cordão de solda. Na soldagem para trás o metal fundido flui através do arco, a penetração e o reforço se reduzem enquanto a largura do cordão aumenta. No caso da solda para diante a penetração e a altura do reforço aumentam enquanto reduz-se a largura da solda (Kumar, 2011). Com a tocha em uma posição perpendicular resulta em uma geometria da união entre as obtidas nos dois casos anteriores, a influência desta variável na geometria do cordão é ilustrada na Figura 2. 9, a seguir.

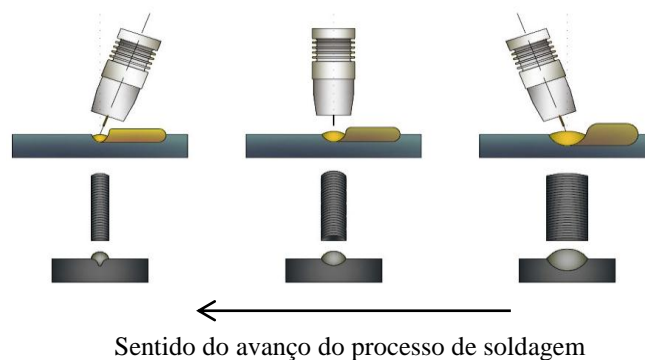


Figura 2. 9: Inclinação da tocha de soldagem.

2.2.3.7 A polaridade da soldagem

A direção do fluxo de corrente influi na eficiência de fusão da solda por arco. Em GMAW, há duas conexões da polaridade de soldagem utilizadas: polaridade direta e polaridade inversa. Quando se utiliza a corrente direta (DC) ou a conexão de corrente contínua ao eletrodo negativo (DCEN), o eletrodo é o polo negativo e a peça de trabalho é o polo positivo do arco de solda. Quando se utiliza a polaridade inversa DC ou a conexão corrente contínua ao eletrodo positivo (DCEP), o eletrodo é o polo positivo e a peça de trabalho é o polo negativo.

Em GMAW, mediante o uso de polaridade de corrente contínua ao eletrodo positivo (DCEP), o efeito de aquecimento do fluxo de elétrons concentra-se na ponta do eletrodo. Isto contribui à fusão eficaz do eletrodo gerando metal fundido e o reforço para a solda. A penetração da solda e a produtividade aumentam com DCEP.

2.2.3.8 Tipo de gás

Durante qualquer processo de soldagem por arco, os gases atmosféricos podem reagir com o metal fundido, causando defeitos que debilitam a solda. A função principal de um gás de proteção é resguardar o metal de solda fundido da contaminação atmosférica e as imperfeições resultantes. Além de sua função de proteção, cada gás ou mistura de gases podem ter um efeito importante na velocidade de soldagem, penetração, propriedades mecânicas, geometria do cordão, geração de fumaças, e a estabilidade do arco.

Os gases de proteção utilizados com a soldagem por arco metálico com gás (GMAW) podem ser reativos, inertes ou misturas de ambos os tipos de gases. Os gases reativos como o oxigênio e nitrogênio não são práticos para usar só como gases de proteção. O dióxido de carbono é a exceção, é barato e funciona bem em aços ao carbono e de baixa liga.

Os gases inertes usados são argônio (Ar) e hélio (He). Estes gases não reagem com outros elementos químicos. Argônio puro e hélio são excelentes gases para a proteção do arco, do eletrodo e do metal de base da contaminação, no entanto, para alguns processos GMAW são necessárias misturas adequadas destes com os gases reativos, para assegurar a estabilidade do arco, reduzir os respingos, e melhorar a geometria do cordão de solda.

2.2.4 Modos de Transferência

O modo ou tipo de transferência de metal no processo GMAW depende da corrente do arco, da tensão, *stick out*, diâmetro do eletrodo e do tipo de gás de proteção utilizado. Classicamente, existem três formas principais de transferência de metal, a saber: (a) Transferência por Curto Circuito, (b) Transferência Globular, (c) Transferência por Spray ou Goticular.

2.2.4.1 Modo de transferência por Curto Circuito

O modo de transferência de metal por curto circuito produz-se quando o eletrodo está em contato direto com o banho de solda. Neste modo de transferência de metal, o eletrodo alimenta-se constantemente a uma velocidade que excede a velocidade de fusão do metal (Modenesi, 2007). Quando o eletrodo entra em contato com o banho de fusão se produz um curto circuito, momento no qual se extingue o arco. A corrente a seguir, começa a subir e esquentar o arame a um estado plástico. Ao mesmo tempo, o arame começa a deformar devido a uma força eletromagnética denominada empescoçamento. Posteriormente, o valor da corrente e a força resultante do empescoçamento causa que a ponta do arame se transfira no metal fundido, neste ponto finalmente se restabelece o arco para iniciar de novo o ciclo. Esta sequência repete-se aproximadamente entre 50 a 250 vezes por segundo (Vide Figura 2.10).

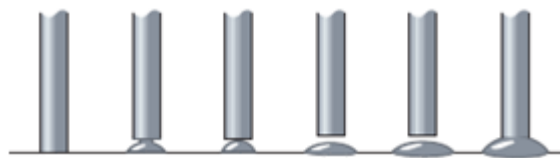


Figura 2.10: Modo de transferência de metal por curto circuito. Modificado (BOC, 2007).

A transferência de calor é baixa, e a profundidade da fusão é relativamente pouco profunda, pelo que deve ser tido cuidado na seleção do procedimento e a técnica de soldar para assegurar a fusão completa quando se solda materiais mais grossos. Devido a suas características o modo de transferência produz um rápido esfriamento da poça de fusão, que o fazem ideal para a soldagem em todas as posições.

2.2.4.2 Modo de transferência Globular

Este modo de transferência leva-se a cabo quando as correntes e tensões do arco se encontram entre os níveis de tensão e corrente da transferência por curto circuito e da

transferência por *spray*. A transferência globular caracteriza-se pela transferência de metal fundido em forma de grandes gotas irregulares de aproximadamente duas a quatro vezes o diâmetro do eletrodo, que caem no banho de solda por a ação da gravidade (Vide Figura 2.11). Este modo de transferência pode ser produzido com todos os tipos de gases de proteção, com dióxido de carbono as gotas se dispersam desordenadamente, devido às forças de repulsão que atuam para a ponta do eletrodo. Com os gases a base de argônio, as gotas não são tão grandes e se transferem em uma direção mais axial.



Figura 2.11: Modo de transferência Globular.

2.2.4.3 Modo de transferência por Spray ou Goticular

Na transferência por spray ou goticular, o metal fundido é impulsionado axialmente para a peça de trabalho através do arco em forma de uma corrente de pequenas gotas de igual ou menor tamanho que o diâmetro do eletrodo (Vide Figura 2. 12). Dado que as gotas de metal são muito pequenas, a velocidade de transferência pode ser de centos de gotas por segundo, apresentando boa qualidade e aparência de solda. Devido à fluidez da poça de fusão este modo de transferência limita-se à posição de solda plana ou horizontal. A corrente flui continuamente devido à alta tensão que mantém um arco longo e onde um curto circuito não pode ter lugar. O melhor ocorre em uma atmosfera de proteção de argônio já que se caracteriza por uma coluna de arco estreita e um final do eletrodo em ponta.

Os níveis de tensão e corrente mínimas requeridos variam com o diâmetro do eletrodo. A mudança de globular a goticular produz-se em um valor chamado corrente de transição globular-spray.

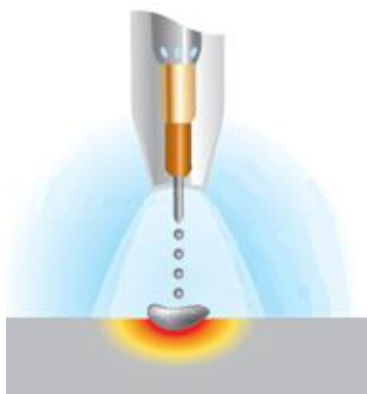


Figura 2. 12: Modo de transferência por Spray ou Goticular.

2.3 A QUALIDADE EM PROCESSOS DE SOLDAGEM GMAW

A qualidade da solda segue sendo tema importante para muitas empresas manufatureiras que utilizam estes processos na fabricação.

Existem distintos conceitos de qualidade, mas em resumo, qualidade se pode definir como os aspectos quantitativos que garantem que um produto cumpra com os requerimentos de funcionalidade desejados pelos clientes.

Atualmente a avaliação da qualidade da solda é feita por ensaios destrutivos e não destrutivos. Os ensaios destrutivos consistem em fazer ensaios de corte, cisalhamento, tração, além de outros em amostras de peças soldadas para avaliar a resistência mecânica, continuidade metálica e outros fatores importantes do produto final. Os ensaios não destrutivos são técnicas utilizadas na inspeção da solda a partir de métodos indiretos para a avaliação sem inutilizar a peça depois do ensaio. Os métodos mais comuns são os baseados em ensaios por ultrassom, radiologia, partículas magnéticas e líquidos penetrantes. Os ensaios sejam destrutivos ou não destrutivos são feitos depois do processo de soldagem (Abende, 2008).

No Brasil o processo de soldagem GMAW é o mais estudado, mas a qualidade, o controle e automatização em soldagem são as áreas menos pesquisadas (Scotti, 2008). Atuais desenvolvimentos em união de materiais estão aumentando o seu alcance e estendendo-se nas indústrias especializadas nas quais a complexidade da geometria e o risco do ambiente necessitam de sistemas de um grande nível de automatização. Neste tipo de tecnologia tem sido incorporado o monitoramento em tempo real da qualidade do processo de soldagem,

pois é muito importante para evitar o tempo e custos das inspeções depois do processo de soldagem, assim como as operações de reparação, mas a escolha adequada dos parâmetros para controlar e otimizar a qualidade da solda demanda tempo devido à quantidade de variáveis inter-relacionadas no processo.

Devido a isso são poucos os trabalhos feitos no controle de qualidade baseado no monitoramento. Em alguns deles, a avaliação da qualidade da solda são levados em consideração fatores visuais como a geometria e a uniformidade na rugosidade da solda. Mas ainda não foram projetados sistemas para assegurar e controlar cada um dos parâmetros geométricos para obter soldas com uma forma e acabamento desejados, garantindo padrões de qualidade estabelecidos na indústria.

2.3.1 Geometria do cordão de solda

Durante muitos anos estudou-se o processo GMAW através de um melhor entendimento dos fenômenos envolvidos com o fim de aumentar sua eficiência e melhorar a qualidade das soldas em diferentes aplicações. Conseguir uma solda com melhores características (sem descontinuidades, com pouco respingo e boas propriedades mecânicas) é o ideal; não obstante o efeito que pode ter a geometria das soldas no comportamento em serviço, este não é bem classificado nas normas técnicas de solda. A AWS não apresenta critérios objetivos para estabelecer uma geometria ótima nas soldas; só estabelece que a aparência é um aspecto que pode chegar a ser importante na classificação do comportamento das soldas em serviço, o que implica um termo subjetivo para sua avaliação. (AWS, 1989). Em 2010, Alam *et al*, determinaram em seu estudo que a geometria das soldas está relacionado com sua resistência à fadiga, como soldas com geometrias suaves e com mínimos defeitos otimizam a resistência à fadiga de uma junta soldada.

Para definir a forma de um cordão de solda, é necessário falar de suas medidas físicas básicas como a largura, o reforço, a penetração e o ângulo de reforço, ainda que estas resultem não serem todas, são as mais importantes para explicar de maneira geral o que sucede com a geometria do cordão. Cortês *et al* (2011), estabelece uma série de conceitos para definir com melhores garantias a geometria, dividindo-os em dois grupos: aparência da solda e morfologia da solda. A aparência relaciona-se com a percepção visual dos cordões. Devido à natureza subjetiva desta definição, esses autores determinaram alguns

parâmetros quantitativos e qualitativos para definir de uma maneira objetiva a aparência como o número de sulcos ou impressões presentes nas soldas por unidade de comprimento, o padrão que expõe a forma dos sulcos e a percentagem de preenchimento. A morfologia define o perfil do contorno do cordão de solda que abarca suas dimensões principais: a largura (L), o reforço (R), o ângulo do reforço (α), o raio do pé (Θ), a penetração (P) etc. (vide Figura 2. 7).

Portanto, o estudo dos fatores geométricos do cordão de solda junto com o controle dos parâmetros de solda tem uma consideração importante para o projeto e fabricação de construções soldadas, já que ditos fatores afetam não só a qualidade mas também a produtividade e o custo da união de estruturas metálicas.

2.3.1.1 Reforço

O reforço é a distância máxima entre o nível do metal base e o ponto superior do metal depositado. Dá a ideia quanto ao número de passadas de solda necessárias para recheiar uma ranhura e, sua convexidade tem uma correlação direta com a força da união soldada e a taxa de consumo do arame de soldagem.

O reforço aumenta com o aumento da velocidade de alimentação do arame de soldagem com independência da corrente de solda e o tipo de polaridade empregada (Gunaraj e Murugan, 1999). É indiretamente proporcional à tensão, velocidade de soldagem e o diâmetro do eletrodo. O aumento do reforço com o incremento da velocidade de alimentação do arame deve-se principalmente à maior quantidade de metal depositado por unidade de longitude. A diminuição de reforço com o aumento da tensão é devido ao aumento da largura do cordão de solda.

Em geral, o reforço deve ser de 20% da espessura da chapa. Uma altura de reforço excessivo não melhora a resistência da solda, mas aumenta o consumo do eletrodo. Um menor reforço significa um maior rendimento metalúrgico da solda, isto é, a deposição de metal se realiza com maior eficiência. Devido às mudanças bruscas na espessura da placa, o reforço pode concentrar tensões nestes pontos que conduzem à insuficiência das uniões soldadas, devido ao efeito de entalhadura (Shoeb *et al*, 2013).

2.3.1.2 Largura

A largura do cordão de solda é a largura da zona de metal depositado na placa sobre a qual se descarrega a força do arco. Atribui-se a força das uniões soldadas. A tensão do arco tem uma grande influência na largura do cordão. Aumento da tensão do arco como resultado dum arco mais longo provoca um cordão mais largo (Cary, 1979). À medida que aumenta a velocidade de soldagem, a largura da solda diminui. Em 1993, Gurev e Stout observaram que na soldagem MIG, seja com um aumento da corrente ou uma diminuição da velocidade de soldagem, a largura do cordão aumenta com o aumento da entrada de calor na peça de trabalho. Uma alta velocidade de soldagem gera cordões com mordeduras, enquanto que baixas velocidades causam cordões muito largos, que tendem a deformar e a mudar as características mecânicas da peça de trabalho.

2.4 FUNDAMENTOS DE SISTEMAS INTELIGENTES

A Inteligência Artificial (IA) é um campo de conhecimento derivado da matemática e a informática. IA é historicamente o termo mais estendido e genérico para a ciência cujo objetivo é o desenvolvimento de sistemas inteligentes artificiais. Desde suas origens a metade do século XX, os sistemas baseados no processamento inteligente da informação têm sido aplicados com sucesso em inúmeros de contextos. Seu campo de aplicação é multidisciplinar: tecnologias da informação, bioquímica, engenharia, comunicações, medicina, economia, segurança, defesa, etc. Graças a sua versatilidade e suas grandes vantagens, esta tecnologia oferece soluções eficazes e robustas a problemas presentes na indústria.

Um sistema inteligente artificial é um sistema que percebe seu ambiente e aprende, para a cada situação que se apresenta, atua continuamente, em forma mental e externa para definir qual é a ação que lhe permite atingir seus objetivos.

Os Sistemas Inteligentes artificiais permitem implementar algumas características e mecanismos de processamento dos sistemas biológicos. Entre os sistemas inteligentes destacam as Redes Neurais Artificiais, a Lógica Difusa (*Fuzzy*) e a Computação Evolutiva.

2.4.1 Redes neurais

Redes neurais artificiais (RNA) constituem um campo da ciência da computação ligado à inteligência artificial, buscando implementar os modelos matemáticos que se assemelhem à estrutura neuronal dos organismos inteligentes, apresentando capacidade de adaptar os seus parâmetros como resultado da interação com o meio externo, melhorando na solução de um determinado problema (Ferneda, 2006). As redes neurais são usadas para resolver problemas em que não há nenhum modelo analítico ou problemas em que o modelo analítico é muito complexo.

As redes neurais são compostas de uma grande quantidade de unidades estruturais interconectadas, também conhecidos como neurónios. O esquema básico na Figura 2. 13, a seguir, mostra os componentes dos neurônios artificiais.

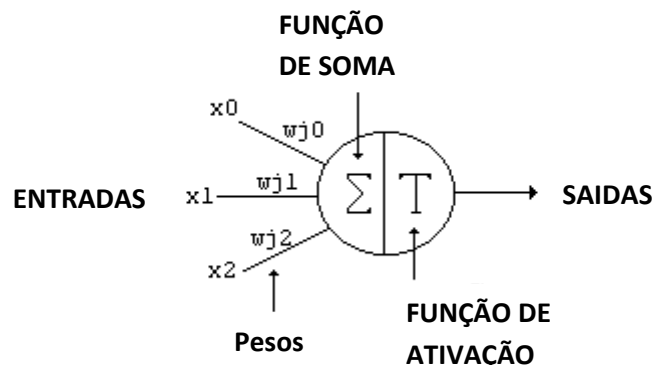


Figura 2. 13: Componentes dos neurônios artificiais.

A informação (sinais) é transmitida entre neurônios através de conexões ou sinapses, a eficiência de uma sinapse, representada por um peso associado, corresponde à informação armazenada pelo neurônio e, portanto, pela rede neural; e o conhecimento é adquirido do ambiente através de um processo de aprendizagem que é basicamente responsável por adaptar os pesos das conexões aos estímulos recebidos do ambiente.

Esta característica tem grandes efeitos para a capacidade de processamento e aprendizagem da rede. Se o conhecimento está armazenado nos pesos das conexões, então o processo de aprendizagem corresponde em identificar um conjunto apropriado de pesos de forma que a rede se comporte como desejado. Esta característica possui duas implicações importantes para as RNAs: a possibilidade de desenvolvimento de técnicas de aprendizagem, e a representação distribuída de conhecimento.

Cada rede neural artificial apresenta uma arquitetura de processamento ou topologia, havendo uma família de arquiteturas, cada qual adequada para funcionalidades específicas. A funcionalidade de uma rede neural artificial vai ser determinada por:

- Dados de treinamento e verificação
- Topologia da rede
- Função de ativação
- Estratégia de aprendizado

2.4.1.1 Dados de treinamento e verificação

Um dos passos mais importantes no processo de desenvolvimento de redes neurais artificiais é a separação dos dados coletados 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. (Carvalho e Ludemir, 1998).

Normalmente, os dados coletados são separados em duas categorias: 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.

Depois de determinados estes conjuntos, eles são, geralmente, colocados em ordem aleatória para prevenção de tendências associadas à ordem de apresentação dos dados. Além disso, pode ser necessário pré-processar estes dados, através de normalizações, escalonamentos e conversões de formato para torná-los mais apropriados à sua utilização na rede.

2.4.1.2 Topologia da rede

A maneira como os neurônios artificiais podem ser agrupados é uma importante característica que define o tipo de arquitetura das Redes Neurais Artificiais. Estes agrupamentos são baseados na maneira como os neurônios são conectados no cérebro humano.

Uma rede neural pode ter uma ou várias camadas. As redes que possuem uma única camada são as redes que possuem um nó entre uma entrada e uma saída da rede. As redes multicamadas possuem uma ou mais camadas entre as camadas de entrada e saída. Essas camadas são chamadas de camadas escondidas (*hidden*), intermediárias ou ocultas. (Carvalho e Ludemir, 1998)

A topologia das Redes Neurais Artificiais depende da forma como os Neurônios se conectam para formar uma "Rede" de neurônios. A topologia pode ser de redes diretas (*Feedforward*) ou de redes recorrentes (*Feedback*).

Na topologia de redes diretas (Vide Figura 2. 14), o grafo não tem ciclos, o fluxo de informação é unidirecional e é frequentemente comum representar estas redes em camadas. Neste caso são chamadas redes de camadas. Na camada de entrada os neurônios recebem sinais de excitação e na camada de saída é enviado o resultado do processamento da RNA. Exemplos para esse tipo de rede são o *perceptron*, o *perceptron* multicamada e o *Adaline*.

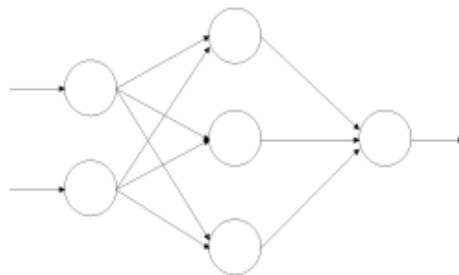


Figura 2. 14: Topologia de redes diretas.

Nas Redes Neurais Recorrentes com Realimentação o grafo de conectividade contém pelo menos um ciclo e têm ligações entre os neurônios sem restrições. As redes propostas por Hopfield (Vide Figura 2. 15) e as redes bidirecionais tem particular importância nesta topologia.

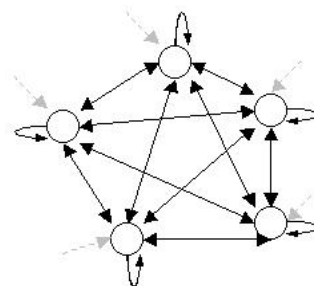


Figura 2. 15: Topologia de uma red Hopfield.

2.4.1.3 Função de Ativação

A função de ativação representa o efeito que a entrada interna e o estado atual de ativação exercem na definição do próximo estado de ativação da unidade. Quando propriedades dinâmicas estão envolvidas na definição do estado de ativação, equações diferenciais (caso contínuo) ou a diferenças (caso discreto) são empregadas. Tendo em vista a simplicidade desejada para as unidades processadoras, geralmente define-se seu estado de ativação como uma função algébrica. Geralmente, esta função é monotonicamente não decrescente e apresenta um tipo de não linearidade associada ao efeito da saturação (CASTRO, 1998). Alguns tipos de função de ativação são descritos a seguir:

- Função Linear

Neste caso a saída linear com pente igual a um, simplesmente repete o sinal que entra no neurônio na sua saída. A Figura 2. 16 apresenta a função linear.

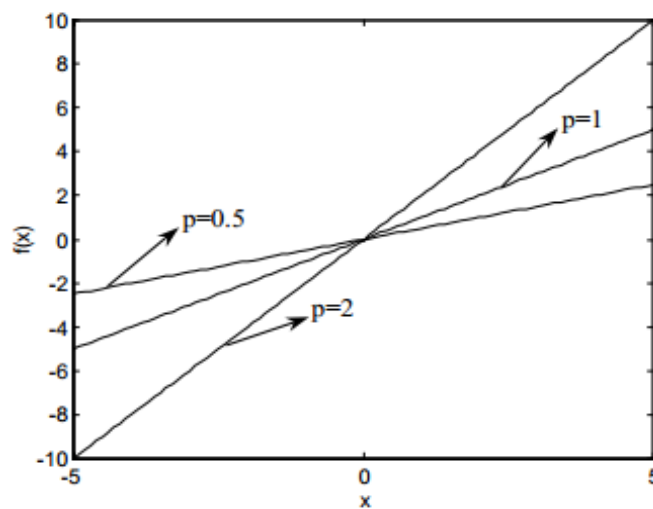


Figura 2. 16: Função Linear.

Este tipo de função de ativação é muito utilizado nas unidades que compõem a camada de saída das arquiteturas *perceptron* multicamada.

- Função Logística

Este tipo de função limita o intervalo de variação da derivada da função, pela inclusão de um efeito de saturação. Sua derivada também é uma função contínua, a Figura 2. 17, a seguir, mostra que a função logística possui intervalo de variação entre 0 e 1.

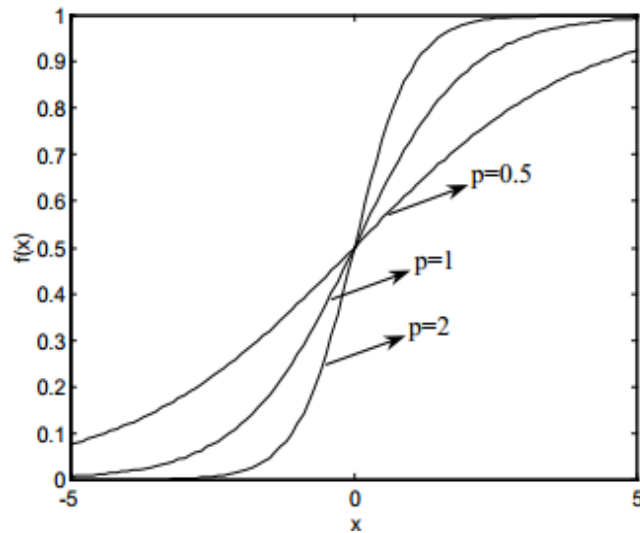


Figura 2. 17: Função Logística.

- Função Tangente Hiperbólica

Pelo fato da função logística apresentar valores de ativação apenas no intervalo $(0, 1)$, em muitos casos ela é substituída pela função tangente hiperbólica, que preserva a forma sigmoideal da função logística (Vide Figura 2. 18), mas assume valores positivos e negativos no intervalo $(-1, 1)$.

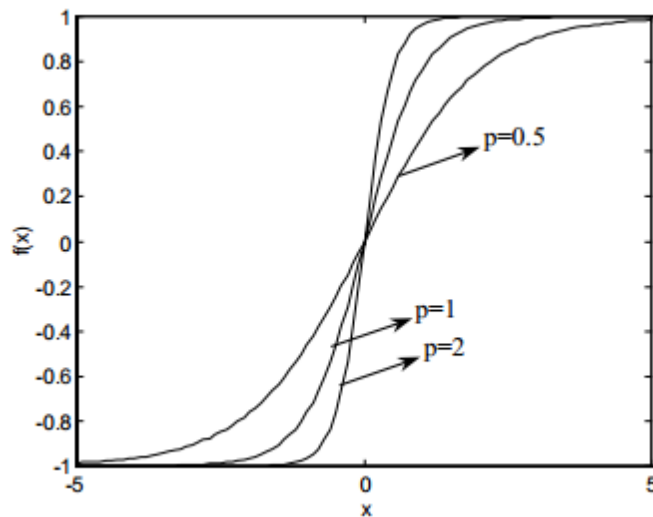


Figura 2. 18: Função tangente hiperbólica.

- Função Arco-Tangente

A função arco tangente é apresentada na Figura 2. 19.

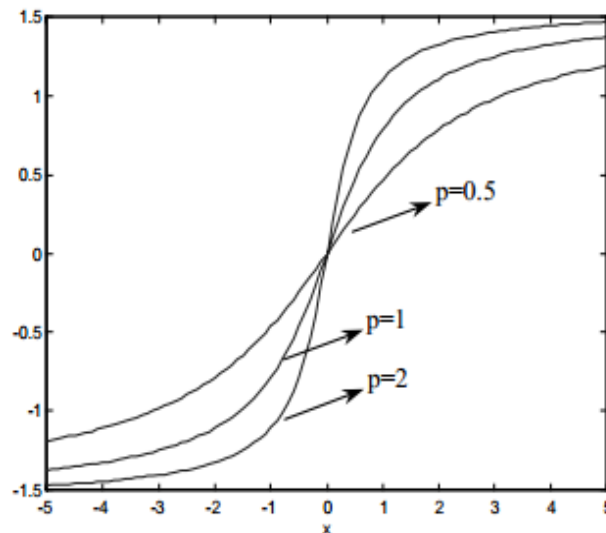


Figura 2. 19: Função arco tangente.

Esta função possui valores de ativação no intervalo $(-\pi/2, \pi/2)$, e pode ser apresentada como uma alternativa à função tangente hiperbólica para a implementação computacional, pois requer menos cálculos para sua elaboração.

2.4.1.4 Estratégia de aprendizado

Existem diversas maneiras de se classificar uma rede neural artificial. Talvez a mais importante seja a classificação pelo processo ou algoritmo de aprendizado empregado para treiná-la, que pode ser supervisionado ou não supervisionado (Xavier, 2005).

No aprendizado supervisionado são sucessivamente apresentadas à rede conjuntos de padrões de entrada e seus correspondentes padrões de saída (De Medeiros, 1999). Durante este processo, a rede realiza um ajustamento dos pesos das conexões entre os elementos de processamento, ou seja, a rede atua comparando a saída com o valor desejado e realizando correções em seu modelo até atingir um valor mínimo desejado ou um erro aceitável. Algumas dentre as muitas leis de aprendizagem supervisionada são *perceptron*, *adaline* e *madaline*, *backpropagation*

No aprendizado não supervisionado a rede “analisa” os conjuntos de dados apresentados a ela, determina algumas propriedades dos conjuntos de dados e “aprende” a refletir estas propriedades na sua saída. A rede utiliza padrões, regularidades e correlações para agrupar os conjuntos de dados em classes (De Medeiros, 1999). As propriedades que a rede vai aprender sobre os dados podem variar em função do tipo de arquitetura utilizada e da lei de

aprendizagem. Alguns métodos de aprendizado não supervisionado são o Mapa Auto-Organizável de Kohonen, Redes de Hopfield e Memória Associativa Bidirecional.

Analisar o papel de todas as características da rede neural no resultado final não é uma tarefa elementar, é por este motivo que as mais avançadas estratégias de aprendizado passaram a ser responsáveis pela definição automática de muitas características do projeto. Geralmente o projetista não possui informação a priori suficiente para definir a melhor topologia da rede, as funções de ativação que devem ser utilizadas em cada neurônio e o algoritmo de treinamento, deixando apenas as conexões ajustáveis a cargo do algoritmo de treinamento. Isto significa que, ao arbitrar a eleição das características devido à complexidade do desenho das redes neurais, boas estimativas podem ser obtidas apenas a partir de procedimentos exaustivos de tentativa e erro.

2.4.1.5 Modelagem de sistemas mediante redes neurais

Entre as características das redes neurais que são interessantes na modelagem e identificação de sistemas são o aprendizado, processamento paralelo e distribuído, reconhecimento de padrões, tolerância a falhas, capacidade de treinamento, robustez, não linearidade e uniformidade. Tais características não são suportadas pelos métodos computacionais tradicionais, fazendo com que tal tecnologia seja empregada para ajudar a solucionar problemas que antes eram resolvidos de forma menos eficaz. A redundância na representação de informações em uma rede neural, ao contrário de outros sistemas, transforma-se em uma vantagem, que torna o sistema tolerante a falhas.

O aprendizado através de exemplos, generalizações redundantes, e tolerância a falhas e sua habilidade de aproximar qualquer função contínua não linear a um grau de correção desejado, proporcionam fortes incentivos para a escolha de redes neurais como uma escolha apropriada para aproximação de funções e para a modelagem de sistemas lineares e não lineares.

A principal vantagem é que esse tipo de algoritmo passa a ser gerado com pouca ou quase nenhuma intervenção humana, criando sistemas autônomos que possam tomar suas próprias decisões baseados em experiências anteriores.

2.4.2 Logica fuzzy

Lógica Fuzzy ou Difusa, proposta por L. Zadeh em 1965 é uma alternativa à lógica tradicional, que nós conhecemos, e como uma tentativa de modelar a forma como o ser humano representa e processam informações sensoriais a um "alto nível", e a forma "difusa" (relativo/subjetiva) com que manipula com muitos conceitos linguísticos.

A chegada da lógica *fuzzy* foi causada pela necessidade de um método capaz de expressar de uma maneira sistemática quantidades imprecisas, vagas e mal definidas. Por exemplo, em vez de se utilizar um modelo matemático complexo, os controladores industriais baseados em lógica *fuzzy* podem ser relacionados com o conhecimento experimental de operadores humanos treinados, fazendo como que a ação de controle seja tão boa quanto à deles e sempre consistente (Godoy Simões e Shaw, 2007).

Assim a vantagem de controladores inteligentes é permitir que regras heurísticas possam capturar tais estratégias de controle de operadores humanos, pois estes operadores podem trabalhar com plantas industriais não completamente compreendidas, processos mal definidos, e sistemas com dinâmica não conhecida. Esses operadores sabem qual ação tomar, quando observam certas condições ou eventos. Isso resolve o problema de se automatizar funções de controle, geralmente delegadas para controle manual.

Modelagem e controle *fuzzy* de sistemas são técnicas para o tratamento de informações qualitativas de uma forma rigorosa. A lógica *fuzzy* constitui a base para o desenvolvimento de métodos e algoritmos de modelagem e controle de processos, permitindo a redução da complexidade de projeto e implementação, tornando-se a solução para problemas de controle até então intratáveis por técnicas clássicas.

2.4.2.1 Conjuntos fuzzy

Na teoria de conjuntos clássica, um elemento ou pertence a um conjunto ou não. Dado um universo U e um elemento particular $x \in U$, o grau de pertinência $\mu_A(x)$ com respeito a um conjunto $A \subseteq U$ é dado por:

$$\mu_A = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (2.1)$$

Zadeh (Zadeh, 1965) propôs uma caracterização mais ampla, na medida em que sugere que alguns elementos são mais membros de um conjunto do que outros. O fator de pertinência pode então assumir qualquer valor entre 0 e 1, sendo que o valor 0 indica uma completa exclusão e um valor 1 representa completa pertinência. Esta generalização aumenta o poder de expressão da função característica (Gomide e Gudwin, 1994).

Formalmente, seja U uma coleção de objetos denominados genericamente por $\{u\}$. U é chamado de universo de discurso, podendo ser contínuo ou discreto. Um conjunto *fuzzy* A em um universo de discurso U é definido por uma função de pertinência μ_A que assume valores em um intervalo $[0,1]$:

$$\mu_A: U \rightarrow [0,1] \quad (2.2)$$

O conjunto suporte de um conjunto *fuzzy* A é o subconjunto dos pontos u de U tal que $\mu_A(u) > 0$. Um conjunto *fuzzy* cujo conjunto suporte é um único ponto de U com $\mu_A = 1$ é chamado de um conjunto unitário *fuzzy*.

Sejam A e B dois conjuntos *fuzzy* em U com funções de pertinência μ_A e μ_B , respectivamente. As operações de conjuntos tais como a união ($A \cup B$), intersecção ($A \cap B$) e complemento ($\neg A$) para conjuntos *fuzzy* são definidos do seguinte modo:

- $\mu_{A \cup B}(u) = \mu_A(u) \text{ S } \mu_B(u) \quad (2.3)$

- $\mu_{A \cap B}(u) = \mu_A(u) \text{ T } \mu_B(u) \quad (2.4)$

- $\mu_{\neg A}(u) = 1 - \mu_A(u) \quad (2.5)$

Onde T é uma norma triangular (norma-t) e S é uma co-norma triangular (norma-s).

Para expressar conceitos é muito comum o uso de elementos qualitativos ao invés de valores quantitativos. Elementos típicos incluem "mais ou menos", "altos", "não muitos", "médio", etc. Estas ideias são capturadas pela definição de variável linguística. Uma variável linguística tem por característica assumir valores dentro de um conjunto de termos linguísticos, ou seja, palavras ou frases. (Gomide e Gudwin, 1994). Assim, ao invés de assumir instâncias numéricas, uma variável linguística assume instâncias linguísticas. Por exemplo, uma variável linguística ALTURA poderá assumir como valor um dos membros do conjunto {baixa, média, alta}. Para se atribuir um significado aos termos linguísticos, associa-se cada um destes a um conjunto *fuzzy* definido sobre um universo de discurso comum.

A forma mais comum de expressar o conhecimento é por meio de regras do tipo condição-ação. Nestas, um conjunto de condições descrevendo uma parcela observável das saídas do processo é associado com uma ação de controle que irá manter ou levar o processo às condições de operação desejadas.

A ideia geral aqui é se representar o conhecimento por meio de um conjunto de regras nas quais as condições são dadas a partir de um conjunto de termos linguísticos associados às variáveis de saída/entrada do processo. Regras do tipo se-então são frequentemente chamadas de regras *fuzzy*. Dependendo de o propósito ser controle ou modelagem, podem ser chamadas ainda de regras de controle *fuzzy* ou regras de modelagem *fuzzy*. Uma regra *fuzzy* como a seguinte:

$$\text{se } (x \text{ é } A_i \text{ e } y \text{ é } B_i) \text{ então } (z \text{ é } C_i)$$

Em um sistema *fuzzy* o comportamento do sistema é representado por uma relação *fuzzy* que é uma combinação de todas as relações *fuzzy* provenientes das diversas regras. Esta combinação envolve um operador de agregação de regras (interpretado como um operador de união utilizando a operação *max*):

$$R = \text{agreg } (R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_n) \quad (2.6)$$

2.4.2.2 Estrutura dos sistemas fuzzy

Um sistema fuzzy é composto dos seguintes blocos funcionais:

- Fuzzificação.
- Motor de inferências.
- Defuzzificação.

Essa estrutura do sistema representa a transformação que ocorre do domínio do mundo real, que usa números reais, para o domínio *fuzzy*. Nessa transformação um conjunto de inferências *fuzzy* é usado para as tomadas de decisões, e por fim ha uma transformação inversa do domínio *fuzzy* para o domínio do mundo real, para que ocorra o acoplamento entre a saída do algoritmo *fuzzy* e as variáveis de atuação.

- Fuzzificação

Geralmente das variáveis de entrada os valores discretos não fuzzificados são provenientes de sensores das grandezas físicas ou de dispositivos de entrada computadorizados. Um fator

de escala pode ser usado para converter os valores reais de entrada para outros que sejam cobertos pelos universos de discurso predefinidos para cada variável de entrada, por meio de umas funções de pertinência contidas na base de conhecimento, convertendo os sinais de entrada em um intervalo $[0,1]$.

- Motor de inferências.

O motor de inferências tem duas partes, a primeira é uma base de conhecimento que representa o modelo do sistema a ser controlado, a base de dados fornece definições numéricas necessárias as funções de pertinência usadas no conjunto de regras fuzzy e contem uma base de dados (funções de pertinência linguísticas) e uma base de regras fuzzy linguísticas.

A segunda é a lógica de tomada de decisões, incorporada na estrutura de inferência da base de regras, usa implicações *fuzzy* para simular tomadas de decisão humanas. Ela gera ações de controle inferidas a partir de um conjunto de condições de entrada- antecedentes.

- Defuzzificação

A defuzzificação consiste em obter-se um único valor discreto, utilizável numa ação de controle concreta no mundo real, a partir de valores *fuzzy* de saída obtidos. Este único valor representa um compromisso entre os diferentes valores *fuzzy* contidos na saída do controlador.

Esta função é necessária apenas quando a saída do controlador tiver de ser interpretada como ação de controle discreta, existem sistemas que não exigem defuzzificação porque a saída *fuzzy* e interpretada de modo qualitativo.

2.4.2.3 Funções de pertinência fuzzy

As funções de pertinência *fuzzy* representam os aspectos fundamentais de todas as ações teóricas e práticas de sistemas *fuzzy*. Uma função de pertinência é uma função numérica gráfica ou tabulada que atribui valores de pertinência *fuzzy* para valores discretos de uma variável, em seu universo de discurso.

Um numero prático de funções de pertinência é algo entre 2 e 7. Quanto maior o numero de conjuntos, maior a precisão, mas a demanda computacional também é mais significativa. Os formatos mais frequentemente encontrados são triangulares e trapezoides (Vide Figura 2. 20), pois são gerados com facilidade, em casos onde um desempenho suave é de importância critica, funções do tipo $\cos^2(x)$, gaussiana, sigmoide podem ser usadas.

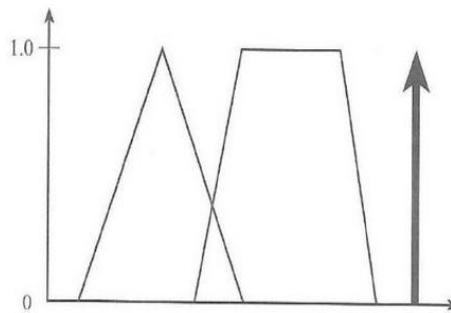


Figura 2. 20: Formatos mais frequentemente das funções de pertinência *fuzzy*.

As funções de pertinência não precisam ser simétricas ou igualmente espaçadas, mas devem ser completas, isso significa que o conjunto de funções de pertinência associado a uma variável especifica deve cobrir todo o universo de discurso desta variável. Cada variável pode ter um conjunto de funções de pertinência diferente, com diversos formatos e distribuições.

Embora as estratégias de controle inteligente possam ser implementadas por outros meios, as implementações por sistemas *fuzzy* frequentemente se tornam muito mais eficientes, já que as estratégias de controle *fuzzy* nascem da experiência e de experimentos, em vez de modelos matemáticos, por tanto, uma implementação linguística é muito mais rápida e efetiva de se implementar, devido a sua estrutura de software mais transparente e compreensível.

Outra característica importante das estratégias de controle *fuzzy* é que nestas envolvem-se um numero muito grande de entradas, a maioria das quais relevantes apenas para condições especiais. Tais entradas são ativadas apenas quando condições especificas prevalecem, sendo mais eficientes, ao se comparar a codificação e o tempo computacional de execução com soluções convencionais de controle. O controle fuzzy também é recomendado e apresenta aplicações bem sucedidas quando ocorrem ajustes em maquinas com o objetivo de redução de perdas e de matéria prima, quando o sistema depender de habilidades e de atenção do operador.

3. O ESTADO DA ARTE NA OTIMIZAÇÃO, MODELAGEM, MONITORAMENTO E CONTROLE DA GEOMETRIA DO CORDÃO NO PROCESSO DE SOLDAGEM.

A necessidade de obtenção de maior produtividade e requisitos de qualidade tem obrigado cada vez mais ao uso de sistemas automatizados na soldagem. Em tais aplicações, um método preciso para a seleção das variáveis de processo e de controle da forma de cordão de solda tem sido algo essencial, uma vez que a qualidade da solda é influenciada não somente pela composição física e química do metal, mas também pela geometria do cordão de solda. A referida geometria tem relação direta com os parâmetros do processo de soldagem. Neste sentido, tem surgido a necessidade do desenvolvimento de expressões matemáticas e técnicas computacionais que representem as relações precisas entre as variáveis do processo e as características geométricas do cordão, tornando possível a otimização dos parâmetros do processo, o monitoramento, controle da obtenção da forma e da qualidade requerida dos cordões de solda. Além disso, com os recentes desenvolvimentos nos processos de soldagem, tem-se identificado um aumento nas aplicações nas indústrias, bem como as necessidades, demandas e a complexidade dos metais, os processos e a geometria. Portanto, existe a necessidade da geração de eficazes sistemas para a devida automatização. Tais requerimentos estão superando as capacidades do ser humano. É preciso dar ênfase nos parâmetros de realimentação e sensoriamento do processo, a fim de alcançar satisfatoriamente um controle do mesmo por meio de ferramentas e métodos que vão desde procedimentos matemáticos ou estatísticos até as metodologias que implementam sistemas inteligentes.

A revisão de literatura apresentada a seguir, tem relação com os efeitos de diferentes parâmetros de soldagem na geometria do cordão, a aplicação das redes neurais artificiais na predição, modelagem e otimização dos parâmetros do processo, e na aplicação da lógica *fuzzy* no controle e monitoramento da soldagem.

3.1 ESTUDO DOS EFEITOS DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE SOLDAGEM SOBRE AS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS CORDÃO

A qualidade do cordão compreende sua geometria e sua microestrutura, que influem nas propriedades mecânicas da solda. Esta breve revisão ilustra os trabalhos realizados sobre o efeito dos parâmetros na qualidade da solda.

Para um melhor conhecimento e controle do processo GMAW (*Gás Métal Arc Welding*), faz-se importante estabelecer a relação entre os parâmetros do processo e a geometria, a fim de prever e controlar a qualidade do cordão. A técnica de análise fatorial pode ser utilizada para o estabelecimento das relações entre os parâmetros do processo de soldagem e as dimensões do cordão (Kim *et al*, 2003a; Ganjigatti *et al*, 2008; Ganjigatti *et al*, 2007).

Em Kim *et al*, (1996), estudaram-se os efeitos dos parâmetros do processo GMAW na penetração do cordão. Os parâmetros do processo de soldagem pesquisados foram: o diâmetro do arame, a taxa de fluxo de gás, a velocidade de soldagem, e a corrente e a tensão do arco.

A metodologia de superfície de resposta (RSM) foi utilizada por Murugan e Parmar (1994) para estabelecer as relações quadráticas entre os parâmetros do processo de soldagem GMAW e a geometria do cordão em aço inoxidável.

Lê e Rhee (2000) levaram a cabo uma investigação no processo de soldagem GMAW logrando obter a relação da resposta aos parâmetros do processo mediante análise de regressão linear múltipla.

Um estudo da influência dos gases de proteção e os parâmetros do processo sobre a transferência de material e a forma do cordão em uniões soldadas com MIG (*Metal Inert Gas*) em placas finas de aço foi feito em Iordachescu *et al*. (2006), observando-se que os gases de proteção têm grande influência na convexidade, na cor, no brilho, na suavidade do cordão e na formação de porosidades.

Um modelo matemático para a predição da geometria do cordão no revestimento por FCAW (arames com alma não metálica) com arame tubular de aço inoxidável em placa base de aço estrutural desenvolveu-se em Palani e Murugan (2006). Os experimentos realizaram-se para o desenvolvimento do modelo que utiliza três fatores, mediante um desenho fatorial nível cinco.

No trabalho realizado por Balasubramanian *et al*. (2008), desenvolveu-se um modelo matemático para prever o tamanho do cordão e a dureza, soldando ligas de titânio. Consideraram-se as variáveis de entrada, a corrente de pico, a corrente de base, a frequência de pulso e as variáveis respostas como, por exemplo, o tamanho do cordão e a dureza. Aqueles autores observaram que o modelo pode ser utilizado com eficácia para prever a dureza e o tamanho dentro de uma faixa de parâmetros estabelecidos.

Segundo Ganjigatti *et al.* (2007), a análise de regressão *cluster-wise* para a predição da geometria do cordão no processo MIG, realiza um melhor desempenho que o enfoque de regressão global na predição dos parâmetros geométricos.

Em Kim *et al.* (2003b), fez-se uma análise de sensibilidade no processo de soldagem robótica GMAW, a fim de determinar o efeito dos erros da medida sobre a incerteza nos parâmetros estimados. Utilizaram-se análise de regressão múltipla não linear para modelar o processo e identificar os respectivos efeitos dos parâmetros do processo sobre os parâmetros geométricos do cordão de solda.

Em outro estudo de Kim *et al.* (2003c), desenvolveram-se equações utilizando análises regressão linear e não linear para relacionar os parâmetros do processo de soldagem com os parâmetros geométricos do cordão na soldagem robotizada MAG. As equações desenvolvidas foram capazes de predizer a geometria do cordão de solda com a suficiente exatidão, a partir dos parâmetros do processo.

Igualmente, o efeito do tamanho e a forma do cordão sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas do metal soldado têm sido estudados. Eroglu *et al.* (1999) observaram o efeito do tamanho do cordão sobre a microestrutura, as propriedades mecânicas e a Zona Termicamente Afetada (ZTA) de aços de baixo carbono. Encontraram-se, a partir de ensaios de tenacidade dos metais soldados, que à medida que aumenta a contribuição de calor, os valores máximos de dureza no metal soldado e a ZTA diminuem.

Um trabalho similar apresenta-se em Kolhe *et al.* (2008), onde foram estudados a microestrutura, as propriedades mecânicas e a largura da zona termicamente afetada (ZTA) em SMAW (soldagem manual com eletrodo revestido) multipasse em uma placa de aço ao carbono de espessura 16 mm. Uma caracterização microestrutural dos aços de alta resistência soldados com GMAW, com 80% de ar e 20% de CO₂, com diferentes entradas de calor na soldagem, levou-se a cabo por meio de microscopia eletrônica de varredura e microscopia eletrônica de transmissão (Wang e Li, 2003).

O processo GMAW é, provavelmente, a mais importante técnica de união para diferentes metais e ligas, e pode promover seu uso mais amplo na indústria aeroespacial, aeronáutica, de automóveis, eletrônica e outras áreas.

Neste sentido, a presente revisão explora o efeito dos parâmetros mais influentes do processo GMAW que afetam a resistência à tração e a geometria da união da articulação

fabricada, uma vez que a seleção adequada dos parâmetros no processo GMAW é crítica se se deseja aplicar tal processo de fabricação a um nível industrial.

3.2 APLICAÇÃO DAS REDES NEURAS ARTIFICIAIS EM SOLDAGEM NA MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DO PROCESSO

Em geral, todos os processos de soldagem são utilizados com o objetivo de obtenção de uma união soldada com os parâmetros de cordão de solda desejados – excelentes propriedades mecânicas com uma distorção mínima.

Atualmente, algumas técnicas como, por exemplo, o Desenho de Experimentos (DoE), os algoritmos evolutivos e as redes computacionais, são amplamente utilizadas para desenvolver uma relação matemática entre os parâmetros de entrada do processo de soldagem e as variáveis de saída da união soldada, a fim de determinar os parâmetros que conduzem à desejada qualidade da solda.

Neste sentido, a seguir, tem-se uma revisão literária das diferentes aplicações das redes neurais no estudo da geometria da união soldada.

Andersen *et al.* (1990) têm explicado alguns conceitos relacionados com as redes neurais e a forma em que se pode utilizar para modelar a geometria do cordão de solda, em termos dos parâmetros do processo, visando avaliar a exatidão das redes neurais para a modelagem da soldagem. Uma série de simulações se levou a cabo utilizando dados reais do processo de soldagem GTAW, observando-se que a exatidão das redes neurais na modelagem é totalmente comparável com a precisão atingida pelos esquemas de modelagem mais tradicionais.

Uma avaliação das redes neurais artificiais para o monitoramento e controle do processo de soldagem por arco de plasma levou-se a cabo por Cook *et al.* (1995). Duas áreas de aplicação da soldagem foram pesquisadas por aqueles autores: a modelagem de processos de soldagem e a análise do perfil do cordão de solda durante o controle de qualidade. Confirmou-se que as ANN (redes neurais artificiais) são ferramentas poderosas para a análise e a modelização das referidas aplicações devido a sua capacidade de ofertar resultados iguais ou de melhor precisão, bem como a confiabilidade dos algoritmos de análises de dados utilizados anteriormente.

Vitek *et al.* (1998) desenvolveram um modelo para prever os parâmetros da forma da poça de fusão a partir de dados experimentais reais dos parâmetros do processo de soldagem pulsada com laser, tais como: a velocidade de soldagem, a potência média, a energia do pulso e a duração do pulso em ligas de alumínio 5754, utilizando-se redes neurais. A referida pesquisa obteve excelente precisão, chegando à conclusão de que as ANN permitem resultados imediatos e, portanto, oferecem vantagens em aplicações onde se fazem necessárias previsões em tempo real, e onde previsões computacionalmente intensivas são demasiado lentas.

Ridiings *et al.* (2002) aplicaram a técnica de redes neurais para prever o diâmetro exterior da forma do cordão de solda para três arames diferentes, em uma só passada com arco submerso, fazendo uso dos seguintes parâmetros do processo: a corrente, a tensão, a velocidade de soldagem, o ângulo de soldagem e o *stick-out*. Demonstrou-se que a técnica aplicada pode prever uma forma de cordão de solda com um alto grau de confiança, determinando-se a contribuição de cada fator para a variação na forma final do cordão de solda.

Uma comparação da previsão da geometria do cordão (largura e penetração) no processo GMAW, fazendo uso da análise de regressão múltipla (MRA) e análise de ANN, têm sido levados a cabo por Lê e Um (2000). Os parâmetros de processo utilizados foram: a distância entre as peças, a corrente, a tensão e a velocidade de soldagem, para as peças de aços doce SS41. Encontrou-se que o erro na previsão para a ANN foi menor que o do enfoque MRA, em termos da largura e o reforço do cordão.

Park e Rhee (1999) analisaram a poça de fusão e o tamanho do cordão, para desenvolver um sistema de estimativa da geometria do cordão, fazendo uso de um método de regressão e um método de redes neurais. No referido estudo, aqueles autores chegaram à conclusão de que os modelos de regressão foram apropriados para a estimativa de classificação do estado da penetração como penetração parcial ou penetração completa, enquanto, a rede neural tornou-se um enfoque muito mais preciso para a estimativa do reforço e a largura do cordão.

Kim *et al.* (2002) apresentaram um algoritmo inteligente a fim de estabelecer a relação entre os parâmetros do processo de soldagem GMA-CO₂ (número de passadas, corrente, tensão, velocidade de soldagem), visando prever a altura do cordão utilizando uma rede neuronal e a análise de regressão múltipla (MRA) para a soldagem robotizada de múltiplos

passes sobre aço BV-AH32 com 12 mm de espessura. Os resultados obtidos evidenciaram quais os parâmetros do processo mais influentes na altura cordão e a importância das redes neurais como uma poderosa ferramenta de modelagem de sistemas complexos.

O efeito sobre a eficiência da entrada de calor e a qualidade da solda, com uma fonte de laser, foi pesquisado por Casalino y Minutolo (2004). Um número de juntas a topo de aço austeníticos inoxidáveis foram produzidos por soldagens a laser-CO₂. A eficácia da soldagem calculou-se entre a relação da zona fundida a uma determinada entrada de energia por unidade de comprimento. De outro modo, a largura, o reforço e a penetração da solda foram medidos com o fim de avaliar a qualidade da união. As ANN foram utilizadas para correlacionar os dados obtidos com os parâmetros de processo (potência do laser, velocidade de soldagem e espessura do material). Para a escolha dos parâmetros ótimos, utilizou-se um desenho fatorial 2⁴, e, finalmente, um modelo foi construído para eleger o processo de soldagem por laser mais adequado para produção de alta eficiência e qualidade.

Sathiya *et al.* (2012) pesquisaram a soldagem por laser e a aplicação de um modelo através de ANN da relação entre os parâmetros de entrada, tais como: a potência do laser, a velocidade de deslocamento e a posição focal, com parâmetros de saída, tais como: a resistência à tração, a penetração, o reforço e a largura do cordão. O modelo de ANN obtido integra-se adequadamente com algoritmos de otimização como, por exemplo, os algoritmos genéticos para otimizar os parâmetros de soldagem.

Dutta e Pratihari (2007) modelaram o processo de solda TIG (*Tungsten Inert Gas*), mediante análise de regressão convencional e os enfoques baseados em redes neurais. A análise de regressão convencional realizou-se com base no desenho fatorial completo de experimentos (DOE), bem como no desenvolvimento de redes neurais (algoritmo *back-propagation* e sistema genético-neural). Quando da comparação dos dados pela regressão com os resultados dados pela rede neuronal artificial, observou-se que as ANN apresentam melhores resultados do que os métodos de regressão tradicionais. O mesmo resultado foi obtido na investigação realizada por Pal *et al.* (2008) para o processo de soldagem MIG pulsado, onde deu-se o desenvolvimento de uma análise regressão e uma rede neural multicamada, a fim de prever a resistência à tração final (UTS), utilizando-se como parâmetros de processo: a tensão pico, a frequência do pulso, a tensão de base, a velocidade de soldagem e a velocidade de alimentação do alambre. Aqueles autores

empregaram os valores (RMS) da corrente e a tensão como variáveis principais, e a resistência à tração como saída.

Ates (2007) fez uso de redes neurais artificiais a fim de prever, na soldagem com gás inerte, os parâmetros de saída, a saber: a resistência à tração, a elongação e a dureza do metal. Neste sentido, é preciso destacar que a ANN é treinada por um algoritmo Delta-bar-delta, encontrando-se como resultado um erro não tão grande. As ANN podem ser integradas com sucesso para este tipo de aplicações.

Malviya e Pratihari (2011) utilizam a técnica de otimização de enxame de partículas para modelar o processo de soldagem MIG. No referido estudo, quatro enfoques de otimização têm sido desenvolvidos. No primeiro e segundo enfoques, utilizam-se redes neurais multicamada com ajuste *feed-forward* e redes neurais com função de base radial, respectivamente. No terceiro e quarto enfoques, utilizou-se um algoritmo *back-propagation* juntamente com a otimização de enxame de partículas (SWARM) para sintonizar uma rede neuronal com função de base radial. Ao comparar os resultados obtidos, observou-se que o rendimento dos enfoques híbridos (terceiro e quarto) foi melhor que o dos outros dois enfoques, indicando que as ANN são, de fato, ferramentas úteis, que expressam as relações entre as múltiplas entradas e as múltiplas saídas nos processos de soldagem.

No trabalho de Campbell *et al.* (2012), um modelo de rede neural artificial (ANN) foi aplicado à predição de geometrias de solda utilizando o processo GMAW com alternância de gases de proteção. O modelo pode ser utilizado para prever a penetração, a largura e o reforço do cordão para um conjunto dado de parâmetros de solda e certa frequência alternada de gás de proteção. A comparação das geometrias experimentais e preditas coincide de modo estreito, demonstrando a eficácia de tal enfoque na predição. O modelo demonstrou que a aplicação alternada de gases de proteção aumenta a penetração e o reforço do cordão em uma soldagem em ângulo reto, enquanto a largura se mostra reduzida.

Em 2012, Patel e Patel estudaram o desenho de experimentos e a utilização de dados experimentais para efetuar a predição da resistência da solda com redes neurais artificiais para os processos MAG-CO₂ e TIG, dados um conjunto de parâmetros de entrada.

Um estudo experimental para prever diversos parâmetros, primeiramente, do processo GMAW, para obtenção da diluição ótima no revestimento de aço inoxidável em placas estruturais de aço de baixo carbono, apresenta-se em Sreeraj e Kannan (2012). Os experimentos levaram-se a cabo segundo o desenho central composto com a técnica de replicação completa, comprovando-se a adequação e a importância dos modelos desenvolvidos. Fazendo uso de redes neurais artificiais, foram preditos os parâmetros, calculando-se a percentagem de erro da diferença entre os valores preditos e os valores reais.

Uma comparação entre as redes *back-propagation* e *counter-propagation* na modelagem do processo de soldagem TIG fez-se por Juang *et al.* (1998). Consideraram-se as complicadas relações entre os parâmetros do processo e as características da poça de fusão. Os resultados experimentais, para o processo TIG, mostrou que a rede *counter-propagation* tem uma melhor capacidade de aprendizagem que a rede *back-propagation* (BPN). No entanto, a rede *back-propagation* tem uma melhor capacidade de generalização que a rede *counter-propagation*. Singh *et al.* (2007) levou a cabo uma análise estatística detalhada dos dados da planta no processo SMAW, a fim de estudar a relação do material depositado e o comportamento da poça de fusão. Uma rede neuronal com *Feed-forward back-propagation*, com três diferentes algoritmos de aprendizagem, tratou de melhorar a precisão da predição.

Chan *et al.* (1999) propôs um modelo para prever a geometria da união de solda (largura, reforço, penetração do cordão e tamanho da piscina a $22,5^\circ$) no processo GMAW para aços de baixa liga. Os parâmetros do processo foram: corrente, tensão, velocidade de soldagem e espessura da peça de trabalho. Com a utilização da BPN, os resultados revelaram que a geometria cordão de solda pode ser modelada com precisão mediante o uso da referida rede.

Jeng *et al.* (2000) obtiveram um modelo de predição preciso dos parâmetros das juntas através da soldagem por laser, utilizando tanto a BPN como a aprendizagem de quantificação vetorial de redes neurais. Os parâmetros de entrada incluíram a espessura da peça e a distância entre as peças a serem soldadas, enquanto os parâmetros de respostas foram: a posição ótima do foco, os parâmetros de soldagem aceitáveis de potência do laser, a velocidade de soldagem e a qualidade da solda, incluindo *undercut*, distorção, largura e altura da solda.

Uma investigação sobre a ANN para modelar o processo GMAW foi reportada por Nagesh e Datta (2002). Em geral, a BPN é utilizada para associar os parâmetros do processo (velocidade de alimentação do arame, potência do arco, tensão do arco, corrente de soldagem e o comprimento do arco) com características de saída da geometria da união (reforço, largura, penetração e área transversal do cordão). No referido estudo, identificou-se uma pequena percentagem de erro entre a diferença dos valores estimados e experimentais, o que indica que as redes neurais podem dar resultados bastante precisos para a modelagem de tais aplicações.

Manikya e Srinivasa (2008) desenvolveram um modelo de rede neuronal de BPN para a predição da geometria da união no processo GMAW-P. O referido sistema de rede é uma das famílias de técnicas de redes neurais artificiais que se utilizam para determinar os parâmetros para diferentes processos de soldagem por arco. Neste sentido, aqueles autores observaram que os resultados obtidos a partir do modelo de rede neural são precisos na predição da geometria do cordão.

Na investigação de Kim *et al.* (2004), desenvolveu-se um modelo de rede neural para prever a geometria do cordão de solda em função dos principais parâmetros do processo em soldagem robotizada GMAW. O modelo de rede neuronal é desenvolvido fazendo uso de dois diferentes algoritmos de treinamento, a saber: o algoritmo de *back-propagation* do erro e o algoritmo de aproximação de Levenberg-Marquardt. A exatidão dos modelos de redes neurais desenvolvidos no referido estudo tem sido provada mediante a comparação dos dados simulados obtidos a partir do modelo de rede neuronal com aqueles obtidos a partir dos experimentos reais. Assim, os resultados destacam que tais algoritmos funcionam muito bem, uma vez que estes reduzem o erro quadrático médio (RMS) a um valor significativamente pequeno.

Christensen *et al.* (2005) desenvolveram uma rede multicamada *feed-forward* para a modelagem dos parâmetros do processo GMAW para garantir um bom grau de qualidade. No referido estudo, levou-se a cabo soldas em aço regular S135 com 3 mm de espessura. Os parâmetros do processo foram: velocidade de alimentação do arame, tensão, velocidade de soldagem e largura do orifício. Na implementação, aqueles autores demonstraram que o uso dos modelos para proporcionar soldas de alta qualidade é factível, e o treinamento da rede é simples e eficaz.

No estudo da literatura, as ANN têm surgido como uma das mais poderosas ferramentas de predição para a aplicação na Engenharia; sua utilização no processo de soldagem realça ainda sua importância e as capacidades concernentes, uma vez que, em sua maioria, tem-se a existência de sistemas muito complexos que implicam grande número de parâmetros, além de maior trabalho e complexidade na implementação.

3.3 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA FUZZY NOS PROCESSOS DE SOLDAGEM

O desenvolvimento de técnicas de Inteligência Artificial (IA) nos últimos anos tem ocupado cada vez mais destaque em pesquisas na área de soldagem e, aos poucos, começam a ser utilizadas em plantas industriais com sucesso, como é o caso da lógica *fuzzy*.

A modelagem e o controle clássico apresentam limitações de desempenho quando o processo aponta para a alta complexidade, onde não linearidades e o comportamento transiente estão presentes, como é o caso dos processos de soldagem. Ao contrário, a lógica *fuzzy* pode ser aplicada a sistemas lineares e não lineares, sendo de fácil implementação, conforme as facilidades existentes em relação à adequação de estratégia de controle e à simplicidade das leis de controle. Muitos trabalhos envolvendo a aplicação da lógica *fuzzy* têm indicado que a referida técnica é uma importante ferramenta para processos complexos, conforme evidenciado a seguir.

Um modelo de regressão *fuzzy* para prever a geometria da união no processo de soldagem robotizada foi estudado em Sung *et al.* (2007). No referido estudo, desenvolveu-se o modelo *fuzzy* a fim de estudar as relações entre quatro variáveis de processo (diâmetro do arame, tensão do arco, velocidade e corrente de soldagem) com quatro características de saída (largura, altura do reforço, penetração e área do cordão) e para controlar a qualidade no processo GMAW com base na análise da geometria da união. No modelo desenvolvido, é possível adaptar as variáveis de processo a uma função linear que determina os coeficientes da função de ajuste da qualidade da solda.

Wu *et al.* (2001) apresentaram um sistema de lógica *fuzzy* que é capaz de reconhecer as alterações durante a soldagem automática por GMAW, fazendo uso de sinais de corrente e tensão. Um método estatístico foi utilizado para processar os dados capturados, obtendo-se as distribuições de densidade de probabilidade (PDDs) e as distribuições de frequência de

classes (CFDs). Com base nos dados processados (valores PDD de tensão e corrente de soldagem e os valores CFD do tempo de curto circuito), o sistema gera automaticamente regras difusas e funções de pertinência das variáveis linguísticas, realiza a inferência, defuzzificação, e completa o processo de avaliação.

Um estudo visando aumentar a produtividade na soldagem por GMAW mediante a otimização da velocidade de deposição do metal de aporte foi desenvolvido por Carrino *et al.* (2007). A fim de atingir os objetivos almejados, aqueles autores desenvolveram um sistema adaptativo capaz de controlar e manter, de modo constante, a velocidade de alimentação do arame a um valor desejado e ótimo. Tal controle conseguiu-se mediante a regulação da corrente de soldagem. Devido às dificuldades típicas dos processos GMAW, em face do grande número de variáveis principais e de sua interdependência, Carrino *et al.* implementaram uma solução através da modelagem de um sistema com base na lógica difusa, cujos elementos foram determinados por meio de dados experimentais, igual aos modelos matemáticos, baseados na análise de regressão múltipla, com o fim último de proporcionar um período de comparação e avaliar a eficácia do enfoque difuso em frente aos métodos matemáticos. Os resultados do referido estudo confirmam a eficácia do enfoque proposto no desenvolvimento de um sistema de soldagem integrado visando o aumento da produtividade.

Eguchi *et al.* (1999) desenvolveram um novo método de soldagem, denominado “o método de solda em ziguezague”, visando controlar a penetração completa em uma peça soldada por múltiplas camadas. Para tanto, pretendeu-se obter uma parte baixa do cordão estável. Aqueles autores propuseram uma rede neuronal (NN) que pudesse monitorar o arco, que estima a extensão livre do eletrodo e o comprimento do arco conforme as medições da tensão e a corrente. Por outra parte, desde a saída da ANN, estima-se a abertura e o erro (desvio) por oscilação da tocha com o centro da ranhura da peça, além de um sistema baseado em lógica *fuzzy* para orientação e controle da tocha de solda. Os dados de treinamento e o desenho das ações de controle foram tomados a partir dos resultados experimentais e do conhecimento do processo.

Bae *et al.* (2002) desenvolveram um sistema de monitoramento visual para a primeira passada de um tubo de aço na soldagem automática por arco metálico com gás (GMAW). O sistema consistiu de uma câmera (CCD) e lentes, um capturador de fotogramas, algoritmos de processamento de imagens e um controlador *fuzzy*. Um manipulador de

cinco eixos especialmente projetado foi utilizado para inserir a tocha e proporcionar acesso ao sensor de visão à posição de soldagem. Durante o referido processo, foram capturadas imagens da poça de fusão e seus arredores. As imagens foram processadas para reconhecer a forma da poça. Para o rastreamento da solda, utilizou-se o controlador *fuzzy* para ajustar a posição do manipulador da tocha com base na imagem da poça e o centro da ranhura para soldagem. A solda automática demonstrou que diante da implementação correta de um sistema *fuzzy*, seria possível o controle das variáveis do processo a fim de obter uma soldadura de boa qualidade.

Em 2010, Coelho realizou uma modelagem da geometria de cordões de solda através da lógica *fuzzy*. Foram obtidas relações entre os parâmetros de soldagem: tensão, corrente e velocidade de soldagem, com os parâmetros geométricos do cordão: largura e reforço. Fez-se ainda uma análise da influência de cada parâmetro após a formalização das regras Fuzzy e da definição das funções de pertinência. Foram utilizados como método de inferência o modelo de Mamdani e o método do Centróide para defuzzificação. Para desenvolver o referido modelo, foram selecionados como parâmetros os cordões que possuíam parâmetros de soldagem definidos como baixo, médio ou alto. Os demais parâmetros foram utilizados para testar o modelo e validá-lo após a implementação.

3.4 VISÃO GERAL DO MONITORAMENTO NA SOLDAGEM

Atualmente, não existe um sistema de monitoramento disponível comercialmente que satisfaça todos os requisitos, as aplicações e a precisão necessária para a implementação de um sistema de controle ideal nos diferentes processos de soldagem, ainda que alguns sensores se empregassem com sucesso em aplicações específicas. Na revisão literária aqui exposta, foi possível a apresentação de diferentes investigações e aplicações desenvolvidas na área de monitoramento da soldagem.

Os sistemas de solda tipicamente automatizados são capazes de controlar a corrente, a velocidade de soldagem, a tensão do arco e a posição da tocha. No entanto, as referidas variáveis geralmente são controladas em função de algumas condições previamente determinadas, e não segundo as condições reais do processo. Muitas tentativas foram empregadas para a obtenção de um método de detecção das diferentes características do processo de soldagem em tempo real, de modo que pudessem ser controladas adequadamente.

Fez-se o uso das medições infravermelhas da temperatura do metal de base para um controle retroalimentado. No entanto, tanto a radiação do arco como do eletrodo, interferiram significativamente nas medições feitas no metal de base (Farson *et al*, 1998). Neste sentido, Li e Zhang (2000) desenvolveram um modelo teórico para relacionar a radiação da luz do arco com os parâmetros de solda. Outros experimentos também se fizeram com a tecnologia do ultrassom e do filtrado cromático da radiação térmica (Miller *et al*, 2002). E ainda, outras técnicas foram desenvolvidas utilizando-se o enfoque com base na inteligência artificial para a previsão de parâmetros do processo (Balfour *et al*, 2000; Luo *et al*, 2002). Também foi identificada a tentativa do monitoramento da poça de fusão para aplicações específicas, como, por exemplo, na soldagem de tubos de aço, na soldagem por curto circuito com arco de CO₂ e na soldagem por laser de chapas delgadas (Ancona *et al*, 2004; Sun *et al*, 2006; Frazer *et al*, 2000; Du *et al*, 2000).

Durante os últimos anos, têm surgido estudos que fazem o uso das técnicas mais complexas. Um estudo realizado por Huang e Kovacevic (2009) utilizou os sinais acústicos para o controle *on line* da profundidade de solda. Aqueles autores registraram e analisaram os sinais acústicos gerados durante o processo de soldagem por laser em aço de alta resistência DP980. Um microfone foi utilizado para adquirir os sinais, bem como um método de subtração espectral para reduzir o ruído, além da utilização de um método de estimativa da densidade do espectro de potência visando para analisar as características de frequência dos sinais acústicos. O referido estudo mostrou que com os sinais supracitados, é possível distinguir as soldas de boa qualidade das soldas de má qualidade, e que o sinal adquirido pode ser utilizado para controlar a penetração da solda. Observou-se também que o estudo do som do arco pode ser fortemente relacionado com o processo e os parâmetros de qualidade da solda (Pal *et al*, 2010). Outro estudo fez uso de sensores infravermelhos, ultravioleta e de som, simultaneamente, a fim de controlar a penetração da solda. Os sensores infravermelhos foram utilizados para detectar a radiação térmica, os sensores de raios ultravioletas para medir a radiação óptica, e os sensores de som para medir o estado da penetração da solda (Zhang *et al*, 2008; Allende *et al*, 2008).

A técnica de espectroscopia, com base na aquisição dos espectros ópticos emitidos desde a estela do plasma gerada pelo laser, foi utilizada para pôr em prática um algoritmo que calcula a temperatura do jato de plasma, analisando as correlações entre as linhas espectrais selecionadas (Sibillano *et al*, 2009).

Em 2008, Song e Zhang utilizaram a propriedade de reflexão da superfície da poça de fusão. No referido estudo, se projetou uma matriz de pontos de luz laser sobre a superfície especular da poça, e seu reflexo foi fotografado. Em seguida, a imagem refletida distorcida foi capturada e processada. Com base na informação obtida, dois esquemas de reconstrução, denominados esquema de reconstrução por interpolação (IRS) e esquema de reconstrução por extrapolação (ERS), foram utilizados para reconstruir a piscina de fusão em três dimensões de forma *off line*.

A luz do arco de solda pode ser vista como um sinal que dispõe de informação essencial sobre o processo de soldagem. A informação contida no sinal pode ser explorada no rastreamento do processo. Em 2009, um estudo realizado por Weglowski emprega a referida ideia para o rastreamento da soldagem MIG.

A contínua redução no custo das câmeras e dos sistemas de iluminação nos últimos anos tem permitido a utilização cada vez mais frequente de sistemas de visão, como, por exemplo, sensores a obtenção da informação sobre a solda. Neste sentido, fez-se uma investigação para desenvolver um sistema de visão, que pudesse ser utilizado para a visualização direta da poça (Chen *et al*, 2003; Wu *et al*, 2000).

Zhang e Kovacevic (1996) utilizaram um modelo de coordenadas polares para a caracterização geométrica da poça de fusão. Desenvolveu-se um algoritmo de rede neural para identificar os parâmetros de soldagem em tempo real. Apesar da utilização de iluminação laser de forma pulsada para iluminar a poça, a interferência da luz do arco foi claramente visível nas imagens obtidas.

Um sistema de visão com luz estroboscópica e um sistema de controle neuro-difuso foram utilizados para o controle do processo de soldagem por arco (Hong *et al*, 2000).

Outras investigações fizeram uso de câmeras para observar o banho de solda sem a utilização de nenhuma fonte de iluminação. Estes sistemas de visão careciam de iluminação adequada e, portanto, as imagens obtidas foram demasiadamente escuras quando se diminuiu o tempo de obturação da câmera, ou demasiadamente brilhante quando o tempo de obturação foi incrementado. Bae *et al*. (2002), por exemplo, utilizaram um sistema de visão para o monitoramento da união soldada (poça de fusão). Uma câmera CCD foi utilizada no sistema de visão para capturar imagens da poça, mas a interferência

da luz de arco resultou em um importante problema a ser sanado, e as imagens obtidas sofreram, em grande parte, pela presença de luz do arco.

Em Wu *et al.* (2003), fez uso de uma câmera CCD em combinação com um filtro de luz para formar um sistema de visão, tendo em vista que não se utilizou a iluminação. As imagens da piscina de fusão resultaram demasiadamente escuras, com zonas muito brilhantes no centro devido à intensa luz de arco.

Devido aos grandes avanços na tecnologia, os sistemas de monitoramento com dispositivos de visão têm sido comumente estudados e aplicados nos últimos anos, ainda que se almeje a superação da principal dificuldade na detecção baseada na visão da geometria da poça de fusão e a formação do cordão de solda, tal qual a forte interferência da luz do arco em um amplo espectro luminoso. No entanto, se insiste na implementação deste tipo de sistema, uma vez que uma das principais vantagens da utilização desta tecnologia de detecção para supervisionar as operações de soldagem é o fato de que este tipo de sensoriamento não é invasivo e não interfere no processo, e as imagens da poça de fusão contêm informação abundante, necessitando-se a devida atenção às características da solda.

4. METODOLOGIA

A modelagem e o controle da altura do reforço e da largura do cordão de solda apresenta uma abordagem que agrega ferramentas hardware e software, com o propósito de obter domínio dos parâmetros geométricos no processo GMAW visando gerar soluções de automação e promover o aumento da produtividade e qualidade na indústria. Os procedimentos e os métodos desenvolvidos são apresentados em duas partes. A primeira, chamada de equipamentos e materiais, contém a descrição dos equipamentos, consumíveis e componentes da bancada experimental. A segunda, chamada de procedimento experimental, relaciona-se com a modelagem através de redes neurais, o processamento digital de imagens e descreve o projeto dos controladores fuzzy. Uma vez realizadas, estas concretizam a implementação do sistema de controle da altura do reforço e da largura do cordão, conforme detalhamento na Figura 4. 1, a seguir.

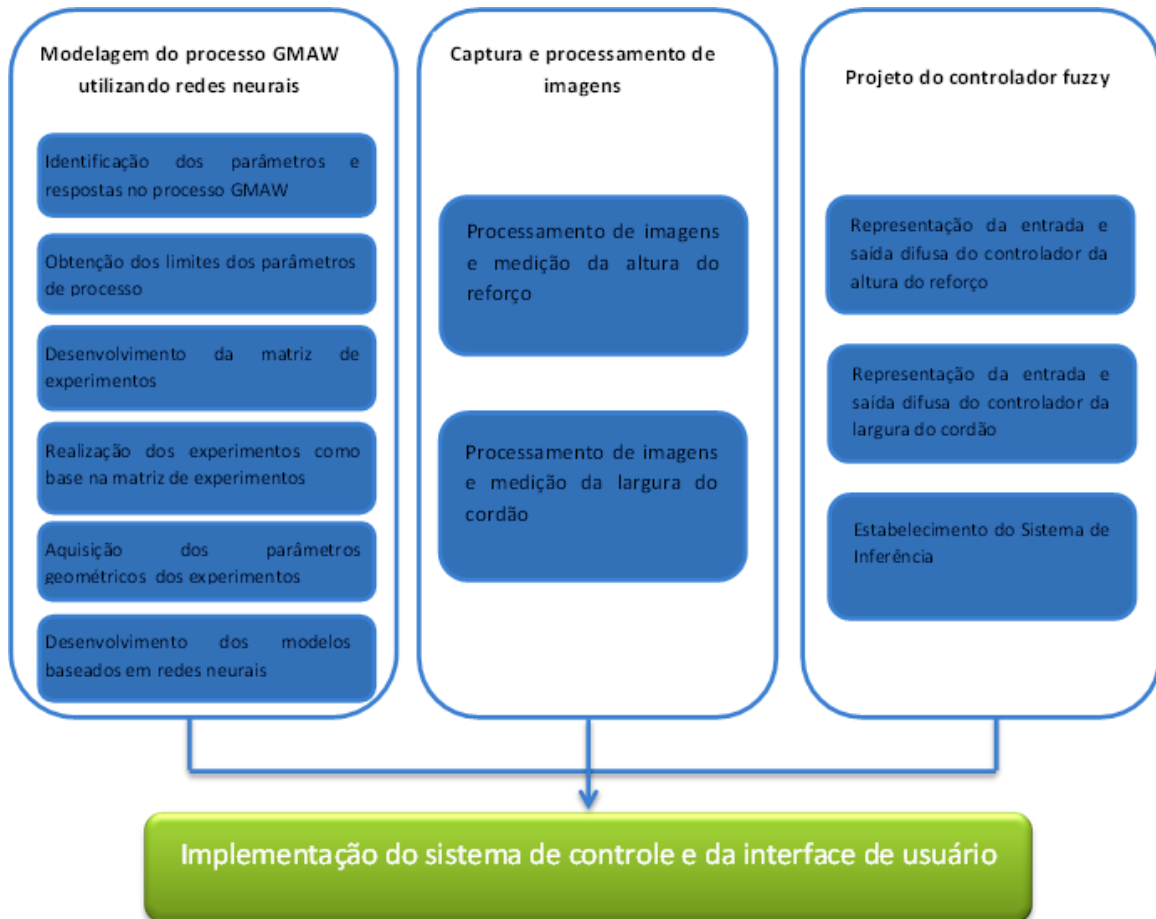


Figura 4. 1: Esquema do procedimento experimental desenvolvido para o trabalho

EQUIPAMENTOS E MATERIAIS

Na Figura 4. 2 se apresenta a distribuição do sistema computacional e hardware utilizado.

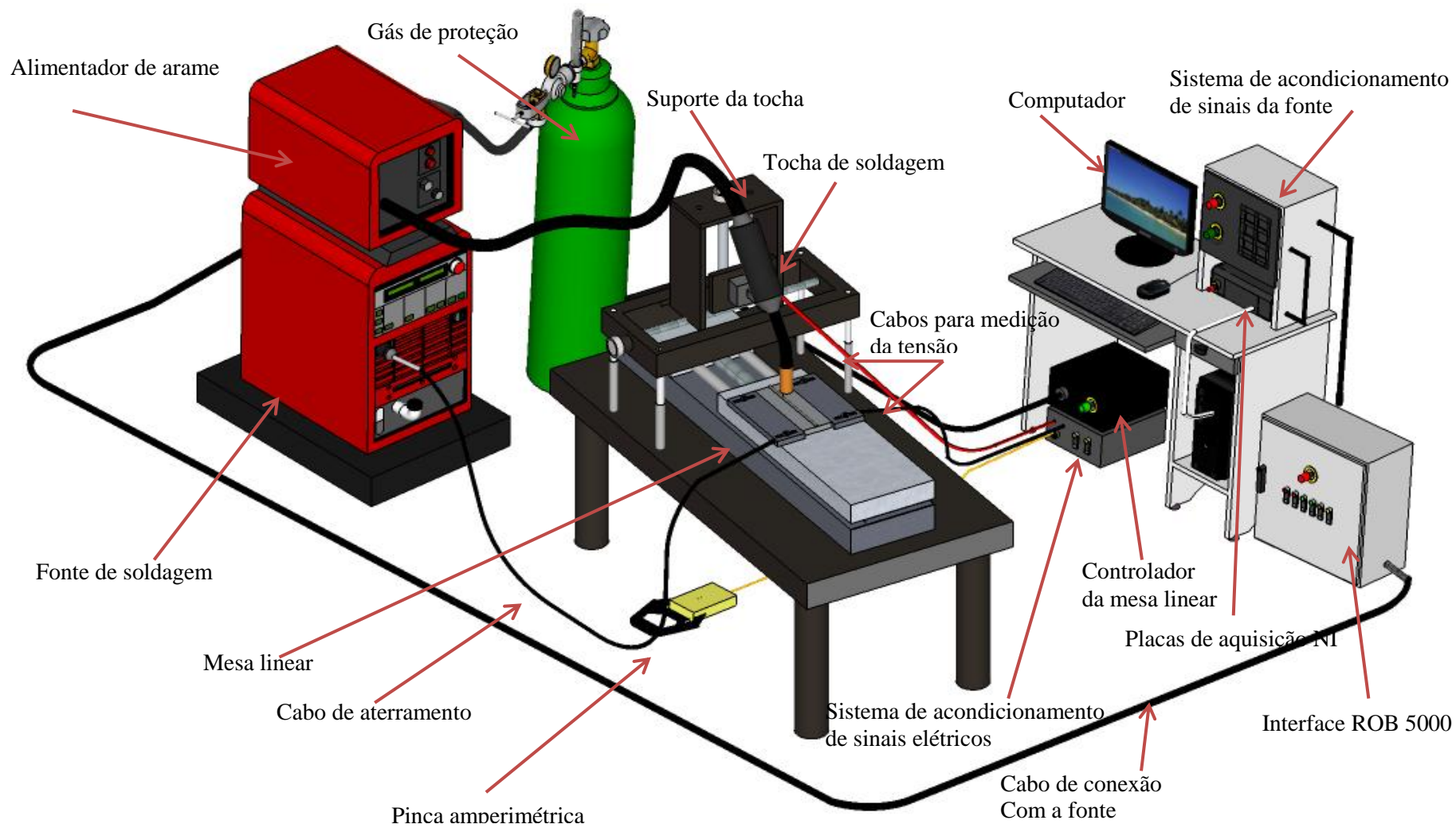


Figura 4. 2: distribuição do sistema computacional e hardware utilizado neste trabalho.

A seguir detalha-se brevemente cada um dos dispositivos da bancada experimental utilizada, a bancada experimental está composta por quatro sistemas principais, como são o sistema de soldagem, sistema de comunicação e controle da fonte de soldagem, sistema de aquisição de imagens, sistema de aquisição dos sinais elétricos.

4.1.1 Sistema de soldagem

4.1.1.1 Fonte de soldagem

A fonte de soldagem utilizada é uma fonte Fronius TransPuls Synergic 5000, realiza os processo de soldagem de SMAW, GTAW e GMAW. Para o desenvolvimento do presente trabalho no processo GMAW a fonte trabalha no modo tensão constante, sendo as variáveis reguladas a tensão de soldagem e a velocidade de alimentação do arame.

A fonte de soldagem possui entradas e saídas analógicas e digitais para o comando e para a aquisição de dados; além disso, para o processo GMAW, possui o sistema alimentador de arame, VR 1500, equipado com sistema de 4 roletes que possibilita a alimentação de arame de diversos tipos, a velocidade do fio é regulada digitalmente e está disponível na faixa de 0–12, 0-22 ou 0-30 m/min.

4.1.1.2 Computador

O computador industrial de marca ADVANTECH de referencia ICP-622 contém uma placa de aquisição de dados PCI Eagle 703s encarregada da aquisição e armazenamento dos sinais de tensão de arco e corrente de soldagem, além de ser responsável por realizar a comunicação, com ajuda de duas placas NI USB 6009 da National Instruments, entre o computador e a interface ROB 5000, que por vez comunica o computador com a fonte de soldagem e a mesa de deslocamento linear. A manipulação da fonte, da mesa de deslocamento linear e a aquisição dos sinais são feitas por meio de programas desenvolvidos nas ferramentas software *LabVIEW* 13 da National Instruments e *MATLAB* 12a da Mathworks.

4.1.1.3 Mesa de deslocamento linear

A mesa de deslocamento linear é uma plataforma que se pode deslocar linearmente numa direção, onde é colocada e assegurada a peça que será soldada. O deslocamento da peça é transmitido por um motor de passo através de um parafuso sem fim. Mediante

este mecanismo se consegue configurar a velocidade, o tempo e o sentido de soldagem por meio de parâmetros enviados para o controlador da mesa desde a placa NI USB 6009 conectada ao computador. A Figura 4. 3 apresenta um diagrama da mesa de deslocamento linear.

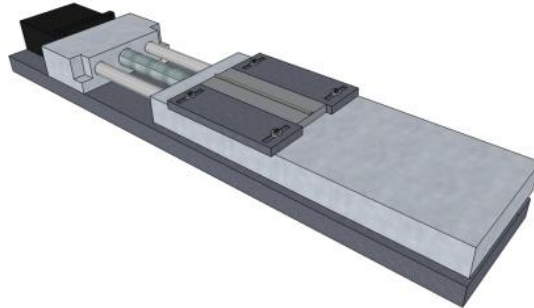


Figura 4. 3: Mesa de deslocamento linear.

4.1.1.4 Materiais e consumíveis

Os materiais e consumíveis usados neste trabalho, de acordo com as disponibilidades do laboratório foram:

- Eletrodos: Neste trabalho foram usados dois tipos de arame com o objetivo de verificar a aplicabilidade e repetibilidade da metodologia proposta para diferentes condições de soldagem, o primeiro é um arame maciço AWS A5.18 ER70S com diâmetro de 1 mm e o segundo é um arame tubular (*metal cored*) da classe 410NiMo MC com diâmetro de 1.2 mm.
- Material de base: O material do metal de base utilizado foi de aço AISI 1020 em formato de chapa plana, com dimensões 6,35 mm de espessura, 200 mm de comprimento e 50 mm de largura.
- Gás de proteção: O gás é um *StarGold* mistura comercial de 96% Ar + 4% CO₂.

4.1.2 Sistema de comunicação e controle da fonte de soldagem

Foi projetado um sistema hardware e software de comunicação entre o computador e a fonte de soldagem para controlar os parâmetros de soldagem em tempo real e garantir que a saída do processo seja a desejada. A manipulação da fonte é feita com o computador por meio de uma placa de aquisição da NI USB 6009, um sistema de

acondicionamento de sinais, uma interface para robôs ROB 5000 e um software de monitorização e controle desenvolvido no MATLAB.

Inicialmente para realizar a comunicação entre o computador e o ROB 5000 utiliza-se a placa NI USB-6009, a qual permite o envio de toda a informação desde o software em MATLAB ao sistema de acondicionamento de sinais para a configuração da fonte, ajustes nos parâmetros do processo e as ações de controle, junto com a recepção dos dados correspondentes a os sinais da fonte. A conexão é feita graças às características da placa com seus oito canais de entradas analógicas, seus dois canais de saídas analógicas, seus 12 canais digitais de entrada-saída e seu conversor A/D de 14 bits, além da capacidade de amostragem de 48KS/s, sendo esta conectada ao computador via *USB full speed*. O sistema de acondicionamento de sinais conta com amplificadores operacionais e um conjunto de relés de estado sólido para adequar e interconectar os sinais provenientes da placa da *National Instruments* com o ROB 5000.

A interface analógico-digital ROB 5000 conta com entradas e saídas na faixa de 0 a 10 volts para os sinais analógicos e de 0 a 24 volts para os sinais digitais. As entradas e saídas digitais são usadas para a configuração dos modos de trabalho da fonte e para a ativação do processo de soldagem, as entradas analógicas são usadas para manipular as variáveis do processo de soldagem. O controle da velocidade de alimentação do arame e da tensão de soldagem é feito em base à relação da faixa de saída do ROB5000 de 0 a 10 volts com os valores de processo de 0 a 22 m/min e de 0 a 40 volts respectivamente. Das saídas analógicas pode ter se informação para a visualização do comportamento dos sinais gerados pela fonte de soldagem.

4.1.3 Sistema de aquisição de imagens

Para a aquisição das imagens realizada nesta pesquisa utilizou-se uma câmera web Wc045 e um filtro clássico ou cristal inactínico DIN 10 usado nos capacetes de soldagem. O filtro é utilizado para suprimir a maior parte da luz do arco, permitindo que apenas uma gama de comprimentos de onda limitado, como ditado pelas características do filtro, ilumine a poça de fusão e sua área circundante. Isto reduz a sensibilidade da imagem da câmara para as flutuações na intensidade de luz do arco gerado durante o processo de soldagem. A câmera é ligada ao computador via porto USB e por meio de um software desenvolvido em MATLAB são adquiridas e analisadas as imagens obtidas

pelo sistema permitindo que as medições da altura do reforço possam ser feita durante a fase de formação da solda. A Figura 4. 4 e Figura 4. 5 a seguir, apresentam a posição da câmera para determinar a altura do reforço e a largura do cordão, além da posição do filtro e do sistema de proteção do aparato, dado que o ambiente onde os equipamentos ópticos estão instalados é bastante hostil e apresenta muitos respingos.

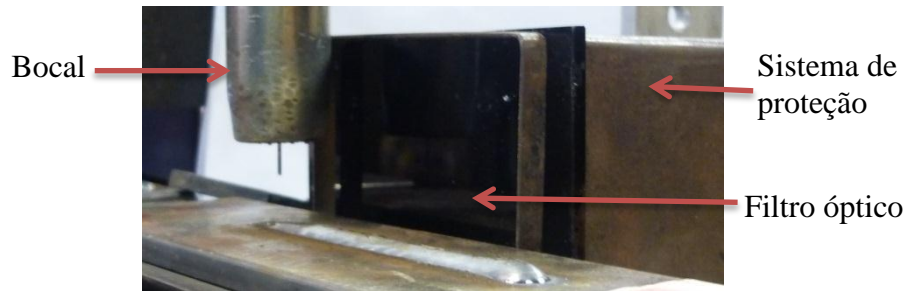


Figura 4. 4: Distribuição e localização do sistema de aquisição de imagens utilizado para determinar a altura do reforço.

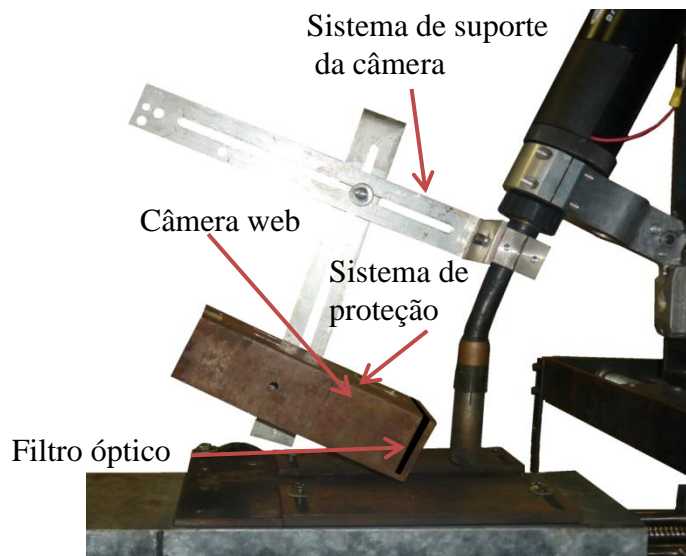


Figura 4. 5: Distribuição e localização do sistema de aquisição de imagens utilizado para determinar a largura do cordão.

4.1.4 Sistema de aquisição dos sinais elétricos

A estabilidade do processo de soldagem é uma propriedade do arco elétrico, a continuidade da estabilidade do arco no processo de soldagem tem implicação direta na qualidade final da solda, na penetração, no acabamento do cordão e na redução da presença de respingos. Um arco ideal para um processo estável apresenta algumas características destacáveis das variáveis do processo, dessa forma, torna-se necessário

dar ênfase no sensoriamento dos parâmetros para alcançar satisfatoriamente um controle do processo.

Os sinais ‘corrente de soldagem’ e ‘tensão do arco’ foram capturados nos experimentos com ajuda de um sistema de aquisição de sinais, o qual tem a função de acondicionar e isolar as variáveis elétricas do processo. Este sinal é isolado opticamente do computador para reduzir o ruído elétrico de origem eletromagnético e proteger das sobretensões e transientes. O sistema de aquisição dos sinais elétricos está composto por uma pinça amperimétrica *Fluke i1010 CA/CC* que utiliza o método do efeito hall para a medição da corrente e um divisor de tensão resistivo para a medição da tensão. Esses sinais são adquiridos a uma taxa de 20 kHz por meio da placa de captura de dados *PCI Eagle 703s* contida no computador, os dados dos sinais são visualizados e armazenados por meio de um software no LabVIEW e posteriormente processados e analisados em MATLAB.

4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.2.1 Modelagem do processo GMAW utilizando redes neurais

4.2.1.1 Identificação dos parâmetros e respostas no processo GMAW

A determinação dos parâmetros de soldagem apropriados para a solda é um tema muito complexo. O GMAW é o processo mais complicado em termos de seleção e ajuste de seus parâmetros devido ao seu elevado número de variáveis e a forte inter-relação entre elas, onde uma pequena mudança de um parâmetro afetará a todos os outros parâmetros, isto, e o aumento gradual das exigências num sem número de aplicações na indústria, faz que seja difícil projetar uma tabela de valores que mostre os parâmetros de soldagem ótimos para diferentes circunstâncias. Requerem-se consideráveis habilidades e experiência para selecionar os valores ótimos para cada aplicação. Estes valores ótimos são afetados pelo tipo de metal de base, a composição do eletrodo, a posição de soldagem e os requisitos de qualidade. Por tanto, não há um conjunto único de parâmetros que produza resultados ótimos em todos os casos.

Como este trabalho se foca no controle dos parâmetros geométricos altura do reforço e largura do cordão se elegeram os parâmetros de processo tensão, velocidade de alimentação do arame e velocidade de soldagem para o estudo, já que a literatura

especializada reconhece que estes parâmetros permitem obter relações entre o comportamento elétrico do arco, o processo de transferência de massa, a aparência e a geometria do cordão de solda. Foram mantidas fixas as variáveis distância bico de contato peça a uma altura de 15 mm, vazão de gás de proteção de 15 lt/min e um ângulo de inclinação da tocha de 90°.

4.2.1.2 Obtenção dos limites dos parâmetros de processo

As faixas de trabalho de todos os parâmetros selecionados se fixam mediante a realização de provas. Isto foi feito mediante a variação de um dos fatores, mantendo o resto deles como valores constantes. A faixa de trabalho de cada um dos parâmetros do processo se decidiu mediante a inspeção do cordão de solda, procurando cordões de aparência lisa e sem defeitos visíveis. Os valores limites dos parâmetros de soldagem são apresentados na Tabela 4. 1: Valores limites dos parâmetros de soldagem.

Tabela 4. 1: Valores limites dos parâmetros de soldagem.

Parâmetros de soldagem	FAIXA	
	MIN	MAX
Velocidade de arame (m/min)	4.5	8.5
Tensão (V)	16	30
Velocidade de soldagem (mm/s)	6	14

4.2.1.3 Desenvolvimento da matriz de experimentos

A escolha de uma configuração adequado em relação ao experimento a ser realizado é fundamental para o treinamento das redes neurais utilizadas para ajustar os modelos ao conjunto de dados recolhidos nos pontos do desenho. Por conseguinte, uma vez que as redes neurais não apresentam uma metodologia para definir o numero de experimentos, no presente estudo se fez uso de um Planejamento Composto Central (PCC) (em inglês, *Central Composite Design*) com o fim de examinar o comportamento das variáveis de resposta no domínio experimental. O PCC conta com um desenho fatorial 2^3 aumentado com seis pontos axiais e um ponto central. Serão realizados os ensaios de soldagem, fazendo a variação nos parâmetros de processo com base nos pontos do PCC para posteriormente avaliar e caracterizar a influencia destes na geometria dos cordões. A

Figura 4. 6 apresenta uma representação do planejamento experimental baseado no PCC para três variáveis de entrada.

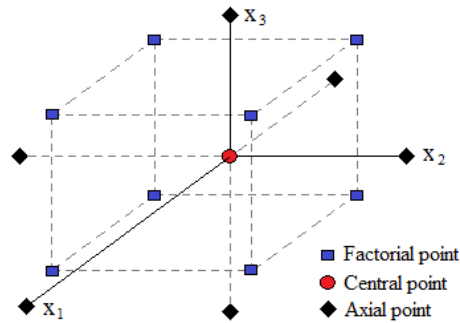


Figura 4. 6: Desenho Central composto para três variáveis.

O número de corridas ao centro e a distância dos pontos axiais (α) do PCC escolheu-se para um desenho rotativo, onde:

$$\alpha = (F)^{1/4},$$

Sendo F o número de pontos da parte fatorial isto é 8, então

$$\alpha = (8)^{1/4} = 1.682.$$

As unidades apresentadas anteriormente na Figura 4. 6 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.

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

Em que:

x_j = indica o nível codificado;

ξ = o valor real da variável;

J = representa a variável;

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

A Tabela 4. 2, a seguir, apresenta os níveis codificados e os seus valores reais correspondentes para cada parâmetro de processo selecionado dentro das suas faixas de trabalho.

Tabela 4. 2: Níveis codificados e os valores reais para cada parâmetro de processo.

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

Os valores correspondentes aos níveis codificados foram arredondados para poder usá-los na fonte de soldagem. Com a combinação dos valores das variáveis indicados na Tabela 4. 2 realizou-se a matriz de experimentos. Na Tabela 4. 3, a seguir, tem-se os experimentos escolhidos e os níveis codificados junto com os valores correspondentes para cada variável do processo.

Tabela 4. 3: Matriz de experimentos.

No Exp	Níveis			Faixa		
	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3
1	-1	-1	-1	5.5	19	8
2	1	-1	-1	7.5	19	8
3	-1	1	-1	5.5	27	8
4	1	1	-1	7.5	27	8
5	-1	-1	1	5.5	19	12
6	1	-1	1	7.5	19	12
7	-1	1	1	5.5	27	12
8	1	1	1	7.5	27	12
9	-1.682	0	0	4.8	23	10
10	1.682	0	0	8.2	23	10
11	0	-1.682	0	6.5	16.3	10
12	0	1.682	0	6.5	29.7	10
13	0	0	-1.682	6.5	23	6.6
14	0	0	1.682	6.5	23	13.4
15	0	0	0	6.5	23	10

4.2.1.4 Realização dos experimentos como base na matriz de experimentos

Para a realização dos experimentos, foram executadas as soldas com cada combinação das variáveis do processo indicadas na Tabela 4. 3. Dado que neste trabalho procura-se desenvolver uma metodologia que permite obter cordões com uma altura de reforço e largura desejada procurando que a implementação desta possa ser incluída nas aplicações não só de pesquisa senão também da indústria, além disso, sabendo da mudança importante que pode se apresentar no processo ante uma alteração em

qualquer uma de suas variáveis, se pretendeu verificar a repetibilidade e aplicabilidade da metodologia proposta a variações nas condições do processo realizando os mesmos ensaios indicados na matriz de experimentos para os arames tubular e maciço. Para cada arame foram feitas 15 cordões de 15 cm cada um, totalizando 30 testes. As soldas para cada tipo de arame foram executadas aleatoriamente como pede a definição da metodologia do desenho experimental com o planejamento composto central.

4.2.1.5 Aquisição dos parâmetros geométricos obtidos dos experimentos

Para a medida da geometria do cordão soldado foi desenvolvido um sistema de *scanner* (vide Figura 4. 7). O sistema similar a um veículo suporta uma câmera web e um gerador de linha laser, que permitem analisar o perfil, a estrutura e a presença de descontinuidades ou porosidade de cada cordão analisado. Estas características são detectadas mediante uma combinação de movimento do mecanismo, triangulação laser, captura e processamento de imagens.

A deslocação do veículo é governado por um sistema de controle constituído por uma placa *arduino* de 14 pinos digitais e 6 analógicos, junto com circuitos condicionadores de sinais, relés de estado sólido e um transformador para o motor.

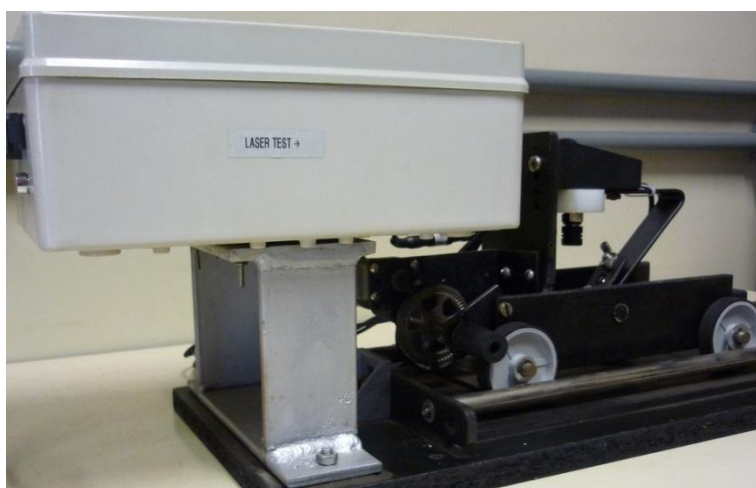


Figura 4. 7: Sistema de *scanner*.

A técnica de triangulação laser consiste na interpretação da imagem gerada por uma linha laser refletida na superfície que se deseja analisar, baseada nos princípios teóricos do comportamento da deformação perspectiva que se produz devido ao ângulo de incidência do laser com respeito à câmera.

A Figura 4. 8, a seguir, mostra uma configuração típica câmara-laser para reconstrução em 3D de objetos.

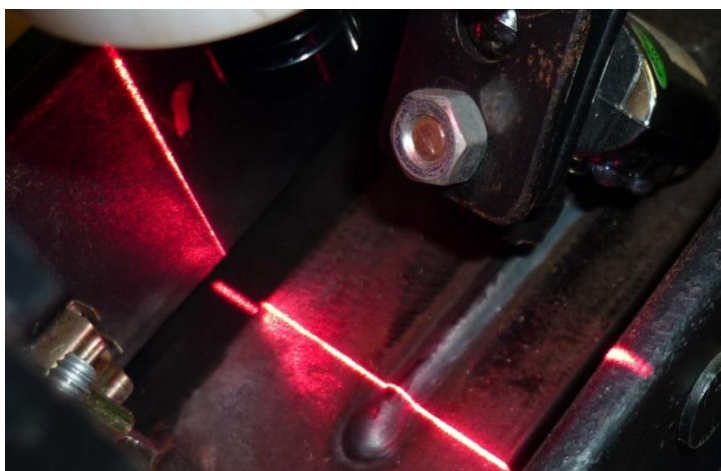


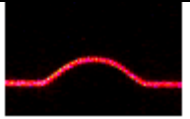
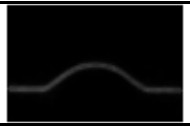
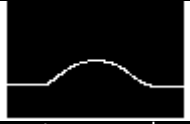

Figura 4. 8: Técnica de triangulação laser.

O funcionamento básico do sistema de *scanner* consiste na aquisição através da câmara do perfil do laser refletido sobre o cordão, dito perfil constitui o elemento básico utilizado para a reconstrução. A forma da linha varia em função da altura e da largura do objeto. À medida que o conjunto formado pela câmara e o laser desloca-se sobre a peça, a imagem mostra uma acumulação de perfis consecutivos adquiridos a intervalos constantes durante o movimento sobre a peça.

A outra parte do sistema usa um software implementado em MATLAB, no qual as imagens são recebidas e processadas para criar perfis tridimensionais. A seguir, as dimensões do cordão de solda tais como a altura do reforço, a largura e a área do reforço ou área depositada são medidas.

Um perfil do cordão e a sequência do processamento da imagem são mostradas na Tabela 4. 4. Nesta tabela apresenta-se o conjunto de técnicas de processamento de imagens utilizadas na etapa de medição das respostas dos experimentos. Um cordão reconstruído em 3D mostra-se na Figura 4. 9.

Tabela 4. 4: Processamento das imagens obtidas da etapa de escaneamento.

<p>1. Obtenção da imagem original</p>	
<p>2. Conversão da imagem a tons de 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.</p>	
<p>4. Medição dos pixels que representam a geometria externa do cordão (reforço, largura e área depositada) e conversão das medidas em milímetros.</p>	

Depois do processamento de todas as imagens e obtenção da reconstrução 3D do cordão, conforme apresentado na Figura 4. 9, a seguir, são feitas as medições das dimensões das características geométricas, com ajuda do software de escaneamento, o qual dada a representação do perfil de todos os parâmetros e da seleção da zona na qual se deseja fazer a medição, gera as medidas dos parâmetros de maneira individual apresentando duas medidas, a primeira, a medida média de cada uma das características geométricas dentro da faixa elegida, e a segunda é a medida do erro com respeito a “*não uniformidade*” do cordão de solda (desvio padrão da medida desejada). As medidas das características geométricas do cordão obtidas da reconstrução são apresentadas na Figura 4. 10.

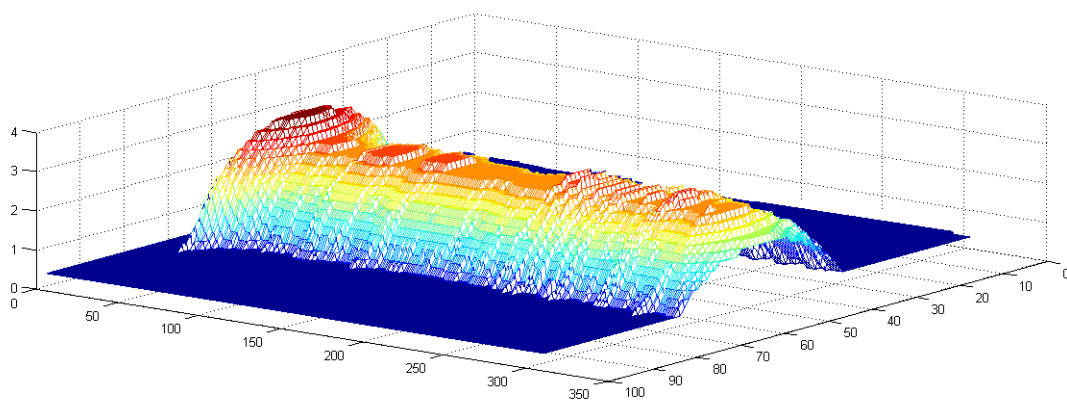


Figura 4. 9: Reconstrução do cordão de solda em 3D.

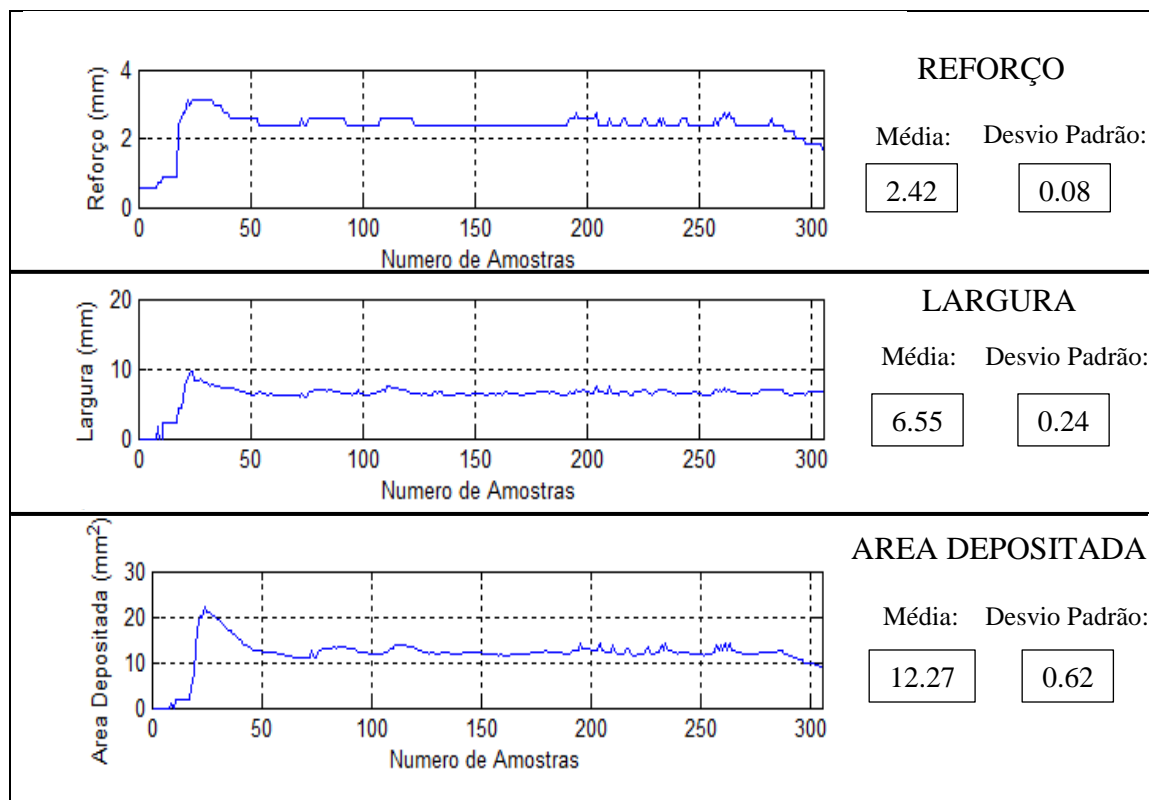


Figura 4. 10: Medidas das características geométricos do cordão.

4.2.1.6 Desenvolvimento dos modelos baseados em redes neurais artificiais

Neste trabalho para o desenvolvimento dos modelos baseados em redes neurais artificiais estuda-se a abordagem da identificação experimental tendo em vista o interesse no desenvolvimento de uma metodologia para a obtenção de modelos a partir de dados observados. Dado que essa abordagem permite um tratamento genérico na modelagem de sistemas de natureza variada, complexos e de muitas variáveis, como é o processo de soldagem GMAW.

Para construir os modelos da altura do reforço e a largura do cordão de solda tendo em conta os parâmetros de processo seleccionados anteriormente se utilizou a identificação experimental, para através das medidas obter o modelo do sistema. Foram escolhidas como entradas às redes neurais os valores médios dos reforços e larguras para os cordões produzidos nas provas realizadas e suas respectivas medidas do desvio padrão, os quais foram fornecidos a partir dos resultados da etapa de aquisição dos parâmetros geométricos obtidos dos experimentos. Como saída das redes foram estabelecidas as variáveis de processo velocidade de alimentação do arame, tensão e velocidade de soldagem.

A medida do desvio padrão foi considerada como entrada já que este valor ajuda garantir que o erro com respeito a “*não uniformidade*” do cordão de solda seja o mínimo, isto é que o cordão resultante seja homogêneo ou que apresente a maior regularidade possível na característica geométrica requerida. Para conseguir isto foram implementadas uma serie de condições no algoritmo de modelado e controle que fazem que o sistema após escolhido o reforço (R) ou a largura (L) procure do conjunto de medidas obtido na parte experimental, os valores que se encontrem numa faixa de $R-0.2 < R < R+0.2$ no caso do reforço e na faixa $L-0.4 < L < L+0.4$ no caso da largura. Uma vez obtidos estes valores realizou-se uma comparação dos valores com o correspondente conjunto dos desvios padrões, para assim selecionar a dupla de parâmetros (medida do reforço ou largura do cordão e seu correspondente desvio padrão) que satisfaz a condição e que apresente o menor valor do desvio padrão como entrada na rede neural. No caso de não se encontrar nenhum valor o sistema toma por default como desvio padrão um valor de 0.2 para o reforço e 0.4 para a largura, além do valor do reforço ou largura que foi definido como desejado.

Para a obtenção dos modelos baseados em redes neurais artificiais, foi utilizado o *Neural networks Toolbox* de MATLAB, o qual é um software para desenvolvimento de aplicações com redes neurais disponível na modalidade de domínio público. Para a concepção do modelo são necessárias diversas etapas, as quais são descritas em seguida.

- Definição da Topologia das redes neurais

Na elaboração do modelo mediante RNA uma das tarefas mais difíceis é determinar o número de elementos de processamento, bem como o número de camadas ocultas. Não existem regras para isto, levando a um sem numero de enfoques na literatura para obter topologias adequadas, mas sem nenhum que generalize o processo para a grande quantidade de aplicações que existem em redes neurais, devendo se escolher a arquitetura dependendo das necessidades e as características do processo a modelar.

Este elemento importante dentro da modelagem com redes neurais tradicionalmente é realizado mediante a experiência sobre o processo e ensaio com diferentes estruturas até encontrar uma adequada. Esta tarefa além de ser complexa e não sistêmica, pode também conduzir a redes demasiado pequenas com pouca capacidade de aprendizagem, ou redes demasiado complexas com excesso de treinamento. A

alternativa para conseguir esta tarefa tem sido a realização de diferentes testes que tentam, a partir de uma rede simples, acrescentar camadas intermediárias e o número de neurônios nas camadas ocultas para melhorar a rede. Os diferentes testes para a obtenção da topologia certa para a rede neural foram feitos no *Neural networks Toolbox* de MATLAB, a fim de acelerar esta tarefa e fazer o processo de modelado menos complexo do que é, já que esta ferramenta implementa a estrutura da maior parte dos tipos de redes e as funções necessárias para trabalhar com elas. Este software oferece uma implementação genérica de redes neuronais, bem como implementações de redes neurais concretas como as *backpropagation*, *perceptron*, etc.

As arquiteturas das redes selecionadas como resultado dos testes apresentam uma topologia de conexões para frente o *feedforward* composta por uma camada de entrada constituída por dois neurônios (medida desejada e desvio padrão da medida), três camadas ocultas formadas por 80, 60 e 40 neurônios para a rede do reforço e por 50, 100 e 50 neurônios para a rede da largura, além de uma camada de saída para cada rede formada por três neurônios que representam as variáveis do processo (tensão, velocidade de alimentação do arame, velocidade de soldagem).

- Método de treinamento das redes neurais

Com base nos estudos pesquisados e os testes realizados, pode-se afirmar que para o tipo de topologia selecionada o tipo de treinamento mais adequado é o método de aprendizagem supervisionado e com algoritmo de retropropagação do erro ou *backpropagation*.

Basicamente, o processo de retropropagação do erro é constituído de duas fases: uma fase de propagação do sinal funcional e uma de retropropagação do erro. Na fase de propagação do sinal funcional, os vetores de dados são aplicados às unidades de entrada, e seu efeito se propaga pela rede, camada a camada. Finalmente, um conjunto de saídas é produzido como resposta da rede; durante esta fase, os pesos das conexões são mantidos fixos. Na retropropagação do erro, por outro lado, os pesos são ajustados de acordo com uma regra de correção do erro. Especificamente, a resposta da rede em um instante de tempo é subtraída da saída desejada para produzir um *signal de erro*. Este sinal de erro é propagado da saída para a entrada, camada a camada. Os pesos são

ajustados de forma que a distância entre a resposta da rede e a resposta desejada seja reduzida (HAYKIN, 2001).

Em as redes implementadas e testadas neste trabalho utilizou-se função de ativação linear na saída. Tendo em vista a simplicidade desejada para os neurônios foi escolhida para todas as camadas intermediárias a função de ativação tangencial, a qual é uma função monotonica não-decrescente que limita o intervalo de variação da derivada da função e apresenta valores de ativação positivos e negativos no intervalo (-1, 1).

- Treinamento da rede neural

Para modelar a altura do reforço e a largura do cordão as redes neurais artificiais foram treinadas para cada tipo de arame. Cada rede foi usada para prever os parâmetros que produzem cordões de solda de boa qualidade. Todos os parâmetros do processo obtidos dos experimentos foram normalizados na faixa de [-1, 1].

Dos 30 experimentos realizados, o MATLAB realiza a 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 testar a capacidade de generalização da rede, esta divisão dos dados foi feita utilizando a função *dividerand*. As redes com a topologia e método de treinamento escolhidos anteriormente foram configuradas com a função de transferência *tansig*, a função 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 *learnsgdm*, que tem por base o descenso do gradiente. A função mse é usada para avaliar o desempenho das redes, calcula o erro quadrático médio e se utiliza para avaliar a precisão da rede neuronal. Os pesos sinápticos iniciais foram inicializados aleatoriamente.

Definidas e configuradas as redes adequadamente, os dados de treinamento são apresentados à RNA repetidamente e a cada ciclo de treinamento os pesos são ajustados através de uma informação complementar que indica a correta classe de saída, até que a função de custo seja reduzida a um valor aceitável.

Quanto ao tempo de treinamento, vários fatores podem influenciar a sua duração, porém sempre será necessário utilizar algum critério de parada. O treinamento deve ser

interrompido quando a rede apresentar uma boa capacidade de generalização e quando a taxa de erro for suficientemente pequena, ou seja, menor que o erro admissível. Assim, deve-se encontrar um ponto ótimo de parada com erro mínimo e capacidade de generalização máxima. O critério de parada do algoritmo *backpropagation* não é bem definido, e geralmente é utilizado um número máximo de ciclos neste caso se definirem 10000 iterações, considerando também a taxa de erro médio por ciclo e a capacidade de generalização da rede.

- Teste da rede neural

Depois de as redes serem treinadas se apresentam às entradas o conjunto de dados de teste de forma que ela deve ser capaz de oferecer a saída correta para novas entradas que não foram proporcionadas à rede no momento do treinamento, ou seja, novos valores da altura do reforço ou da largura desejados e dos desvios padrão se apresentam aos neurônios de entrada e a rede deve ser capaz de interpolar entre o que ela já aprendeu para dar seu veredicto dos valores ideais de saída (tensão, velocidade de alimentação do arame e velocidade de soldagem), para os novos dados de entrada.

4.2.2 Captura e processamento de imagens

A geometria e a qualidade da solda resultante não só se determinam pela adequada comunicação com os equipamentos de soldagem e a seleção correta dos parâmetros, senão também pela habilidade de monitorar e controlar o que ocorre no processo. Por esta razão, requer-se um sistema de sensoriamento que proporcione medidas viáveis da geometria do cordão de solda, obtendo informação importante sobre o processo, que pode ser utilizada pelo controlador para ajustar os parâmetros de soldagem com o fim de permitir soldas adequadas. Tudo isso têm conduzido a um interesse crescente no uso de sensores para proporcionar robusta e precisa monitorização do processo em tempo real, onde isto não se pode conseguir através de enfoques mais tradicionais e técnicas de inspeção. No entanto, as maiorias destas técnicas concentraram-se em aplicações específicas e têm levado ao desenvolvimento de sistemas de soldagem semiautomática em lugar de sistemas totalmente automatizados. As técnicas que se baseiam em sistemas de visão até agora têm sido afetadas pelo alto custo dos componentes e não são úteis para os sistemas de produção, em muitos casos porque

estes sistemas de detecção são volumosos, muito caros de produzir e só são adequados para aplicações específicas.

No entanto, neste trabalho, propõe-se um sistema de visão compacto e de baixo custo para a medida das características geométricas estudadas. Este sistema baseia-se na aquisição de imagens mediante um *webcam*, que são geralmente mais acessíveis e têm características que as fazem mais atraentes que as volumosas e caras câmaras de alta velocidade. Igualmente o sistema projetado elimina com sucesso a maioria da luz intensa do arco mediante o uso de filtros comuns e uma quantidade considerável de informação pode se obter em tempo real da formação da solda e da geometria do cordão. Também foi desenvolvido um algoritmo versátil para proporcionar um processamento em tempo real de imagens empregando uma abordagem genérica para a execução do algoritmo, o que permite que uma grande variedade de dispositivos de captura de imagem pode ser utilizada.

A abordagem alternativa utilizada neste trabalho faz uso das vantagens do MATLAB no processamento de imagens para tomar medições da altura do reforço e da largura durante a formação de uma solda. O software de processamento é configurado para realizar a aquisição, análise da imagem e gerar as medições necessárias, a uma taxa de 10 frames por segundo.

Uma potencial desvantagem da utilização deste método é a forte influência da luz do arco nas imagens adquiridas, dificultando seu correto tratamento. Por este motivo fez-se necessário o uso do cristal inactínico procurando diminuir a maior interferência possível da intensidade luminosa na imagem obtida. Além disso, trabalhar com uma imagem inteira pode envolver uma quantidade significativa de processamento. Por isso, no algoritmo a imagem é redimensionada com uma função do *Image Acquisition Toolbox* de MATLAB transformando-a para uma resolução de imagem menor, a fim de limitar a quantidade de processamento necessário e obter tratamento da informação em tempo real. Da mesma forma, o alinhamento preciso da câmera e a calibração posicional elimina a necessidade de redimensionar, girar ou mover a posição de elementos de referência relativos e permite identificar uma determinada área da imagem a ser processada.

Cada imagem obtida é armazenada como uma matriz de elementos (pixels) cujos índices de fila e coluna identificam um ponto na imagem e cujo valor coincide com o nível de intensidade da luz nesse ponto. Posteriormente utilizaram-se técnicas de processamento digital de imagens para reduzir os efeitos do ruído e melhorar o contraste, mediante uma transformação da imagem a escala de cinzas e a aplicação de um filtro de mediana para eliminar pixels isolados; além disso, se realizou a binarização das imagens, 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 ($f(x, y)$), tom cinza à imagem, transformando uma imagem representada em tom cinza em uma imagem binária ($g(x, y)$), em preto e branco, considerando-se '0' os pixels correspondentes ao objeto e '1' àqueles do fundo ou vice-versa. Neste sentido, aplicou-se a equação 4.2, exposta a seguir.

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

4.2.2.1 Processamento de imagens e medição da altura do reforço

Na medição da altura do reforço o maior problema para a utilização deste método é a forte influência da luz do arco nas imagens adquiridas, dificultando seu correto tratamento, como se mostra na Figura 4. 11. Por este motivo fez-se necessário cobrir o bocal procurando diminuir a interferência da intensidade luminosa na imagem obtida.

Uma imagem adquirida, recortada e pronta para o processo de análises pode ser vista na Figura 4. 12, a seguir.



Figura 4. 11: Imagem adquirida com forte influência da luz do arco.



Figura 4. 12: Imagem adquirida e recortada.

Depois que a imagem é cortada utilizam-se as técnicas de processamento digital de imagens para a transformação da imagem a escala de cinzas e a aplicação de um filtro de mediana para eliminar pixels isolados como se mostra na Figura 4. 13.



Figura 4. 13: Imagem em escala de cinzas e filtro de mediana.

Posteriormente se realizou a binarização da imagem, conforme apresentado na Figura 4. 14, a seguir.



Figura 4. 14: Imagem Binarizada.

A técnica de análise de imagens utilizada para a medição da altura do cordão basicamente procura na imagem binarizada os pixels que representam as bordas da poça de fusão, a peça de trabalho e o cordão de solda. Isto é conseguido utilizando a seguinte abordagem.

Uma vez binarizada a imagem, procede-se a encontrar a fila de *pixels* onde se encontra o metal de base. Procura-se fazendo o percurso pixel a pixel começando do vértice inferior direito da imagem de abaixo para acima e de direita a esquerda de toda a matriz de elementos, até encontrar a linha que delimita a franja onde termina a peça de trabalho e onde inicia o cordão de solda, como é ilustrado na Figura 4. 15.



Figura 4. 15: Fila de *pixels* onde se encontra o metal de base.

Quando o processo para a localização do metal de base na imagem tem sido concluído, as colunas dos extremos horizontais para a delimitação da zona na qual será medido o reforço podem ser encontradas. A posição em que estes pontos localizam-se ao longo da matriz de elementos é achada deslocando-se fila a fila e coluna a coluna pela matriz. Um movimento vertical descendente fila por fila dentro de cada coluna desde o vértice superior esquerdo da imagem é realizado até encontrar o pixel em branco que demarque o limite esquerdo e o início da zona para a medição. Para encontrar o limite direito o deslocamento vertical descendente começa no vértice superior direito percorrendo todas as filas de cada coluna até encontrar o elemento que representa o extremo direito. A Figura 4. 16 representa os limites horizontais encontrados para delimitar a zona na qual se procedera à medição da altura do reforço num cordão de solda.

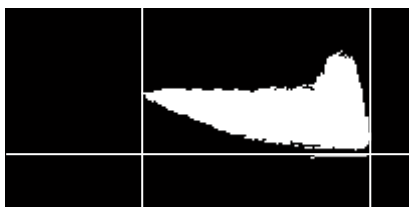


Figura 4. 16: Limites horizontais.

Com o objetivo de evitar a região em que ainda se apresenta a maior interferência pela luz do arco, se elege como localização para a medida um ponto a uma distância considerável da poça de fusão, mas que ainda presente boa definição para um adequado calculo da altura do cordão. Isto foi feito dividendo a zona demarcada pelos limites das bordas em três partes, a coluna é selecionada na fronteira entre o primeiro e segundo terço da divisão partindo do limite esquerdo da zona como se mostra na Figura 4. 17, a seguir. Esta coluna foi escolhida já que esta nesta região encontram-se as posições de menor erro com relação a influencia do arco, portanto, as prováveis melhores posições para a identificação do cordão de solda.

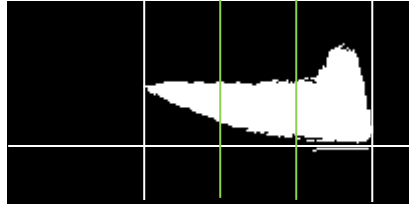


Figura 4. 17: Localização da zona para a medida da altura do reforço.

Uma vez localizada a coluna aonde vai se medir o reforço procede se a fazer a contagem da quantidade de *pixels* entre a borda do cordão e a fila onde se encontra o metal de base. Isto é percorrendo esta coluna de acima para abaixo até encontrar a fila na matriz que delimita o início do cordão. A diferença entre os dois pontos (fila da borda do cordão e do metal de base) na coluna representa a altura do cordão de solda em *pixels*. Uma representação do expressado anteriormente é mostrada na Figura 4. 18, a seguir.

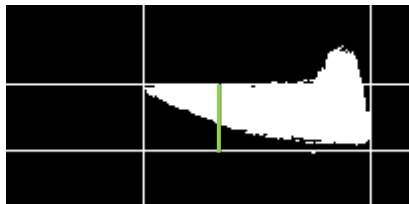


Figura 4. 18: Medida do Reforço.

O ultimo passo nesta abordagem para o tratamento das imagens no processo é a conversão de pixels em milímetros, através de um modelo adquirido na etapa de calibração posicional da câmara. Obtendo assim as medidas das alturas dos cordões, que serão usadas posteriormente na etapa de controle.

4.2.2.2 Processamento de imagens e medição da largura do cordão

Antes da aquisição das imagens da largura do cordão, a câmara é posicionada de tal maneira que se foca na zona onde se encontra o cordão de solda.

A imagem adquirida pode ser observada na Figura 4. 19, a seguir. Na Figura é possível identificar a zona da poça de fusão e a zona onde se encontra o cordão de solda.

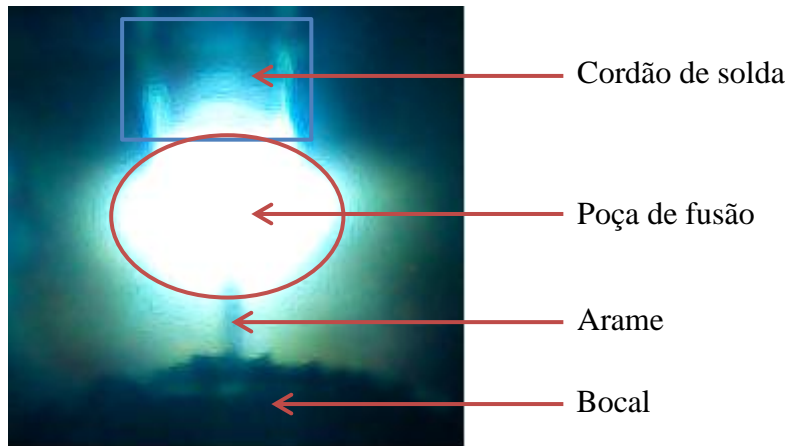


Figura 4. 19: Imagem adquirida pela webcam da poça de fusão e da zona do cordão de solda.

Depois que a imagem é obtida utilizam-se as técnicas de processamento digital de imagens para a transformação da imagem a escala de cinzas e a aplicação de um filtro de mediana para eliminar pixels isolados, conforme evidenciado na Figura 4. 20 (a). Posteriormente se realizou a binarização da imagem, conforme apresentado na Figura 4. 20 (b), a seguir.



Figura 4. 20: (a) Imagem escala de cinzas e filtro de mediana, (b) Imagem Binarizada.

Na Figura 4. 21, a seguir, é possível observar como a poça de fusão pode ser aproximada a uma elipse.



Figura 4. 21: 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. 22, a seguir.

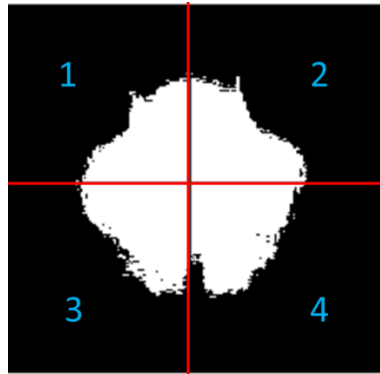


Figura 4. 22: Imagem em 4 seções.

Conforme apresentado na Figura 4. 22, o cordão de solda se encontra nas seções 1 e 2. Neste sentido, para encontrar a medida da largura, é preciso encontrar 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, estabeleceu-se 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. 23, a seguir.

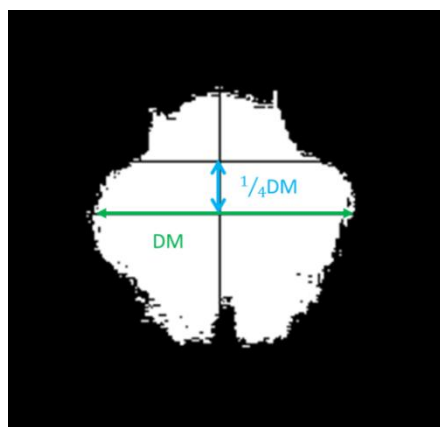


Figura 4. 23: Seleção da zona do cordão da imagem.

repetições, gerando a linha que representa a largura do cordão como uma média dos índices das filas.

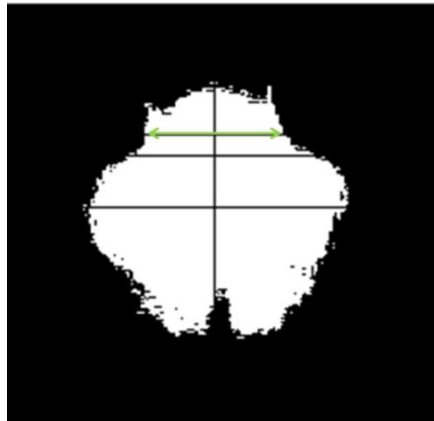


Figura 4. 25: Seleção da fila onde será medido o cordão.

4.2.3 Projeto do controlador fuzzy

Neste trabalho para a implementação do controlador fuzzy baseado no método de inferência *Mamdani* foi necessária a definição de alguns parâmetros. Estes parâmetros foram definidos a partir da experiência, pesquisa de literatura e através de experimentos. Dada a complexidade do processo, alguns dos parâmetros são mantidos fixos, dentro das condições normais de operação, sendo que outros precisam ser alterados no tempo.

Visando o controle em tempo real, fez-se necessária a pesquisa da influencia dos parâmetros de processo na geometria do cordão de onde é evidenciado que a velocidade de alimentação do arame influi fortemente nas características do reforço num cordão de solda, dado que uma mudança da velocidade de alimentação de arame também mudará a velocidade de adição de material de recheio o que afetará à forma do cordão final. Por isto a velocidade de alimentação do arame foi escolhida como a variável a manipular no processo para realizar o controle da altura do cordão. No caso da largura do cordão a velocidade de soldagem é o parâmetro de processo que influi mais fortemente, dado que uma mudança da velocidade de soldagem produz um comportamento inverso na deposição de material e, por conseguinte na largura do cordão de solda.

A seguir apresentam-se as etapas de projeto do controlador difuso proposto. Para implementar os conjuntos difusos, o sistema de inferência e a defuzzificação que

permitam obter a altura do reforço e a largura do cordão desejada foi usado o *Fuzzy Logic Toolbox* do MATLAB.

4.2.3.1 Representação da entrada e saída difusa do controlador da altura do reforço

Como a entrada do controlador toma-se o valor do erro na medida do reforço, o qual é a diferença entre a altura do reforço desejada e o valor da medida do reforço obtida pelo sistema de aquisição de imagens. Para a variável de entrada foram utilizadas sete funções de pertinência, cinco de forma triangular como são negativo alto (NA), negativo médio (N), aceitável (C), positivo médio (P), positivo alto (PA), e dois de forma trapezoidal chamadas negativo muito alto (NMA) e positivo muito alto (PMA). A representação difusa e as variáveis linguísticas do erro na medida são apresentadas na Figura 4. 26.

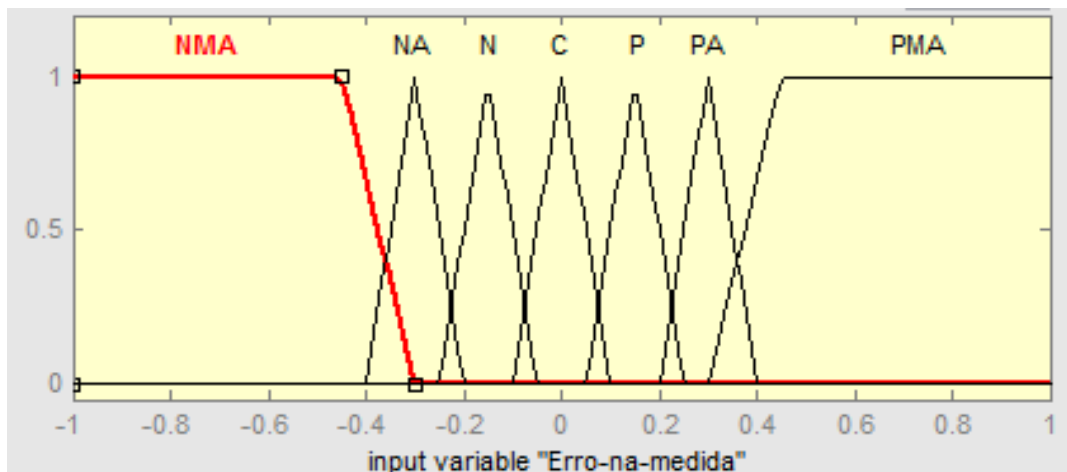


Figura 4. 26: Variável de entrada e suas funções de pertinência no controle da altura do reforço.

Para o controlador, a saída que se propõe parte da necessidade de corrigir o processo para chegar à dimensão desejada do reforço no cordão, isto mediante a modificação da velocidade de alimentação do arame. A saída do controlador velocidade de alimentação corresponde ao ajuste que se deve fazer em dito parâmetro de processo em procura de diminuir o erro na medida. Este ajuste é positivo se o erro na medida é negativo (valor medido maior que o valor desejado), negativo se o erro é positivo (valor desejado maior que o valor medido) e sem ajuste no caso de que não se apresente erro ou aceitável, isto é que não exista diferença ou que seja muito pequena entre os valores medidos e os desejados. Para a variável de saída foram utilizadas cinco funções de pertinência quatro

de forma trapezoidal e uma de forma triangular, chamadas baixar muito (BM), baixar (B), manter (M), subir (S) e subir muito (SM). A Figura 4. 27, exibe a representação difusa e as variáveis linguísticas da saída do controlador.

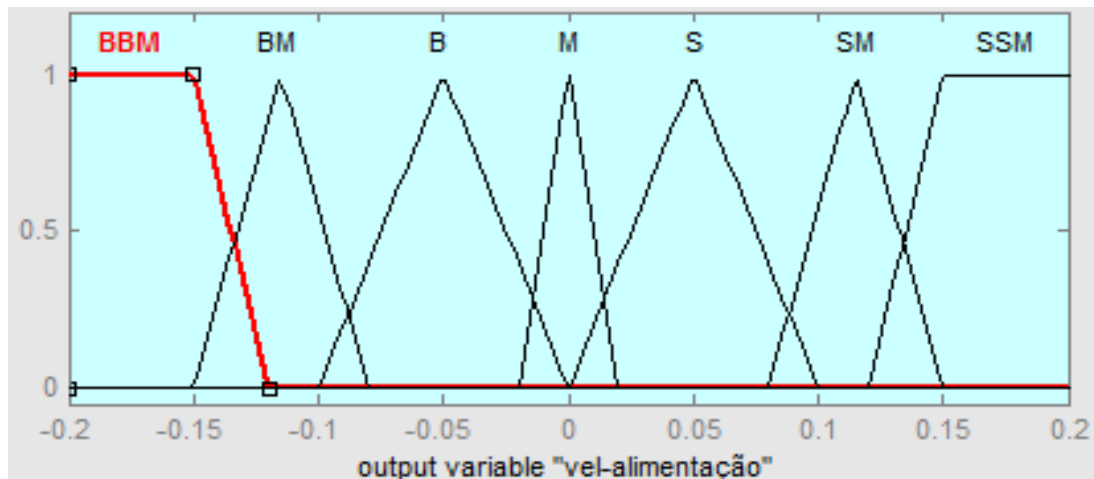


Figura 4. 27: Variável de saída e suas funções de pertinência no controle da altura do reforço.

4.2.3.2 Representação da entrada e saída difusa do controlador da largura do cordão

Para a variável de entrada, foram utilizadas sete funções de pertinência (vide Figura 4. 28): 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.

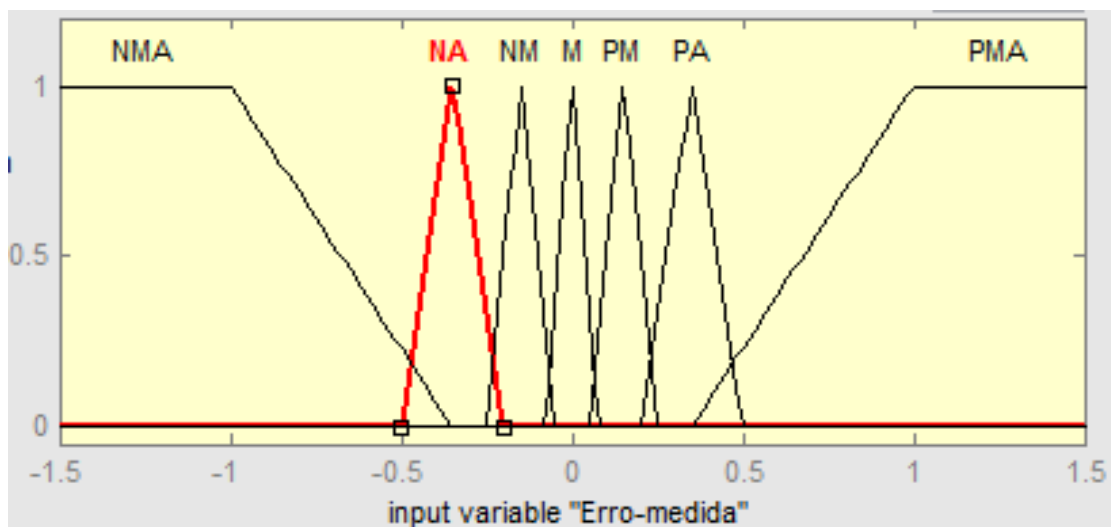


Figura 4. 28: Variável de entrada e suas funções de pertinência no controle da largura do cordão.

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. 29, 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.

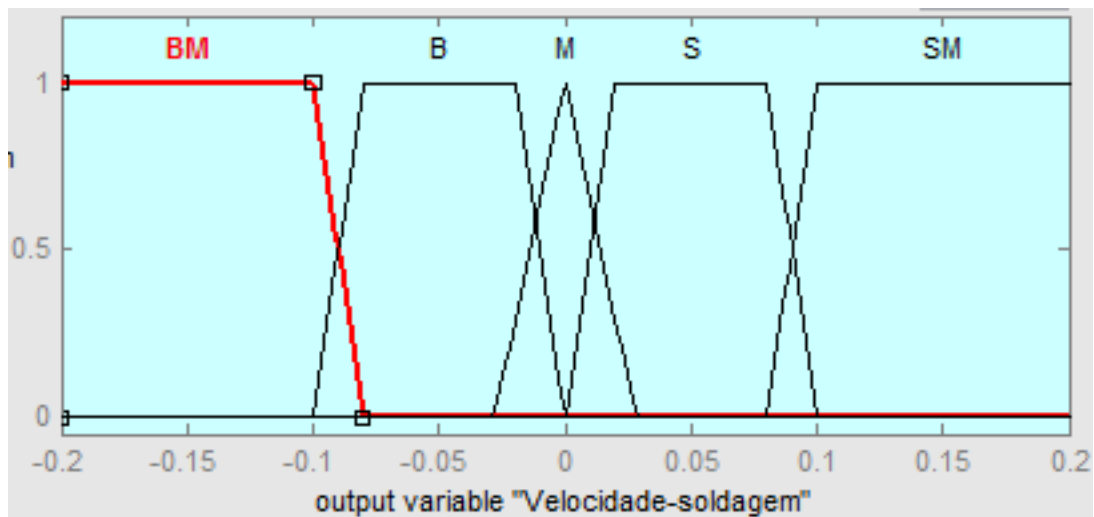


Figura 4. 29: Variável de saída e suas funções de pertinência no controle da largura do cordão.

4.2.3.3 Estabelecimento do Sistema de Inferência

Tendo a entrada e a saída do controlador podem-se estabelecer as relações existentes a partir das regras de inferência difusa. Tomando a estrutura IF (premissa correspondente à entrada erro na medida com respeito ao parâmetro geométrico desejado) THEN (ajuste necessário no parâmetro do processo relacionado) podem-se deduzir as regras que configuram o sistema de inferência de acordo as possíveis situações que se podem apresentar no processo, as regras do sistema de inferência se apresentam na Figura 4. 30, a seguir, para o controle da altura do reforço e na Figura 4. 31, para o controle da largura do cordão.

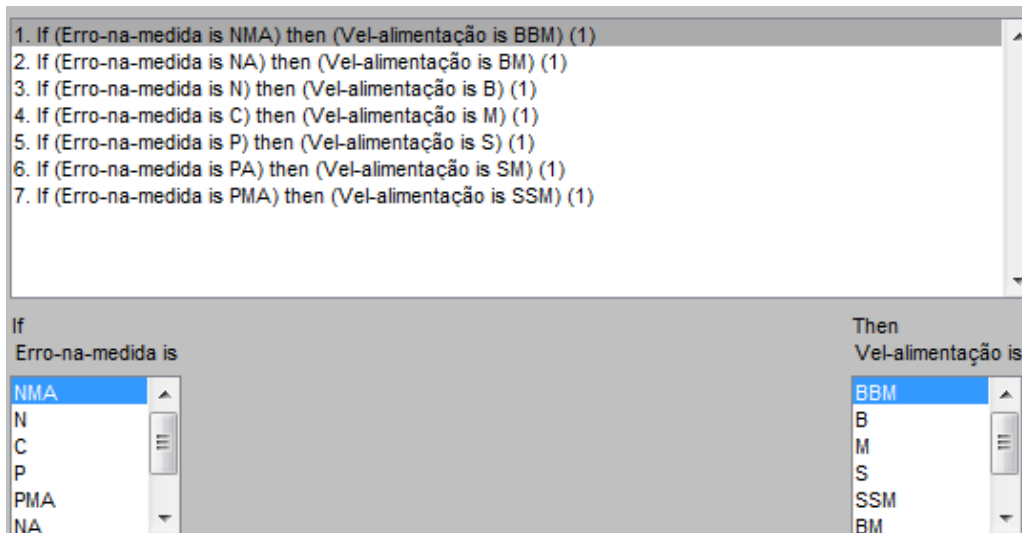


Figura 4. 30: Regras de Inferência Difusa para o controlador da altura do reforço.

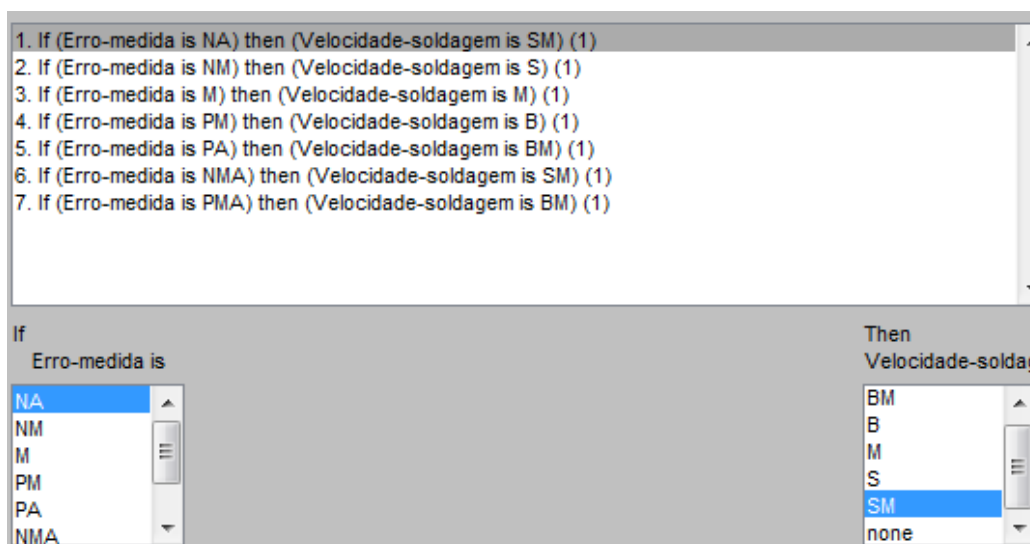


Figura 4. 31: Regras de Inferência Difusa para o controlador da largura do cordão.

Com os sistemas de inferência difusa definidos, procede-se a realizar a defuzzificação, que é a encarregada de tomar os valores obtidos da avaliação de cada uma das regras do sistema de inferência e produzir uma saída precisa. Um dos métodos mais utilizados para obter a defuzzificação é o método do *centroide*. Este método tem como saída o ponto que divide a área da função de pertinência em duas partes iguais, isto é, o valor numérico que representa o centro de gravidade da distribuição de probabilidade do conjunto *fuzzy* de saída. O ponto obtido na etapa de defuzzificação é a saída do controlador, o qual será transformado numa tensão equivalente no sistema de comunicação e controle da fonte de soldagem ou da mesa de deslocamento linear, qualquer que seja o caso, e assim exercer as ações de controle pertinentes.

4.2.4 Implementação do sistema de controle e da interface de usuário

Uma vez cumpridas as etapas de modelagem, tratamento das imagens e projeto do controlador, procede-se à implementação do sistema de controle integrando as redes neurais treinadas, o processamento proposto das imagens e os controladores fuzzy. No esquema da Figura 4. 32, é possível observar a malha de controle empregada para a altura do reforço, onde se observa que a saída da planta do processo GMAW (altura do reforço do cordão) se compara com a referência para determinar o erro, sinal que ingressa ao controlador *fuzzy*. No esquema da Figura 4. 33, é possível observar da estratégia de controle em tempo real para a largura do cordão, onde 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.

Para facilitar o monitoramento e realizar a comunicação com o processo de soldagem, desenvolveu-se uma interface gráfica de usuário no MATLAB que contém todos os algoritmos gerados nesta metodologia, tanto para o controle da altura do reforço como da largura do cordão, onde o usuário pode visualizar e manipular a informação referente à configuração a utilizar do processo de soldagem e ao controle dos parâmetros geométricos estudados. Além de contar com gráficos para avaliar o funcionamento do controle e detectar as tendências no comportamento do processo. Na Figura 4. 34 apresenta a interface gráfica de usuário desenvolvida para o controle da altura do reforço no cordão de solda.

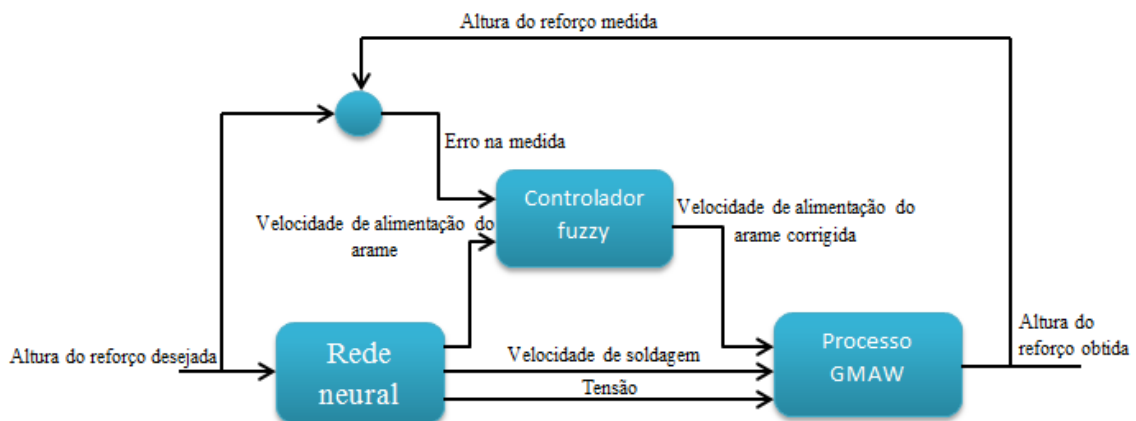


Figura 4. 32: Arquitetura do sistema desenvolvido para o controle da altura do reforço.

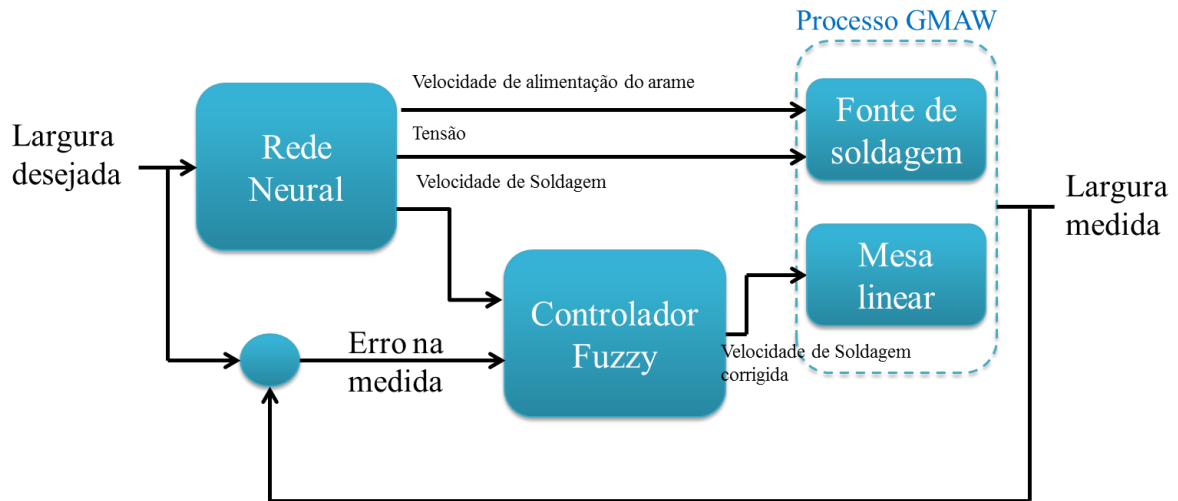


Figura 4. 33: Arquitetura do sistema desenvolvido para o controle da largura do cordão.

Figura 4. 34: Interface gráfica de usuário para o monitoramento, configuração e controle da altura do reforço.

5. RESULTADOS

No presente capítulo, têm-se os resultados obtidos no referencial literário exposto anteriormente, divididos em duas partes, a saber: a primeira, os resultados do projeto, ou seja, a descrição dos resultados obtidos em cada uma das etapas apresentadas na metodologia proposta; a segunda, os resultados de implementação, onde se encontram os resultados obtidos no sistema em operação, ou seja, os resultados no controle da altura do reforço e da largura do cordão no cordão de solda para o processo GMAW (*Gás Métal Arc Welding*).

5.1 RESULTADOS DO PROJETO

5.1.1 Obtenção dos modelos da altura do reforço e da largura do cordão de solda

Para modelar a altura do reforço e a largura, foram extraídos – com o uso do sistema de *scanner* – os perfis referentes às características geométricas externas de cada cordão. Os cordões foram obtidos a partir das provas indicadas na matriz de experimentos apresentados anteriormente na Tabela 4. 3. As medidas extraídas com o sistema de *scanner* da altura do reforço e da largura junto com o desvio padrão de cada cordão gerado com os dos tipos de arame encontram-se na Tabela 5.1 e Tabela 5.2.

Tabela 5.1: Resultados experimentos do desenho central composto para o reforço.

No Exp	Níveis			Arame Maciço		Arame Tubular	
				Altura do reforço (mm)		Altura do reforço (mm)	
	x_1	x_2	x_3	μ	σ	μ	σ
1	-1	-1	-1	2.09	0.09	3.56	0.18
2	1	-1	-1	2.56	0.08	4.04	0.25
3	-1	1	-1	1.62	0.10	2.63	0.14
4	1	1	-1	2.22	0.11	3.08	0.09
5	-1	-1	1	1.76	0.08	2.74	0.11
6	1	-1	1	2.08	0.13	3.11	0.16
7	-1	1	1	1.40	0.14	2.32	0.13
8	1	1	1	1.89	0.13	2.67	0.11
9	-1.682	0	0	1.57	0.12	2.31	0.12
10	1.682	0	0	2.21	0.12	3.20	0.11
11	0	-1.682	0	2.07	0.34	3.52	0.17
12	0	1.682	0	1.71	0.10	2.71	0.14
13	0	0	-1.682	2.31	0.09	3.17	0.13
14	0	0	1.682	1.60	0.09	2.44	0.11
15	0	0	0	1.82	0.10	2.76	0.17

Tabela 5.2: Resultados experimentos do desenho central composto para largura do cordão.

No Exp	Níveis			Arame Maciço		Arame Tubular	
				Largura do cordão (mm)		Largura do cordão (mm)	
	x_1	x_2	x_3	μ	σ	μ	σ
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 obtidos referentes aos ensaios apresentados nas Tabela 5.1 e Tabela 5.2, criaram-se duas redes neurais para cada um dos arames, referentes às duas características geométricas estudadas, que utilizam como entrada os valores médios das alturas dos reforços e das larguras para os cordões produzidos (μ) e suas respectivas medidas dos desvios-padrões (σ); como saída, tem-se as variáveis de processo velocidade de alimentação do arame (V_{alim}), tensão (T) e velocidade de soldagem (V_{sol}), conforme evidenciado na Figura 5.1.

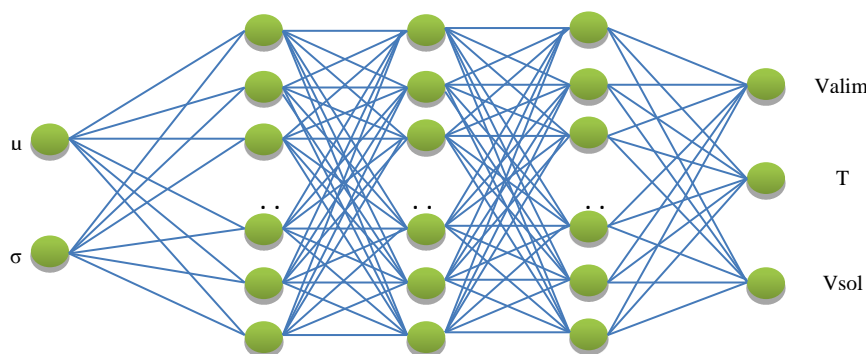
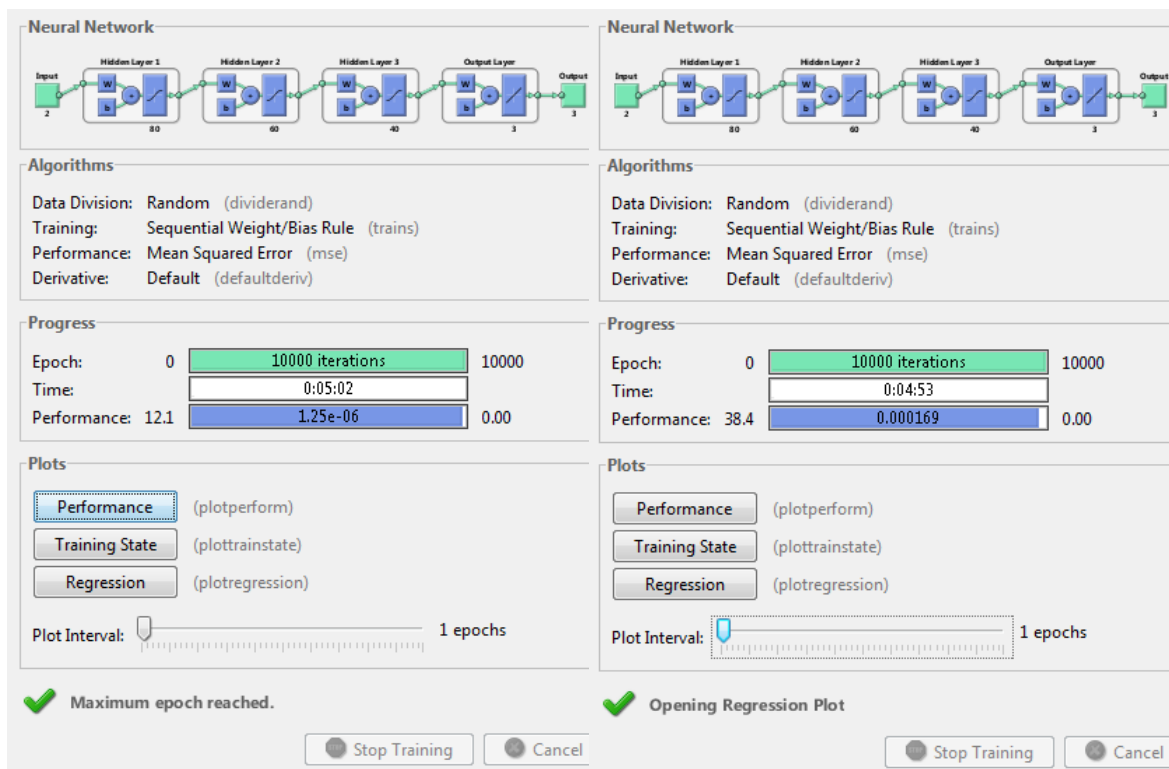


Figura 5.1: Desenho esquemático das redes neurais utilizadas no modelo para o reforço e a largura do cordão

Foram realizados diferentes testes para selecionar a topologias das redes, sendo escolhidas aquelas que forneceram os menores erros de simulação; as redes para o

arames tipo maciço e para o arame tipo tubular foram configuradas e treinadas com o *Neural Networks Toolbox* de MATLAB. A Figura 5.2 e Figura 5.3, a seguir, evidenciam o monitor de progresso do treinamento para as duas redes de cada característica geométrica estudada, permitindo a visualização da evolução da capacidade das redes para adaptar os dados de entrada com os de saída, com base nas iterações, tempo de treinamento e seu desempenho para atingir o erro desejado. Apresenta ainda, esquematicamente, a conformação de cada rede, exibindo os algoritmos que realizam as funções de divisão dos dados, aprendizado, *performance* do erro e treinamento, além de gerar gráficos para avaliar a qualidade do treinamento.

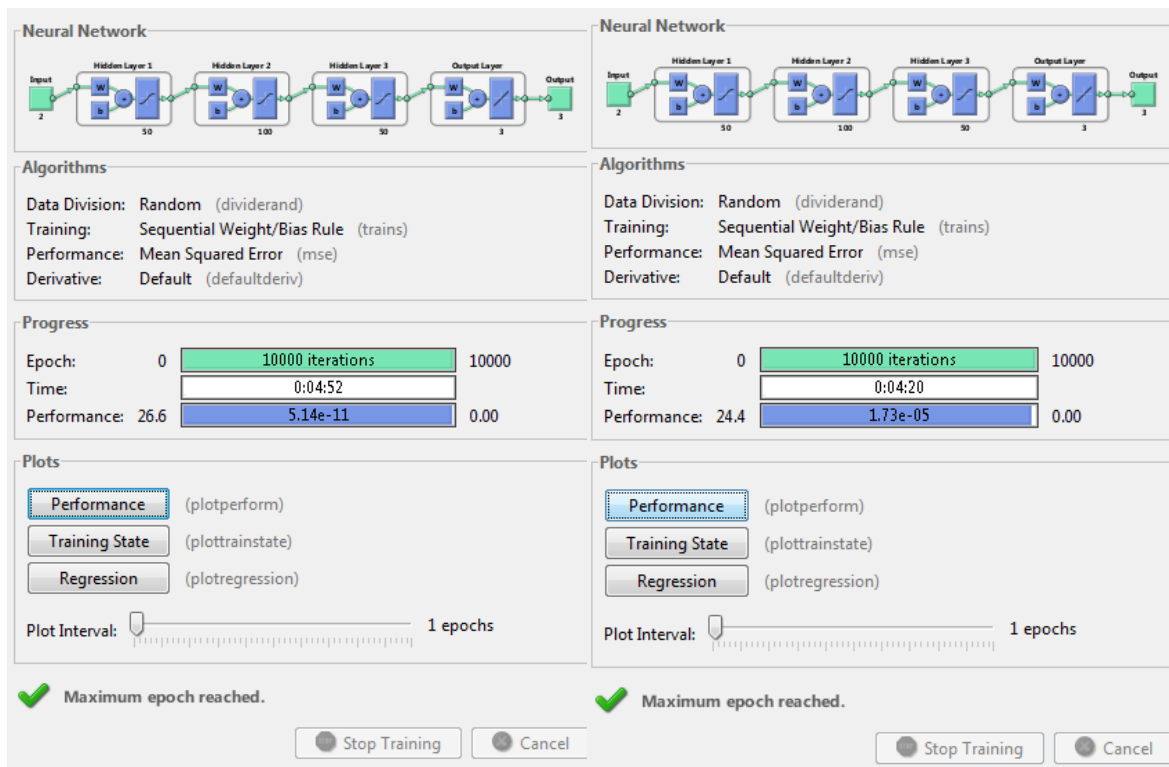
Voltando ao problema, o conjunto de dados de treinamento foi, então, apresentado à rede neural para a atuação do algoritmo *backpropagation*, sendo importante salientar a escolha do critério de parada com iterações visando a obtenção do menor valor de erro médio quadrático que o algoritmo possa alcançar, o que significa que o referido algoritmo fará várias iterações de atualização dos pesos até atingir o menor valor de erro possível.



(a)

(b)

Figura 5.2: Monitor de progresso do treinamento altura do reforço (a) Rede neural para o arame tipo maciço, (b) Rede neural para o arame tipo tubular.



(a)

(b)

Figura 5.3: Monitor de progresso do treinamento largura do cordão (a) Rede neural para o arame tipo maciço, (b) Rede neural para o arame tipo tubular.

Na Figura 5.2, apresentada anteriormente, foi possível observar que na altura do reforço a rede do arame tipo maciço atinge um erro de 1.25×10^{-6} em 10000 iterações, e a rede do arame tipo tubular atinge um erro de 0.000169 em igual numero de iterações. Na Figura 5.3, apresentada anteriormente, foi possível observar que na largura do cordão a rede do arame tipo maciço atinge um erro de 5.14×10^{-11} em 10000 iterações, e a rede do arame tipo tubular atinge um erro de 1.73×10^{-5} em igual numero de iterações, ou seja, com a utilização da configuração das redes, é possível obter erros baixos, adequados para a modelagem da altura do reforço e da largura no cordão de solda.

Na Figura 5.4 e na Figura 5.5, a seguir, têm-se os gráficos de busca do vetor gradiente na superfície de erro para a altura do reforço e a largura do cordão em função do numero de iterações para o treinamento, validação e teste, para os dois tipos de arame. O vetor gradiente do erro quadrático médio é um dos métodos mais utilizados em processamento adaptativo, e serve para atualizar os pesos conectados às entradas de cada neurônio. Tal cálculo se faz necessário para a retropropagação dos erros através da rede.

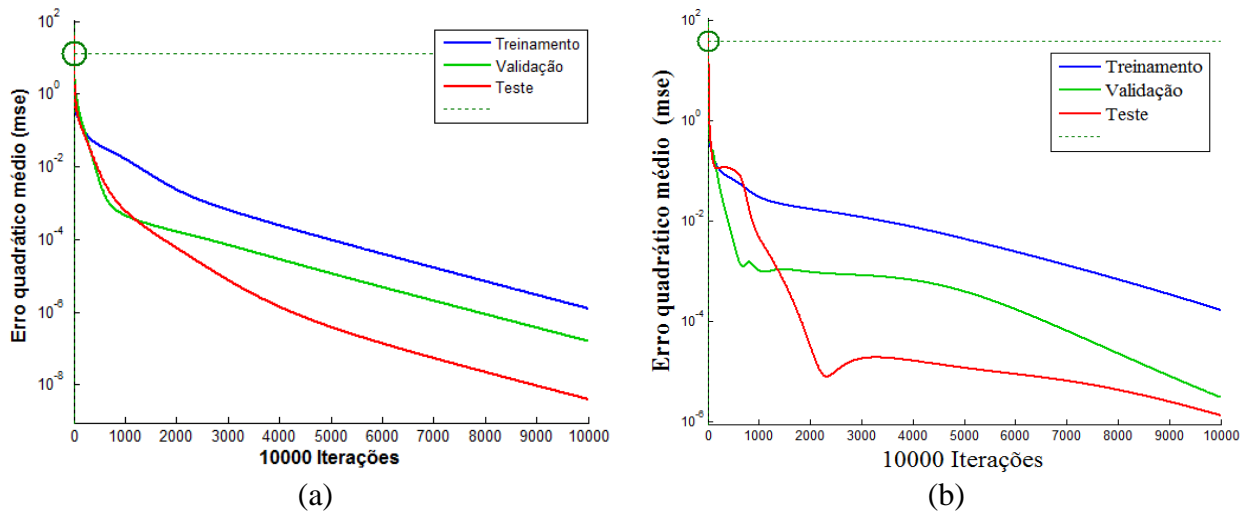


Figura 5.4: Medida para a altura do reforço do mse da (a) Rede para arame tipo maciço, (b) Rede para tipo arame tubular.

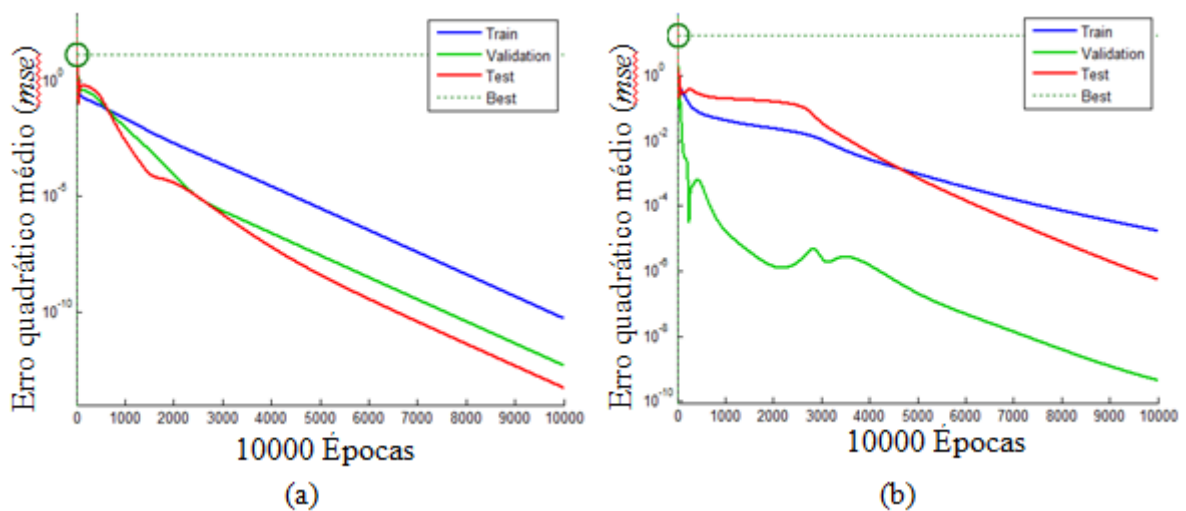


Figura 5.5: Medida para a largura do cordão do mse da (a) Rede para arame tipo maciço, (b) Rede para tipo arame tubular.

Dos resultados obtidos tanto da Figura 5.4 como da Figura 5.5, apresentadas anteriormente, é possível observar que os erros de treinamento, validação e teste tendem a diminuir os três conjuntos de dados, ofertando como resultado o fato de que a redes estão treinadas de uma maneira adequada, capaz de prever os parâmetros de processo para uma especificada altura do reforço ou largura do cordão.

Nesta etapa, obtiveram-se ótimos resultados, uma vez que as redes apresentaram o resultado esperados em todos os casos. Para avaliar a dispersão dos dados, foram plotados os valores reais *versus* os valores estimados pelas redes neurais para os arames tipo maciço e tubular tanto para a altura do reforço como para a largura. Na Figura 5.6,

Figura 5.7, Figura 5.8 e Figura 5.9, a seguir, mostram-se as retas que melhor ajustam os valores desejados e os valores obtidos pelas redes treinadas; nestas, percebe-se a coincidência dos valores é quase total, confirmando uma porcentagem de acerto muito elevado. Os coeficientes de correlação obtidos pelas redes neurais artificiais para os dois tipos de arames nas fases de treinamento, validação e teste, mostram um alto grau de dependência estatística linear existente entre a saída real e a saída estimada das redes, dado que para cada caso, o coeficiente de correlação aproxima-se muito a 1.

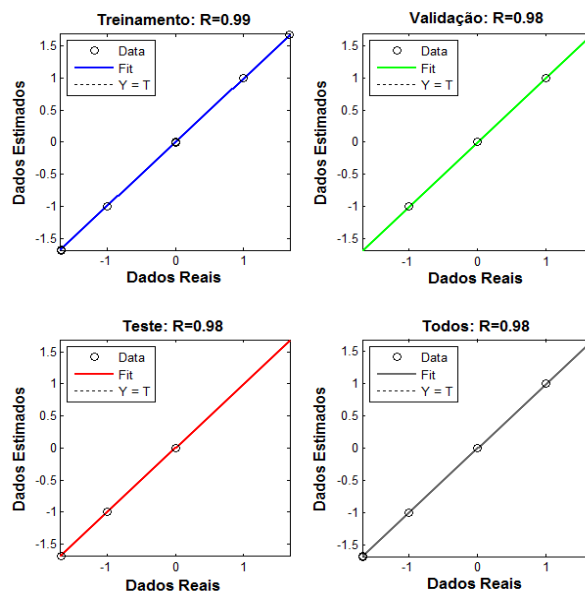


Figura 5.6: Ajuste conseguido pela rede neural na altura do reforço para o arame tipo maciço.

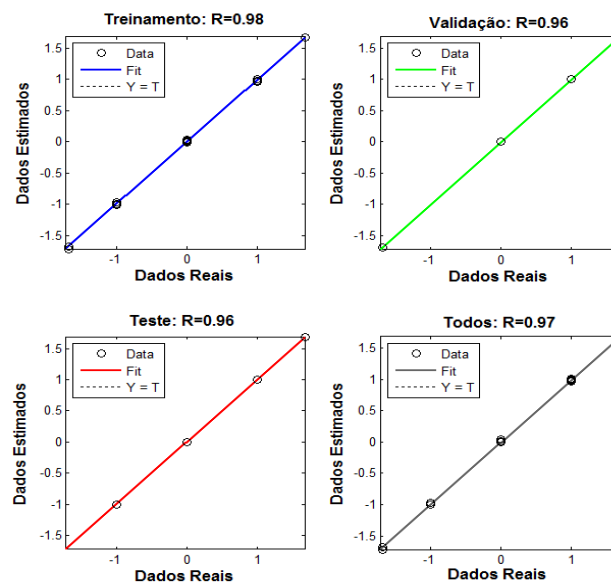


Figura 5.7: Ajuste conseguido pela rede neural na altura do reforço para o arame tipo tubular.

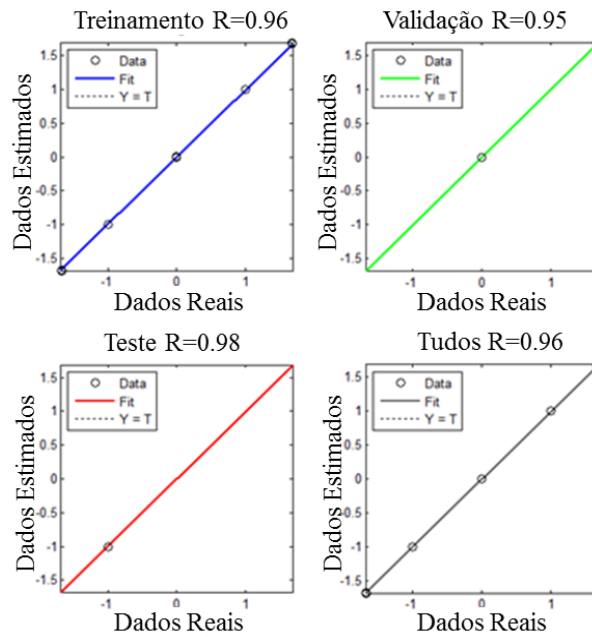


Figura 5.8: Ajuste conseguido pela rede neural na largura do cordão para o arame tipo maciço.

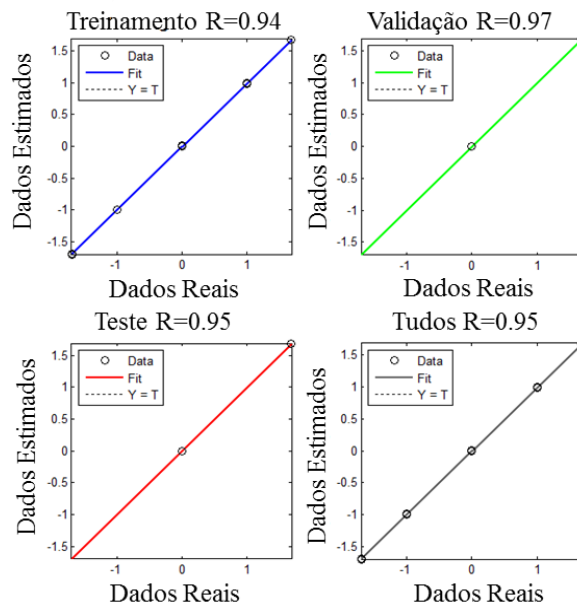


Figura 5.9: Ajuste conseguido pela rede neural na largura do cordão para o arame tipo tubular.

Treinadas as redes, foram simulados, a título de exemplo, medidas da altura do reforço e largura do cordão para valores intermediários aos valores experimentais de entrada para o treinamento da rede (vide Tabela 5.1 e Tabela 5.2), de modo a produzir um conjunto de dados de verificação dos modelos obtidos com as redes neurais. Os dados são apresentados na Tabela 5.3 e Tabela 5.4, a seguir, a fim de facilitar a visualização de uma tendência que permita estabelecer uma relação entre a altura do reforço e a largura

do cordão de solda com os parâmetros de processo de soldagem, de modo a concluir se as redes estão fornecendo resultados condizentes com o conhecimento empírico do processo de soldagem.

Tabela 5.3: Parâmetros de soldagem preditos pelas redes neurais artificiais para diferentes alturas do reforço do cordão com arame tipo maciço e tubular.

Arame tipo maciço			
Altura do reforço do cordão (mm)	Velocidade de alimentação do arame (m/min)	Tensão (Volt)	Velocidade de soldagem (mm/s)
2	5,86	20,36	8,93
2,5	7,34	19,84	7,13
3	10,09	20,85	9,42
3,5	11,25	21,17	8,23
Arame tipo tubular			
Altura do reforço do cordão (mm)	Velocidade de alimentação do arame (m/min)	Tensão (Volt)	Velocidade de soldagem (mm/s)
2	4,63	20,67	13,47
2,5	6,71	23,26	13,29
3	8,88	22,23	10,69
3,5	5,65	18,89	8,24

Tabela 5.4: Parâmetros de soldagem preditos pelas redes neurais artificiais para diferentes larguras do cordão com arame tipo maciço e tubular

Arame tipo maciço			
Largura do cordão (mm)	Velocidade de alimentação do arame (m/min)	Tensão (Volt)	Velocidade de soldagem (mm/s)
5	5.50268	18.9746	12.0635
5.5	7.60921	19.135	12.0054
6	5.52899	18.9915	7.9505
6.5	7.27835	17.9702	7.43862
7	7.27103	20.893	8.78508
Arame tipo tubular			
Largura do cordão (mm)	Velocidade de alimentação do arame (m/min)	Tensão (Volt)	Velocidade de soldagem (mm/s)
5	5.61671	19.4081	12.6376
5.5	7.56851	19.9219	11.9244
6	6.31873	22.7414	13.2677
6.5	7.18553	22.4952	9.86238
7	7.50618	27.0126	12.0368

Com os modelos obtidos mediante o treinamento das redes, foram construídos os gráficos apresentados nas Figura 5. 10 e Figura 5. 11, a seguir, buscando evidenciar o comportamento dos parâmetros do processo em relação às diferentes alturas do reforço do cordão. Nas Figura 5. 12 e Figura 5. 13 apresentam o comportamento dos parâmetros do processo em relação às diferentes larguras do cordão.

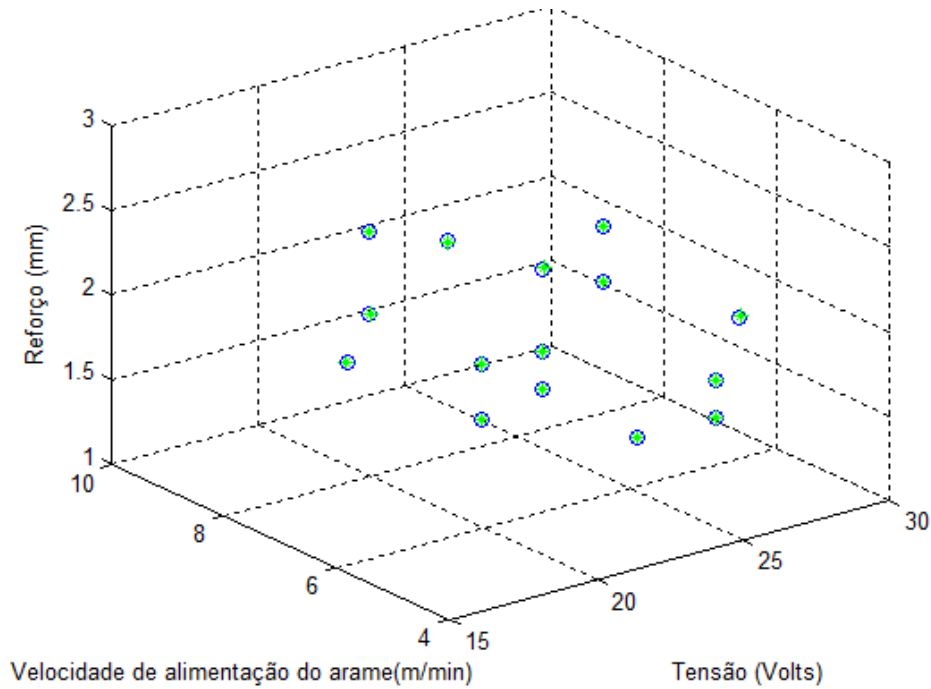


Figura 5. 10: Comportamento dos parâmetros do processo com respeito a diferentes alturas do reforço do cordão com o arame tipo maciço.

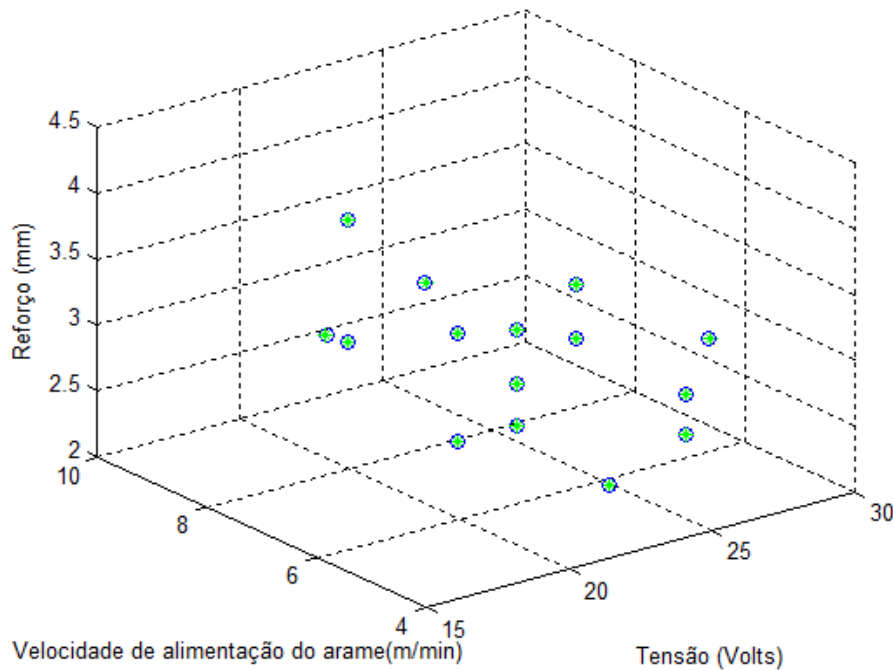


Figura 5. 11: Comportamento dos parâmetros do processo com respeito a diferentes alturas do reforço do cordão com o arame tipo tubular.

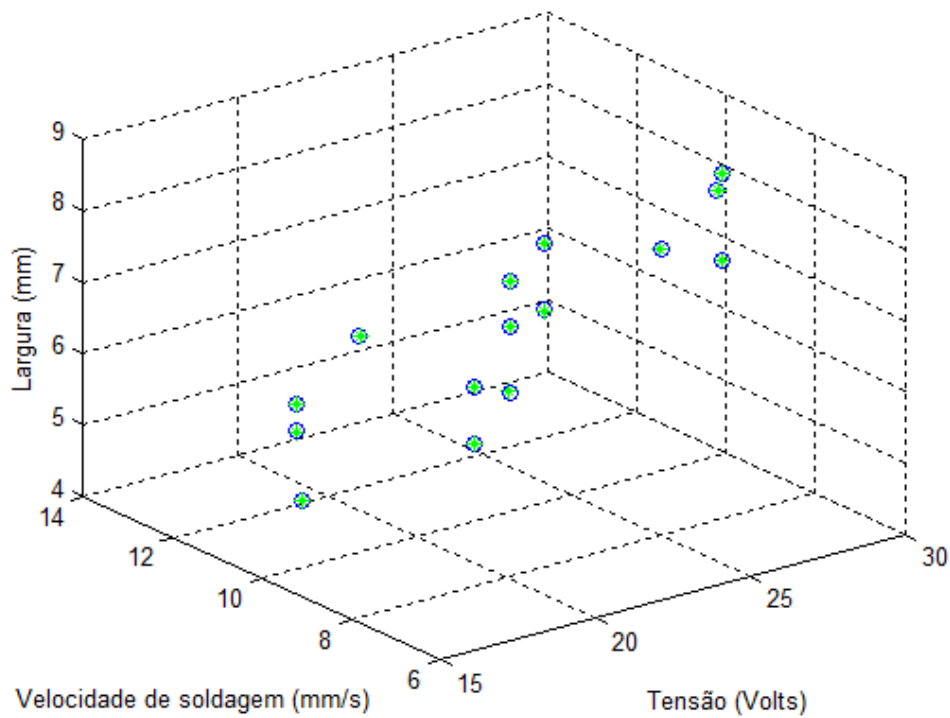


Figura 5. 12: Comportamento dos parâmetros do processo com respeito a diferentes larguras do cordão com o arame tipo maciço.

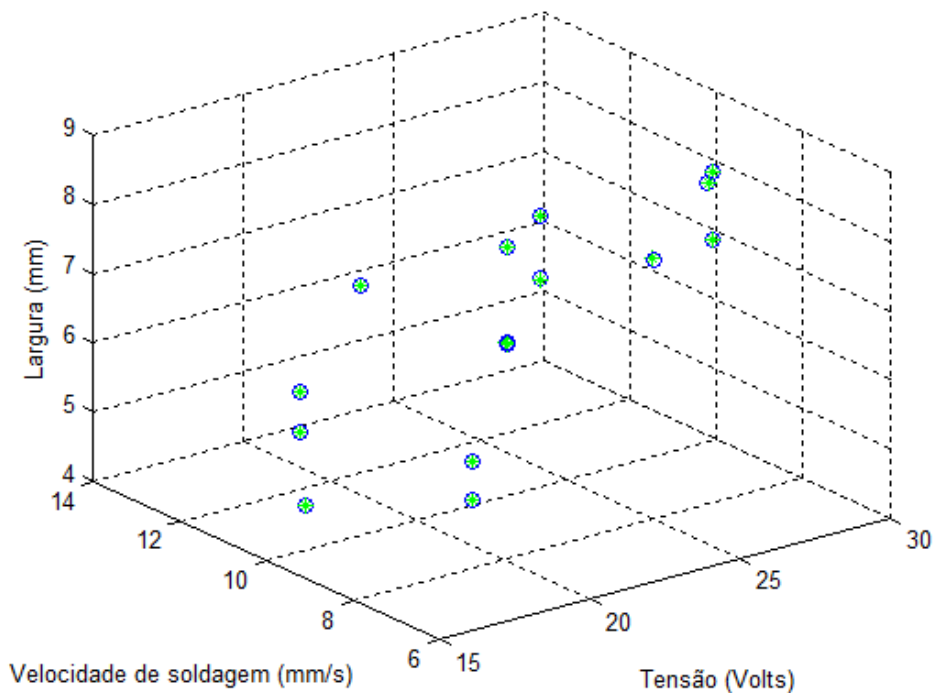


Figura 5. 13: Comportamento dos parâmetros do processo com respeito a diferentes larguras do cordão com o arame tipo tubular.

Uma vez definidos os modelos para a predição dos parâmetros de processo em função da altura do reforço e a largura do cordão de solda, foram utilizados os códigos gerados no *Neural Networks Toolbox* de MATLAB para a implementação do *software* de

simulação e integração do sistema de controle *online* das características geométricas estudadas.

5.1.2 Resultados da captura e processamento de imagens

No processo de aquisição das imagens para a medição da altura do reforço do cordão, a câmera é alinhada de forma precisa para identificar e capturar nas fotos a área de início do cordão de solda a ser processada, conforme evidenciado na Figura 5.14, a seguir.

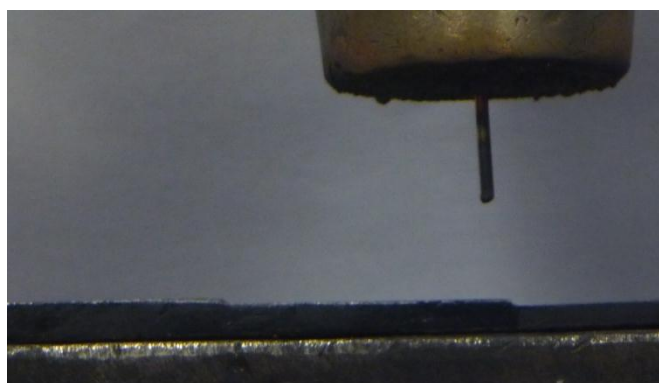


Figura 5.14: Zona da imagem para a aquisição das imagens da altura do reforço.

Após preparar o sistema, fez-se a delimitação da imagem para obter a zona específica quando da medida da altura do cordão de solda, procedendo-se a calibração posicional. Tal processo mostra-se necessário para a obtenção de um modelo que será utilizado na aplicação, uma vez que os resultados de saída do sistema de medição requerem-se em um sistema de grandezas físicas padrão em lugar de medidas em pixels. Como a câmara foi posicionada de forma paralela ao cordão de solda uma calibração linear foi utilizada. Este tipo de calibração é uma calibração linear simples, que se refere a um simples escalamento que relaciona a um pixel com uma unidade de medida real conhecida. Para tanto, fez-se uso de uma peça de calibração com a qual se tem um padrão de referência entre o número de pixels e unidades padronizadas como são os milímetros. A Figura 5.15, apresenta o desenho da peça de calibração.

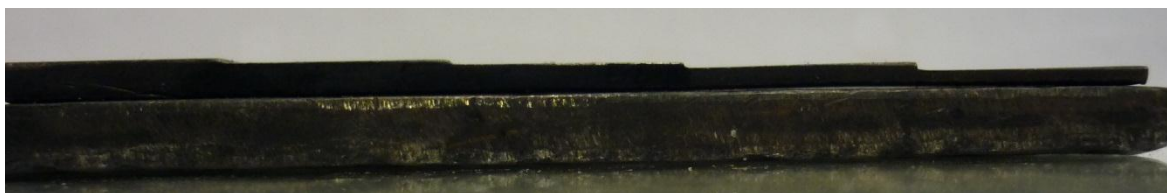


Figura 5.15: Peça de calibração para a medição da altura do reforço no cordão de solda.

Para a calibração do sistema de aquisição de imagens para a medição da largura do cordão, fez-se uso de papel milimétrico, conforme evidenciado na Figura 5.16, 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 o escalamento que relaciona a quantidade de pixels dentro de cada quadrado do papel milimétrico.

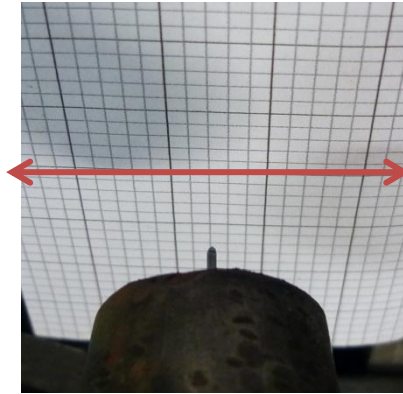


Figura 5.16: Calibração do sistema de aquisição para a medição da largura do cordão.

Da calibração da câmera, obtêm-se os modelos utilizados para o sistema de aquisição de imagens – meio utilizado para o cálculo da medida da altura do reforço e da largura do cordão de solda, que, por sua vez, são empregadas pelo controlador para corrigir problemas no caso de desvio na medida desejada da altura do reforço ou largura do cordão.

Para avaliar o rendimento do sistema de aquisição e processamento de imagens apresentam-se, a título de exemplo, as sequências de imagens capturadas de algumas soldas que utilizam os parâmetros de processo previamente obtidos dos modelos com redes neurais apresentados anteriormente na Tabela 5.3 e Tabela 5.4. As soldas foram definidas para as alturas do reforço do cordão de solda de 2.5 mm com arame tipo tubular e para uma largura de 5 mm com o arame tipo maciço. As imagens obtidas encontram-se na Figura 5.17 e Figura 5.18.


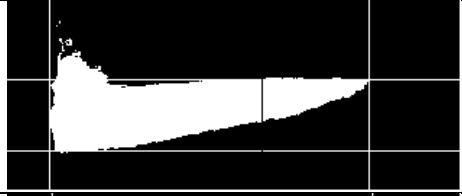














Imagem	Imagem processada	Medida da altura do reforço (mm)
		2.47
		2.47
		2.47
		2.43
		2.47
		2.57
		2.52
		2.52

Figura 5.17: Sequências de imagens para um cordão de 2.5mm de altura do reforço com arame tipo tubular.


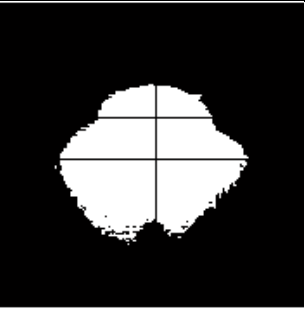

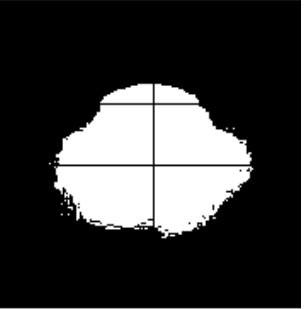

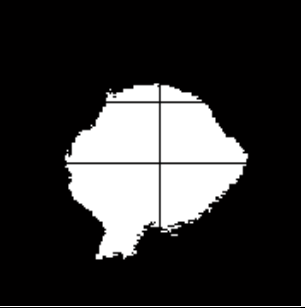

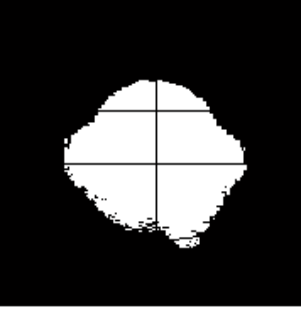

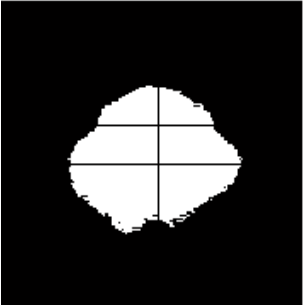
Imagem	Imagem processada	Medida da largura do cordão
		5.02
		4.42
		4.27
		5.02
		5.25

Figura 5.18: Sequências de imagens para um cordão de 5mm de largura com arame tipo maciço.

Em seguida, realizou-se uma avaliação da exatidão das medidas realizadas pelo sistema. Tal fato foi possível mediante a comparação dos resultados da medida do sistema com leituras feitas ao cordão posterior à solda pelo sistema de *scanner*. Os resultados para a avaliação são apresentados na Tabela 5.5 a seguir, os quais são aceitáveis 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.

Tabela 5.5: Avaliação da exatidão das medidas realizadas pelo sistema de aquisição de imagens.

Altura do reforço com arame tipo maciço			
Valor desejado da altura do reforço do cordão de solda (mm)	Valor médio da medida obtido pelo sistema de aquisição de imagens (mm)	Valor médio da medida obtido pelo sistema de escaneamento (mm)	% de erro
2	1.9768	2.03	1.17%
2.5	2.4771	2.59	0.9%
3	3.1043	3.07	3.35%
Altura do reforço com arame tipo tubular			
Valor desejado da altura do reforço do cordão de solda (mm)	Valor médio da medida obtido pelo sistema de aquisição de imagens (mm)	Valor médio da medida obtido pelo sistema de escaneamento (mm)	% de erro
2	2.0324	1.98	1.59%
2.5	2.4600	2.53	1.62%
3	2.9141	3.01	2.94%
Largura do cordão com arame tipo maciço			
Valor desejado da largura do cordão de solda (mm)	Valor médio da medida obtido pelo sistema de aquisição de imagens (mm)	Valor médio da medida obtido pelo sistema de escaneamento (mm)	% de erro
5	5.0187	5,03	0.37%
6	6.0005	6,01	8.3 e -03%
7	7.0488	6,93	0.69%
Largura do cordão com arame tipo tubular			
Valor desejado da largura do cordão de solda (mm)	Valor médio da medida obtido pelo sistema de aquisição de imagens (mm)	Valor médio da medida obtido pelo sistema de escaneamento (mm)	% de erro
5	5.0319	4,93	0.63%
6	6.1691	6,14	2.74%
7	7.1091	6,9	1.55%

O objetivo do sistema de visão é capturar as imagens do cordão com boa qualidade, bem como realçar os detalhes que interessam para facilitar a busca de informação durante a formação da solda. Com as características de detalhe obtidas pelo sistema de aquisição para a identificação e medida tanto da altura do reforço como da largura do cordão, pode-se implementar o sistema para interatuar com o controlador do processo na tomada de decisões de maneira automática, segundo o conteúdo das imagens obtidas.

5.1.3 Desenvolvimento do controlador *fuzzy*

Os sistemas de controle *fuzzy* tem por base as regras e os conjuntos difusos, que são utilizados para emular o raciocínio humano. Devido ao anterior, o sucesso da estratégia de controle dependerá, em grande parte, do conhecimento que se tenha do processo, isto é, de que tão bem se conheça o comportamento da(s) saída(s) deste último ante as diferentes condições de entrada. Tal conhecimento pode provir de um modelo dinâmico do processo ou, conforme o presente estudo, da experiência.

A presente seção descreve a parte central do controlador *fuzzy*, isto é, a base de conhecimento, que contém o conjunto de regras que rege a inferência. O sistema aqui projetado atua com base em regras tipo *Mamdani*, que se caracterizam pela existência de conjuntos difusos. Para o desenvolvimento da base de conhecimento que faz uso do controlador para governar a altura do reforço e a largura do cordão, fez-se necessário a realização de uma investigação de campo, que permitiu confirmar os conhecimentos teóricos para um respaldo adequado de que o controlador tenha por base a melhor informação possível. Com as variáveis e a representação da entrada e saída difusa do controlador definidas, conforme indicado no capítulo 4 apresentado anteriormente, tem-se os termos utilizados, bem como a base de conhecimento em forma de tabelas de associação (vide Tabela 5.6 e Tabela 5.7, a seguir).

Tabela 5.6: base de conhecimento definida para o controlador *fuzzy* da altura do reforço.

Variáveis linguísticas (erro na medida do reforço)	Abreviatura das variáveis linguísticas		Abreviatura dos Resultados linguísticos	Resultados linguísticos (Velocidade de alimentação do arame)
Negativo muito alto	NMA	Deve-se	BBM	Baixar baixar muito
Negativo alto	NA	Deve-se	BM	Baixar muito
Negativo médio	N	Deve-se	B	Baixar
Aceitável	C	Deve-se	M	Manter
Positivo médio	P	Deve-se	S	Subir
Positivo alto	PA	Deve-se	SM	Subir muito
Positivo muito alto	PMA	Deve-se	SSM	Subir subir muito

Tabela 5.7: base de conhecimento definida para o controlador *fuzzy* da largura do cordão

Variáveis linguísticas (erro na medida do largura)	Abreviatura das variáveis linguísticas		Abreviatura dos Resultados linguísticos	Resultados linguísticos (Velocidade de soldagem)
Negativo muito alto	NMA	Deve-se	SM	Subir muito
Negativo alto	NA	Deve-se	SM	Subir muito
Negativo médio	NM	Deve-se	S	Subir
Aceitável	M	Deve-se	M	Manter
Positivo médio	PM	Deve-se	B	Baixar
Positivo alto	PA	Deve-se	BM	Baixar muito
Positivo muito alto	PMA	Deve-se	BM	Baixar muito

Construído o conjunto de regras que rege a base do conhecimento dos controladores *fuzzy*, é possível arbitrar valores numéricos para a variável de entrada, simulando cenários factíveis, do ponto de vista do especialista, a fim de observar e analisar os valores obtidos para as variáveis de saída velocidade de alimentação de arame ou velocidade de soldagem. A Figura 5.19, a seguir, apresenta um exemplo sobre a questão, fazendo uso da aplicação de simulação gráfica *Rule Viewer* do *Fuzzy Logic Toolbox* do MATLAB: no caso, quando se tem um erro na medida do reforço de 0.3 mm, onde se aplicou à entrada do controlador, tem-se a geração de uma mudança na variável manipulada de 0.115, o que significa que o controlador vai aumentar 0.115 m/min do valor atual da velocidade de alimentação do arame, gerando, assim, um ajuste no processo de soldagem para corrigir o erro e obter a altura do reforço desejada no cordão.

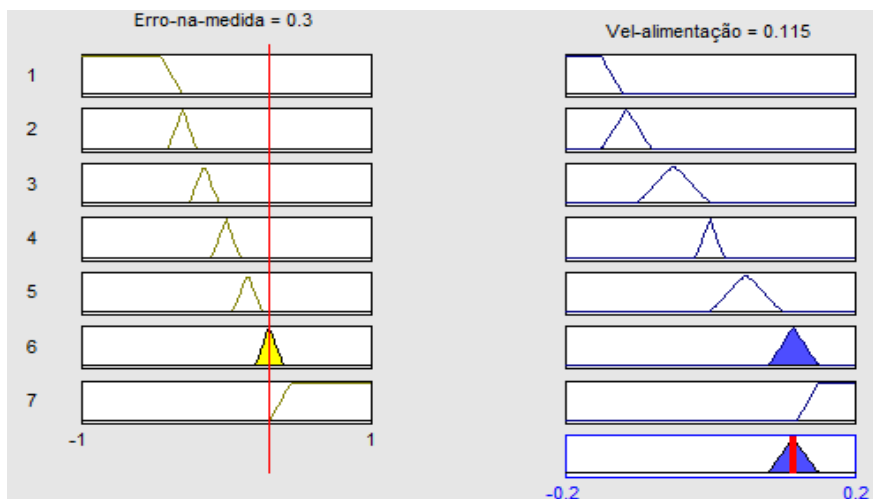


Figura 5.19: Exemplo de um cenário factível para o análise dos valores obtidos para a variável de saída.

Para a verificação dos resultados do sistema de inferência e a avaliação da obtenção certa dos valores que realizaram a correção da velocidade de alimentação do arame no controle da altura do reforço e a correção da velocidade de soldagem no controle da largura do cordão, fizeram-se alguns testes para apreciar o estado das regras e a saída para diferentes valores de entrada – todos fazendo uso da aplicação gráfica do *Fuzzy Logic Toolbox* do MATLAB. A Tabela 5.8 apresenta um resumo da informação obtida nos referidos testes.

Tabela 5.8: Informação obtida nos testes de avaliação das regras e saídas dos controladores.

Controle da altura do reforço				
Valor de entrada (Erro na medida) Altura do reforço (mm)	Variável linguística de entrada	Inferência	Variável linguística de saída	Valor de saída defuzzificado (valor para correção da velocidade de alimentação do arame em m/min)
-0.7	NMA	→	BBM	-0.168
-0.3	NA	→	BM	-0.115
-0.15	N	→	B	-0.05
0.05	C	→	M	8.67e-18
0.15	P	→	S	0.05
0.35	PA	→	SM	0.14
0.8	PMA	→	SSM	0.168
Controle da largura do cordão				
Valor de entrada (Erro na medida) Largura do cordão (mm)	Variável linguística de entrada	Inferência	Variável linguística de saída	Valor de saída defuzzificado (valor para correção da velocidade de soldagem em mm/s)
-1.5	NMA	→	SM	0.146

Tabela 5.8: Informação obtida nos testes de avaliação das regras e saídas dos controladores. (Continuação).

Controle da largura do cordão				
Valor de entrada (Erro na medida) Largura do cordão (mm)	Variável linguística de entrada	Inferência	Variável linguística de saída	Valor de saída defuzzificado (valor para correção da velocidade de soldagem em mm/s)
-0.7	NMA	→	SM	0.144
-0.15	NM	→	S	0.05
0	M	→	M	3.97 e-18
0.4	PA	→	BM	-0.144
1.2	PMA	→	BM	-0.146

A Tabela 5.8 destaca a informação resultante da comprovação do sistema de regras e inferências dos controladores *fuzzy* desenhados. Conforme evidenciado, as regras estão corretas, pois, quando foram apontados os distintos erros referentes à diferença entre o valor desejado e o valor obtido pelo sistema de aquisição, o conjunto de regras determina corretamente a ação necessária para diminuir o erro. Além disso, as funções de pertinência foram bem elaboradas, uma vez que os erros considerados possíveis encontram-se bem definidos dentro do conjunto de funções de pertinência, e a etapa de defuzzificação realiza adequadamente a conversão das variáveis linguísticas de saída, para uma magnitude dada, não difusa, no rango de valores da variável manipulada que realizara a ação de controle concreta.

5.2 RESULTADOS DE IMPLEMENTAÇÃO

Uma vez descritos os resultados obtidos em cada uma das etapas apresentadas na metodologia, tem-se a apresentação dos resultados obtidos na implementação do sistema de controle proposto.

O desenho e a implementação do sistema de controle e as *interfaces* de usuário foram realizados em MATLAB, obtendo uma aplicação idônea para a aquisição, controle, análise e apresentação de dados do processo. A Figura 5.20 e Figura 5.21 apresentam as *interfaces* do usuário desenhadas que servem como enlace entre o operador do processo e o sistema de controle. A característica mais importante destes sistemas é que, ante qualquer perturbação no processo, os controladores fornecem uma resposta imediata para evitar que as perturbações influenciem no objetivo principal de controle – no presente caso, a altura do reforço e a largura do cordão de solda.

A Figura 5.20, a seguir, apresenta o caso do requerimento de um cordão de solda com um valor de reforço de 3 mm, onde se têm os valores encontrados pelas redes neurais mais adequados para as três variáveis de processo estudadas – para uma solda com o arame tipo tubular. Na referida figura, tem-se ainda uma série de *menus* de configuração do processo que devem ser realizados antes de iniciar o processo de soldagem: o sentido de soldagem e o comprimento do cordão que se procura obter. Uma das mais importantes propriedades de configuração é a ordem de realizar ou bloquear as ações de controle, uma vez que, dependendo de tal aspecto, o sistema realiza somente um vídeo do ocorrido durante a soldagem, mas não exercerá nenhuma ação de controle, no caso de solda sem controle, ou exercerá ações de controle sobre a velocidade de alimentação do arame a partir dos valores das medidas da altura do cordão obtidos da aquisição e processamento das imagens – no caso de solda com controle. E ainda, é possível visualizar as imagens adquiridas, as variações realizadas sobre a velocidade de alimentação do arame e os sinais da tensão e corrente dispostos pela fonte de soldagem, uma vez terminado o processo de soldagem.

O processo descrito anteriormente é aplicável no caso desejado de controle da largura do cordão de solda, sendo neste caso as ações de controle realizadas sobre a velocidade de soldagem. A Figura 5.21, a seguir, apresenta o caso do requerimento de um cordão de solda com um valor de largura de 5.5 mm para uma solda com o arame tipo maciço.

The image shows a software interface for weld reinforcement control. It is organized into several functional areas:

- Reforço - Red Neural:** This section allows setting the desired reinforcement. The 'Reforço Desejado' is set to 3 mm. It displays calculated values: Tensão = 22.2283 Volts, Velocidade do Arame = 8.8789 m/min, and Velocidade de Soldagem = 10.6983 mm/s. A 'Calcular' button is present.
- Tipo de Arame:** Radio buttons for 'Tipo Maciço' and 'Tipo Tubular' (selected).
- Controle da mesa linear:** Includes 'Seleção da posição' with 'Para Frente' (selected) and 'Para Tras (Sentido motor)', and buttons for 'Encender Mesa' and 'Apagar Mesa'.
- Soldagem:** Features a large green button labeled 'INICIO DA SOLDAGEM' and a 'Visualização dos sinais da fonte' button.
- Parâmetros Iniciais:** Contains 'Tamanho do cordão' (cm) input, 'Fonte' buttons ('Enviar', 'Remover'), a 'Calibração' button, and 'Sistema de Controle' options ('Sem Controle' selected, 'Com Controle').

Figura 5.20: Interface de usuário com as diferentes características de processo definidas para o controle da altura do reforço de 3 mm com arame tipo tubular

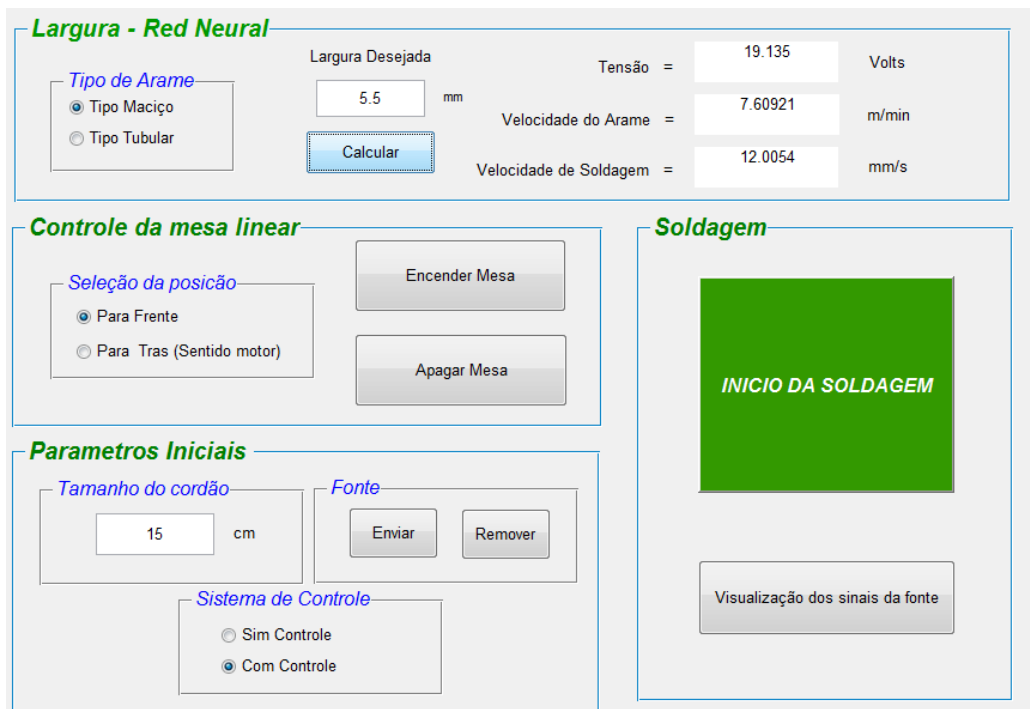


Figura 5.21: Interface de usuário com as diferentes características de processo definidas para um cordão de 5.5 mm de largura com arame tipo maciço.

Exposto o funcionamento, em termos gerais, das aplicações que permite a implementação do sistema de controle, aquisição e análise dos dados do processo, tem-se a apresentação dos resultados obtidos no controle da altura do reforço e da largura do cordão de solda para o processo GMAW.

Para a realização dos testes, os valores dos parâmetros de soldagem, que, segundo os modelos de redes neurais produzem distintos valores de reforços e larguras no cordão, foram enviados do computador à fonte de soldagem e mesa linear mediante o sistema de comunicação e controle da fonte de soldagem. Neste sentido, os testes se deram da seguinte forma:

Foram selecionados alguns testes para avaliar o controle da altura do reforço e largura do cordão. A seguir, tem-se a apresentação de 4 testes de avaliação para cada característica geométrica estudada: 2 testes com o arame tipo maciço e 2 testes com o arame tipo tubular. A realização dos testes fez-se utilizando os modelos das características geométricas obtidos das redes neurais artificiais – apresentados em capítulo anterior –, onde se ingressou como entrada as alturas do reforço e larguras dos cordões desejadas, obtendo-se como saída os respectivos valores das variáveis do processo (vide Tabela 5.9 e Tabela 5.10, a seguir).

Tabela 5.9: Testes selecionados para avaliar o controle da altura do reforço do cordão.

Arame tipo Maciço			
Entrada ao modelo	Saídas do modelo		
Altura do reforço do cordão desejada (mm)	Tensão (V)	Velocidade de alimentação do arame (m/min)	Velocidade de soldagem (mm/s)
2.5	19,84	7,34	7,13
3	20,85	10,09	9,42
Arame tipo tubular			
Entrada ao modelo	Saídas do modelo		
Altura do reforço do cordão desejada (mm)	Tensão (V)	Velocidade de alimentação do arame (m/min)	Velocidade de soldagem (mm/s)
2.5	23,26	6,71	13,29
3	22,23	8,88	10,69

Tabela 5.10: Testes selecionados para avaliar o controle da largura do cordão de solda.

Arame tipo Maciço			
Entrada ao modelo	Saídas do modelo		
Largura do cordão desejada (mm)	Tensão (V)	Velocidade de alimentação do arame (m/min)	Velocidade de soldagem (mm/s)
6	18.9915	5.52899	7.9505
7	20.893	7.27103	8.78508
Arame tipo tubular			
Entrada ao modelo	Saídas do modelo		
Largura do cordão desejada (mm)	Tensão (V)	Velocidade de alimentação do arame (m/min)	Velocidade de soldagem (mm/s)
6	22.7414	6.31873	13.2677
7	27.0126	7.50618	12.0368

Os resultados obtidos para os cordões de solda que fizeram uso de arame de tipo maciço foram os seguintes:

- Para o cordão de solda com a altura do reforço desejada de 2.5 mm

Na Figura 5.22, a seguir, tem-se o conjunto de medidas da altura do reforço obtidas do processamento das imagens. Na Figura 5.23, a seguir, tem-se o sinal de controle sobre a velocidade de alimentação do arame aplicado a cada instante ao processo de soldagem para a obtenção e manutenção da altura do cordão em 2.5 mm.

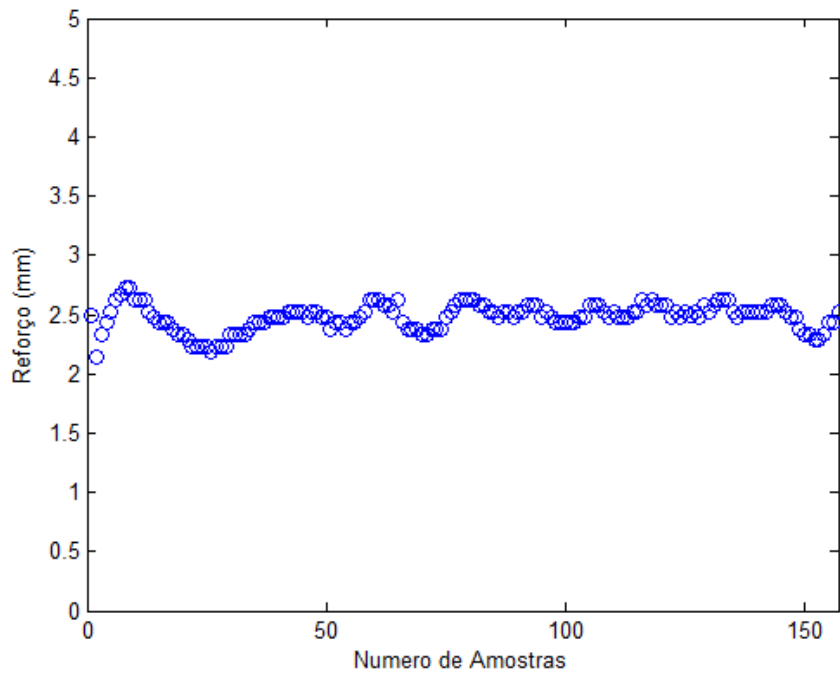


Figura 5.22: Medidas obtidas durante o processo de controle para um cordão com altura do reforço 2.5 mm com arame tipo maciço.

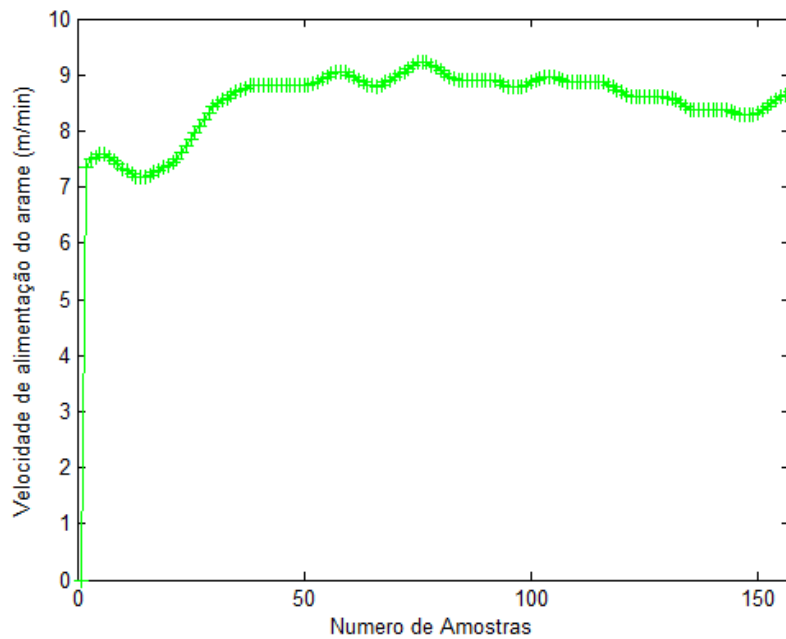


Figura 5.23: Comportamento da velocidade de alimentação do arame durante o controle da altura do reforço de 2.5 mm com arame tipo maciço.

O cordão de solda obtido no referido teste é apresentado na Figura 5.24, a seguir.



Figura 5.24: Cordão final obtido depois do controle para uma altura do reforço de 2.5 mm com arame tipo maciço.

Para a verificação do controle da altura do reforço do cordão de solda, após a elaboração das provas e obtenção dos dados, a qualidade do cordão produzido deve ser monitorada para assegurar que se mantém o estado de controle adequado. Para tanto, como primeira medida, tem-se os resultados obtidos da reconstrução em 3D, bem como as medidas extraídas das características geométricas do cordão produzido, estabelecendo-se uma evidência documentada de que o processo produz de forma consistente, um cordão de solda que cumpra com as especificações predeterminadas e atributos de qualidade.

Na Figura 5.25, a seguir, tem-se a reconstrução em 3D; na Figura 5.26, tem-se as medidas das características geométricas do cordão produzido para uma altura de reforço desejada de 2.5 mm.

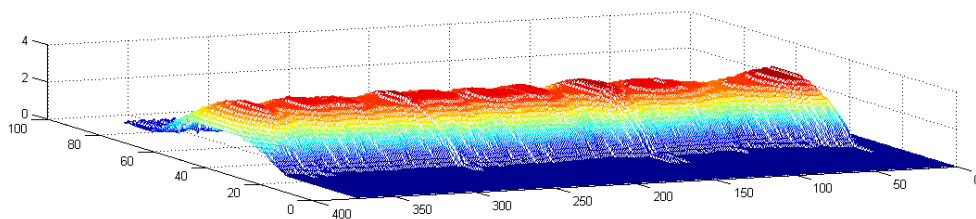


Figura 5.25: Reconstrução e 3D do cordão de 2.5 mm de altura do reforço com arame tipo maciço.

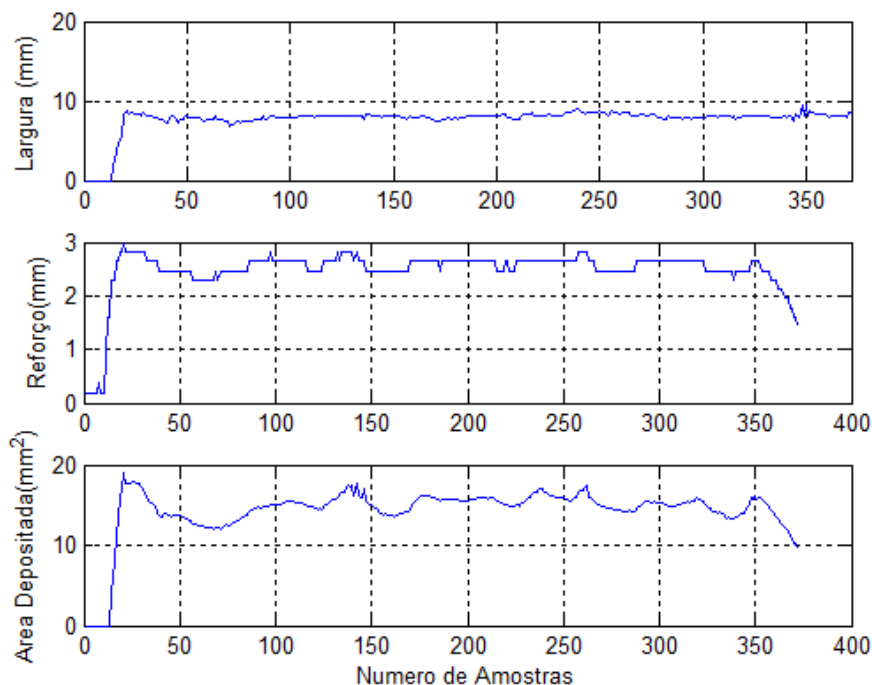


Figura 5.26: Medidas das características geométricas do cordão de 2.5 mm de altura do reforço com arame tipo maciço.

As medidas das características geométricas extraídas do cordão produzido e apresentadas na Figura 5.26 são: uma altura do reforço de 2,59 mm com um desvio

padrão 0,092 mm, uma largura média de 8,11 mm com um desvio padrão de 0,324 mm e uma área total depositada de 15,34 mm² com um desvio padrão de 0,842 mm².

Além de analisar os atributos físicos do cordão, faz-se necessário conhecer a influência do controle no desempenho do processo de soldagem. Tal fato se deu mediante o estudo da estabilidade do arco elétrico, monitorando a tensão e a corrente do arco, que permitem avaliar o comportamento dos fenômenos de transferência de carga elétrica, transferência energética e de transferência metálica através do arco, definindo também a qualidade do produto obtido por a soldagem. Na Figura 5.27, a seguir, têm-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 219 amperes e uma tensão média de aproximadamente 19.28 volts.

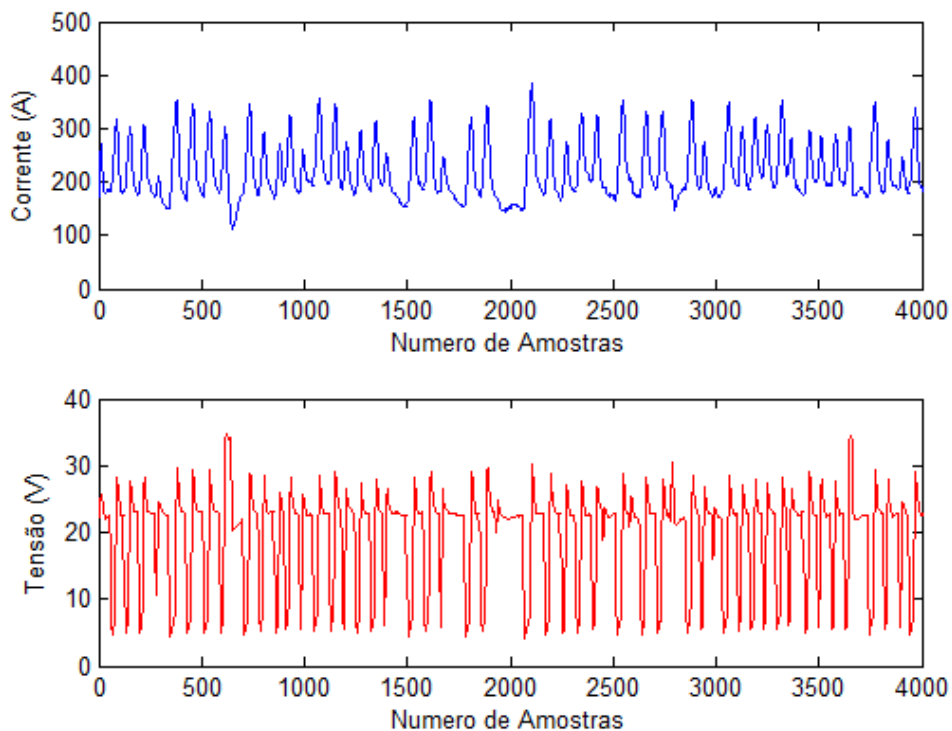


Figura 5.27: Medidas dos sinais do processo para um cordão de 2.5 mm de altura do reforço com arame tipo maciço.

Na Tabela 5. 11, a seguir, tem-se o conjunto de medidas obtidas durante o processo de controle para as alturas do reforço e as larguras dos cordões de solda obtidas do processamento das imagens para os outros testes selecionados para avaliar o controle das características geométricas estudadas.

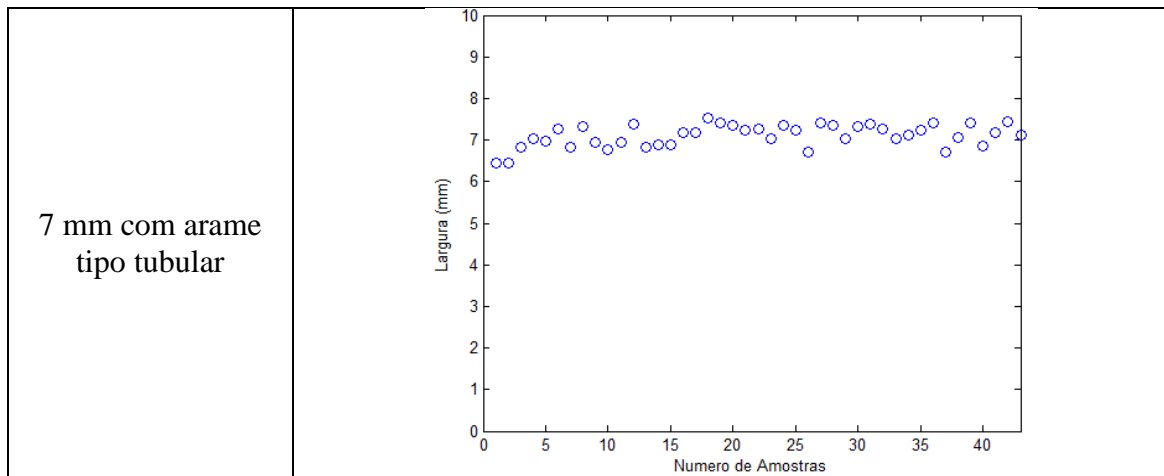
Tabela 5. 11: Medidas obtidas durante o processo de controle para altura do reforço e largura do cordão.

ALTURA DO REFORÇO	
Medida desejada	Medidas obtidas
3 mm com arame tipo maciço	
2.5 mm com arame tipo tubular	
3 mm com arame tipo tubular	

Tabela 5.11: Medidas obtidas durante o processo de controle para altura do reforço e largura do cordão (continuação).

LARGURA DO CORDÃO	
Medida desejada	Medidas obtidas
6 mm com arame tipo maciço	
7 mm com arame tipo maciço	
6 mm com arame tipo tubular	

Tabela 5.11: Medidas obtidas durante o processo de controle para altura do reforço e largura do cordão (continuação).



Na Tabela 5. 12, a seguir, têm-se os sinais de controle sobre a velocidade de alimentação do arame ou a velocidade de soldagem aplicada a cada instante ao processo de soldagem para a obtenção e manutenção da altura do reforço e da largura do cordão.

Tabela 5. 12: Comportamento da variável manipulada durante o controle da altura do reforço e da largura do cordão.

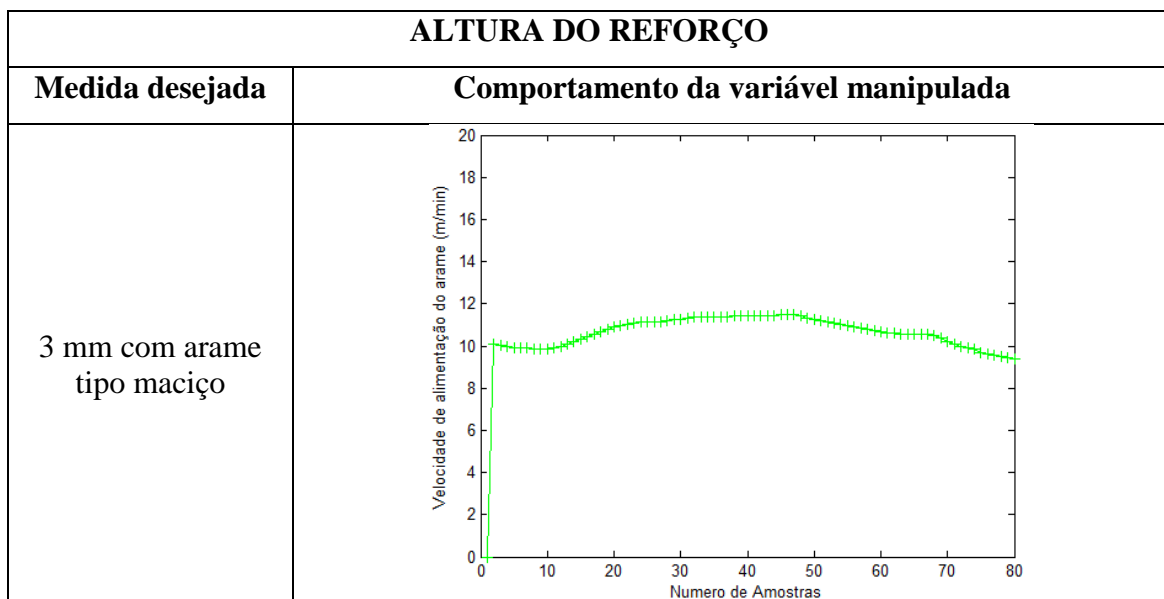


Tabela 5. 12: Comportamento da variável manipulada durante o controle da altura do reforço e da largura do cordão (continuação).

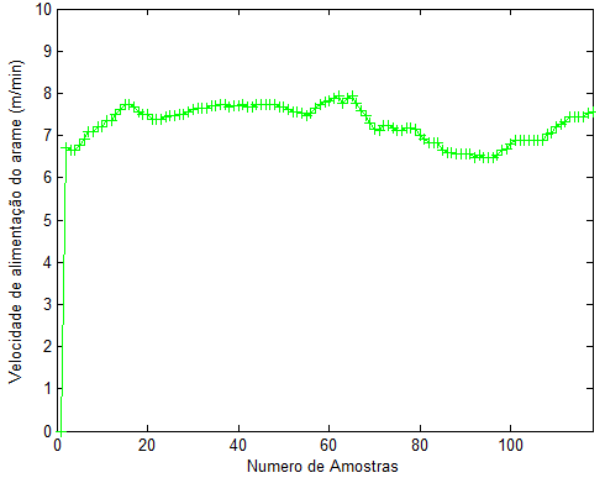
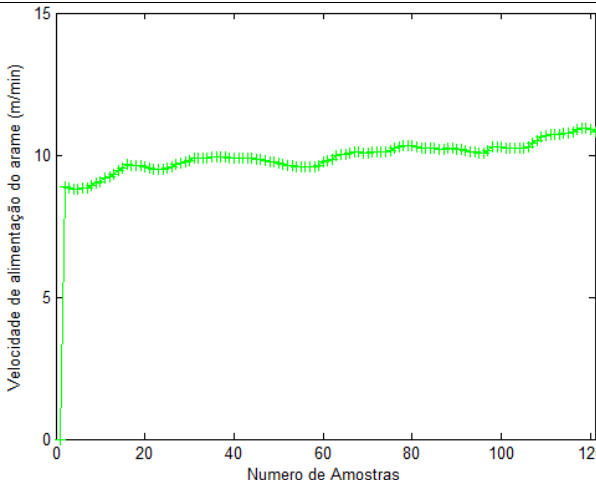
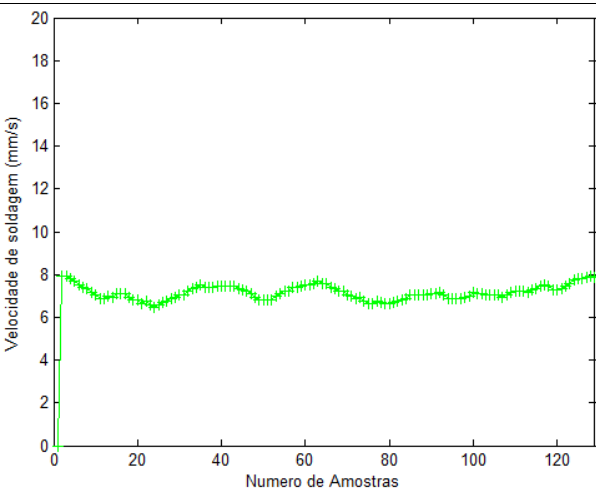







<p>2.5 mm com arame tipo tubular</p>	
<p>3 mm com arame tipo tubular</p>	
<p>LARGURA DO CORDÃO</p>	
<p>Medida desejada</p>	<p>Comportamento da variável manipulada</p>
<p>6 mm com arame tipo maciço</p>	

Tabela 5. 12: Comportamento da variável manipulada durante o controle da altura do reforço e da largura do cordão (continuação).

<p>7 mm com arame tipo maciço</p>	
<p>6 mm com arame tipo tubular</p>	
<p>7 mm com arame tipo tubular</p>	

Os cordões de solda obtidos nos referidos testes são apresentados na Tabela 5. 13, a seguir.

Tabela 5. 13: Cordões finais obtidos depois do controle para altura do reforço e largura do cordão.

ALTURA DO REFORÇO	
Medida desejada	Cordões finais
3 mm com arame tipo maciço	
2.5 mm com arame tipo tubular	
3 mm com arame tipo tubular	
LARGURA DO CORDÃO	
Medida desejada	Cordões finais
6 mm com arame tipo maciço	
7 mm com arame tipo maciço	
6 mm com arame tipo tubular	
7 mm com arame tipo tubular	

Na Tabela 5. 14, a seguir, tem-se a reconstrução em 3D dos cordões apresentados na Tabela 5. 13.

Tabela 5. 14: Reconstrução e 3D dos cordões para altura do reforço e largura do cordão.

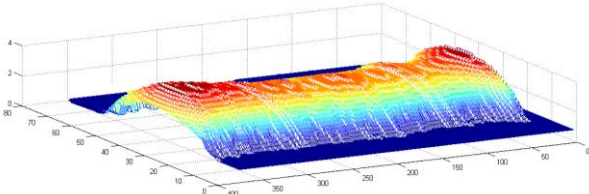
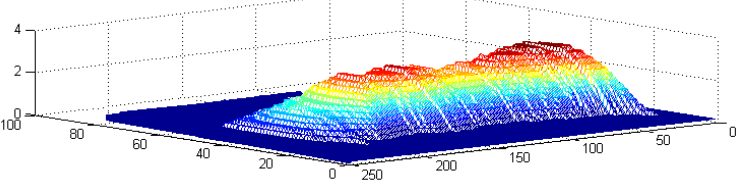
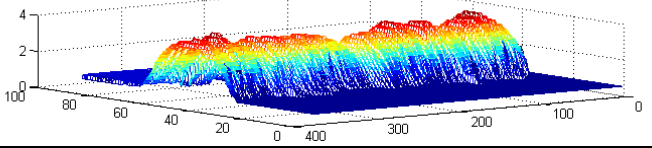
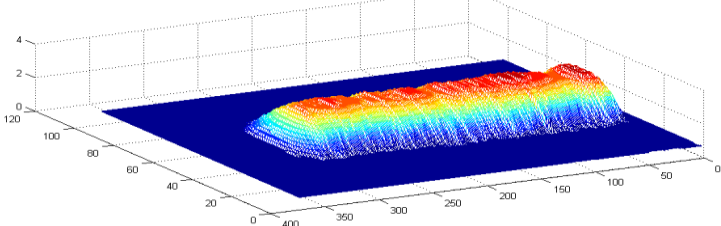
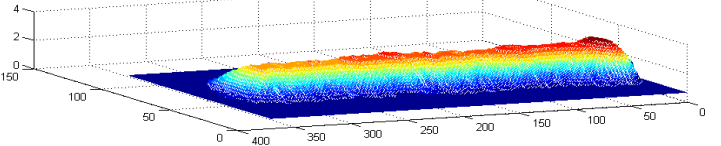
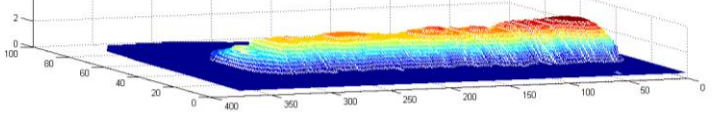
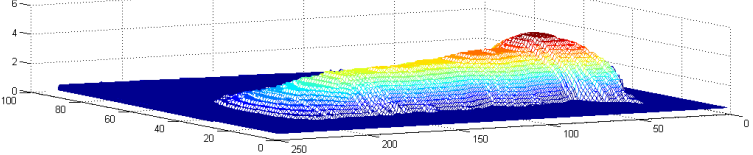
ALTURA DO REFORÇO	
Medida desejada	Reconstrução e 3D
3 mm com arame tipo maciço	

Tabela 5. 14: Reconstrução e 3D dos cordões para altura do reforço e largura do cordão (continuação).

2.5 mm com arame tipo tubular	
3 mm com arame tipo tubular	
LARGURA DO CORDÃO	
Medida desejada	Reconstrução e 3D
6 mm com arame tipo maciço	
7 mm com arame tipo maciço	
6 mm com arame tipo tubular	
7 mm com arame tipo tubular	

Na Tabela 5. 15, tem-se as medidas das características geométricas dos cordões produzidos para as alturas dos reforços e as larguras dos cordões desejadas.

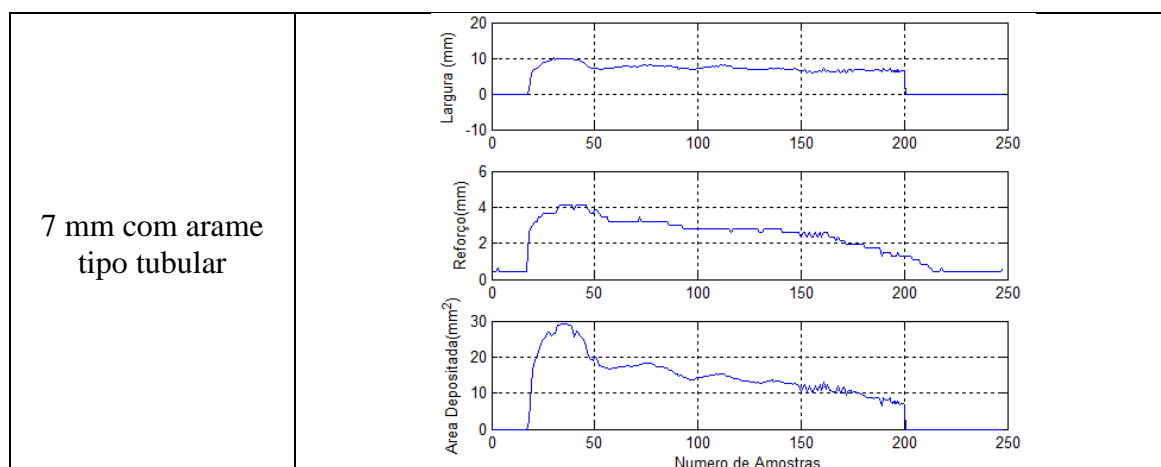
Tabela 5. 15: Medidas das características geométricas dos cordões para altura do reforço e largura do cordão.

ALTURA DO REFORÇO	
Medida desejada	Medidas das características geométricas
3 mm com arame tipo maciço	
2.5 mm com arame tipo tubular	
3 mm com arame tipo tubular	

Tabela 5. 15: Medidas das características geométricas dos cordões para altura do reforço e largura do cordão (continuação).

LARGURA DO CORDÃO	
Medida desejada	Medidas das características geométricas
6 mm com arame tipo maciço	<p>The first graph shows 'Largura (mm)' on the y-axis (0 to 20) and 'Numero de Amostras' on the x-axis (0 to 400). The width starts at 0, jumps to approximately 5 mm at sample 10, and remains stable until sample 300, where it drops to 0.</p> <p>The second graph shows 'Reforço(mm)' on the y-axis (0 to 4) and 'Numero de Amostras' on the x-axis (0 to 400). The reinforcement height starts at 0, jumps to approximately 3 mm at sample 10, and remains stable until sample 300, where it drops to 0.</p> <p>The third graph shows 'Area Depositada(mm²)' on the y-axis (0 to 20) and 'Numero de Amostras' on the x-axis (0 to 400). The area starts at 0, jumps to approximately 15 mm² at sample 10, and remains stable until sample 300, where it drops to 0.</p>
7 mm com arame tipo maciço	<p>The first graph shows 'Largura (mm)' on the y-axis (0 to 20) and 'Numero de Amostras' on the x-axis (0 to 400). The width starts at 0, jumps to approximately 5 mm at sample 10, and remains stable until sample 350, where it drops to 0.</p> <p>The second graph shows 'Reforço(mm)' on the y-axis (0 to 4) and 'Numero de Amostras' on the x-axis (0 to 400). The reinforcement height starts at 0, jumps to approximately 3 mm at sample 10, and remains stable until sample 300, where it drops to 0.</p> <p>The third graph shows 'Area Depositada(mm²)' on the y-axis (0 to 20) and 'Numero de Amostras' on the x-axis (0 to 400). The area starts at 0, jumps to approximately 18 mm² at sample 10, and remains stable until sample 350, where it drops to 0.</p>
6 mm com arame tipo tubular	<p>The first graph shows 'Largura (mm)' on the y-axis (-10 to 20) and 'Numero de Amostras' on the x-axis (0 to 400). The width starts at 0, jumps to approximately 5 mm at sample 10, and remains stable until sample 300, where it drops to 0.</p> <p>The second graph shows 'Reforço(mm)' on the y-axis (0 to 4) and 'Numero de Amostras' on the x-axis (0 to 400). The reinforcement height starts at 0, jumps to approximately 3 mm at sample 10, and remains stable until sample 300, where it drops to 0.</p> <p>The third graph shows 'Area Depositada(mm²)' on the y-axis (0 to 20) and 'Numero de Amostras' on the x-axis (0 to 400). The area starts at 0, jumps to approximately 15 mm² at sample 10, and remains stable until sample 300, where it drops to 0.</p>

Tabela 5. 15: Medidas das características geométricas dos cordões para altura do reforço e largura do cordão (continuação).



As medidas das características geométricas extraídas dos cordões produzidos e expostas na Tabela 5. 15 são apresentadas na Tabela 5. 16.

Tabela 5. 16: Medidas das características geométricas extraídas dos cordões produzidos.

Medidas das características geométricas extraídas do cordão de 3 mm de altura do reforço com arame tipo maciço						
Medida desejada (mm)	Altura do reforço (mm)	Desvio padrão da altura do reforço (mm)	Largura do cordão (mm)	Desvio padrão da largura do cordão (mm)	Área total depositada (mm ²)	Desvio padrão da Área total depositada (mm ²)
3	3,07	0,131	7,53	0,239	18,23	0,893
Medidas das características geométricas extraídas do cordão de 2.5 mm de altura do reforço com arame tipo tubular						
Medida desejada (mm)	Altura do reforço (mm)	Desvio padrão da altura do reforço (mm)	Largura do cordão (mm)	Desvio padrão da largura do cordão (mm)	Área total depositada (mm ²)	Desvio padrão da área total depositada (mm ²)
2.5	2,53	0,22	6,69	0,53	11,66	1,776
Medidas das características geométricas extraídas do cordão de 3 mm de altura do reforço com arame tipo tubular						
Medida desejada (mm)	Altura do reforço (mm)	Desvio padrão da altura do reforço (mm)	Largura do cordão (mm)	Desvio padrão da largura do cordão (mm)	Área total depositada (mm ²)	Desvio padrão da área total depositada (mm ²)
3	3,1	0,27	5,22	0,42	12,27	1,52

Tabela 5. 16: Medidas das características geométricas extraídas dos cordões produzidos (continuação).

Medidas das características geométricas extraídas do cordão de 6 mm de largura com arame tipo maciço						
Medida desejada (mm)	Altura do reforço (mm)	Desvio padrão da altura do reforço (mm)	Largura do cordão (mm)	Desvio padrão da largura do cordão (mm)	Área total depositada (mm ²)	Desvio padrão da área total depositada (mm ²)
6	2,7	0,1	6,01	0,37	12,77	0,91
Medidas das características geométricas extraídas do cordão de 7 mm de largura com arame tipo maciço						
Medida desejada (mm)	Altura do reforço (mm)	Desvio padrão da altura do reforço (mm)	Largura do cordão (mm)	Desvio padrão da largura do cordão (mm)	Área total depositada (mm ²)	Desvio padrão da área total depositada (mm ²)
7	2,62	0,08	6,93	0,48	13,71	0,87
Medidas das características geométricas extraídas do cordão de 6 mm de largura com arame tipo tubular						
Medida desejada (mm)	Altura do reforço (mm)	Desvio padrão da altura do reforço (mm)	Largura do cordão (mm)	Desvio padrão da largura do cordão (mm)	Área total depositada (mm ²)	Desvio padrão da área total depositada (mm ²)
6	2,31	0,16	6,14	0,36	10,64	0,88
Medidas das características geométricas extraídas do cordão de 7 mm de largura com arame tipo tubular						
Medida desejada (mm)	Altura do reforço (mm)	Desvio padrão da altura do reforço (mm)	Largura do cordão (mm)	Desvio padrão da largura do cordão (mm)	Área total depositada (mm ²)	Desvio padrão da área total depositada (mm ²)
7	2,65	0,19	6,9	0,58	12,93	1,47

Na Tabela 5. 17, a seguir, têm-se os sinais de corrente e tensão obtidos do processo. Nesta tabela é possível observar os sinais de processo e o modo de transferência de massa para cada cordão obtido, junto com a corrente média e a tensão média em cada caso.

Tabela 5. 17: Medidas dos sinais do processo dos cordões para altura do reforço e largura do cordão.

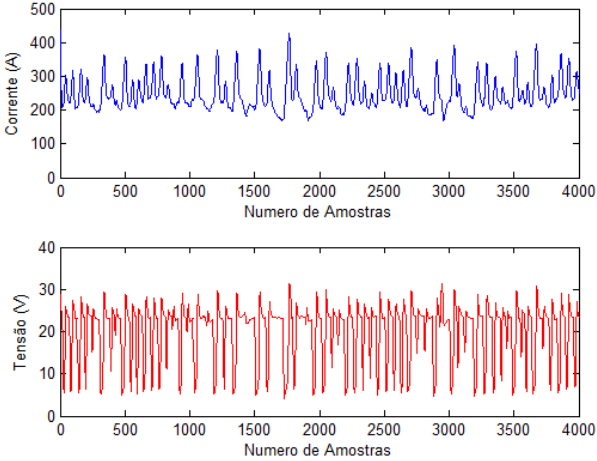
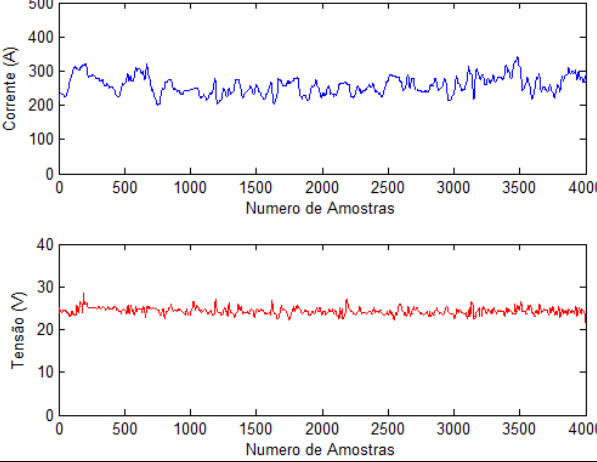
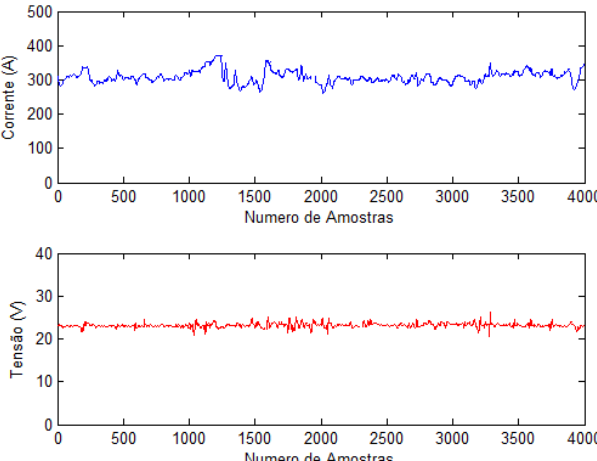
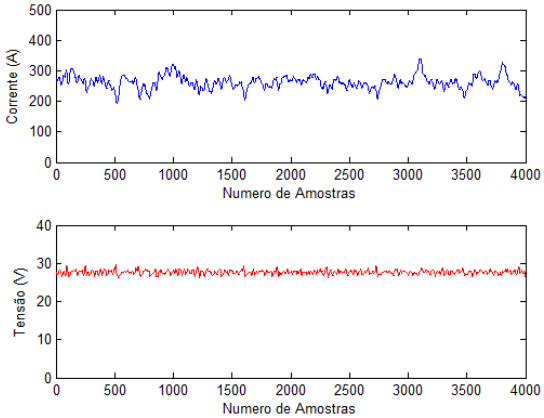
ALTURA DO REFORÇO		
Medida desejada	Medidas dos sinais	Modo de transferência
3 mm com arame tipo maciço		Curto circuito, com uma corrente média de aproximadamente 260 amperes e uma tensão média de aproximadamente 19.94 volts.
2.5 mm com arame tipo tubular		Globular, com uma corrente média de aproximadamente 265 amperes e uma tensão média de aproximadamente 23.98 volts.
3 mm com arame tipo tubular		Globular, com uma corrente média de aproximadamente 317 amperes e uma tensão média de aproximadamente 22.99 volts.

Tabela 5. 17: Medidas dos sinais do processo dos cordões para altura do reforço e largura do cordão (continuação).

LARGURA DO CORDÃO		
Medida desejada	Medidas dos sinais	Modo de transferência
6 mm com arame tipo maciço		Curto circuito, com uma corrente média de aproximadamente 158,2 amperes e uma tensão média de aproximadamente 19.34 volts.
7 mm com arame tipo maciço		Curto circuito, com uma corrente média de aproximadamente 197,6 amperes e uma tensão média de aproximadamente 20.69 volts.
6 mm com arame tipo tubular		Globular, com uma corrente média de aproximadamente 232,9 amperes e uma tensão média de aproximadamente 23.3 volts.

Tabela 5. 17: Medidas dos sinais do processo dos cordões para altura do reforço e largura do cordão (continuação).

<p>7 mm com arame tipo tubular</p>	 <p>The figure contains two vertically stacked line graphs. The top graph plots 'Corrente (A)' on the y-axis (0 to 500) against 'Numero de Amostras' on the x-axis (0 to 4000). The data is a blue line fluctuating between approximately 200 and 400 amperes. The bottom graph plots 'Tensão (V)' on the y-axis (0 to 40) against 'Numero de Amostras' on the x-axis (0 to 4000). The data is a red line fluctuating between approximately 25 and 35 volts.</p>	<p>Globular, com uma corrente média de aproximadamente 262 amperes e uma tensão média de aproximadamente 27.66 volts.</p>
------------------------------------	--	---

6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No presente capítulo, tem-se a discussão dos resultados obtidos a partir de diversas investigações e experiências realizadas na pesquisa em questão. O sistema de controle obtido integrou vários elementos e constituiu-se em um trabalho complexo, devido à grande quantidade de componentes necessários para serem sincronizados e que possibilitam a consecução dos objetivos propostos. Para o desenvolvimento do sistema de controle que integra todos os componentes *hardware* (computador, mesa de deslocamento linear, sistema de comunicação/controlador da fonte de soldagem, sistema de aquisição de imagens e sistema de aquisição dos sinais elétricos) e *software* (algoritmo de modelagem do processo de soldagem por arco metálico com gás (GMAW), algoritmo para o processamento de imagens, algoritmo do controlador e o algoritmo de interface de usuário), fez-se necessário analisar e modificar o funcionamento de cada aspecto, em prol da identificação de compatibilidade com as necessidades e condições de soldagem. Portanto, foi preciso adquirir experiência com todas as atividades envolvidas por meio de sistemas de aquisição e transmissão de dados, aquisição e processamento de imagens, comunicação e configuração da fonte de soldagem, além de sistemas de integração e controle. Desta forma, desenvolveu-se, a partir da experiência e do conhecimento adquirido, o *software* de integração e implementação que gerencia todos os componentes e procedimentos que compõem o sistema de controle dos parâmetros geométricos estudados no processo GMAW.

Conforme a revisão bibliográfica e considerando a complexidade do processo (GMAW), optou-se por adotar a inteligência artificial para realizar uma aproximação que permitisse a obtenção dos resultados esperados, uma vez que os sistemas de controle baseados neste ramo da computação sobressaem nas áreas onde os processos são altamente não lineares; assim, quando os sistemas clássicos de controle falham, ou o modelo do sistema é difícil ou impossível de obter – graças a sua capacidade para se adaptar a condições mutáveis, à habilidade para atuar adequadamente em um ambiente incerto e à sua arquitetura funcional apropriada para enfrentar problemas complexos.

Os modelos produzidos utilizando redes neurais artificiais é, de fato, viável, quanto maior for a velocidade de aprendizagem da rede neural. Neste sentido,

foi tomado como guia os pontos de um *Planejamento Composto Central* para realizar o treinamento das redes: foram testados quinze pontos de trabalho na região adequada dentro dos limites dos parâmetros de processo, a fim de obter uma boa velocidade de busca do pacote de parâmetros de processo ótimo para um dado valor dos parâmetros geométricos estudados. Os cordões obtidos em cada um dos quinze pontos de trabalho foram reconstruídos em 3D com ajuda do sistema de *scanner*, extraindo-se as medidas das características geométricas e seus desvios padrões.

Como entradas para os modelos com redes neurais, empregaram-se os valores das medidas das características geométricas, bem como seu desvio padrão – em relação a não uniformidade, importantes características da geometria do cordão de solda. Como saídas do modelo, fez-se a escolha dos seguintes parâmetros de processo: velocidade de alimentação do arame, tensão e velocidade de soldagem. Como os valores dos erros de treinamento e de simulação apresentaram grande variação em função do número de neurônios, tipo de topologia e algoritmos de treinamento, escolheu-se uma topologia de rede multicamada *feed-forward back-propagation* – esta forneceu os menores erros de simulação. Conforme a variação dos parâmetros de treinamento e a realização de treinamentos sucessivos, as redes com três camadas ocultas com 80, 60 e 40 neurônios para a altura do reforço e com 50, 100 e 50 para a largura do cordão, forneceram os valores dos parâmetros de processo em relação aos parâmetros geométricos do cordão de solda que se aproximaram mais dos valores reais. Neste sentido, tem-se uma representação do esquema das redes implementadas na Figura 5.1.

Depois da obtenção dos modelos, os resultados obtidos a partir da comparação dos dados experimentais e os estimados pelas RNAs (vide Figura 5.6, Figura 5.7, Figura 5.8 e Figura 5.9) permitem observar que os modelos apresentam uma adequada aproximação às respostas encontradas nas medições, demonstrando a validade dos modelos obtidos a partir da pesquisa executada, abrindo a possibilidade aos devidos avanços no controle automático das características geométricas do cordão de solda.

Cumprido o objetivo da modelagem da altura do reforço e da largura do cordão de solda, outra meta que se propôs na presente pesquisa foi o desenvolvimento de um sistema de controle automático, visando reduzir o custo associado à geração de soldas, à eliminação de erros, ao aumento na segurança dos processos, ao incremento na

qualidade e nos volumes de produção no âmbito industrial, além de outros benefícios associados à sua aplicação na área de investigação. Em geral, o princípio de todo o sistema de controle automático é a aplicação do conceito de realimentação ou *feedback* (medida tomada desde o processo que repassa a informação do estado atual da variável que se deseja controlar), cuja característica especial é a de manter informado o controlador central do estado das variáveis, a fim de gerar ações corretivas, quando necessário. Conforme o resultado obtido, o laço de controle realimentado – sendo uma trajetória fechada formada por um sistema de aquisição de imagens – dá formação ao cordão, além de um controlador com lógica *fuzzy*, que gera as ações corretivas sobre a variável manipulada.

Os resultados da operação básica do algoritmo de processamento de imagens para os dois tipos de arame encontram-se ilustrados nas Figura 5.17 e Figura 5.18, para uma sequência de imagens utilizando o processo GMAW. Uma zona delimitada da imagem, conforme evidenciada nas Figura 5.14 e Figura 5.16, foi escolhida e encontra-se situada no centro da imagem perto do arame, que serve de referência para indicar a área específica sobre a qual o processamento de imagens subsequentes deve ocorrer. Após a calibração do algoritmo do sistema de aquisição de imagens, uma série de características de borda é extraída a partir de cada imagem obtida. Uma vez que tal informação tenha sido fornecida, o algoritmo é configurado para operação em tempo real; em seguida, fazem-se as devidas medições. A Tabela 5.5 apresenta uma avaliação da exatidão das medidas realizadas pelo sistema, em que se comparam as médias das medições feitas com o valor obtido pelo sistema de *scanner* após a produção dos cordões.

Os controladores para as características geométricas estudadas que foram desenhados inspirados na lógica *fuzzy* foram sintonizado com base na experiência adquirida sobre o processo – produto dos resultados obtidos e das medidas efetuadas nas provas experimentais praticadas no processo GMAW.

O número de regras da base de conhecimento desenvolvidas em base à experiência foi definido com base na análise detalhada do funcionamento que deveriam apresentar os controladores em relação ao processo em questão. Nas Tabela 5.6 e

Tabela 5.7 têm-se as bases de regras dos controladores difusos. A ação de controle mostra-se nas colunas dos resultados linguísticos, que correspondem a uma mudança nas variáveis manipuladas, dado que, segundo as pesquisas empregadas na revisão bibliográfica, são os fatores mais determinantes na características geométricas estudadas.

A implementação da modelagem e do controle dos parâmetros geométricos estudados fez-se integrando os algoritmos de cada uma das etapas desenvolvidas anteriormente no *software* MATLAB, além do uso da ferramenta GUI para o desenho de duas *interfaces* gráficas de usuário que permitisse o monitoramento e domínio do sistema de soldagem, conforme apresentado nas Figura 5.20 e Figura 5.21, onde se estabelecem as medidas desejadas (*set point*) e as características de configuração do processo GMAW, posteriormente utilizadas na etapa de controle.

Da Figura 5.22 e da Tabela 5. 11 foi possível observar o comportamento da variável controlada (altura do reforço e largura do cordão) através dos círculos de cor azul, e como estes se encontravam distribuídos junto ao *set point* estabelecido. Na Figura 5.23 e na Tabela 5. 12, tem-se os sinais de saída do sistema de controle da altura do cordão e da largura do cordão, que corresponde à manipulação da velocidade de alimentação de arame e velocidade de soldagem respectivamente, para atingir as medidas preestabelecidas como referência.

Em relação aos cordões de solda obtidos, conforme apresentado na Figura 5.24 e na Tabela 5. 13, realizou-se uma inspeção visual com o objetivo de avaliar a qualidade dos mesmos. Neste sentido, foi possível observar e destacar que os cordões de solda não apresentam defeitos visíveis, tais como: falta de fusão, acumulação lateral do material de aporte, porosidades, mordeduras ou respingos. Os referidos aspectos podem ser atribuídos a um adequado controle e uma boa seleção dos parâmetros operacionais pelos modelos com redes neurais.

Após a elaboração das provas, fez-se uma avaliação da qualidade dos cordões produzidos para assegurar a manutenção do estado de controle. Os resultados experimentais apresentados nas Figura 5.25 e Figura 5.26: Medidas das características geométricas do cordão de 2.5 mm de altura do reforço com arame tipo maciço. Figura 5.26 e nas Tabela 5. 14 e Tabela 5. 15 demonstraram que a técnica desenvolvida é válida, uma vez que o controlador assume todas as perturbações antes

que estas interfiram no processo de produção dos cordões com a altura do reforço e a largura do cordão especificada.

As informações obtidas a partir da leitura da corrente e tensão do processo, conforme apresentado na Figura 5.27 e na Tabela 5. 17, foram utilizadas para avaliar a capacidade do processo e a qualidade do produto e, posteriormente, possibilitar a identificação das mudanças que possam melhorar a qualidade e o rendimento das soldas. O estudo dos resultados dos parâmetros críticos do processo foi levado em consideração, já que é em onde se demonstra a robustez, confiabilidade e consistência do sistema de modelagem e controle dos cordões no processo GMAW.

7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

7.1 CONCLUSÕES

O objetivo geral do presente estudo foi o desenvolvimento de uma metodologia para modelagem e controle da altura do reforço e da largura do cordão de solda no processo GMAW, a partir de redes neurais, processamento de digital de imagens e lógica *fuzzy*. Os resultados adquiridos permitiram concluir os seguintes aspectos:

- A partir do Planejamento Composto Central e com a região de estudo estabelecida, foi possível encontrar os pontos de trabalho mais convenientes e suficientemente significativos, onde se deu a conformação dos conjuntos de dados de treinamento das redes neurais artificiais.
- Tendo em vista que as relações entre as características geométricas do cordão e os parâmetros do processo são difíceis de serem obtidas na prática, foi empregado para modelar o processo um enfoque com base em redes neurais artificiais. Nesta linha, fazendo uso de dados experimentais e da inteligência artificial, os modelos foram desenvolvidos para estabelecer as referidas relações, bem como o procedimento de otimização, a fim de determinar os parâmetros de processo para qualquer altura do reforço ou largura do cordão desejada.
- Da análise das imagens obtidas, demonstrou-se que grande parte da luz intensa do arco pode ser eliminada com sucesso e que uma quantidade considerável de informação pode ser extraída em tempo real durante o desenvolvimento da solda, graças ao sistema desenvolvido que realiza a aquisição e o processamento das imagens digitais que medem as características geométricas do cordão de solda, demonstrando, assim, que é possível a construção de sistemas de medição da geometria do cordão eficazes, de baixo custo e aplicáveis na indústria e para fins de pesquisa.
- As principais vantagens dos controladores difusos que foram possíveis de comprovação através da realização do presente estudo, é que o método fundamentado na experiência, a fim de obter a base de regras do

controlador *fuzzy* é satisfatório, levando-se em conta a utilização do conhecimento sobre o processo em forma de variáveis descritas na linguagem natural.

- A aplicação do controlador lógico *fuzzy*, segundo os resultados experimentais atingidos, apresenta bom desempenho, uma vez que a referida técnica permite controlar o processo de soldagem automaticamente, possibilitando que o sistema se adapte imediatamente às variações nos parâmetros geométricos durante todo o processo de soldagem, com boas características de robustez frente à mudança das condições de operação.
- Os resultados obtidos demonstraram que a metodologia proposta com as redes neurais artificiais, para a geração e otimização dos parâmetros de processo e o posterior controle em tempo real mediante o processamento digital de imagens e os controladores *fuzzy*, é eficiente, obtendo com poucos testes, em pouco tempo de treinamento e aplicação, ótimos resultados, e mostrando-se como uma boa opção no controle das características geométricas dos cordões de solda.
- As *interfaces* gráficas de usuário se apresentam como uma ferramenta útil e interativa que permite a interação do usuário com o sistema de controle em tempo real da altura do reforço e largura do cordão de solda, onde, a partir dos valores desejados, o programa fornece os parâmetros da velocidade do arame, da tensão e da velocidade de soldagem que atingem a medida desejada, além da visualização do comportamento dos parâmetros e dos sinais correspondentes ao controle durante o processo de soldagem.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- A metodologia para a modelagem e o controle da altura do reforço do cordão de solda pode ser aplicada em outros tipos de parâmetros de soldagem como parâmetros de saída do modelo, variando-se, por exemplo, o *stickout*, o fluxo de gás, o ângulo de inclinação da tocha etc., o que permite analisar sua influência na geometria dos cordões de solda e sua possível utilização como variável manipulável no controle da geometria final do cordão no processo GMAW.

- O sistema proposto e desenvolvido no presente estudo pode ser aplicado na modelagem, na predição dos parâmetros ótimos de processo e no controle das características geométricas dos cordões de solda em outros processos de soldagem, como, por exemplo, o FCAW e o GTAW.
- Outra ação futura necessária para fortalecer e impulsionar a aplicabilidade do processo GMAW na indústria é a formação de um sistema integrado da modelagem, estimação, monitoramento e controle das características geométricas do cordão de solda, tais como: a altura do reforço, a largura, a penetração e a área depositada, dominando os parâmetros de processo – a velocidade de alimentação do arame, a velocidade de soldagem e a tensão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abende (Associação Brasileira de Ensaaios não Destrutivos e Inspeção). (2008), web site: <http://www.abende.org.br>.
- Alam, M.M., Barsoum, Z., Jonsén, P., Kaplan, A.F.H. e Häggblad, H.A. (2010). The influence of surface geometry and topography on the fatigue cracking behavior of laser hybrid welded eccentric fillet joints. In: *Journal Applied Surface Science* 256, 1936–1945.
- Allende, G., Mirapeix, J., Cobdo, A., Conde, O. M. e Lopez-Higuera, J. M. (2008). Arc welding quality monitoring by means of near infrared imaging spectroscopy. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, ISBN 978-0-8194-7130-7, 18-20.
- Althouse, A., Turnquist C. H., Bowditch, W., Bowditch, K. e Bowditch, M. (2004). *Modern Welding*, 10th Edition, Goodheart-Willcox Co Inc, 27-35.
- Ancona, A., Lugara, P. M., Ottonelli, F. e Catalano, I. M. (2004). A sensing torch for on-line monitoring of gas tungsten arc welding processes of steel pipes. In: *IOP Publishing, Mea. Sci. Technol.*, 15, 2412-2418.
- Andersen, K., Cook, G., Karsai, G. e Ramaswmy, K. (1990). Artificial neural network applied to arc welding process modelling and control, In: *IEEE Transactions on Industry Applications*, 26(5), 824-830.
- Ates, H., (2007). “Prediction of gas metal arc welding parameters based on artificial neural networks.” In: *Materials and Design*, 28, 2015–2023.
- AWS. (1989). *Recommended Practices for Gas Metal Arc Welding*. C5.6-89R, Lejeune Road Miami, Florida, E.U.A.
- Bae, K.Y., Lee, T.H. e Ahn, K.C. (2002). An optical sensing system for seam tracking and weld pool control in gas metal arc welding of steel pipe. In: *Journal of Materials Processing Technology*, volume 120, issues 1–3, 458–465.
- Balasubramanian, M., Jayabalan, V., e Balasubramanian, V. (2008). Developing mathematical models to predict grain size and hardness of argon tungsten pulse current arc welded titanium alloy. In: *Journal of material processing technology*, vol 196, 222-229.
- Balfour, C., Lucas, J., Maqbool, S., Smith, J. S. e Mcilroy, L. (2000). A Neural Network Model for MIG welding Parameter Prediction. In: *Proc. 10th Int. Conf. on Computer Technology in Welding*, Copenhagen, Denmark.

- Bingul, Z. e Cook, G. E. (2006), A Real–Time Prediction Model of Electrode Extension for GMAW, In: IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol 11(1), 13-17.
- Campbell, S. W., Galloway, A. M. e McPherson, N. A. (2012). Artificial neural network prediction of weld geometry performed using GMAW with alternating shielding gases. In: *Welding Journal*, 91 (6), 174S-181S.
- Carrino, L., Natale, U., Nele, L., Sabatini, M. L. e Sorrentino, L. (2007). A neuro-fuzzy approach for increasing productivity in gas metal arc welding processes. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32 (5-6), 459-467.
- Carvalho, A. e Ludemir, A., (1998). Fundamentos de redes neurais artificiais. In: *11ª Escola de computação*. Imprinta Gráfica e Editora Ltda. 28-32.
- Cary H. B. (1979). “Modern Welding Technology”. Prentice Hall. 169-175. New Jersey. E.U.A.
- Casalion, G. e Minutolo, F. M. (2004). Model for evaluation of laser welding efficiency and quality using an artificial neural network and fuzzy logic, In: *Journal of Engineering Manufacture*, 218(B), 1-6.
- Castro, L.N. (1998). *Análise e Síntese de Estratégias de Aprendizado para Redes Neurais Artificiais*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 250p.
- Chan, B., Pacey, J. e Bibby, M. (1999) .Modelling gas metal arc weld geometry using artificial neural network technology. In: *Journal of Canadian Metallurgical Quarterly*, 38(1), 43-51.
- Chen, S. B., Zhang, Y., Qiu, T. e Lin, T. (2003). Robotic welding systems with vision sensing and self-learning neuron control of arc weld dynamic process. In: *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 36, 191-208.
- Christensen, K. H., Sorensen T. e Kristensen, J. K. (2005). Gas metal arc welding of butt joint with varying gap width on neural networks, In: *Journal of Science and Technology of welding and joining*, 10(1), 32-43.
- Coelho, F. G. (2010). *Modelagem da Geometria de Cordões de Solda Utilizando Lógica Fuzzy*. Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais. 97p.
- Cook, G., Barnett, R. J., Andersen, K. e Strauss, A. M. (1995). Weld modelling and control using artificial neural networks, In: *IEEE Transactions on Industry Applications*, 31(6), 1484-1491.

- Cortés, P.A., Gómez, D.A., Posada, D. e Giraldo, J.E. (2011), *Efecto de la oscilación en la geometría de soldaduras superficiales aplicadas con GMAW cortocircuito*, Trabalho de Conclusão de Curso. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- De Medeiros J.S. (1999). *Bancos de dados geográficos e redes neurais artificiais: tecnologias de apoio à gestão do território*. Dissertação de doutorado. Departamento de geografia - Universidade de São Paulo. 87p.
- Du, J., Longobardi, J., Latham, W. P., e Kar, A. (2000). Welding geometry and tensile strength in laser thin sheet metals. In: *Science and Technology of Welding & Joining*, 5(5), 304-309.
- Dutta, P. e Pratihari, D.K. (2007). Modelling of TIG welding process using conventional regression analysis and neural network-based approaches. In: *Journal of Materials Processing Technology*, 184, 56–68.
- Eguchi K., Yamane S., Sugi H. e Oshima K. (1999). Application of neural network to arc sensor. In: *Science and Technology of Welding & Joining*, 4(6), 327-334.
- Eroglu M., Aksoy M. e Orhan M. (1999). Effect of coarse initial grain size on microstructure and mechanical properties of weld metal and HAZ of a low carbon steel. In: *Journal of Material science and engineering*, 269, 59-66.
- Farson, D., Richardson R. W. e Li, X. (1998). Infrared measurement of base metal temperature in gas tungsten arc welding. In: *Weld Journal supplement, AWS*.
- Ferneda, E. (2006). Redes neurais e sua aplicação em sistemas de recuperação de informação. In: *Jornal Ciência da Informação*, 35(1), 25-30.
- Frazer, I., Fyffe, L., Gibson, O. J. e Lucas, W. (2002). Remotely operated underwater thermal cutting processes for decommissioning of large North Sea platforms. In: 21st International Conf. on offshore Mechanics and Arctic Engineering, Norway.
- Giraldo, J. (1997). Aspectos básicos del control de calidad de estructuras metálicas soldadas. In: *Aciem*, 1(1), 10-15.
- Godoy Simões M. e Shaw I. S. (2007). “Controle e Modelagem Fuzzy.” 2a Edição Revista e Ampliada. Editora Blucher. 200-201.
- Gomide, F. e Gudwin, R.R. (1994). Modelagem, controle, sistemas e lógica fuzzy. In: *SBA Controle & Automação*, 4(3). 12-18.
- Ganjigatti J.P., Pratihari D.K. e Roychoudhury A. (2007). Global versus cluster-wise regression analyses for prediction of bead geometry in MIG Welding process. In: *Journal of materials processing technology*, 189, 352-366

- Ganjigatti J.P., Pratihari D.K. e Roychoudhury A. (2008). Modeling of MIG welding process using statistical approaches. In: *International journal of advanced manufacturing technology*, 35, 1166-1190.
- Gunaraj, V. e Murugan, N. (1999). Application of response surface methodology for predicting weld bead quality in submerged arc welding of pipes. In: *Journal of Materials Processing Technology*, 88(1-3), 266 – 275.
- Gurev H. S. e Stout, R. D. (1963). “Solidification phenomenon in inert gas metal arc welding”. In: *Welding Journal*, 42(7), 298-310.
- Haykin, S. (2001). “Redes Neurais: Princípios e Prática.” 2.^a edição, Bookman, Porto Alegre.
- Hong, L., Kee, L. F., Yu, J. W., Mohanmurthy, P. H., Devanathan, R., Xiaoqi, C. e Piu, C. S. (2000). Vision based GTA weld pool sensing and control using neurofuzzy logic. In: SIMTech Technical Report. Singapore Institute of Manufacturing Technology.
- Huang, W. e Kovacevic, R. W. (2009). Feasibility study of using acoustic signals for online monitoring of the depth of weld in the laser welding of high-strength steels. In: *Journal of Engineering Manufacture IMechE*, 223(B).
- Iordachescu D., Quintino L. M. e Pimenta G. (2006). Influence of shielding gases and process parameters on metal transfer and bead shape in MIG brazed joints of the thin zinc coated steel plates. In : *Journal of Materials and Design*, 27, 381-390.
- Jeng, J. Y., Mau, T. e Leu, S. (2000). Prediction of laser butt joint welding parameters using back propagation and learning vector quantization networks. In: *Journal of Materials Processing Technology*, 99, 207-218.
- Juan W. e Yajiang L. (2003). Microstructure characterization in the weld metals of high strength steels. In: *Journal material science*, 26, 295-299.
- Juang, S. C., Tarng, Y. S. e Lii, H. R., (1998). A comparison between the back-propagation and counter-propagation networks in the modelling of the TIG welding process. In: *Journal of Material Processing Technology*, 75, 54-62.
- Kim, I. S. (1995). *Numerical and experimental analysis for the GMAW process*, Doctor of Philosophy thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Wollongong, Wollongong, Australia.
- Kim I. S., Basu A. e Siores E. (1996). Mathematical models for control of weld bead penetration in GMAW process. In: *International journal of advanced manufacturing technology*, 12, 393-401

- Kim, I. S., Son, J. S., Park, C. E., Lee, C. W. e Prasad, Y. K. (2002). A study on prediction of bead height in robotic arc welding using a neural network. In: *Journal of Materials Processing Technology*, 130, 229-234.
- Kim I. S., Son K. J., Yang Y. S. e Yaragada P. K. (2003a). Sensitivity analysis for process parameters in GMAW processes using a factorial design method. In: *International journal of machine tools and manufacture*, 43, 763-769.
- Kim I. S., Son K. J., Yang Y. S. e Yaragada P.K. (2003b). Sensitivity analysis for process parameters influencing weld quality in robotic GMAW process. In: *Journal of materials processing technology*, 140, 676-681.
- Kim I. S, Son J. S., Kim I. G., Kim J. Y. e Kim O. S. (2003c). A study on relationship between process variables and bead penetration for robotic CO2 arc welding. In: *Journal of material processing technology*, 136, 139-145.
- Kim I. S., Son, J. S., Lee S. H. e Yarlagadda, P. K. (2004). Optimal design of neural networks for control in robotic arc welding. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 20, 57-63.
- Kolhe P. Kishor C. e Dutta C. K. (2008). Prediction of microstructure and mechanical properties of multipass SAW. In: *Journal of materials processing technology*, 197, 241-249.
- Kumar V., Khamba, J. S. e Mohan, N. (2011). *Development and characterization of fluxes for submerged arc welding*, Doctor of Philosophy thesis, Universidad Punjabi, Patiala, India, 103 -113.
- Lee, J.I. e Rhee S. (2000). Prediction of process parameters for gas metal arc welding by multiple regression analysis. In: *Journal of the Institution of mechanical engineers*, 214(B), 443-449.
- 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. In: *Journal of Optics and Lasers in Engineering*, 34, 149-158.
- Li, P. J. e Zhang, Y. M. (2000). Analysis of an Arc Light Mechanism and its Applications in Sensing of the GTAW Process. In: *Welding Research Supplement, Research and Development*, 252-260.
- Luo, H., Devanathan, R., Wang, J., Chen, X. e Sun, Z. (2002). Vision based Neuro-fuzzy logic control of weld pool geometry. In: *Science and Technology of Welding and Joining*, 7(5), 321-325.

- Malviya, R. e Pratihari, D.K., (2011). Tuning of neural networks using particle swarm optimization to model MIG welding process. In: *Swarm and evolutionary computation*, 1(4), 223–235.
- Manikya, K. K. e Srinivasa, R. P. (2008). Prediction of bead geometry in pulsed GMAW using back propagation neural network. In: *Journal of materials processing technology*, 200, 300-305.
- Miller, M., Mi, B, Kita, A. e Ume, I. C. (2002). Development of automated real-time data acquisition system for robotic weld quality monitoring. In: *Mechatronics*, 12(9-10), 1259-1269.
- Modenesi, P. (2007). Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais. Editora UFMG, Belo Horizonte, Brasil.
- Murugan N. e Parmar R.S. (1994). Effect of MIG process parameters on the geometry of the bead in the automatic surfacing of stainless steel. In: *Journal of material processing technology*, 41, 381-398.
- Nadzam J., Armao F., Byall L., Kotecki D. e Miller D. (2011). *Gas Metal Arc Welding Guide lines*, Lincoln Electric literature editorial, 24-33.
- Nagesh, D.S. e Datta, G. L. (2002). Prediction of weld bead geometry and penetration in shielded metal-arc welding using artificial neural networks. In: *Journal of Materials Processing Technology*. 123, 303-312.
- Pal, K., Bhattacharya, S. e Pal, S. (2010). Investigation on arc sound and metal transfer modes for on-line monitoring in pulsed gas metal arc welding. In: *Journal of Materials Processing Technology*, 210(10), 1397-1410.
- Pal, S., Pal. S. K. e Samantaray, S. K., (2008). Artificial neural network modeling of weld joint strength prediction of a pulsed metal inert gas welding process using arc signals. In: *Journal of materials processing technology*, 202, 464-474.
- Palani P.K. e Murugan N. (2006). Development of mathematical models for prediction of weld bead geometry in cladding by flux cored arc welding. In: *International journal advanced technology*, 30, 669-679.
- Pandey, S. e Mohan, N. (2003). Investigation into flux consumption. In: *International Conference on CAD, CAM, Robotics and Autonomous Factories*, Delhi, India.
- Park, H. e Rhee, S. (1999). Estimation of weld bead size in Co₂ laser welding by using multiple regression and neural network. In: *Journal of Laser Application*, 11(3), 143-150.

- Patel, P. D. e Patel, S. P. (2012). Prediction of weld strength of metal active gas (MAG) welding using artificial neural network. In: *International Journal of Engineering Research and Applications*, 1(1), 36-44.
- Ridings, G. E., Thomson, R. C. e Thewlis, G. (2002). Prediction of multiwire submerged arc weld bead shape using neural network modelling, In: *Journal of Science and Technology of welding and joining*, 7(5), 265-279.
- Sathiya, P., Panneerselvam, K. e Abdul Jaleel, M.Y. (2012). Optimization of laser welding process parameters for super austenitic stainless steel using artificial neural networks and genetic algorithm. In: *Materials and Design*. 36, 190-198.
- Scotti, A. (2008), A Portrait of the Welding Research in Brazil, In: *Soldagem & Inspeção*, 13(2), 160-164.
- Shoeb M., Parvez M. e Kumari P. (2013). Effect of mig welding input process parameters on weld bead geometry on hsla steel. In: *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, 5(1), 200- 212.
- Sibillano, T., Ancona, A., Berardi, V. e Lugarà, P. M. (2009). A Real-Time Spectroscopic Sensor for Monitoring Laser Welding Processes. In: *Sensors Review*, 9, 3376-3385.
- Singh, V., Tathavadkar, V., Mohan Rao, S. e Raju K. S. (2007). Predicting the performance of submerged arc furnace with varied raw material combinations using artificial neural network. In: *Journal of Materials Processing Technology*, 183, 111-116.
- Song, H. S. e Zhang, Y. M. (2008). Measurement and Analysis of Three-Dimensional Specular Gas Tungsten Arc Weld Pool Surface. In: *Supplement to The Welding Journal*, 85-95.
- Sreeraj, P. e Kannan, T. (2012). Modelling and Prediction of Stainless Steel Clad Bead Geometry Deposited by GMAW Using Regression and Artificial Neural Network Models. In: *Advances in Mechanical Engineering*, 12, 43-49.
- Sun, Z., Chen, Q., Zhang, W., Cao, Y. e Liu, P. (2006). A novel visual image sensor for CO₂ short circuiting arc welding and its applications in weld reinforcement detection. In: *IOP Publishing, Measurement Science and Technology*, 17, 3212-3220.
- Sung B.S., Kim I.S., Xue Y., Kim H.H e Cha Y.H. (2007). Fuzzy regression model to predict the bead geometry in the robotic welding process. In: *Acta Metallurgica Sinica*, 20, 391-397.

- Villani, P., Modenesi, P. e Bracarense, A. (2005). *Soldagem Fundamentos e Tecnologia*, 1.ed., Editora UFMG, Belo Horizonte, Brasil.
- Vitek, J. M., Iskander, Y. S. e Oblow E. M. (1998). Neural network modeling of pulsed-laser weld pool shapes in aluminum alloy welds, In: *5th International Conference on Trends in Welding Research*, Pine Mountain, Georgia, E.U.A, 442-448.
- Węglowski, M. S. (2009). Measurement of Arc Light Spectrum in the MAG Welding Method. Institute of Welding. In: *Metrology and Measurement Systems*, 16(1), 143-160.
- Weiman, C. (1981). Fundamentals of welding. In: American Welding Society Handbook, Vol. 2, Florida.
- Wu, C. S., Polte, T. e Rehfeldt, D. (2000). Gas metal arc welding monitoring and quality evaluation using neural network. In: *Science and Technology of Welding and Joining*, 5(5), 131–141.
- Wu, C.S., Polte, T. e Rehfeldt, D. (2001). A fuzzy logic system for process monitoring and quality evaluation in GMAW. In: *Weld Journal* 80(2), 33–38.
- Wu, C. S., Gao, J. Q., Liu, X. F. e Zhao, Y. H. (2003). Vision-based measurement of weld pool geometry in constant-current gas tungsten arc welding. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 217(B), 114-122.
- Wu C. S. e Gao J. Q. (2006). Vision-based neuro-fuzzy control of weld penetration in gas tungsten arc welding of thin sheets. In: *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 1(2), 126-132.
- Xavier, P. P. S. (2005). Efeitos de Diferentes Regiões Urbanas na Propagação de Sinais de Sistemas de Comunicações Pessoais Baseados em Redes de Satélites Não Geoestacionários. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 106.
- Zadeh, L. (1965). Fuzzy Sets. In: *Information and Control*, 8, 338-353.
- Zhang, Y. M., Kovacevic, R. W. e Li, L. (1996). Characterization and real-time measurement of geometrical appearance of the weld pool. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 36(7), 799-816.
- Zhang, P., Kong, L., Wenzhong, L., Jingjing, C. e Zhou, K. (2008). Real-time Monitoring of Laser Welding Based on Multiple Sensors. In: *Control and Decision Conference, CCDC*, China, 1746-1748.