



**TESE DE DOUTORADO**

**MONITORAÇÃO E ANÁLISES DA PENETRAÇÃO DO CORDÃO  
DE SOLDA ATRAVES DA OBSERVAÇÃO DA OSCILAÇÃO DA  
POÇA DE FUSÃO NO PROCESSO GMAW-S.**

**JORGE ANDRÉS GIRÓN CRUZ**

**Brasília-DF, 2018**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**Faculdade de Tecnologia**

**Departamento de Engenharia Mecânica**

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

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

**MONITORAÇÃO E ANÁLISES DA PENETRAÇÃO DO  
CORDÃO DE SOLDA ATRAVES DA OBSERVAÇÃO DA  
OSCILAÇÃO DA POCA DE FUSÃO NO PROCESSO  
GMAW-S.**

**JORGE ANDRÉS GIRÓN CRUZ**

**ORIENTADOR: SADEK CRISÓSTOMO ABSI ALFARO**

**TESE DE DOUTORADO EM SISTEMAS  
MECATRÔNICOS**

**PUBLICAÇÃO: ENM.TD – 17/18**

**BRASÍLIA/DF: MAIO – 2018**

# UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica

## MONITORAÇÃO E ANÁLISES DA PENETRAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA ATRAVÉS DA OBSERVAÇÃO DA OSCILAÇÃO DA POÇA DE FUSÃO NO PROCESSO GMAW-S.

**JORGE ANDRÉS GIRÓN CRUZ**

*Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos do Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Sistemas Mecatrônicos.*

### Banca Examinadora



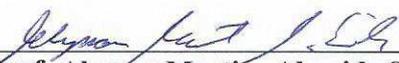
---

**Prof. Sadek C. Absi Alfaro, PhD, ENM/UnB**  
ENM/FT/UnB  
Orientador



---

**Prof. Louriel Oliveira Vilarinho, Dr, FEMC/UFU**  
FEMC/UFU  
Examinador externo



---

**Prof. Alysson Martins Almeida Silva, Dr, ENM/UnB**  
ENM/UnB  
Examinador externo



---

**Prof. José Maurício Santos Torres da Motta, Dr, ENM/UnB**  
ENM/FT/UnB  
Examinador Interno

**BRASÍLIA- DF, 18 DE MAIO DE 2018.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

CRUZ, JORGE ANDRÉS GIRÓN

Monitoração e análises da penetração do cordão de solda através da observação da oscilação da poça de fusão no processo GMAW-S. [Distrito Federal] 2018.

xviii, 122p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Doutor, Sistemas Mecatrônicos, 2018).  
Tese de Doutorado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

- |                                     |                                 |
|-------------------------------------|---------------------------------|
| 1. Processo GMAW                    | 2. Monitoração da Poça de Fusão |
| 3. Controle da Penetração do Cordão | 4. Inteligência Artificial      |

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CRUZ, J. A. G. (2018). Monitoração e análises da penetração do cordão de solda através da observação da oscilação da poça de fusão no processo GMAW-S. Tese de Doutorado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.TD/18, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 122p.

## CESSÃO DE DEREITOS

AUTOR: Jorge Andrés Girón Cruz

TÍTULO: Monitoração e análises da penetração do cordão de solda através da observação da oscilação da poça de fusão no processo GMAW-S.

GRAU: Doutor

ANO: 2018

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta Tese de Doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta Tese de Doutorado 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.

## **Dedicatória**

*Dedicado aos meus pais e ao meu irmão, que com seu compreensão, amor e carinho me fortaleceram nos momentos mais difíceis, também por me ensinar a perseguir minhas ilusões com dedicação e coragem. A meu avô Luis, pelas lições deixadas e pelo exemplo de humanidade e dedicação à família que sempre mostrou em vida.*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente quero agradecer a Deus pela sua proteção, pelas oportunidades e bênçãos recebidas, por ter colocado no meu caminho pessoas maravilhosas que tornaram isto possível.

Aos meus pais: Jorge e Deiby, suas bênçãos, seu amor e compreensão me mantiveram forte em cada um dos diferentes momentos que levou este processo. Meu irmão: Fabian Eduardo, sua confiança em mim e seu apoio incondicional alimentaram meu espírito e me permitiram sobrelevar os tempos mais difíceis. Aos meus avós Luis, Alicia, Etelberto e Susana, obrigado pelo amor e apoio em cada passo da minha vida. A minha família, por que mesmo de longe sempre estiveram do meu lado o tempo todo, me apoiando e dando forças. Para todos eles meu maior agradecimento.

Ao meu orientador, Professor Sadek Absi Alfaro, pela amizade, confiança, orientação e constante apoio.

Aos meus professores, funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília e do Laboratório do GRACO, que com sua ajuda, sugestões e estímulos tornaram possível este trabalho.

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

Ao Antonio Marrocos pela sua total disposição e apoio incondicional no laboratório.

A todas as pessoas que de alguma forma contribuíram com esta pesquisa.

Finalmente, agradeço ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro.

*“Enquanto os filósofos discutem se a inteligência artificial é possível ou não, os pesquisadores a constroem.”*

*- C. Frabetti*

## **RESUMO**

### **MONITORAÇÃO E ANÁLISES DA PENETRAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA ATRAVÉS DA OBSERVAÇÃO DA OSCILAÇÃO DA POÇA DE FUSÃO NO PROCESSO GMAW-S.**

**Autor: Jorge Andrés Girón Cruz.**

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

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

**Brasília, Maio de 2018.**

A busca por métodos de produção com melhor controle da qualidade e maior produtividade tem impulsionado o uso de sistemas automatizados em processos industriais como a soldagem. Porém, tornar a soldagem eficiente e econômica, é necessário para reduzir o desperdício de material e tempo gasto na produção e ensaios de verificação de qualidade. Isso pode ser conseguido por meio de sistemas automatizados que substituam os soldadores especialistas e sejam capazes de prever a geometria do cordão de solda a partir dos parâmetros de soldagem – permitindo que um processo realizado com os parâmetros determinados forneça uma junta com as propriedades mecânicas desejadas. Durante anos, muito se tem feito no sentido de prever os problemas na soldagem com o intuito de torná-la um processo estável, capaz de efetuar uniões de peças com o mínimo de interferência humana. Dos vários sensores utilizados em processos de soldagem, ainda não há uma opção eficaz capaz de identificar, diretamente, as características do cordão obtido durante o processo. Esse é um fator limitante no controle do processo, pois somente é possível determinar as características do cordão após a realização da solda através de ensaios (destrutivos ou não), quando nenhuma ação de controle pode ser tomada. Este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de monitoramento da poça de fusão em tempo real usado para obter imagens do comportamento da oscilação da poça durante a solda. Uma nova abordagem para este tipo de imagens é a utilização de um sistema de iluminação por laser do processo, de modo que uma imagem de alta qualidade natural da poça de fusão, eletrodo e cordão de solda possa ser obtida, dando detalhes da poça e arredores. Essa estratégia, independente de modelos pré-definidos do processo, permite controlar a penetração dos cordões de solda no processo GMAW no modo de transferência metálica por curto-circuito (GMAW-S). Para o modelo e controlador definiu-se a utilização de sistemas inteligentes focados diretamente nas medições da oscilação da poça de fusão e a estimação da penetração dos cordões de solda a partir dos parâmetros de processo. Finalmente, um modelo para relacionar a profundidade da penetração, a frequência de oscilação da poça com a formação e o padrão das escamas na superfície do cordão de solda é proposto.

## **ABSTRACT**

The search for methods of production with better quality control and greater productivity has promoted the use of automated systems in industrial processes such as welding. However, make the welding efficient and economical; it is necessary to reduce the waste and time spent on the production and quality tests. This can be achieved by means of automated systems to replace those skilled welders and be able to predict the geometry of the weld bead as welding parameters - allowing a process performed with the determined parameters provide a joint with the desired mechanical properties. For years, much has been done to predict problems in welding in order to make it a stable process capable of making unions parts with minimal human interference. The various sensors used in welding processes, there is still no effective option able to identify, directly, the weld bead characteristics obtained during the process. This is a limiting factor in the process control, because only can be determined the weld bead characteristics after the completion of welding through testing (destructive or not) when no control action can be taken. This work proposes the development of a real-time weld pool monitoring system to obtain the images of the weld pool oscillation behavior during welding. A novel approach to this type of images is the use of a laser lighting system for illumination of the process, so that a high quality natural image of the weld pool, electrode and weld bead can be obtained, giving details of the weld pool and surrounding area. This strategy, regardless of predefined models, can control the weld bead penetration in the GMAW-S process. For the proposed model and controller is defined the use of intelligent systems focused on the measurements of the weld pool oscillations and the estimation of the weld bead penetration from the process parameters. Finally, a model to relate the weld penetration depth, the weld pool oscillation frequency with the formation and the pattern of the ripples on the weld bead surface is proposed.

# SUMARIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1. MOTIVAÇÃO</b>	<b>2</b>
<b>1.2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA</b>	<b>3</b>
<b>1.3. OBJETIVOS</b>	<b>5</b>
1.3.1. Objetivo geral	5
1.3.2. Objetivos específicos	5
<b>1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO</b>	<b>5</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>7</b>
<b>2.1. PROCESSO DE SOLDAGEM</b>	<b>7</b>
<b>2.2. PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW</b>	<b>8</b>
2.2.1. Definição do Processo GMAW	8
2.2.2. Equipamentos no processo de soldagem GMAW	8
2.2.3. Parâmetros do Processo de Soldagem GMAW	9
2.2.3.1. Corrente de soldagem	10
2.2.3.2. Tensão de soldagem	11
2.2.3.3. Velocidade de soldagem	11
2.2.4. Modos de Transferência	12
2.2.4.1. Modo de transferência por Curto Circuito	12
<b>2.3. A QUALIDADE EM PROCESSOS DE SOLDAGEM GMAW</b>	<b>13</b>
2.3.1. Geometria do cordão de solda	14
2.3.1.1. Penetração da solda	15
<b>2.4. TOPICOS ESPECIAIS EM PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS</b>	<b>15</b>
2.4.1. Processamento digital de imagens	15
2.4.2. Imagem digital	16
2.4.2.1. Região de Interesse	18
2.4.2.2. Distâncias	18
2.4.2.3. Filtragem	19
2.4.2.4. Segmentação	20
2.4.2.5. Binarização	21
2.4.2.6. Reconhecimento	22
<b>2.5. CONTROLE DE PROCESSOS</b>	<b>22</b>
2.5.1. Controle Robusto	23
2.5.2. Controle Adaptativo	23
2.5.3. Controle Inteligente	24
<b>3. ESTADO DA ARTE</b>	<b>26</b>
<b>3.1. MONITORAMENTO DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DO CORDÃO DE SOLDA</b>	<b>26</b>

3.1.1. Sistemas de visualização da poça de fusão	27
3.1.2. Sistemas de luz estruturada	29
3.1.3. Sistemas de monitoramento de outras características na soldagem.	29
3.1.4. Visão artificial na robotica e algoritmos de software	30
<b>3.2. CALIBRAÇÃO DE CAMERAS PARA FINS DE MONITORAMENTO DO PROCESSO</b>	<b>31</b>
<b>3.3. MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROCESSO</b>	<b>32</b>
3.3.1. Modelos estatísticos	32
3.3.2. Sistemas inteligentes	34
3.3.3. Modelos matemáticos	35
<b>3.4. CONTROLE DO PROCESSO DE SOLDAGEM</b>	<b>36</b>
<b>3.5. MODELAGEM E CONTROLE DA PENETRAÇÃO DA SOLDA</b>	<b>38</b>
<b>3.6. SUMÁRIO</b>	<b>39</b>
<b>4. PROPOSTA METODOLOGIA EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTOS</b>	<b>41</b>
<b>4.1. MONITORAMENTO DA OSCILAÇÃO DA POÇA DE FUSÃO</b>	<b>41</b>
4.1.1. Estabelecimento do sistema de filmagem da oscilação da poça de fusão	42
4.1.1.1. Sistema de iluminação	43
4.1.2. Construir a planta experimental	44
4.1.3. Processamento das imagens	46
4.1.3.1. Análise do Espectro de Fourier da oscilação da poça de fusão	48
<b>4.2. MODELAGEM DA OSCILAÇÃO DA POÇA DE FUSÃO</b>	<b>50</b>
4.2.1. Definir o desenho experimental	50
4.2.2. Realização dos experimentos	52
4.2.3. Extração dos parâmetros geométricos dos cordões de solda	53
4.2.4. Obtenção do modelo de oscilação da poça de fusão	55
4.2.4.1 Desenvolvimento do modelo baseado em Redes Neurais Artificiais	55
4.2.5. Validação do modelo	59
<b>4.3. CONTROLE DA PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA</b>	<b>59</b>
4.3.1. Determinação do tipo de controlador	59
4.3.2. Definição das ações de controle (variáveis manipuladas e controladas)	60
4.3.3. Implementação do controlador para a profundidade da penetração do cordão de solda	64
<b>4.4. ANALISES DA FORMAÇÃO DE ESCAMAS NOS CORDÕES DE SOLDA</b>	<b>64</b>
<b>5. RESULTADOS</b>	<b>67</b>
<b>5.1. RESULTADOS DA METODOLOGIA</b>	<b>67</b>
5.1.1. Avaliação da metodologia de medição	67
5.1.2. Modelagem da oscilação da poça de fusão por meio de redes neurais artificiais	74
5.1.3. Desenvolvimento do controlador difuso	80

<b>5.2 RESULTADOS DE IMPLEMENTAÇÃO</b>	<b>83</b>
<b>5.3. ANÁLISES DA FORMAÇÃO DE ESCAMAS NOS CORDÕES DE SOLDA</b>	<b>92</b>
<b>6 . DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>94</b>
<b>7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>99</b>
<b>7.1. CONCLUSÕES</b>	<b>99</b>
<b>7.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>101</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>102</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1: Desenvolvimento da teoria de controle. (Modificado Von Zuben, 2000)..	23
Tabela 4. 1: Valores limites dos parâmetros de soldagem. ....	50
Tabela 4. 2: Níveis codificados e os valores reais para cada parâmetro de processo.....	51
Tabela 4. 3: Matriz de experimentos. ....	52
Tabela 4. 4: Espectros de frequências obtidos dos experimentos.....	53
Tabela 4. 5: Medidas das penetrações dos cordões obtidos nos experimentos. ....	54
Tabela 4. 6: Regras de Inferência Difusa para o controlador. ....	63
Tabela 5. 1: Parâmetros de soldagem preditos pela rede neural artificial para diferentes penetrações do cordão de solda. ....	77
Tabela 5. 2: Tabela de resíduos das respostas do modelo e dos experimentos. ....	79
Tabela 5. 3: Informação obtida nos testes de avaliação das regras e saídas do controlador. ....	82
Tabela 5. 4: Testes selecionados para avaliar o controle da penetração do cordão de solda. ....	83
Tabela 5. 5: Dados para a correlação com o padrão das escamas na superfície do cordão. ....	92

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1: Equipamentos básicos de soldagem GMAW (Modificado Nadzam, 2011).	9
Figura 2. 2: Características geométricas do cordão de solda.....	10
Figura 2. 3: Modo de transferência de metal por curto circuito. Modificado (BOC, 2007). .....	12
Figura 2. 4: Penetração em juntas de soldagem. Modificado: Modenesi (2008). .....	15
Figura 2. 5: Fases que compõem o processamento de imagens digitais.....	16
Figura 2. 6: Representação de um pixel numa imagem.....	17
Figura 2. 7: Digitalização de uma imagem.....	17
Figura 2. 8: Conexão entre dois pontos $p(x,y)$ e $q(s,t)$ .(Modificado de Albuquerque, 2001).....	18
Figura 2. 9: Determinação do perímetro de uma forma usando conectividade D8. (Modificado de Albuquerque, 2001).....	19
Figura 2. 10: Filtragem de uma imagem. (a) - Imagem original. (b) - A imagem com um filtro Médio (passa-baixas). (c) - Filtro de detecção de variações bruscas no sentido horizontal (Passa-Alta). (d) - Filtro também Passa-Alta que melhora o contraste da imagem realçando os contornos do objeto. (Modificado de Albuquerque, 2001)..	20
Figura 2. 11: a) Imagem com região de intensidade constante. b) Imagem mostra as bordas da região interior, obtida da descontinuidade de intensidade. c) Resultado da segmentação da imagem em duas regiões. (Modificado de Albuquerque, 2001)...	21
Figura 2. 12: Sistemas de controle. (a) Em malha aberta; (b) em malha fechada. ....	23
Figura 2. 13: Sistemas de controle adaptativo. (Modificado de Von Zuben, 2000).....	24
Figura 3. 1: Distribuição Percentual dos trabalhos e pesquisas abordados. ....	40
Figura 4. 1: Esquema da metodologia proposta para o sistema de controle da penetração do cordão de solda no processo GMAW-S. ....	42
Figura 4. 2: Técnica de perfilografia. ....	44
Figura 4. 3: Distribuição do sistema computacional e hardware utilizado. Cruz (2014). .....	45
Figura 4. 4: (a) Exemplo de Imagem Original (b) Exemplo de Imagem Pós-Processada. .....	47
Figura 4. 5: Obtenção da coordenada do ponto selecionado numa imagem analisada. .	48
Figura 4. 6: Oscilação do ponto $X=215$ .....	49

Figura 4. 7: Espectros de frequências do sinal de oscilação da poça de fusão no ponto X=215.....	49
Figura 4. 8: Desenho Central composto para três variáveis. ....	51
Figura 4. 9: Seção transversal do cordão de solda.....	54
Figura 4. 10: Topologia da Rede Neural Artificial.....	57
Figura 4. 11: Representação difusa e variáveis linguísticas das entradas do controlador. ....	61
Figura 4. 12: Representação difusa e variáveis linguísticas da saída do controlador....	62
Figura 4. 13: Malha de controle.....	64
Figura 4. 14: Escamas no cordão de solda. ....	65
Figura 4. 15: Superfície de resposta da relação na produção de escamas na superfície dos cordões. ....	66
Figura 5. 1: Zona da imagem para a aquisição das imagens da poça de fusão.....	67
Figura 5. 2: Sequência de imagens da oscilação da poça de fusão durante formação do cordão 1, adquiridas a uma taxa de 1 frame/s. ....	69
Figura 5. 3: Sequência de imagens da oscilação da poça de fusão durante formação do cordão 2, adquiridas a uma taxa de 1 frame/s.. ....	71
Figura 5. 4: Análises do poça de fusão no ponto X=215. (a) Sinal obtido da oscilação no ponto. (b) espectro de frequência. ....	72
Figura 5. 5: Análises de oscilação em X=255 (mais perto do arco). (a) sinal oscilante. (b) espectro de frequência. ....	72
Figura 5. 6: Análises de oscilação em X=175 (intermediário). (a) sinal oscilante. (b) espectro de frequência. ....	73
Figura 5. 7: Análises de oscilação em X=35 (longe do arco). (a) sinal oscilante. (b) espectro de frequência. ....	73
Figura 5. 8: Representação da topologia da rede neural artificial implementada.....	74
Figura 5. 9: Monitor de progresso do treinamento da rede neural artificial para a penetração do cordão de solda. ....	75
Figura 5. 10: Comportamento do erro para a penetração do cordão de solda do mse da rede neural artificial. ....	76
Figura 5. 11: Ajuste conseguido pela rede neural artificial. ....	77
Figura 5. 12: Comportamento da tensão e da velocidade de alimentação de arame com respeito a diferentes profundidades de penetração do cordão de solda.....	78

Figura 5. 13: Comportamento da velocidade de alimentação de arame e da velocidade de soldagem com respeito a diferentes profundidades de penetração do cordão de solda. ....	78
Figura 5. 14: Comportamento da tensão e da velocidade de soldagem com respeito a diferentes profundidades de penetração do cordão de solda. ....	79
Figura 5. 15: Distribuição adequada dos resíduos. ....	80
Figura 5. 16: Simulação do cenário factível durante o controle. ....	81
Figura 5. 17: Relação erro na frequência e erro na faixa com respeito da velocidade de alimentação de arame. ....	81
Figura 5. 18: Relação erro na frequência e erro na faixa com respeito da velocidade de soldagem. ....	82
Figura 5. 19: Controle de profundidade da penetração. Tensão inicial: 21.8 V; velocidade de alimentação do arame inicial: 7.2 m/min; velocidade de soldagem inicial: 8.2 mm/s; penetração de referência: 1.5 mm. Sinais adquiridos: (a) Frequência de oscilação da poça de fusão; (b) Variação da frequência de oscilação; (c) Velocidade de alimentação do arame; (d) Velocidade de soldagem; (e) Tensão. ....	84
Figura 5. 20: Cordão final obtido depois do controle para uma penetração de 1.5 mm.	85
Figura 5. 21: Medidas dos sinais do processo para o controle da penetração com um valor de referência de 1.5 mm. ....	86
Figura 5. 22: Controle de profundidade da penetração. Tensão inicial: 21.4 V; velocidade de alimentação do arame inicial: 7.5 m/min; velocidade de soldagem inicial: 7.6 mm/s; penetração de referência: 1.8 mm. Sinais adquiridos: (a) Frequência de oscilação da poça de fusão; (b) Variação da frequência de oscilação; (c) Velocidade de alimentação do arame; (d) Velocidade de soldagem; (e) Tensão. ....	87
Figura 5. 23: Controle de profundidade da penetração. Tensão inicial: 21.3 V; velocidade de alimentação do arame inicial: 7.6 m/min; velocidade de soldagem inicial: 7.2 mm/s; penetração de referência: 2 mm. Sinais adquiridos: (a) Frequência de oscilação da poça de fusão; (b) Variação da frequência de oscilação; (c) Velocidade de alimentação do arame; (d) Velocidade de soldagem; (e) Tensão. ....	88
Figura 5. 24: Controle de profundidade da penetração. Tensão inicial: 20.9 V; velocidade de alimentação do arame inicial: 7.9 m/min; velocidade de soldagem inicial: 6.7 mm/s; penetração de referência: 2.5 mm. Sinais adquiridos: (a) Frequência de oscilação da poça de fusão; (b) Variação da frequência de oscilação; (c) Velocidade de alimentação do arame; (d) Velocidade de soldagem; (e) Tensão. ....	89

Figura 5. 25: Cordões finais obtidos depois do controle da penetração dos cordões de solda de 1.8 mm, 2 mm e 2.5 mm. ....	90
Figura 5. 26: Medidas dos sinais do processo para o controle da penetração para os valores de referência. (a) 1.8 mm, (b) 2 mm e (c) 2,5 mm. ....	91
Figura 5. 27: Superfície de resposta da relação das escamas na superfície dos cordões com a penetração. ....	93
Figura 5. 28: Relação entre diversas medidas de penetração e as escamas formadas na superfície do cordão de solda. ....	93

## LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

Abreviatura	Significado
ANFIS	Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
CCD	Charge-Coupled Device
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
CRS	Controlled Random Search Algorithm
DC	Direct Current
DCEN	Direct Current Electrode Negative
DCEP	Direct Current Electrode Positive
DE-GMAW	Double Electrode - Gas metal arc welding
EBW	Electron Beam Welding
FCAW	Flux Cored Arc Welding
GMAW	Gas metal arc welding
GMAW-P	Pulsed Gas Metal Arc Welding
GMAW-S	Gas Metal Arc Welding-Short Circuit Arc
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
GTAW-P	Pulsed Gas Tungsten Arc Welding
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
MIMO	Multiple-input Multiple-output
PAW	Plasma Arc Welding
PID	Proportional-Integral-Derivative controller
RNA	Rede Neural Artificial
SAW	Submerged arc welding
SFS	Shape From Shading
SISO	Single Input - Single Output
TIG	Tungsten Inert Gas
ZTA	Zona Termicamente Afetada

Símbolo	Significado
Ar	Argônio
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
D <sub>4</sub>	Distância Manhattan
D <sub>8</sub>	Distância Tabuleiro de Xadrez
De	Distância Euclidiana
S	Desvio padrão
$\mu$	Média amostral

# 1. INTRODUÇÃO

A união de peças metálicas por soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) 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.

Para cada produto obtido de processos de soldagem, as especificações técnicas da geometria e qualidade dos cordões de solda são garantidas, de forma geral, pela escolha correta dos parâmetros de processo. O procedimento de identificação da combinação adequada de parâmetros que garantam as especificações técnicas requeridas implica tempo e esforço de engenheiros e técnicos, mas é a chave para definir processos mais eficientes que produzam cordões de solda sem defeitos, com a geometria indicada e com o mínimo de desperdício de insumos.

Observar a superfície da poça de fusão e medir os parâmetros geométricos do cordão de solda é importante para o desenvolvimento de máquinas de soldagem inteligentes que permitiram interpretar e interatuar com o comportamento dos parâmetros de processo para produzir processos de soldagem mais práticos e confiáveis, além de ser importante quando se precisa de requerimentos técnicos específicos na redução de desperdício de insumos, custos e processos de revestimento e reparo.

## 1.1. MOTIVAÇÃO

Quando a soldagem atingiu escalas industriais, as exigências e requerimentos de qualidade da solda no mercado também foram se multiplicando. Para se garantir a qualidade do processo, nas últimas décadas o avanço da eletrônica e da informática no processo GMAW tem possibilitado consideráveis melhorias nas fontes de soldagem e a implementação de novas técnicas de monitoramento e controle do processo. De forma geral, novas tecnologias de automação têm sido desenvolvidas nos processos de soldagem e continuam evoluindo cada dia visando aumentar a produtividade e reduzir custos.

Na atualidade o monitoramento de algumas variáveis físicas do processo de soldagem para a análise e exploração das suas potencialidades e limitações para ser usadas como variáveis de realimentação no controle do processo mediante técnicas de fusão de sensores tem sido empregado como uma possibilidade de desenvolver estratégias de controle semelhantes das utilizadas pelo pessoal técnico especializado em soldagem, obtendo assim certo grau de automação dos processos de soldagem. Neste contexto os principais parâmetros a serem controlados são a corrente, a velocidade e a tensão de soldagem. São esses parâmetros que representam a energia do arco elétrico, que por sua vez faz fundir o metal de base e o arame. O metal quando fundido forma a poça de fusão que se movimenta de modo oscilatório devido à excitação proveniente do arco e da transferência metálica. A motivação deste trabalho é estudar o comportamento desta oscilação, pois ela está intimamente relacionada com a formação da solda. Pelo monitoramento da oscilação pode-se por exemplo saber o que ocorreu com a penetração da solda. Isso permite correção em tempo real do processo de soldagem de um parâmetro que antes não era possível ser monitorado.

Focado em processos de soldagem no modo de transferência por curto-circuito na posição plana, este trabalho visa contribuir no desenvolvimento de sistemas inteligentes que permitam controlar os parâmetros geométricos dos cordões de solda. A utilização de técnicas de processamento em tempo real focadas no monitoramento dos parâmetros de interesse permitirá ao sistema emular a tomada de decisões tais como as de um operário humano, além de permitir também recursos como a avaliação da estabilidade e do modo de transferência metálica do processo em tempo real. Os sistemas de monitoramento e de controle propostos permitirão mudar diferentes parâmetros durante o processo de soldagem sem experimentar prejuízos significativos nos resultados esperados do projeto e serão uma base para trabalhos futuros focados em sistemas de prototipagem e preenchimento de cavidades em geral, nos quais os parâmetros geométricos dos cordões de solda são de máxima relevância.

## 1.2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

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.

Deste ponto de vista do monitoramento do processo, a capacidade de observar e medir a superfície da poça de fusão em tempo real é o núcleo da fundação para a próxima geração de soldagem inteligente que pode imitar soldadores qualificados que observam a poça de fusão para adquirir informações sobre o processo de soldagem.

Os modelos preditivos derivados total ou parcialmente de técnicas estatísticas ou de inteligência artificial são amplamente utilizados para descrever o comportamento dinâmico do processo de soldagem. A partir dos resultados destes modelos, decisões, tais como a determinação dos limites de operação do processo, o ajuste dos parâmetros e o controle das características geométricas do cordão, são tomadas. O sucesso destas decisões depende, em grande parte, da exatidão do modelo. Portanto, os parâmetros do modelo devem ser muito bem ajustados para garantir que os resultados da predição fiquem suficientemente próximos ao comportamento do sistema real.

Na literatura, existem diversas metodologias para estimação dos parâmetros de processo, porém só algumas delas determinam as relações dos parâmetros de processo GMAW, utilizando sistemas inteligentes, com a penetração do cordão de solda. Entretanto, tal abordagem requer que o processo opere em condições especiais, junto com o problema do controle em tempo real dos parâmetros de interesse.

Na atualidade, as utilizações de processos de soldagem automatizadas têm crescido muito contribuindo para o maior controle dos parâmetros de soldagem, e conseqüentemente, a possibilidade de obtenção de juntas soldadas com melhores propriedades mecânicas. O controle da penetração dos cordões de solda no processo GMAW ainda vem sendo

avaliada no que diz respeito aos melhores procedimentos, parâmetros e processos de soldagem; a aplicação de processos automatizados nas condições específicas de campo constitui em uma opção ainda incipiente por se discutir ainda a relação custo/benefício com a sua implantação. Logo, o objetivo deste trabalho focado em processos de soldagem GMAW-S na posição plana é o desenvolvimento de um sistema automático de soldagem para a obtenção e controle da penetração desejada, partindo de um sistema de monitoramento que é uma solução avançada para processamento de imagens concebido especificamente para a análise das características da oscilação da poça de fusão e fornece informações importantes sobre a condição da penetração, o que pode ser utilizado para controlar e aperfeiçoar o processo de união de metais. O sistema compreende todo o hardware e software necessário para realizar a análise de imagens e relatar informações sobre a frequência de oscilação e geometria da poça de fusão, além da velocidade de solidificação do metal. Além disso, para obter o processo de forma mais eficiente, tem-se como propósito o desenvolvimento de modelos e algoritmos de controle mais precisos e capazes de representar a penetração do cordão de solda, para que, implantados, possam produzir com maior fidelidade a geometria do mesmo e aumentar a garantia de que as características finais do cordão de solda produzido irão atender às especificações do projeto, reduzindo assim, o tempo gasto com ensaios e testes de qualidade.

A fim de produzir soldas que satisfaçam outros requisitos de qualidade, as imperfeições de solda contidas nas irregularidades da superfície e descontinuidades da solda devem ser controladas. As irregularidades da superfície podem ser definidas como condições variantes da poça de fusão, que contêm o impacto periódico da transferência metálica, a dinâmica da poça de fusão e a solidificação. Neste contexto, devido a esta forte correlação, pretendesse o desenvolvimento de um modelo que apresente os fundamentos necessários para a realização de estudos paramétricos para a compreensão dos efeitos da penetração da solda no formato superficial, mais especificamente na formação de escamas nos cordões de solda.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um sistema de monitoração e análise da penetração do cordão de solda através da observação da oscilação da poça de fusão no processo de soldagem GMAW no modo de transferência por curto-circuito.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

Para cumprir o objetivo principal, este trabalho visa atingir os seguintes objetivos específicos:

- Analisar e compreender as técnicas e metodologias que estudam os fenômenos envolvidos na formação da solda relacionados com a oscilação da poça.
- Identificar uma metodologia que permita o monitoramento e caracterização da oscilação da poça de fusão.
- Desenvolver um sistema de aquisição de imagens com o propósito de monitorar e medir a oscilação da poça de fusão em tempo real no modo de transferência por curto-circuito.
- Desenvolver um modelo experimental da profundidade da penetração do cordão de solda no processo GMAW-S.
- Validar o modelo e projetar um controlador para a profundidade da penetração do cordão de solda, visando estabelecer as variações dos parâmetros de soldagem para manter as características desejadas da solda.
- Determinar as relações, a partir da frequência de oscilação da poça e a profundidade da penetração, na formação das escamas e o formato final do cordão de solda.

### **1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO**

Com o propósito de conhecer e entender o problema e assim alcançar os objetivos propostos nesta pesquisa, o trabalho foi dividido nas seguintes partes: no capítulo 2 é

apresentada uma revisão teórica dos temas centrais da pesquisa, relacionados com o processo de soldagem GMAW, parâmetros do processo, qualidade na soldagem, processamento digital de imagens, modelagem e controle de processos. No capítulo 3 mostra-se o estado da arte relacionada com os tópicos estudados neste trabalho. No capítulo 4, encontra-se a proposta dos procedimentos a serem empregados para o monitoramento da oscilação da poça de fusão, a coleta de dados e a modelagem e controle da penetração. Finalmente a proposta experimental para relacionar a penetração com as escamas presentes nos cordões de solda. No 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; e ainda, apresenta-se os resultados de diferentes teste para a integração das diferentes etapas realizadas, visando a obtenção do sistema de controle em tempo real. O capítulo 6 apresenta a discussão dos resultados obtidos no procedimento experimental. No 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 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 do processamento digital de imagens modelagem e controle de processos.

### **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 econômico. Durante as últimas décadas, esta tecnologia tem recebido importantes esforços em recursos humanos e econômicos 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 elétrico 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 (*Metal Inerte Gas*), que emprega um gás inerte puro (hélio, argônio, etc.), e, b) o processo MAG (*Metal Active Gas*), que faz uso de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) ou a mistura de Argônio/CO<sub>2</sub> como gás protetor (Villani *et al.*, 2005). Devido às suas características, o processo GMAW permite: um arco e uma poça de fusão claramente visível; 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 escória, 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).

Além de compreender as características equipamentos básicos de soldagem 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. 2). Frequentemente classificam-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.

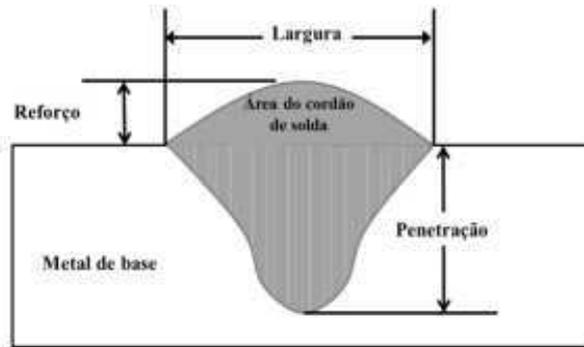


Figura 2. 2: Características geométricas do cordão de solda.

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 manual. 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 está 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 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.

#### 2.2.4. 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 duas formas principais de transferência de metal, a saber:

- (a) Transferência por Curto Circuito.
- (b) Transferência por vôo livre (transferência globular e transferência 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 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. 3).



Figura 2. 3: 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 espessos. 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.

### **2.3. 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 e qualitativos 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 seja 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 ( $\alpha$ ), o raio do pé ( $\Theta$ ), a penetração (P) etc. (vide Figura 2. 2).

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. Penetração da solda

A penetração da solda é a distância que a linha de fusão se estende abaixo da superfície do material soldado. A penetração da solda é diretamente proporcional à corrente de soldagem, se ocorrer um aumento ou uma diminuição na corrente, conseqüentemente aumentará ou diminuirá a penetração da solda. Entretanto, tem sido observado que a corrente de soldagem pode variar sem alterar a velocidade de alimentação do arame (Fortes, 2005).

Modenesi (2008) afirma que as soldas podem ser definidas por penetração total ou parcial. A penetração total apresenta melhor comportamento mecânico, porém, é de execução mais difícil. Esta penetração está associada às soldas em juntas de topo e ângulo, assim, quando o desempenho destas não for necessário, o melhor é de se trabalhar com soldas de penetração parcial. A penetração parcial tem menor resistência e é de fácil execução (vide Figura 2. 4).

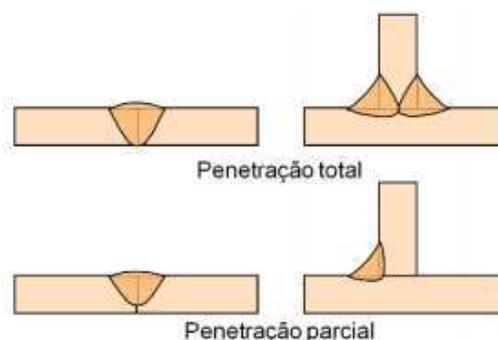


Figura 2. 4: Penetração em juntas de soldagem. Modificado: Modenesi (2008).

## 2.4. TOPICOS ESPECIAIS EM PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

### 2.4.1. Processamento digital de imagens

Atualmente as técnicas de processamento digital de imagens podem-se encontrar em muitas áreas da vida cotidiana, desde aplicações simples em entretenimento até as mais sofisticadas de produção industrial ou militar. Estas técnicas visam extrair informação específica das imagens e gerar decisões a partir da informação particular coletada em cada caso de estudo. As técnicas contêm princípios básicos, mas evoluem continuamente devido ao desenvolvimento constante de tecnologias de hardware e software que permitem maior eficiência nos algoritmos utilizados. (Lopera, 2016).

A ideia de processar uma imagem digital está relacionada com a mudança da sua forma original para outra onde as características desejadas estejam evidenciadas. A Figura 2. 5 apresenta de maneira geral os passos fundamentais em processamento de imagens.

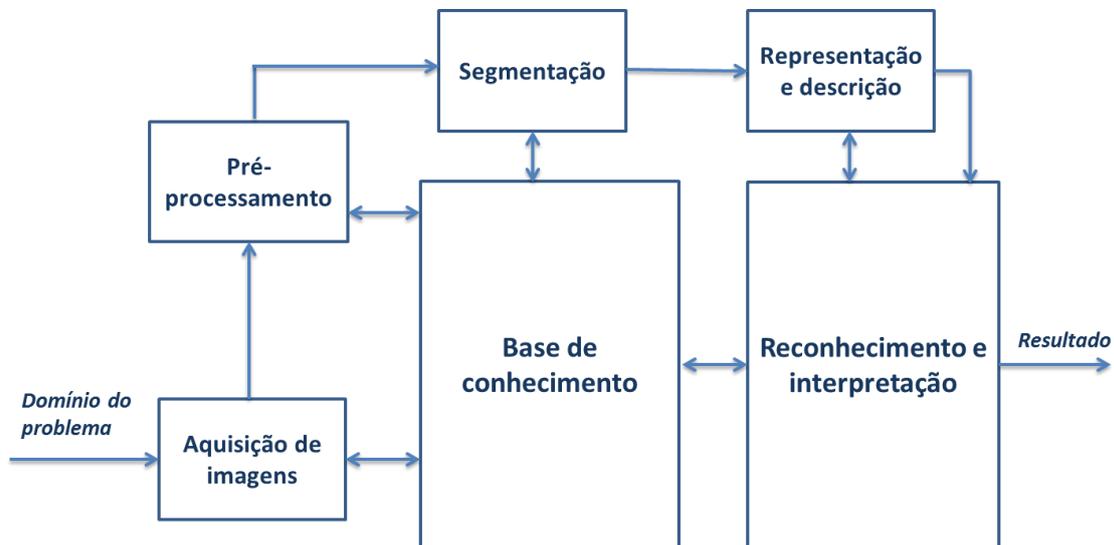


Figura 2. 5: Fases que compõem o processamento de imagens digitais.

A base do conhecimento depende de cada problema a ser tratado, desde localizar regiões na imagem que possuem a informação de interesse, até listar características específicas requeridas na imagem. A fase de aquisição da Imagem Digital é caracterizada pelo uso de dispositivos de sensoriamento sensíveis a certos espectros de energia eletromagnética e, posteriormente, digitalizar o sinal elétrico obtido. O Pré-processamento é a fase onde são realizadas transformações sobre a imagem visando um melhoramento na imagem para o sucesso das etapas posteriores, este melhoramento pode ser obtido, por exemplos, realçando contrastes ou reduzindo ruídos. A segmentação é responsável por dividir a imagem em regiões disjuntas com algum significado para a aplicação, esta fase é totalmente dependente do domínio do problema. Na etapa da descrição procura-se extrair características das regiões segmentadas que tenham relevância para o processo. Finalmente a classificação, é o processo que identifica a imagem.

A seguir apresentam-se alguns conceitos básicos referentes aos módulos de processamento digital de imagens.

#### 2.4.2. Imagem digital

Uma imagem digital é a representação de uma imagem bidimensional usando números binários, denotada por  $f(x, y)$ , em que o valor de  $f$  nas coordenadas espaciais  $(x, y)$

proporciona a intensidade da imagem naquele ponto. Para ser adequada para processamento computacional, a função  $f(x, y)$  precisa ser digitalizada tanto espacialmente quanto em intensidade. A digitalização das coordenadas espaciais  $(x, y)$  é denominada *amostragem da imagem* e a digitalização da intensidade é chamada *quantização em níveis de cinza*. A imagem contínua  $f(x, y)$  é aproximada por amostras igualmente espaçadas, arranjadas na forma de uma matriz. (Lopera, 2016).

Cada elemento da matriz denomina-se um *elemento da imagem* ou *pixel* (Ribeiro, 2007). A Figura 2. 6 representa a quantização em níveis de cinza e apresenta um pixel.

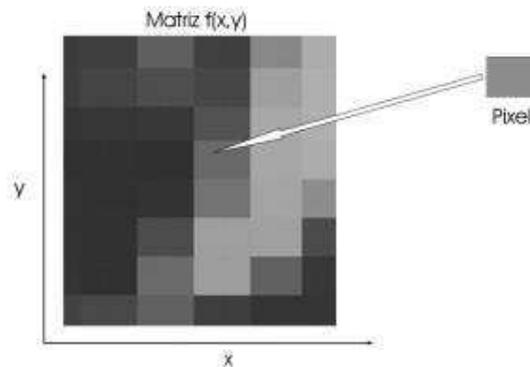


Figura 2. 6: Representação de um pixel numa imagem.

O grau de detalhe de uma imagem é dado pela resolução espacial e pelo número de níveis de cinza que a representam. Quanto maior forem esses parâmetros, melhor será a imagem original aproximada pela matriz digitalizada e maior será o espaço de armazenamento e o tempo de processamento requerido. O conceito de qualidade da imagem depende do detalhe da mesma. A Figura 2. 7 representa a digitalização de uma imagem.

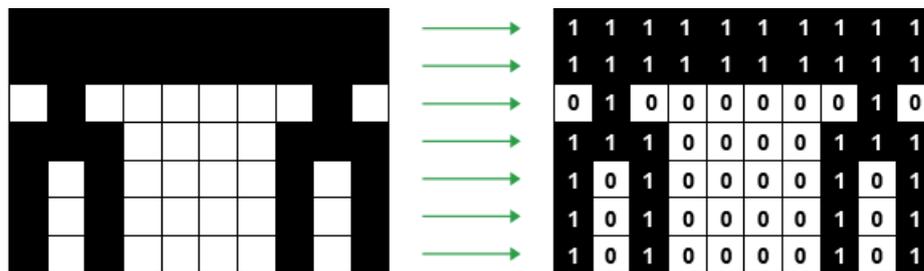


Figura 2. 7: Digitalização de uma imagem.

### 2.4.2.1. Região de Interesse

Um conceito importante em processamento de imagens é a Região de Interesse. Entende-se como Região de Interesse a região definida automaticamente a partir de parâmetros obtidos na própria imagem onde o processamento estará totalmente concentrado. Normalmente, nas técnicas de processamento de imagens apresentam-se problemas no tratamento das bordas da imagem. A criação de regiões de interesse faz com que apareçam também problemas nas bordas das regiões de interesse. A solução deste problema é completamente dependente do problema ao qual o processamento de imagens está associado, ao que conhecemos e podemos levar em consideração anteriormente ao processamento (Albuquerque, 2001).

### 2.4.2.2. Distâncias

Quando se trabalha com imagens é muito frequente medir distâncias. Em muitos casos utiliza-se a definição clássica de distância euclidiana entre dois pontos. Porém devido aos problemas apresentados pela simetria quadrada que interfere na execução de alguns algoritmos. Existem diferentes medidas de distância em função da conectividade utilizada. Os pontos  $p(x,y)$ ,  $q(s,t)$  da figura 2. 8 tem as seguintes definições de distância (Albuquerque, 2001).

- Distância Euclidiana:  $De(p, q) = \sqrt{(x - s)^2 + (y - t)^2}$ . (Vide Figura 2. 8)
- D4 ou Distância “Manhattan”:  $D4(p, q) = |x - s| + |y - t|$ . É importante lembrar que em D4 só podemos nos movimentar para a horizontal e para vertical. Os caminhos mostrados pela Figura 2. 8 não servem para D4.
- D8 ou Distância Tabuleiro de Xadrez:  $D8(p, q) = \text{Max}(|x - s|, |y - t|)$ .

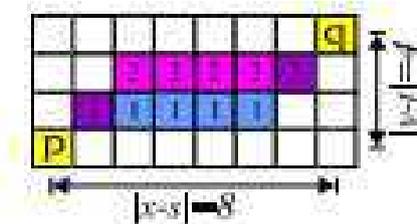


Figura 2. 8: Conexão entre dois pontos  $p(x,y)$  e  $q(s,t)$ .(Modificado de Albuquerque, 2001).

Em uma imagem digital o perímetro de uma determinada forma corresponde a contagem dos pixels pertencente à borda do objeto. Em alguns casos, antes de realizar a medida de distâncias se devem isolar a forma do resto da imagem. Devem-se conectar todos os pixels

que pertençam ao seu contorno para em seguida poder medir o seu perímetro. Na Figura 2. 9 se apresenta o cálculo do perímetro de uma determinada forma (Albuquerque, 2001).

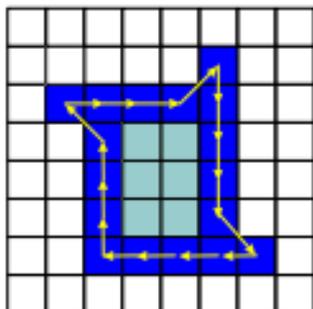


Figura 2. 9: Determinação do perímetro de uma forma usando conectividade D8.  
(Modificado de Albuquerque, 2001).

#### 2.4.2.3. Filtragem

Em processamento de imagens, os filtros lineares são geralmente descritos através de matrizes de convolução. Um filtro numérico vai influenciar a variação da frequência espacial em uma imagem. Na frequência temporal a escala usada é geralmente o Hertz ( $s^{-1}$ ), em uma imagem usamos o 1/metro ( $m^{-1}$ ) ou 1/pels ( $pix^{-1}$ ). O termo frequência espacial é análogo ao termo frequência temporal e ela descreve a velocidade de modificação de uma luminosidade em uma direção em uma imagem (Albuquerque, 2001), (Gonzalez e Woods, 1992), (Smith, 1999), (Coster e Chermant, 1989).

Na prática, para realizar uma operação de filtragem espacial, deve-se escolher uma matriz de dimensão  $n \times n$  com valores que dependem do filtro que se deseja usar, seja ele passa baixa (filtrando as altas frequências), passa banda (filtrando uma região específica de frequências espaciais) ou passa alta (filtrando as baixas frequências). Em uma imagem, as altas frequências correspondem às modificações abruptas dos níveis de cinza, i.e., as bordas dos objetos. As baixas frequências correspondem às variações suaves dos níveis de cinza. Logo quando se deseja evidenciar os contornos de um determinado objeto utilizam-se filtros do tipo passa-alta. Em outros casos pode-se estar interessado na forma da iluminação de fundo, onde se precisam usar filtros passa-baixa para eliminar todas as altas frequências correspondendo a borda dos objetos, e chegar a iluminação de fundo (Albuquerque, 2001).

Na Figura 2. 10 se apresentam três filtros clássicos e seu efeito na imagem inicial (Figura 2. 10a). Na aplicação do filtro Médio (Figura 2. 10b) em uma imagem, equivale a um imagem final onde cada pixel corresponde à média local, na imagem original, dele com os 8 pixels vizinhos. O efeito do filtro passa-alta da Figura 2. 10c. Todas as variações fortes horizontais, que correspondem às bordas horizontais do objeto, ficaram na imagem final filtrada. Neste caso os valores da nova imagem devem ser truncados ou normalizados em função dos valores máximos e mínimos trabalhados.

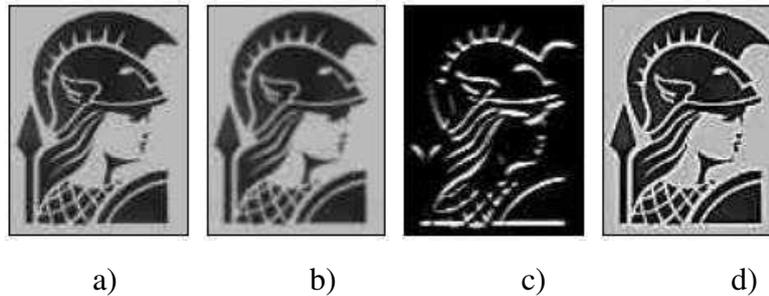


Figura 2. 10: Filtragem de uma imagem. (a) - Imagem original. (b) - A imagem com um filtro Médio (passa-baixas). (c) - Filtro de detecção de variações bruscas no sentido horizontal (Passa-Alta). (d) - Filtro também Passa-Alta que melhora o contraste da imagem realçando os contornos do objeto. (Modificado de Albuquerque, 2001).

#### 2.4.2.4. Segmentação

A segmentação consiste na primeira etapa de processamento da imagem quando consideramos uma análise do ponto de vista da informação presente. Esta área representa até hoje uma linha de pesquisa importante do processamento de imagens, principalmente por ela estar na base de todo o processamento da informação em uma imagem. Segmentar é dividir a imagem em diferentes regiões, que serão posteriormente analisadas por algoritmos especializados em busca de informações de "alto-nível" (Albuquerque, 2001), (Fu e Mui, 1980).

A segmentação subdivide uma imagem em regiões ou objetos que a compõem;

- Nível de detalhe depende do problema
- Segmentação para quando objetos de interesse ao problema são detectados.

A separação dos pixels relativos a cada objeto, ou região, é uma etapa fundamental para o sucesso do processo de análise da imagem. Embora o ser humano possa facilmente identificar regiões com as mesmas características ou objetos presentes em uma imagem,

para se realizar a mesma tarefa com um computador deve-se implementar algoritmos que analisem as características de cada pixel ou da distribuição da população de pixels.



Figura 2. 11: a) Imagem com região de intensidade constante. b) Imagem mostra as bordas da região interior, obtida da descontinuidade de intensidade. c) Resultado da segmentação da imagem em duas regiões. (Modificado de Albuquerque, 2001).

Existem diversas técnicas de segmentação de imagens, mas não existe nenhum método único que seja capaz de segmentar todos os tipos de imagem (Figura 2. 11). Globalmente, uma imagem em níveis de cinza pode ser segmentada de duas maneiras: ou consideramos a semelhança entre os níveis de cinza ou consideramos as suas diferenças. A detecção de um contorno de um objeto, através de matrizes do tipo Passa-Alta, é um exemplo de técnicas baseado nas diferenças. Neste caso estamos segmentando as imagens em regiões que pertencem à borda do objeto.

#### 2.4.2.5. Binarização

A binarização na área de processamento digital de imagens é uma técnica de segmentação de regiões homogêneas em tons de cinza baseada em características de similaridade. A segmentação por limiarização tem como objetivo separar os objetos de interesse do fundo, consistindo em aplicar um limiar de tom de cinza ( $T$ ) à imagem  $f(x,y)$ , transformando-a numa binária  $g(x,y)$ , aplicando (Vide Eq. 2.1):

$$g(x,y) = \begin{cases} 0 & \text{se } f(x,y) < T \\ 1 & \text{se } f(x,y) \geq T \end{cases} \quad 2.1$$

Considerando-se ‘0’ os pixels correspondentes ao objeto e ‘1’ aqueles do fundo ou vice-versa (segundo o caso dos objetos de interesse) (Lopera, 2016).

No trabalho de Weska (1978) classificam-se os métodos de binarização em três grupos: global, local e dinâmico. Assim, se o operador for determinado usando apenas as intensidades é classificado como global, se se utiliza as intensidades e alguma informação

espacial da imagem é classificada como local e se utiliza ambas as informações mais as coordenadas espaciais é classificado como dinâmico.

#### 2.4.2.6. Reconhecimento

Reconhecimento é a parte do processamento que vai classificar os objetos a partir de informações encontradas na imagem, geralmente tendo como apoio uma base de conhecimento previamente estabelecida (Guyon, 1991). Esta fase é normalmente aplicada após uma fase de segmentação e parametrização da imagem. A fase de parametrização identifica e calcula parâmetros nos objetos segmentados. Um exemplo de parâmetros pertinentes a um objeto é o seu perímetro ou sua área (Rasure et al, 1990).

A qualidade final da imagem binária é diretamente dependente da qualidade de iluminação da mesma. Um bom espaço de medidas significa na prática um eficiente sistema de reconhecimento de formas, e este deve ser o mais independente possível dos erros provenientes da segmentação ou da parametrização. Devemos ressaltar que espaços de medidas são muito importantes e utilizados em reconhecimento de formas, seja por métodos clássicos ou aqueles que usam métodos baseados em Redes Neurais.

### 2.5. CONTROLE DE PROCESSOS

Controle de processos é a técnica de manter variáveis de um processo em valores pré-determinados, conhecidos como set-point's a partir da regulação de determinadas entradas no sistema que são medidas em tempo real. Basicamente existem duas configurações nos sistemas de controle: em malha aberta e em malha fechada (Vide Figura 2. 12). De forma geral o controlador em malha aberta consiste em aplicar um sinal de controle pré-determinado, esperando-se que ao final de um determinado tempo a variável controlada atinja um determinado valor ou apresente um determinado comportamento. Neste tipo de sistema de controle não são utilizadas informações sobre evolução do processo para determiná-la o sinal de controle a ser aplicado em um determinado instante. Mais especificamente, o sinal de controle não é calculado a partir de uma medição do sinal de saída. Por outro lado, no controlador em malha fechada, a fim de tornar o sistema mais preciso e de fazer com que ele reaja a perturbações externas, o sinal de saída é comparado com um sinal de referência e o desvio (erro) entre estes dois sinais são utilizados para determinar o sinal de controle que deve efetivamente ser aplicado ao processo.

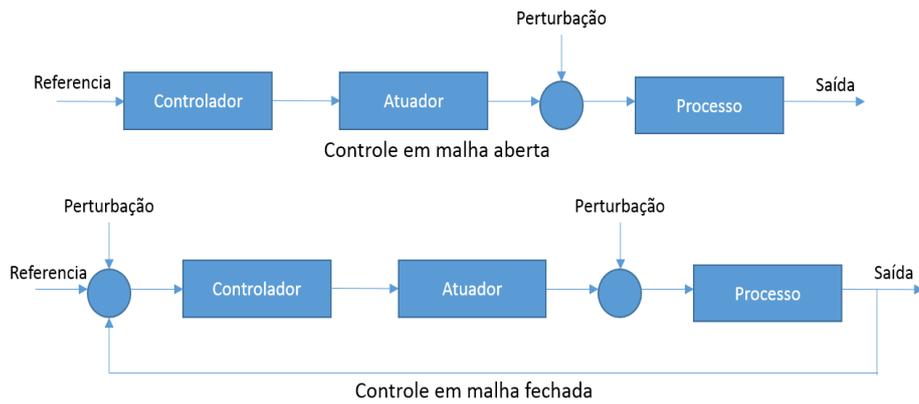


Figura 2. 12: Sistemas de controle. (a) Em malha aberta; (b) em malha fechada.

### 2.5.1. Controle Robusto

A teoria de controle robusto, campo ativo de pesquisa desde o final dos anos 70, visa à garantia de estabilidade e o atendimento ótimo de critérios de desempenho, mas as ações de controle (por realimentação) devem realizar estas tarefas mesmo com incertezas no modelo da planta, na dinâmica e na operação dos sensores e atuadores. Na Tabela 2. 1 é apresentada uma classificação que procura descrever o desenvolvimento da teoria de controle. (Von Zuben, 2000).

Tabela 2. 1: Desenvolvimento da teoria de controle. (Modificado Von Zuben, 2000).

	<b>Controle Clássico 1930-1960</b>	<b>Controle Moderno 1960-1980</b>	<b>Controle Robusto 1980-nossos dias</b>
<b>Análise</b>	Diagramas de Bode Critério de Nyquist Critério de Routh-Hurwitz Lugar das Raízes Margens de Ganho e Fase	Modelo por Espaço de Estados Controlabilidade Observabilidade Processos Estocásticos	Decomposição em Valores Singulares Análise $\mu$ Fatorização Espectral Inequações Matriciais
<b>Síntese</b>	Controladores PID Compensação Lead-Lag	Filtro Kalman PLQ PLQG	Síntese $H_\infty$ Síntese $H_2/H_\infty$ Síntese $\mu$
<b>Paradigma</b>	Domínio da frequência SISO	Domínio do tempo MIMO	Domínio da frequência com modelos por espaço de estados

### 2.5.2. Controle Adaptativo

Controle clássico e robusto proveem respectivamente padrões de estabilidade relativa e medidas de custo garantido que representam um fator de segurança para variações e incertezas no sistema de controle. No entanto, algumas plantas apresentam variações tão amplas e com efeitos significativos sobre o comportamento dinâmico que um ganho de

realimentação linear e com coeficientes constantes é incapaz de fornecer a flexibilidade necessária para atender às especificações de desempenho. Sendo assim, passa a ser necessário medir continuamente estas variações e então ajustar devidamente os parâmetros de controle. (Von Zuben, 2000).

Logo, controle adaptativo é a denominação atribuída à ação de controle de sistemas capazes de modificar seus próprios parâmetros em resposta a alterações verificadas em algum módulo que esteja sendo monitorado. Neste sentido, adaptar-se significa mudar o comportamento em resposta a novas circunstâncias de operação, com o objetivo de manter um nível esperado de desempenho.

Sistemas de controle adaptativo são caracterizados pela existência de duas malhas de realimentação (vide Figura 2. 13). A primeira é malha de controle convencional e a segunda é a malha de adaptação, responsável por monitorar o desempenho e ajustar os parâmetros do controlador de acordo com as condições de operação em vigor. (Von Zuben, 2000).

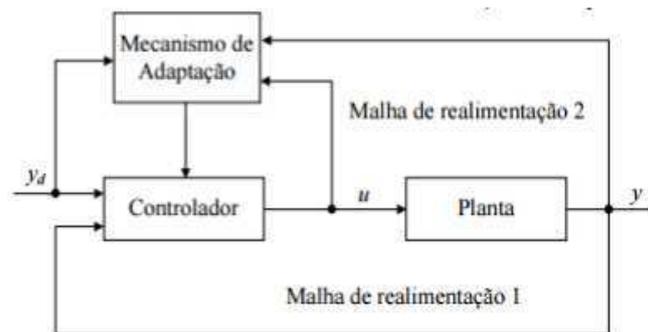


Figura 2. 13: Sistemas de controle adaptativo. (Modificado de Von Zuben, 2000).

### Tipos de Controle Adaptativo

\* Controle Adaptativo por Modelo de Referência: é um método direto, pois as regras de ajuste indicam como os parâmetros do controlador devem ser ajustados.

\* Reguladores Auto-Ajustáveis: é um método indireto, pois aqui os parâmetros do modelo da planta são ajustados e os parâmetros do controlador são obtidos por procedimentos de projeto.

### 2.5.3. Controle Inteligente

Desenvolvimentos em teoria de controle ótimo, controle robusto e controle adaptativo têm expandido de forma significativa o conceito de automação e ampliado a factibilidade

de controle automático na prática. No entanto, as técnicas envolvidas geralmente dependem da existência de um modelo matemático para a planta e o controlador, além de requerer formas estruturadas de representação e lógica clássica (Von Zuben, 2000).

As técnicas de controle inteligente, por sua vez, buscam gerar ações de controle efetivas sem recorrer a tais hipóteses. Alguns atributos de sistemas de controle inteligente:

- Aprendizado automático
- Auto-configuração
- Mecanismos de inferência
- Elaboração e uso de planejamentos
- Mecanismos de tomada de decisão
- Habilidade para extrair as informações mais relevantes de bases de dados não rotuladas, não estruturadas e ruidosas.

Um sistema de controle inteligente deve apresentar, portanto, um alto grau de autonomia detectando alterações na planta ou no ambiente; tomando decisões mesmo na presença de informações incompletas ou conflitantes, provenientes de múltiplos sensores; gerando modelos ou representações qualitativas; gerando ações apropriadas para modificar o desempenho do sistema frente a eventos inesperados; reconfigurando o sistema na presença de falhas internas; integrando várias funções de controle: identificação de plantas, adaptação, incorporação de perturbações e incertezas nos modelos (Von Zuben, 2000).

### **3. ESTADO DA ARTE**

A necessidade de aumentar a produtividade e a qualidade tem obrigado ao uso de sistemas automatizados na soldagem. Em tais aplicações, um método preciso para a seleção das variáveis de processo e de controle da geometria de cordão de solda é algo essencial, uma vez que a qualidade da solda é influenciada não somente pela composição física e química do metal, mas também pelo formato 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 (Cruz, 2014). Além disso, com os recentes desenvolvimentos nos processos de soldagem, tem-se identificado um aumento nas aplicações industriais, bem como as necessidades, demandas e a complexidade dos metais, os processos e a geometria. 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 de diferentes técnicas clássicas e modernas na predição, modelagem e otimização dos parâmetros do processo, e na aplicação da visão computacional no monitoramento da soldagem.

#### **3.1. MONITORAMENTO DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DO CORDÃO DE SOLDA**

A largura, a altura do reforço e a penetração são as principais características geométricas dos cordões de solda nos diferentes processos de soldagem. No caso da penetração, a maioria dos estudos realizados baseia-se em medições indiretas, utilizando modelos associados às variáveis gerais do processo, por exemplo, tensão, corrente, velocidade de soldagem. No contexto do enfoque estabelecido no presente trabalho, pesquisas como as de Shi *et al.* (2015) e Ramos *et al.* (2015), embora sejam em outros processos de soldagem e para outros fins, incitam o uso da frequência de oscilação da poça de fusão na tentativa

de obter modelos e controladores que caracterizem a dinâmica da formação do cordão e a penetração da solda. Além disso, diferentes sistemas de processamento da imagem da poça de fusão foram desenvolvidos nos distintos processos. Técnicas de reconstrução laser do perfil do cordão também são utilizadas para a análises dos processos de soldagem. Esta revisão ilustra os trabalhos realizados sobre estes tópicos na monitoração da solda.

### **3.1.1. Sistemas de visualização da poça de fusão**

Técnicas empregadas para o monitoramento dos parâmetros geométricos dos cordões de solda baseiam-se na extração de características específicas do cordão de solda e/ou da poça de fusão a partir de imagens adquiridas durante o processo de soldagem. Muitas pesquisas têm sido realizadas com o fim de adquirir imagens nítidas da poça de fusão, como é o caso dos trabalhos de Moncayo (2013), Cruz (2015) e Cruz (2018) desenvolvidos no grupo de Automação e Controle na área de soldagem. A seguir se apresentam algumas pesquisas realizadas nos diferentes processos de soldagem.

Com respeito ao processo GTAW tem-se apresentado enfoques onde usando um sistema de visão 3D pode se medir os parâmetros característicos da poça de fusão no processo em tempo real como evidenciado em Liu e Zhang (2013) e Liu e Zhang (2013b).

Sistemas de detecção visual capazes de exibir simultaneamente a parte superior e a parte inferior da poça de fusão desenvolveram-se nos trabalhos de Zhao *et al.* (2001) e Zhang *et al.* (2005) no processo GTAW-P com metal de adição. No mesmo modo de transferência Chen e Wu (2007) e Chen (2006) apresentam investigações sobre a aquisição visual de informação e controle da dinâmica da poça de fusão. Chen *et al.* (2003) utiliza tecnologias de filtragem composto e um sistema de detecção por visão computacional para aquisição de imagens claras da poça de fusão.

Um sistema de detecção de imagem para o processo de soldagem TIG de ligas de alumínio foi estabelecido no trabalho de Wang *et al.* (2005). As relações entre as características obtidas pelo sistema de detecção de imagem e a de corrente de soldagem foram discutidas em detalhe.

No trabalho de Wang *et al.* (2009) o objetivo foi inspecionar a altura poça de fusão no processo GTAW com base no algoritmo *shape from shading* (SFS) para reconstruir a poça de fusão em 3D a partir de uma imagem 2D.

Um sistema de detecção móvel foi desenvolvido em Zhang *et al.* (2016) para monitorar o processo de soldagem manual por arco de tungstênio com gás (GTAW). O sistema consiste de uma tocha e um capacete-sensor sobre a cabeça do soldador. A superfície tridimensional da poça de fusão é medida em tempo real. O sistema de detecção é avaliado utilizando uma plataforma de simulação em que os movimentos do capacete/cabeça do soldador são imitados por um sistema robótico com 6 graus de liberdade (DOF), e um espelho esférico convexo comparável com o tamanho da poça de fusão.

No caso do processo GMAW, autores como Chen *et al.* (2008), Yan (2011), Wang (2010), Xiong e Zhang (2013), Abdullah *et al.* (2006) apresentam sistemas de visão de detecção passiva baseados em câmaras de alta velocidade para obter a imagem da superfície da poça de fusão e a zona circundante no processo GMAW-P.

Em alguns casos particulares utiliza-se o monitoramento de outras variáveis para inferir características dos cordões de solda. Por exemplo, Kong e Chen (2009) controlam a largura em soldagem de ligas de alumínio através da visão para soldagem robotizada. Sharif *et al.* (2001) propõem um controle cooperativo dos equipamentos de soldagem, onde a tocha de soldagem não apenas oscila no chanfro, também se movimenta para trás e para frente. Por conseguinte, a poça de fusão e a posição do arco são observadas. A medição da extensão do arame e detecção da poça de fusão para controlar os parâmetros de soldagem e análise de defeitos é apresentada em Lertrusdachakul *et al.* (2015) e o trabalho de Xiong *et al.* (2013) foca-se no uso racional de materiais e energia no processo.

Com respeito à soldagem de metais de ligas de alumínio, técnicas de processamento de imagens e de identificação da resposta dinâmica da poça de fusão foram utilizadas nos trabalhos de Yu (2007) para gerar ações destinadas a controlar o processo e de Lu (2011) no controle do *stick-out* no processo de soldagem MIG pulsado.

Diferentes métodos de detecção da poça de fusão são revistos e novos sistemas de detecção baseado em visão 3D são definidos em Chen *et al.* (2000), Mnich (2004), Anren *et al.* (2012), Liu *et al.* (2014). Mota *et al.* (2015) e Abdullah (2012) apresentam a capacidade e potencialidade de um sistema de visão baseado em iluminação por diodo-led.

### **3.1.2. Sistemas de luz estruturada**

A utilização de uma luz estruturada, tal como uma linha de laser, padrões especiais de várias linhas ou pontos, por exemplo, pode trazer outras vantagens, além da identificação da posição correta, também pode capturar a forma da poça de fusão. Com a geometria do chanfro, a forma do cordão e a informação do processo, tal como a velocidade, a corrente, a tensão e a taxa de alimentação de arame, os sistemas apresentam uma aproximação aos sistemas autônomos de controle de qualidade. Esta técnica é a mais referenciada e utilizada a fim de determinar parâmetros geométricos (externos) em cordões de solda tanto no processo GTAW como no GMAW, alguns exemplos deste tipo de sistemas nos são referidos em Lanzetta *et al.* (2001), Faria *et al.* (2010), Xu *et al.* (2011), Doumanidis e Kwak (2002), Ma *et al.* (2012), Yin *et al.* (2012), Saeed e Zhang (2007), Ma e Zhang (2009), Song e Zhang (2007), Zhang *et al.* (2013), Luo *et al.* (2013), Zhang *et al.* (2015), Wang (2015).

Shi *et al.* (2007) e Xiao (2011) apresentam o uso de sistemas de visão laser com a técnica de triangulação para o seguimento da junta soldada e o chanfro, assim como Kangl *et al.* (2007) desta vez aplicado para detectar a posição e controlar automaticamente a tocha na soldagem orbital automática de aço inoxidável.

O trabalho de Starling *et al.* (2004) avalia alguns fatores e características do processo FCAW determinantes da transferência metálica resultante da soldagem com um arame tubular básico. O estudo da transferência metálica foi realizado através da técnica de *shadowgrafia*, utilizando-se uma fonte de laser e uma câmera de alta velocidade.

Para minimizar a interferência indesejável do arco elétrico nas imagens, um feixe laser pulsado ilumina a área da poça de fusão. No trabalho de Chen *et al.* (2007) um sistema de visão de alta velocidade é sincronizado para capturar a imagem da poça de fusão em um curto período de tempo.

### **3.1.3. Sistemas de monitoramento de outras características na soldagem.**

No caso do monitoramento de outras características na soldagem, diferentes abordagens são apresentadas na literatura. Por um lado estão os trabalhos de Zhao (2011) e Zhao (2009) onde um sistema óptico combinado com uma câmera de alta velocidade foi adaptado para visualizar os padrões do fluxo de fluido da poça de fusão e os resultados quantitativos sobre a velocidade do fluxo são obtidos por processamento de imagens.

Juntamente com o fluxo de fluido e suas influências são estudadas e descritas as medidas da forma final do cordão de solda e as suas propriedades químicas.

Tsai (2006) propõem um sistema automático de controle *fuzzy* no processo GTAW-P usando imagens em tempo real do passe de raiz e da largura da raiz como um indicador de controle para a penetração completa de placas planas soldadas em V.

A monitoração da distorção angular em chapa de aço de baixo carbono ASTM A36, por meio de um transdutor linear (laser), no trabalho de Miranda e Bracarense (2007) possibilitou verificar a influência da geometria do corpo de prova e da refrigeração forçada da poça de fusão na formação do cordão de solda.

No trabalho de Paciornik *et al.* (2012) amostras de aços soldados foram analisadas por  $\mu$ CT, com o objetivo de analisar a presença de poros e fissuras, sua concentração, distribuição espacial e orientação. Isto com o fim de comprovar que a visualização 3D e medição desses defeitos podem contribuir significativamente para uma melhor caracterização e previsão das propriedades da solda na reparação *in situ* de peças estruturais de unidades de produção de petróleo offshore.

A fim de melhor compreender a influência do pulso térmico no processo de soldagem MIG duplo pulso na poça de fusão de ligas de alumínio, um sistema de monitoramento foi desenvolvido em Liu *et al.* (2013) para obter a imagem do perfil da poça de fusão durante a soldagem. Sob condição de pulso duplo, a poça de fusão é influenciada pela alta frequência e a frequência térmica simultaneamente.

Com o uso de um sensor de luminosidade e a utilização de um sistema de lentes ópticas foi adquirido o espectro luminoso emitido pelo arco voltaico no trabalho de Mota *et al.* (2011). Um estudo comparativo entre a emissão de radiação infravermelha do arco de soldagem em dois processos largamente utilizados, TIG e MIG/MAG, focando também sua influência por parâmetros como a corrente de soldagem e a proteção gasosa.

#### **3.1.4. Visão artificial na robótica e algoritmos de software**

Sistemas de visão artificial para correções off-line da programação de trajetórias nominais na soldagem robotizada são importantes devido que correções de trajetória de soldagem frente a variações nas juntas são necessários, já que tais variações ocorrem naturalmente, pelas variações em tolerâncias das peças e as deformações induzidas pelo calor durante a

soldagem. Neste contexto Ryberg *et al.* (2010) desenvolveram um sistema que obtém imagens da junta de solda de diferentes posições e orientações, e determina a geometria da junta. A trajetória de soldagem é atualizada no sistema de controle do robô e a operação de soldagem é realizada. No mesmo sentido Xu *et al.* (2012) apresentam uma tecnologia para o monitoramento da junta em tempo real, o que é necessário para superar as deficiências de treinamento dos robôs de soldagem no rastreamento da junta durante o processo de soldagem GTAW.

Em relação a novos algoritmos aplicados a extrair características das soldas durante o processo de soldagem Lima II *et al.* (2011) propõem uma análise através de algoritmos de visão computacional e de ajuste de curvas da geometria do cordão de solda para obter modelos de simulação que se aproximam dos formatos reais do cordão de solda. Da mesma forma Xu *et al.* (2004) e Wu e Chen (2007) sugerem um algoritmo de processamento de imagem para extrair características da solda a partir de imagens com perturbações como a forte reflexão, interferência da luz do arco e respingos.

Outro tipo de trabalho nesta área é o apresentado por Thamilarasi *et al.* (2007), que realizam uma revisão da investigação sobre o avanço da soldagem robotizada usando o poder da visão. Ao implementar o poder da visão na área de soldagem, produz uma solução inovadora para o mundo real em uma dimensão diferente.

### **3.2. CALIBRAÇÃO DE CÂMERAS PARA FINS DE MONITORAMENTO DO PROCESSO**

Para avaliar a viabilidade da calibração de câmeras para uso no monitoramento dos processos de soldagem através de pontos de coordenadas fixados no metal e padrões conhecidos. As pesquisas apresentadas a seguir relatam aplicações em desenvolvimento do monitoramento da solda a partir de técnicas de baixo custo.

No trabalho de Stivanello (2008) é apresentado o desenvolvimento de uma biblioteca para sistemas de visão estereoscópica para robótica móvel. São avaliados e propostos modelos, métodos e soluções para diferentes problemas como calibração de câmeras, retificação de imagens, reconstrução e geração de mapas de profundidade densos.

Uma técnica para calibrar uma câmera se apresenta em Zhang (2000). A câmera é obrigada a observar um padrão plano mostrado em duas diferentes orientações, a distorção da lente é modelada e um refinamento não linear com base no critério de

máxima verosimilhança é realizado. Em comparação com as técnicas convencionais que utilizam equipamentos caros, a técnica proposta é fácil de usar e flexível.

O trabalho apresentado em Dinham e Fang (2010) visa desenvolver um algoritmo de calibração da câmara com base na visão estéreo e a calibração mão-olho robusto para ser usado em um sistema de soldagem robôtizada. O método de calibração proposto permite o marco de referencia do objeto seja relacionado com o sistema de coordenadas do robô sem o uso de dispositivos de medição.

O objetivo de Vilarinho *et al.* (2009) é trazer à discussão os critérios e cuidados necessários durante medições realizadas a partir de fotografias/filmagens em soldagem. São abordados ao longo do texto os principais detalhes relacionados ao tema de forma prática para que o usuário possa aproveitar todo o potencial de sua fotografia/filmagem.

Liu (2007) explica o princípio e o método para a calibração no centro da imagem da câmara mediante o uso de um laser. O laser na imagem está disposto corretamente, de modo que a posição exata foi localizada através do cálculo do centro de massa. Por conseguinte, o centro da imagem pode ser calibrado com precisão.

### **3.3. MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROCESSO**

Para automatizar um processo de soldagem, que é a tendência atual na indústria de transformação, é necessário dispor de um modelo que relacione os parâmetros de processo, neste contexto Lima II *et al.* (2012) propõe um estudo crítico e comparativo dos modelos de predição da geometria de cordões até então desenvolvidos, baseados em técnicas como regressão quadráticas, redes neurais e lógica *fuzzy*. Devido à alta confiabilidade, facilidade de operação, alta penetração, bom acabamento superficial e alta produtividade o processo de soldagem ao arco tornou-se uma escolha natural para indústrias de manufatura, a seguir se apresentam os trabalhos desenvolvidos nesta área.

#### **3.3.1. Modelos estatísticos**

Esta abordagem é uma das mais utilizadas para determinar a melhor configuração dos parâmetros de processo e nos processos de controle de parâmetros geométricos em cordões de solda. Alguns exemplos desta modelagem para encontrar parâmetros geométricos no processo GMAW podem ser vistos em Kim *et al.* (2005), Kim *et al.* (1996), Soares e Bracarense (2010) e Scotti e Monteiro (2012).

Uma das técnicas mais utilizadas na otimização das características fundamentais da geometria do cordão no processo soldagem GMAW é as técnicas fatoriais aplicadas em Sreeraj *et al.* (2013), Wang *et al.* (2014).

Outra técnica estatística comumente utilizada na otimização de processos de soldagem GMAW são a metodologia de superfície de resposta (RSM) com base no planejamento composto central (CCD) utilizada em Xu *et al.* (2015) para estudar os efeitos da velocidade de alimentação de arame, velocidade de soldagem e posição da tocha de soldagem sobre a dimensão do cordão de solda nas posições de soldadura de 180° a 360°.

Tendo em vista a importância da robotização da soldagem e de sua aplicação de forma eficiente, o trabalho de Pinto *et al.* (2010) propõe uma análise experimental crítica e comparativa dos modelos de predição da geometria de cordões de solda no processo GMAW com valores diferentes de tensão, velocidade de alimentação e velocidade de soldagem.

Com o objetivo de evitar as falhas e o efeito do calor na solda, Jimenez *et al.* (2013) propõem um modelo para avaliar a saúde do reparo em função da porosidade variando a entrada de calor com uma pressão constante e Albuquerque *et al.* (2012) avaliam o comportamento na ZTA de juntas soldadas do aço API 5L X80 quando submetidas à soldagem com diferentes parâmetros de processos.

Por outro lado, no que se refere ao processo de soldagem GTAW os modelos estatísticos avaliam a capacidade de previsão das características dos cordões de solda sem ou com adição de arame como evidenciado em López *et al.* (2013). Técnicas de regressão linear também são usadas como em Lv *et al.* (2014) para a previsão da depressão da poça de fusão através do sinal do som do arco.

O objetivo do trabalho de Duman (2009) é desenvolver a capacidade de previsão da profundidade de penetração do cordão no processo GTAW, em que correntes e velocidades de soldagem elevadas viram a poça de fusão em uma camada de líquido fino numa morfologia conhecida como *gouging region*. Este trabalho mostra que até o momento, poucos estudos têm-se centrado sobre este regime, apesar de seu amplo uso na indústria. Albuquerque *et al.* (2011) avaliam as características da zona termicamente afetada (ZTA), a microestrutura e as propriedades mecânicas de juntas soldadas obtidas por diferentes procedimentos de soldagem utilizando processos manuais e automatizados.

Para o processo SAW, Murugana e Gunaraj (2005) preveem relações de três características físicas do cordão e o formato da solda usando técnicas fatoriais de cinco níveis. A adequação e importância dos modelos são verificadas através do teste F e o teste t.

Em Andrade Junior *et al.* (2009) propõem um modelo estatístico para avaliar o efeito de oscilação magnética do arco elétrico no processo FCAW na geometria do cordão de solda. No mesmo processo de soldagem Bracarense *et al.* (2006) definem os parâmetros ótimos para a soldagem orbital de tubulações com aproximações estatísticas e experiência na soldagem.

### **3.3.2. Sistemas inteligentes**

Outra abordagem comumente é a utilização de técnicas de inteligência artificial (IA) para a caracterização de parâmetros geométricos do cordão de solda. Em especial, os modelos de redes neurais artificiais são os mais utilizados nos processos de soldagem pela sua capacidade de ser programados para se atualizar continuamente. Isto pode ser evidenciado no trabalho de Chen *et al.* (2011) para o planejamento combinado da posição da tocha e os parâmetros de soldagem na programação dos robôs de soldagem. Outra habilidade interessante é a vantagem de ser integrados com outros sistemas inteligentes como a lógica difusa. Alguns trabalhos que utilizam a integração das redes neurais e lógica *fuzzy* para modelar parâmetros geométricos em podem ser vistos em Paton *et al.* (2006), Dhas e kumanan (2007), Ma e Chen (2011), Liu *et al.* (2012), Liu *et al.* (2013), Liu *et al.* (2013b).

Com respeito à lógica difusa ou *Fuzzy*, o trabalho de Coelho *et al.* (2010) permite ressaltar o atrativo desta técnica na modelagem, o qual permite manipular a informação imprecisa matematicamente de forma similar à linguagem humana, e analisar a influência de cada parâmetro de soldagem com o conhecimento empírico dos soldadores.

O trabalho de Yang e Chen (2011) se foca na modelagem e controle de um sistema de soldagem robotizada baseado em outro sistemas inteligente, como é o caso dos sistemas multi-agentes. Nele descrevem-se as técnicas de modelagem baseada na teoria de agentes BDI e rede de Petri as quais surgiram como o paradigma dominante no campo da pesquisa e o desenvolvimento de agentes principalmente por causa das bases sólidas e filosóficas sobre a intencionalidade e o raciocínio prático, a lógica de sua semântica abstrata e

algumas implementações bem-sucedidas, além de técnicas de comunicação, tecnologias de middleware e métodos de cooperação.

### **3.3.3. Modelos matemáticos**

Os modelos matemáticos propostos em inúmeros trabalhos procuram exibir uma representação teórica dos diferentes fenômenos na soldagem, tipicamente expressa na forma empírica, o que permite uma melhor compreensão e estudo do seu comportamento. Estes modelos são restritos a parâmetros específicos e utilizam geralmente constantes determinadas experimentalmente. Na literatura encontram-se modelos desde parâmetros para a estabilidade do arco (Huang *et al.* (2011)) até modelos más complexos como análises de difração de elétrons retro espalhados (EBSD) para estudar a direção de formação e da microestrutura do cordão de solda (Mukherjee *et al.* (2015)).

Neste contexto, diferentes características são modeladas como em Santana e Modenesi (2011) que descrevem as características operacionais da fonte de energia, as quedas de tensão no arco elétrico e nos componentes do circuito de soldagem, e um balanço de energia na ponta do arame. Berezovsky *et al.* (2006) oferece uma técnica para modelar a forma da superfície, a penetração e a análises térmica da HAZ em vários pontos no processo GMAW.

O trabalho de Morkov *et al.* (2006) apresenta um modelo para analisar as características elétricas e térmicas da fusão e a transferência de metal. Propriedades termo-físicas e elétricas dos materiais e gases de proteção foram analisadas nos modelos de Pavlyk (2006).

A simulação numérica com Volume de fluido (VOF) foi utilizada no trabalho de Cho *et al.* (2015) para investigar o fluxo de material fundido e a oscilação volumétrica das poças de fusão na soldagem com laser pulsado.

Modelos que estudam a dinâmica da poça de fusão junto como as relações entre parâmetros de qualidade e variáveis de processo são apresentados em Hu *et al.* (2008), Matsui *et al.* (2014), Traidia (2011), Lima II *et al.* (2007), Balasubramanian (2016).

As distribuições da velocidade de escoamento por fusão e temperatura, fluxo de fluido, a formação do cordão de solda, etapas de esfriamento e de solidificação são estudadas em

Karkhin *et al.* (2006), Sudnik (2006), Saldi *et al.* (2013), Jaidi e Dutta (2013), Liu *et al.* (2015).

O objetivo do trabalho de Modenesi *et al.* (2011) foi estudar os fatores que afetam a resistividade elétrica do arame durante a soldagem GMAW e a soma das quedas de tensão anódica e catódica no arco,  $U_{AC}$ ). Em Bachmann *et al.* (2016) um modelo em estado estacionário complexo de permeabilidade magnética para a análise do comportamento de histerese magnética foi apresentado, devido às características férricas do material.

### **3.4. CONTROLE DO PROCESSO DE SOLDAGEM**

A dificuldade fundamental da automação do processo de soldagem é detectar e controlar o comportamento dinâmico da poça de fusão, tais como os parâmetros da geometria, penetração e a formação da solda. A soldagem a arco é um processo complexo que envolve interações de materiais, metalurgia física e química. A qualidade da solda está relacionada com os vários parâmetros da soldagem, estes parâmetros estão relacionados ao processo dinâmico e tem sobreposição no processo estático. O processo dinâmico é um objeto altamente complexo, com uma forte não-linearidade, múltiplas variáveis e um grande número de fatores estocásticos e incertos, e isso torna muito difícil controlar as mudanças dinâmicas da solda, a largura e a penetração do cordão. Para resolver estes problemas a seguir se apresentam trabalhos que utilizam enfoques da teoria de controle clássico e moderno.

Os trabalhos de Wang *et al.* (2010), Stefanovski (2012) e Wang *et al.* (2012) tem como objetivo controlar a superfície da poça de fusão, como uma medida indireta, em GMAW-P para atingir a geometria desejada por inferência da relação simples entre a alteração na tensão do arco durante a corrente de pico e a geometria da poça de fusão. Um sistema de controle para o mesmo processo é apresentado no trabalho de Thomsen (2006). Este sistema torna possível manipular a corrente e o comprimento do arco durante a soldagem. O mesmo enfoque é utilizado por Lu *et al.* (2005) e Lu *et al.* (2008) embora a processo de soldagem seja o GTAW-P.

Um algoritmo de controle preditivo da corrente e velocidade de soldagem é proposto em Liu e Zhang (2013) e Qian (2010) para obter a caracterização da geometria da superfície da poça apesar de vários distúrbios. Fazendo uso do controle adaptativo e otimização de parâmetros procura-se determinar e prever a sensibilidade e resposta da deposição do

metal e a eliminação de defeitos com a escolha dos parâmetros de soldagem ideais. Por exemplo Lu e Zhang (2006) propõem um algoritmo de controle em intervalos no período de arco aberto. Lv *et al.* (2007) sugerem um modelo ARX MISO para modelar a dinâmica do processo GTAW. Christiansson e Gougeon (2006) desenvolveram um sistema que mede a temperatura do metal antes e depois de uma nova camada, a fim de obter controladas as propriedades do material.

A frequência natural da poça de fusão pode ser medida para inferir sistemas de controle de diversas características, como em Ju *et al.* (2002) onde a frequência da poça de fusão é medida a partir da oscilação detectada por um sensor de arco. Regtien e Van Wieringen (2011), e Arivarasu *et al.* (2014) estudaram o mesmo fenômeno de oscilações da poça de fusão devido ao efeito da alta frequência de pulsos.

Com base na identificação de sistemas, controladores PI e PID foram desenhados para controlar a dinâmica da poça de fusão lidando com o inconveniente da instabilidade do sistema e a presença de incertezas em relação à mudança dos diferentes parâmetros de processo. Evidências do dito anteriormente pode ser corroborado em Kejie *et al.* (2010), Anzehae and Haeri (2011), Fan *et al.* (2011), Junfeng e Chunlong (2012), Li *et al.* (2013), Al-Mufadi (2015).

O trabalho de Juliani *et al.* (2013) estudou um sistema de controle para a deflexão do arco elétrico de forma a favorecer a deposição de metal fundido em local pré-determinado. Para melhorar o desempenho e velocidade de resposta do sistema, Zhang e Walcott (2006) desenvolveram um sistema de controle adaptativo para eliminar o efeito de “flutuação do jato de plasma” no processo de soldagem a arco de plasma (PAW). O controle do excesso de alongamento do arco causado pela atração eletromagnética a partir do bico do arco no outro arame no processo Tandem MIG é apresentado em Chen *et al.* (2015).

Outros tipos de controle focam-se no direcionamento da tocha de soldagem para entender seu efeito na geometria das soldas. Um sistema de controle com um PLC industrial para integrar diferentes controladores foi concebido em Choi *et al.* (2009) para a soldagem tandem de chapas grossas de alumínio na construção naval. O trabalho de Sayyaadi e Eftekharian (2008) centra-se no desenvolvimento de um sistema de controle da trajetória do braço robótico SCARA e o processo de soldagem através da aplicação de um controlador *fuzzy*-GA (MFGAC). Um controle inteligente da posição da tocha para soldagem orbital com um robô baseado numa rede neural artificial e um sistema

especialista é apresentado em Tian *et al.* (2013). Um sistema com uma função de autodiagnóstico para facilitar a manutenção e as reparações é implementado em Moon *et al.* (2006) para a construção de gasodutos.

Estudos exploratórios sobre critérios, conceitos e metodologias nas teorias de controle foram definidos em trabalhos como de De Rezende *et al.* (2011) que propõe um índice de regularidade como critério para estabilidade de transferência em MIG/MAG com curto-circuito visando minimizar respingos e otimizar o acabamento do cordão. Em Souza *et al.* (2011) utilizou-se um critério de comparação, onde foi quantificada a regularidade da transferência através de um índice a partir do comportamento do sinal de tensão de soldagem. Felizardo e Bracarense (2012) propõem uma reformulação dos conceitos e métodos de aplicação de classificação dos processos de soldagem, já que consideram que é inconsistente que um processo classificado como de usinagem tenha um maior número de variáveis controladas pelas máquinas que um processo semiautomático. Finalmente Hartman *et al.* (2011) fornecem uma visão geral das pesquisas relacionada com o desenvolvimento do controle do processo de soldagem.

### **3.5. MODELAGEM E CONTROLE DA PENETRAÇÃO DA SOLDA**

Na soldagem automática é importante controlar as condições de soldagem, a fim de se obter soldas com a qualidade desejada e com penetração adequada. Recentemente, foi relatado que há uma relação íntima entre as características do arco, a oscilação da poça de fusão e a penetração. Por isso, as características do arco e os fenômenos da poça de fusão da solda são analisados e a estimativa da penetração através destas é realizada nos trabalhos apresentados a seguir.

Uma considerável quantidade de trabalhos de controle da penetração da solda são disponibilizados na literatura baseados no emprego de controladores clássicos e/ou com sistemas inteligentes. Nestas metodologias, algumas das variáveis de controle dependem principalmente das variáveis de controle das fontes de soldagem. Por exemplo, para controlar o processo GMAW-P empregando uma fonte do tipo tensão constante, Wang *et al.* (2011) utilizam a tensão do arco para derivar a penetração durante o pico de corrente. Da mesma maneira, no trabalho Li *et al.* (2013) é proposto que o comportamento da tensão do arco, refletindo a alteração no comprimento do arco e a superfície da poça de fusão, pode ser analisado para determinar a penetração no processo GTAW.

Também podem ser envolvidos outros parâmetros independentes da fonte, como o caso do som do arco, por exemplo Ye *et al.* (2011) propõem que a característica da energia em alguns intervalos de frequência pode descrever as características do sinal acústico, que podem ser utilizadas para prever a penetração da solda. Igualmente, Wang *et al.* (2011) e Lv e Chen (2011) adotaram a tecnologia de coeficientes da predição no reconhecimento de padrões para extrair as características do som do arco no processo GTAW e usar uma rede neural artificial para classificar os diferentes estados de penetração.

Além do apresentado anteriormente, era de se esperar que autores tentassem o uso da visão computacional para buscar adquirir características que levassem ao controle da penetração na soldagem. Neste contexto, trabalhos como de Suga *et al.* (2001), Wu e Gao (2006), Wang *et al.* (2011) e Liu *et al.* (2013) utilizam a inteligência artificial junto com a visão computacional, para estimar as relações entre os parâmetros, incluindo a forma da poça de fusão, as condições de soldagem e o controle da penetração da solda tanto no processo GTAW como no GMAW-P.

Para superar os problemas da soldagem de juntas sobrepostas com uma penetração parcial em fabricação de automóveis, um controlador em malha fechada com ajuda de uma câmera para monitorar parcialmente a penetração da solda foi desenvolvido em Abt *et al.* (2011). A potência do laser é ajustada para obter uma ligação adequada entre as duas partes da união, mesmo sob condições variáveis.

### **3.6. SUMÁRIO**

O estado da arte exposto anteriormente teve como objetivo apresentar os estudos realizados na finalidade de monitorar os parâmetros geométricos, estudos da dinâmica da poça de fusão, obtenção de parâmetros e características para controlar o processo e geração de sistemas de soldagem automáticos. Os estudos sobre a dinâmica da poça de fusão no processo GMAW-S, como se percebe, são incipientes em comparação às pesquisas no processo GTAW, nos quais existem inúmeros trabalhos em análises, simulações e experimentos encaminhados ao monitoramento e caracterização do comportamento da poça de fusão. As pesquisas avançadas no monitoramento da poça de fusão no caso do processo GMAW mostram soluções parciais e experimentais sem levar ao controle de características tão importantes como a penetração da solda. Além do descrito anteriormente, a crescente necessidade de sistemas automáticos nos processos de soldagem que apresentem estratégias de controle semelhantes a das utilizadas pelo

peçoal técnico especializado em soldagem motivou o desenvolvimento do presente trabalho.

As fontes de informa o consultadas são livros, jornais impressos, jornais eletr nicos e portais de internet. Foram consultadas 156 fontes envolvendo as cinco áreas pesquisadas, A Figura 3. 1 mostra a distribui o percentual dos trabalhos e pesquisas abordados.

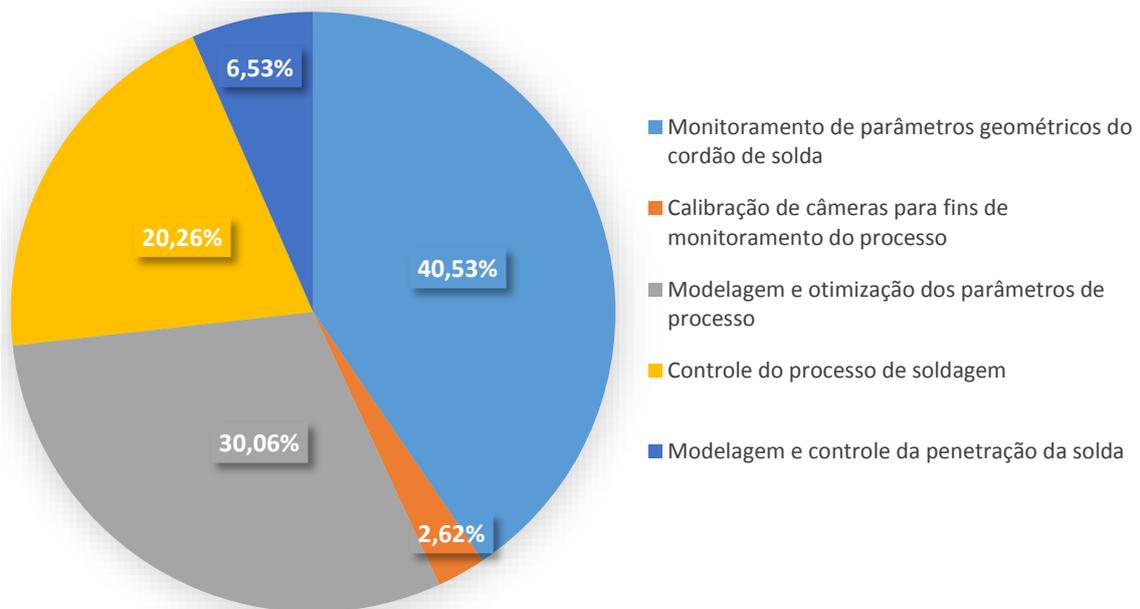


Figura 3. 1: Distribuição Percentual dos trabalhos e pesquisas abordados.

## **4. PROPOSTA METODOLOGIA EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTOS**

O monitoramento e a modelagem da penetração do cordão de solda apresenta uma abordagem que agrega ferramentas hardware e software, com o propósito de obter domínio dos parâmetros do processo GMAW visando gerar soluções de automação e promover o aumento da produtividade e qualidade na indústria. Os procedimentos e métodos propostos para desenvolver o trabalho são apresentados em três partes. A primeira, chamada de Monitoramento da oscilação da poça de fusão, contém a descrição dos equipamentos e componentes da bancada experimental e análises das técnicas de processamento digital de imagens para a análises e monitoramento da oscilação da poça de fusão. A segunda, chamada de modelagem da oscilação da poça de fusão, relaciona-se com o entrosamento do processo GMAW-S e a determinação das relações, a partir da frequência de oscilação da poça, na formação das escamas e o formato final do cordão de solda e, a terceira, controle da profundidade de penetração da solda tem o projeto de um controlador para a profundidade da penetração do cordão de solda. Uma vez realizadas, estas concretizam a implementação do sistema de controle da penetração do cordão de solda através da observação da oscilação da poça de fusão no processo GMAW-S, conforme detalhamento na Figura 4. 1, a seguir.

### **4.1. MONITORAMENTO DA OSCILAÇÃO DA POÇA DE FUSÃO**

O conhecimento da soldagem e o monitoramento do processo permitem definir a garantia de qualidade das soldas e que os especialistas possam procurar padrões, diferenças e anomalias no processo. Estes tipos de procedimentos são fundamentais para ajustar o processo de soldagem e, ao agir assim, faz com que o processo seja eficiente.

Um dos aspectos mais importantes no processo de soldagem por fusão é conhecer as reações do metal nas suas quatro fases (sólido, líquido, gás e plasma). As reações físicas nessas regiões incluem muitos fatores desconhecidos, além de ocorrer em uma área muito pequena. Por conseguinte, a velocidade de movimento do metal na área de observação é bastante elevada. Esta é a principal razão pela qual a técnica de processamento de imagens de alta velocidade é necessária na análise visual dos processos de soldagem por fusão. Com base nisso é levado a cabo os passos apresentados a seguir para o monitoramento da oscilação da poça de fusão.

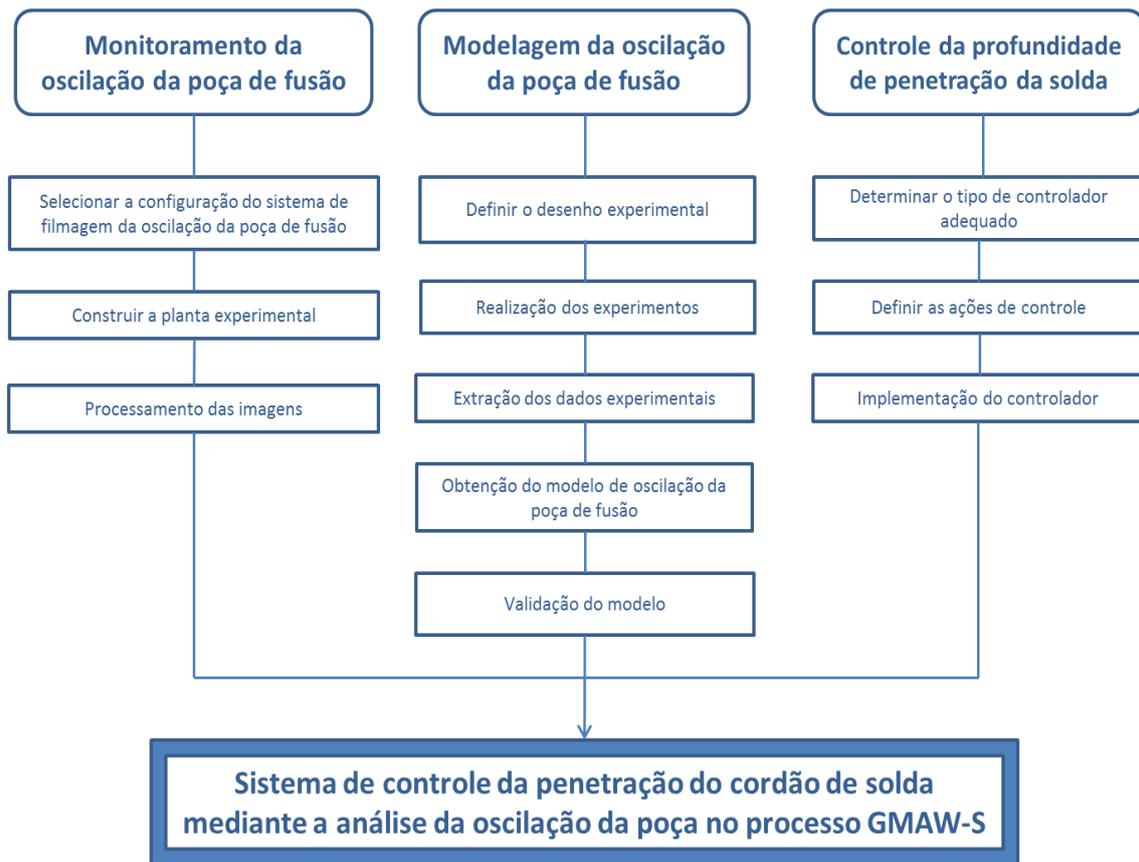


Figura 4. 1: Esquema da metodologia proposta para o sistema de controle da penetração do cordão de solda no processo GMAW-S.

#### 4.1.1. Estabelecimento do sistema de filmagem da oscilação da poça de fusão

Para o estabelecimento do sistema de monitoramento realiza-se previamente o entrosamento do processo GMAW a fim de identificar os seus requisitos de desempenho e analisar os fenômenos envolvidos na formação da solda relacionados com a oscilação da poça. A seleção e configuração do sistema de filmagem são realizadas considerando a distância de localização, proteção frente a respingos, resposta frente a perturbações, tipo de iluminação, tipo de sinal de entrada e saída, tempo de resposta, etc.

Para capturar as imagens foi utilizada uma câmera de alta velocidade DALSA modelo DS-21-001M150 de tecnologia CMOS, monocromática com 256 níveis de cinza. O tempo de exposição no sensor da câmera tem que ser fixado visando observar os pontos de menor temperatura na poça de fusão, por isto o tempo de exposição foi fixado em 0.375 ms. A abertura do diafragma da lente foi fixada em f/8.0 procurando uma profundidade de campo que permita observar em foco a poça de fusão durante o processo de soldagem.

#### 4.1.1.1. Sistema de iluminação

O estudo de boa parte dos fenômenos envolvidos no processo de soldagem necessita de auxílio visual e a luminosidade emitida pelo arco pode representar uma grande barreira. Uma das formas utilizadas atualmente para se obter a visualização do processo, sem a interferência do arco, consiste em iluminar o processo com uma fonte de luz externa durante a aquisição das imagens. Esta iluminação é essencial para a análise do movimento da poça de fusão durante a soldagem utilizando câmeras de alta velocidade. Se a quantidade e qualidade da iluminação não é a adequada, dados visuais adquiridos pelos sistemas de imagem são menos válidos e pode levar a uma medição errada. Então, uma iluminação adequada é essencial para maximizar a quantidade de informação extraível da dinâmica da poça de fusão.

Nesta fase da metodologia é essencial uma escolha adequada da técnica e dos equipamentos de iluminação específicos para obter imagens fixas individuais do comportamento da transferência de metal durante a soldagem, que leve em conta aspectos como: a distância entre a fonte emissora de luz e poça de fusão, o campo de visão, tipo de luz a partir do emissor, a intensidade da fonte de luz, o contraste entre a poça de fusão e o fundo, o reflexo da luz sobre o metal base, a cor e tonalidade da imagem, as configurações da câmera (Velocidade de disparo, a abertura do diafragma, tempo de exposição, etc.).

Existem diferentes técnicas de iluminação que são utilizadas para ressaltar diferentes aspectos das peças que serão analisadas numa aplicação de visão artificial. A técnica escolhida é a perfilografia, esta técnica de iluminação é usada para realçar certos detalhes nas peças e ter um maior contraste entre o fundo e os elementos envolvidos na transferência metálica (arame, metal de base e poça de fusão), que são visíveis apenas quando a forte influência da luz do arco é neutralizada como o uso da fonte de luz externa.

Nesta técnica uma fonte de luz laser ilumina a região de interesse, de modo que a imagem de interesse seja a sombra dessa região. A fonte de luz utilizada é um laser de He-Ne com comprimento de onda de 633 nm, potência de 15 mW, que emite um feixe de luz com 1.2 mm de diâmetro. O feixe de luz é ampliado com o auxílio de sistema expensor de feixe laser de Galileu com uma lente divergente e uma convergente com distâncias focais de 12.5 mm e 500 mm respectivamente, o fator de ampliação é de 40 X e o diâmetro final do feixe colimado é de 48 mm. Do outro lado, a câmera com filtro passa-banda captura a

luz que está na região de comprimento do laser e o que não estiver nessa região fica escuro, de modo que a imagem seja do metal sendo depositado. (Figura 4. 2).

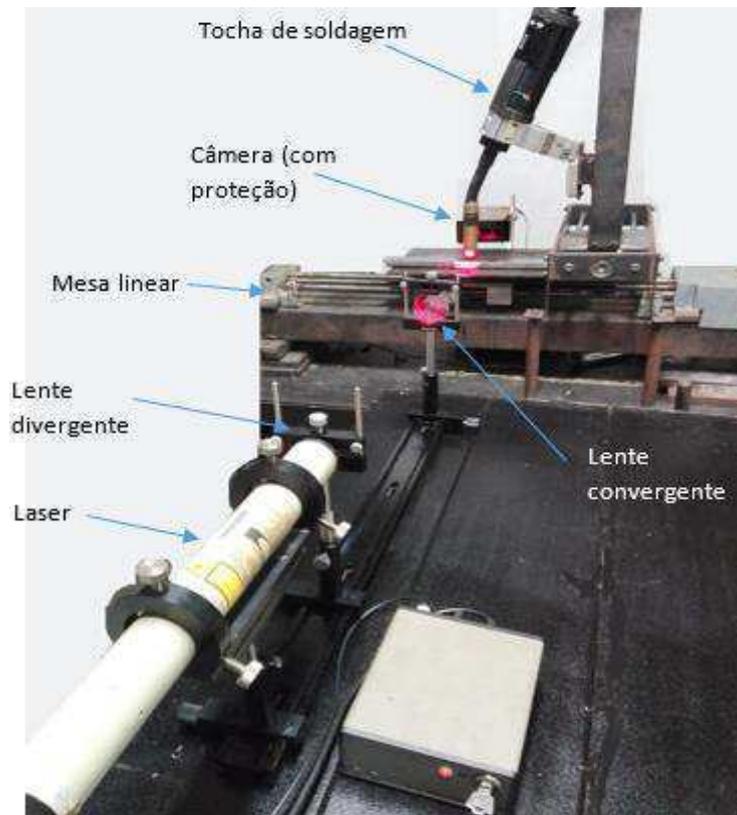


Figura 4. 2: Técnica de perfilografia.

A principal novidade desta abordagem para este tipo de filmagem é a quantidade de informação que pode ser extraída da dinâmica da poça de fusão, onde uma imagem com a poça e o eletrodo pode se obter numa alta qualidade, dando detalhes do metal fundido e arredores.

#### 4.1.2. Construção da planta experimental

A escolha dos equipamentos, atuadores e sensores, assim como condicionamento com os sistemas de aquisição de dados e comando remoto da fonte de soldagem envolvidos no presente trabalho são definidas em função da necessidade de estudo das relações entre os parâmetros de entrada e saída do processo de soldagem GMAW-S e o seu comportamento diante das variações.

Parte do processo de construção da planta envolve decidir que capacidades do sistema têm que ser implementadas em software. Para os sistemas de monitoramento e controle em tempo real em que a resposta do sistema computacional é crítica. Podem-se usar processadores com software específicos projetados para suportar sistemas de verificação

em tempo real. Neste trabalho é utilizada a tocha de soldagem em uma posição fixa sobre a mesa de deslocamento linear, a qual 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 a partir de uma placa NI USB 6009 conectada ao computador. Da mesma forma a manipulação da fonte é feita com o computador por meio do software NI LabVIEW, uma placa de aquisição da NI USB 6009, um sistema de acondicionamento de sinais e uma interface para robôs ROB 5000.

A fonte de soldagem utilizada é uma fonte Fronius TransPuls Synergic 5000, que realiza os processos 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. Para o processo GMAW, possui o sistema alimentador de arame, VR 1500, equipado com sistema de quatro 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 (vide Figura 4. 3).

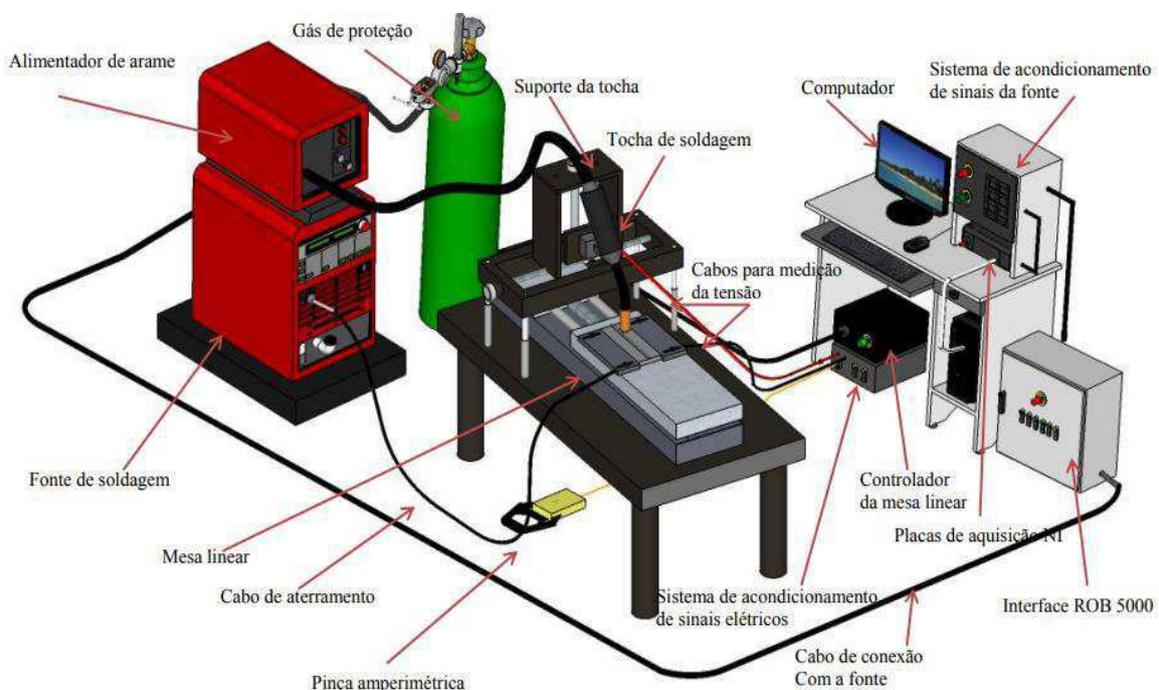


Figura 4. 3: Distribuição do sistema computacional e hardware utilizado. Cruz (2014).

De acordo com as disposições do laboratório, os materiais e consumíveis utilizados foram:

- Eletrodo: arame maciço da classe AWS A5.18 ER70S-6, com diâmetro de 1,2 mm;
- Material de base: aço carbono ABNT 1020 em formato de chapa plana limpa e esmerilada, com 6,35 mm de espessura;
- Gás de proteção: mistura comercial 94%Ar + 6%CO<sub>2</sub>.

Os parâmetros do processo considerados variáveis são: tensão de soldagem, velocidade de alimentação do arame e velocidade de soldagem. Outros fatores de entrada manipuláveis que permaneceram constantes foram:

- Vazão de gás de proteção igual a 15 litros/min;
- Distância bico de contato-peça igual a 15 mm;
- Ângulo de ataque reto (eletrodo perpendicular à chapa);
- Polaridade positiva.

Para adquirir as imagens, a câmera faz uso de um programa implementado em linguagem C na plataforma Microsoft Visual Studio; o qual, a partir de um arquivo de configuração da câmera, executa uma captura (imagens/filmagem) durante um período determinado e cria um conjunto de arquivos contendo em cada um, o quadro capturado pela câmera e um arquivo com o vídeo gerado com as imagens capturadas.

O arquivo de configuração é gerado a partir do programa CamExpert, a partir do qual são testadas e definidas as características do processo de captura. O tempo de exposição e a taxa de captura da câmera são fixados no programa PFRemote.

#### **4.1.3. Processamento das imagens**

Considerando a estratégia para a visualização da poça de fusão escolhida, e visando diminuir ao máximo o tempo de processamento computacional, a escolha das técnicas de processamento digital de imagens para a análises e monitoramento da oscilação da poça de fusão para o processo GMAW-S representa um papel importante na solução do problema de controlar a penetração e determinação da formação de escamas nos cordões de solda.

As imagens são adquiridas a uma taxa aproximada de 1000 quadros (frames) por segundo com uma resolução espacial de 344 colunas por 250 linhas. A determinação da oscilação da poça de fusão nas imagens adquiridas é baseada nos conceitos de limiarização local da imagem.

Com o fim de garantir uma boa segmentação, um pré-processamento de imagem é realizado utilizando um filtro de média para conectar todos os pixels pertencentes à poça de fusão. A linha da imagem que descreve a peça de trabalho é determinada na fase de calibração posicional da câmera, antes da realização do processo de aquisição e processamento das imagens, mediante a observação da borda do metal de base.

A técnica de limiarização é empregada na segmentação das imagens para separar o fundo dos objetos de interesse. No caso da oscilação da poça, depois do pré-processamento a intensidade dos pixels na poça de fusão comparada com a intensidade dos pixels da peça de trabalho e área circundante é altamente diferente (caso de alto contraste). Isto permite que um valor de limiar pré-estabelecido seja utilizado para segmentar.

Para a caracterização da oscilação da poça e ver como ela se comporta na formação do cordão de solda, o processo de rotulação se movimenta unicamente nos pixels que se encontram na crista das ondas formadas. A partir do processo de rotulação são encontrados os pontos de referência utilizados para calcular a variação da oscilação em cada imagem. Exemplo de imagem original e após os processamentos podem ser vistos na Figura 4. 4.

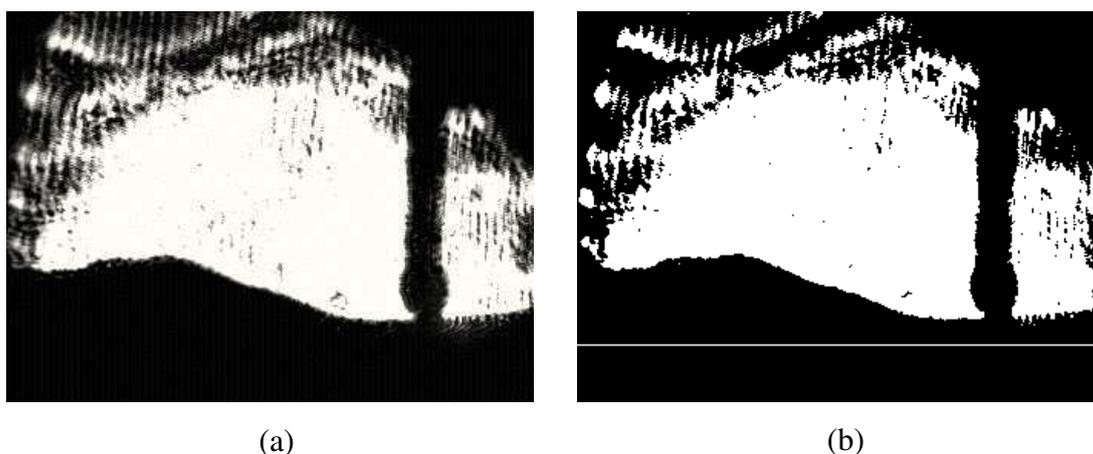


Figura 4. 4: (a) Exemplo de Imagem Original (b) Exemplo de Imagem Pós-Processada.

Na imagem para determinar a oscilação da poça e ver como ela se comporta na formação do cordão de solda, depois do processo de limiarização, o processo de rotulação inicia

numa coluna dentro da janela que determina a poça de fusão e na linha da imagem que pertence à peça de trabalho e que tem nível de cinza com valor “0”. A detecção da poça de fusão realiza-se deslocando a posição de referência da posição inicial ao longo da coluna, pixel por pixel, de baixo para cima até encontrar um pixel com nível de cinza “1”. Esta posição considera-se pertence à borda da poça de fusão, e em seguida, para a próxima imagem, o programa procura o novo limite superior da borda da poça e armazena as coordenadas, e assim sucessivamente. O algoritmo rotula os pixels localizados unicamente na borda da poça de fusão até encontrar o gráfico oscilatório que descreve a crista das ondas formadas nesta posição ao longo do tempo. Este processo de rotulação realiza-se utilizando conectividade-8 como critério de busca.

Como exemplo, a Figura 4. 5 mostra uma imagem adquirida, na qual se indica a trajetória percorrida no processo de rotulação (linha de cor branca na imagem) e o ponto de referência encontrado, neste caso, na posição de coluna 215 e de linha 190, localizado a uma distância de 60 pixels com respeito do eletrodo. A tensão de trabalho utilizada neste caso foi de 22.5 V, a velocidade de alimentação de arame de 7.5 m/min e a velocidade de soldagem de 9.5 mm/s.

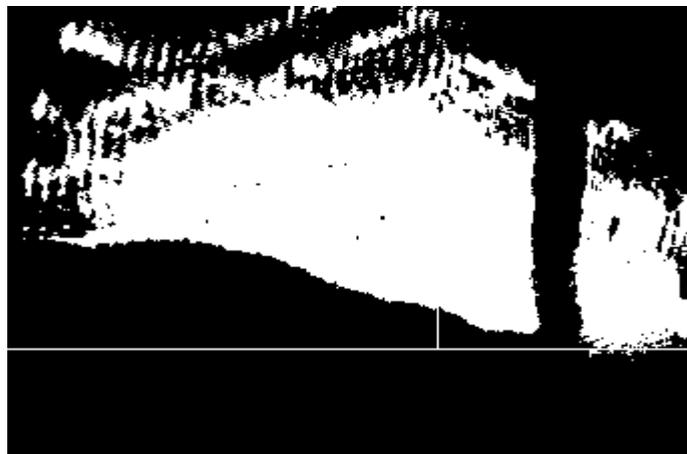


Figura 4. 5: Obtenção da coordenada do ponto selecionado numa imagem analisada.

O algoritmo armazena como saída um vetor das coordenadas do ponto em cada uma das imagens analisadas; as imagens adquiridas e um vídeo. Por último calcula-se o espectro de Fourier do sinal ondulatório gerado pelas coordenadas do ponto a cada imagem.

#### 4.1.3.1. Análise do Espectro de Fourier da oscilação da poça de fusão

Analisaram-se 350 imagens em cada intervalo de processamento (cada 350 ms), já que a transformada discreta de Fourier (DFT) requer que a função de entrada seja uma

sequência discreta e de duração finita. De modo que é ideal pra processar informação armazenada em suportes digitais, em particular se utiliza comumente em processador digital de sinais. Além disso com o número de imagens processadas procurasse conseguir uma boa quantidade de informação sem afetar o tempo de resposta do sistema e ter as ações de controle necessárias para obter as características geométricas desejadas nos cordões de solda.

O gráfico da Figura 4. 6 apresenta a oscilação do ponto com posição em X=215 (60 pixels do centro do arame).

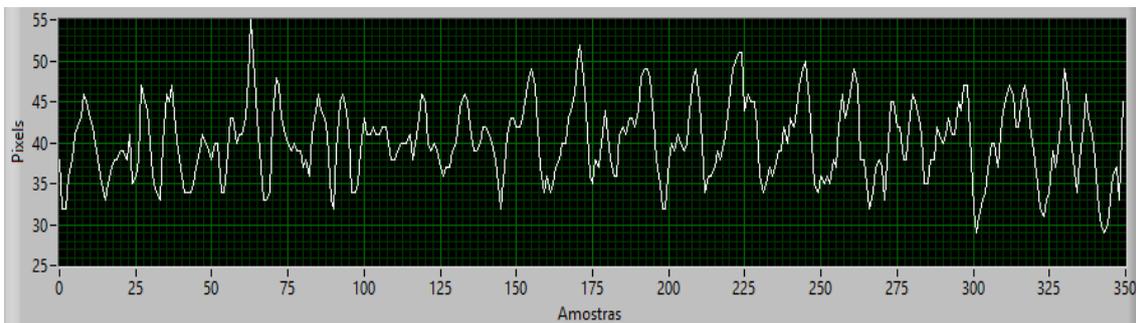


Figura 4. 6: Oscilação do ponto X=215.

A DFT (do inglês, *discrete Fourier transform*) de um sinal  $x[n]$  definido na faixa  $0 \leq n \leq N-1$  se define como:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i kn}{N}} \quad k = 0, \dots, N-1$$

Desconsiderando as frequências mais baixas que ocorrem devido ao deslocamento vertical do valor médio das oscilações pode-se corroborar que a frequência mais significativa é de 19 Hz, conforme evidenciado no gráfico de espectros de frequência da Figura 4. 7, que está de acordo com a frequência de oscilação do arco.

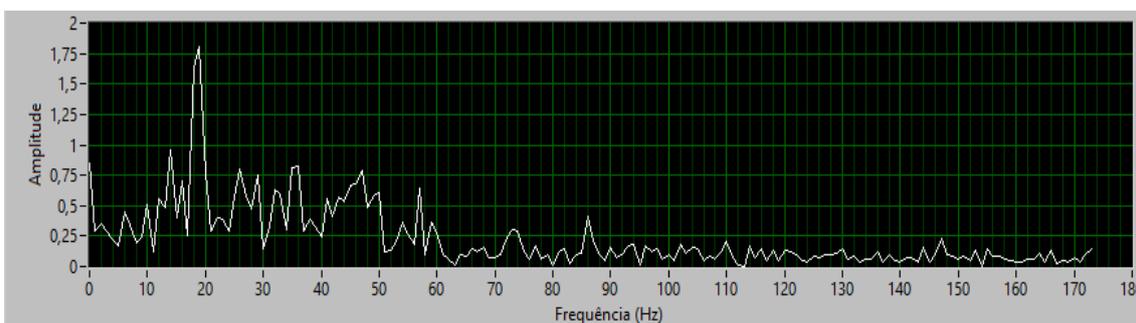


Figura 4. 7: Espectros de frequências do sinal de oscilação da poça de fusão no ponto X=215.

## 4.2. MODELAGEM DA OSCILAÇÃO DA POÇA DE FUSÃO

Para realizar a modelagem da penetração do cordão de solda são levados a cabo os passos apresentados na Figura 4. 1.

### 4.2.1. Definir o projeto experimental

O GMAW é o processo de soldagem 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 é, o aumento gradual das exigências em um 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. Portanto, não há um conjunto único de parâmetros que produza resultados ótimos em todos os casos. Como este trabalho se foca no controle do parâmetro geométrico da penetração 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.

As faixas de trabalho de todos os parâmetros selecionados se fixam mediante a realização de provas. Isto é 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 decidiu-se mediante a inspeção do cordão de solda, procurando cordões de boa aparência e sem defeitos visíveis. Os valores limites dos parâmetros de soldagem para o modo de transferência por curto circuito são apresentados na Tabela 4. 1.

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

<b>FAIXA</b>	Tensão (V)	Velocidade de alimentação de arame (m/min)	Velocidade de soldagem (mm/s)
<b>MIN</b>	18	3	5
<b>MAX</b>	24	9	11

A escolha de uma configuração adequada em relação ao experimento a ser realizado é fundamental para ajustar os modelos ao conjunto de dados recolhidos nos pontos do desenho. 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. São realizados os ensaios de soldagem, fazendo a variação nos parâmetros de processo com base nos pontos do PCC para posteriormente avaliar e caracterizar a influência destes na geometria dos cordões. A Figura 4. 8 apresenta uma representação do planejamento experimental baseado no PCC para três variáveis de entrada.

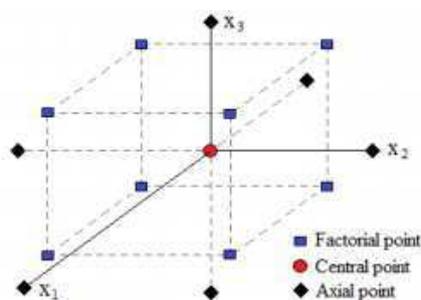


Figura 4. 8: Projeto central composto para três variáveis.

As unidades apresentadas anteriormente na Figura 4.8 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.

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
Tensão (V)	$x_1$	18.5	19.5	21	22.5	23.5
Velocidade de alimentação de arame (m/min)	$x_2$	3.5	4.5	6.0	7.5	8.5
Velocidade de soldagem (mm/s)	$x_3$	5.5	6.5	8.0	9.5	10.5

Os valores correspondentes aos níveis codificados são arredondados para poder usá-los na fonte de soldagem.

Com a combinação dos valores das variáveis obtidos no Planejamento Composto Central, obtém-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			No Exp	Níveis			Faixa		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1$	$x_2$	$x_3$		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1$	$x_2$	$x_3$
<b>1</b>	-1	-1	-1	19.5	4.5	6.5	<b>11</b>	0	-1.682	0	21	3.5	8.0
<b>2</b>	1	-1	-1	22.5	4.5	6.5	<b>12</b>	0	1.682	0	21	8.5	8.0
<b>3</b>	-1	1	-1	19.5	7.5	6.5	<b>13</b>	0	0	-1.682	21	6.0	5.5
<b>4</b>	1	1	-1	22.5	7.5	6.5	<b>14</b>	0	0	1.682	21	6.0	10.5
<b>5</b>	-1	-1	1	19.5	4.5	9.5	<b>15</b>	0	0	0	21	6.0	8.0
<b>6</b>	1	-1	1	22.5	4.5	9.5	<b>16</b>	0	0	0	21	6.0	8.0
<b>7</b>	-1	1	1	19.5	7.5	9.5	<b>17</b>	0	0	0	21	6.0	8.0
<b>8</b>	1	1	1	22.5	7.5	9.5	<b>18</b>	0	0	0	21	6.0	8.0
<b>9</b>	-1.682	0	0	18.5	6	8.0	<b>19</b>	0	0	0	21	6.0	8.0
<b>10</b>	1.682	0	0	23.5	6	8.0	<b>20</b>	0	0	0	21	6.0	8.0

#### 4.2.2. Realização dos experimentos

Para a realização dos experimentos, são executadas as soldas com cada combinação das variáveis do processo indicadas acima, sendo que o comprimento dos cordões foi de 100 mm. Dado que neste trabalho procura-se desenvolver uma metodologia que permite obter cordões com a profundidade da penetração desejada fazendo com 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 pretende verificar a repetitividade e aplicabilidade da metodologia proposta a variações nas condições do processo realizando os mesmos ensaios indicados na matriz de experimentos. As soldas foram executadas aleatoriamente como pede a definição da metodologia do desenho experimental com o planejamento composto central. Na Tabela 4. 4 se apresentam os espectros de frequências obtidos (media e desvio padrão) e a quantidade de curtos-circuitos obtidos durante a realização dos experimentos.

Tabela 4. 4: Espectros de frequências obtidos dos experimentos.

Experimento	Entradas			Resultados	
	Tensão	Velocidade de alimentação de arame	Velocidade de soldagem	Frequência de oscilação poça de fusão (Hz)	Media quantidade curto circuitos
1	19,5	4,5	6,5	15-20	23,83
2	22,5	4,5	6,5	8--12	10,54
3	19,5	7,5	6,5	28--40	34,87
4	22,5	7,5	6,5	27--33	19,33
5	19,5	4,5	9,5	45--51	26,04
6	22,5	4,5	9,5	8--12	11,06
7	19,5	7,5	9,5	35--42	36,94
8	22,5	7,5	9,5	13--17	19,4
9	18,5	6	8	37--48	40,64
10	23,5	6	8	8--13	11,11
11	21	3,5	8	19--26	12,80
12	21	8,5	8	12--16	31,09
13	21	6	5,5	34--39	26,42
14	21	6	10,5	19--23	23,52
15	21	6	8	33--39	24,38
16	21	6	8	32--37	26
17	21	6	8	30--39	26,71
18	21	6	8	31--38	26,23
19	21	6	8	33--39	26,33
20	21	6	8	33--36	25,52

#### 4.2.3. Extração dos parâmetros geométricos dos cordões de solda

Depois de realizar as soldas, os cordões são cortados transversalmente com um disco especial de corte fino para aço. Em cada cordão, realizaram-se três cortes a uma distância de 20 mm do centro do cordão, esses pontos foram escolhidos por estarem na parte mais estável durante a formação do cordão de solda. As amostras foram lixadas passando progressivamente por lixas de água com gramatura desde 120 até as mais finas de 2400, e finalmente o polimento tipo espelho com um pano e um líquido com micropartículas de alumina ( $Al_2O_3$ ). Para revelar a penetração do cordão de solda, as amostras são atacadas quimicamente na face polida com NITAL a 5%v.v, composto de 5 ml de ácido nítrico ( $HNO_3$ ) e 95 ml de álcool etílico 96°GL (96%v.v $CH_3CH_2OH$  +4%v.v $H_2O$ ). Na Figura 4. 9, mostra-se o perfil da penetração do cordão de solda e a poça de fusão obtida por metalografia.

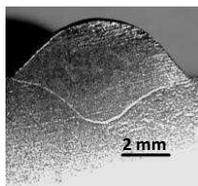


Figura 4. 9: Seção transversal do cordão de solda.

Uma média aritmética dos valores obtidos de penetração e área da poça de fusão para cada corpo de prova é realizada. Isto é feito para permitir a análise de forma qualitativa da geometria dos cordões de solda em relação aos parâmetros de processo. A Tabela 4. 5 apresenta os valores médios das penetrações medidas que resultaram das amostras tratadas com os parâmetros de soldagem estabelecidos na matriz de experimentos (Tabela 4. 3).

Tabela 4. 5: Medidas das penetrações dos cordões obtidos nos experimentos.

Experimento	Parâmetros de processo			Penetração do cordão (mm)	
	Tensão (V)	Velocidade de alimentação de arame (m/min)	Velocidade de soldagem (mm/s)	Media	Desvio padrão
1	19,5	4,5	6,5	1,309	0,265
2	22,5	4,5	6,5	1,078	0,188
3	19,5	7,5	6,5	1,619	0,255
4	22,5	7,5	6,5	1,952	0,132
5	19,5	4,5	9,5	1,016	0,057
6	22,5	4,5	9,5	0,762	0,075
7	19,5	7,5	9,5	1,345	0,045
8	22,5	7,5	9,5	1,328	0,328
9	18,5	6	8	1,290	0,067
10	23,5	6	8	1,267	0,070
11	21	3,5	8	0,769	0,078
12	21	8,5	8	1,681	0,1
13	21	6	5,5	1,748	0,080
14	21	6	10,5	1,160	0,060
15	21	6	8	1,354	0,037
16	21	6	8	1,458	-
17	21	6	8	1,239	0,038
18	21	6	8	1,410	0,113
19	21	6	8	1,249	0,073
20	21	6	8	1,239	0,144

#### **4.2.4. Obtenção do modelo de oscilação da poça de fusão**

Nesta seção se apresenta a construção do modelo da profundidade de penetração do cordão de solda tendo em conta os parâmetros de processo selecionados anteriormente, e com base na identificação experimental. Como proposta pretende-se escolher como entradas os valores médios e desvios padrões da penetração para os cordões produzidos nas provas, junto com a média e o desvio padrão das frequência de oscilação da poça, os quais foram fornecidos a partir dos resultados das etapas de realização dos experimentos e de extração dos parâmetros geométricos dos cordões de solda. Como saída procuram-se as estimativas dos valores das variáveis de processo: velocidade de alimentação do arame, tensão e velocidade de soldagem, já que a literatura especializada e a experiência no laboratório falam que são os parâmetros que tem mais influência na penetração da solda, comportamento elétrico do arco, o processo de transferência de massa, a aparência superficial do cordão de solda.

##### **4.2.4.1 Desenvolvimento do modelo baseado em Redes Neurais Artificiais**

Neste trabalho estuda-se a abordagem da identificação dos modelos baseados em redes neurais artificiais (RNA) 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-S.

Além das medidas médias, as medidas do desvio padrão, para a penetração e frequência de oscilação, foram consideradas como entradas já que este valor ajuda garantir que o erro com respeito a “não uniformidade” dos valores obtidos das variáveis de entrada na etapa experimental seja o mínimo, isto é garantir a diferenciação dos dados de entrada que representem o comportamento das respostas no domínio experimental e que resultem em cordões que apresentem a maior regularidade possível na característica geométrica requerida.

Para conseguir isto foram implementadas uma série de condições no algoritmo de modelado e controle que fazem que o sistema após escolhido a penetração desejada ( $p$ ) procure do conjunto de medidas obtidas na parte experimental, os valores que se encontrem numa faixa de  $p-0.15 < p < p+0.15$ . Uma vez obtidos estes valores realiza-se uma comparação dos valores com o correspondente conjunto dos desvios padrões, para

assim selecionar o quarteto de parâmetros (medida da penetração e frequência de oscilação, e seus correspondentes desvios padrões) que satisfaz a condição e que apresente o menor valor do desvio padrão como entrada na rede neural. Para a concepção do modelo são necessárias diversas etapas, as quais são descritas em seguida.

- Definição da Topologia das Redes Neurais Artificiais

Na elaboração do modelo mediante Redes Neurais Artificiais uma das tarefas mais difíceis é determinar o número de elementos de neurônios, bem como o número de camadas ocultas. Este elemento importante dentro da modelagem tradicionalmente é realizado mediante a experiência sobre o processo e ensaio com diferentes estruturas até encontrar uma adequada, já que não existem regras para isto, levando a um sem número 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.

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 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 arquitetura da rede selecionada como resultado dos testes apresentam uma topologia de conexões para frente o *feedforward* (vide Figura 4. 10) composta por uma camada de entrada constituída por quatro neurônios (medida desejada e desvio padrão da penetração e frequência de oscilação), duas camadas ocultas formadas por 20 e 11 neurônios, além de uma camada de saída formada por três neurônios que representam as variáveis do processo (tensão, velocidade de alimentação do arame, velocidade de soldagem).

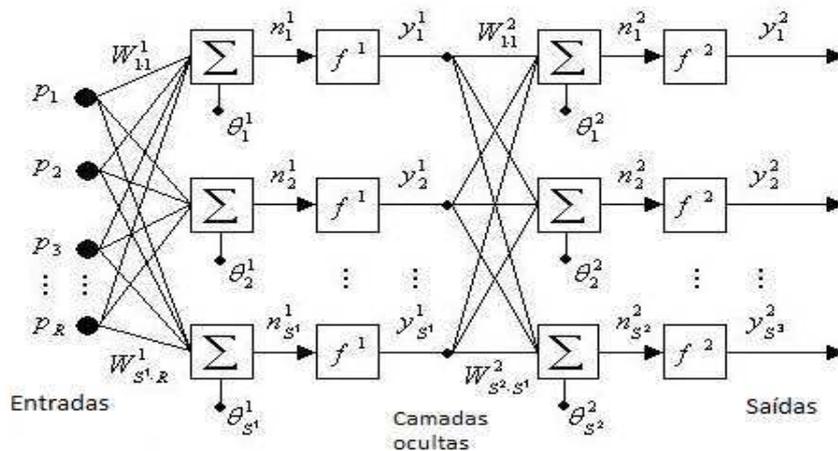


Figura 4. 10: Topologia da Rede Neural Artificial.

- Método de treinamento das redes neurais

Com base no 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 sinal 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).

Na rede neural artificial implementada utilizou-se a função de ativação linear na saída e 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 monotônica 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

A rede neural artificial treinada é usada para prever os parâmetros que produzem cordões de solda com a penetração desejada e com boa qualidade. Todos os parâmetros do processo obtidos dos experimentos foram normalizados na faixa de  $[-1, 1]$ .

Dos resultados obtidos nos 20 experimentos é realizada a divisão, aleatória, em três conjuntos, a saber: 70% dos dados são utilizados para o treinamento, 15% dos dados para validação e 15% dos dados para testar a capacidade de generalização da rede. As redes com a topologia e o método de treinamento escolhidos anteriormente foram configuradas com a função de transferência tansig, a função de treinamento apresenta a sequência das entradas à rede e as atualizações se produzem após cada passo de tempo. A função de atualização dos pesos utilizada é a função de aprendizagem de gradiente decrescente com momentum e pesos em limiares.

O erro quadrático médio (em inglês, MSE) é usado para avaliar a precisão da rede neuronal. Os pesos sinápticos iniciais foram inicializados aleatoriamente. Definida e configurada a rede 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. O critério de parada do algoritmo retropropagação do erro não é bem definido, e geralmente é utilizado um número máximo de ciclos, neste caso se definirem 5000 iterações.

- Teste da rede neural

Depois da rede ser treinada 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, que 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.

#### **4.2.5. Validação do modelo**

A verificação de que o modelo experimental, dentro do seu domínio de aplicação, se comporta de maneira suficientemente satisfatória com relação ao conjunto de condições prescritas para as quais o modelo experimental foi criado é realizado nesta etapa.

As medidas numéricas das discrepâncias entre a resposta do modelo e os dados experimentais desejados são usadas para comparar vários modelos e decidir sobre o seu comportamento. Para isso, foi proposto o uso do cálculo de resíduos, que pode ser calculado conforme apresentado a seguir.

$$e = y - y_m \quad (4.1)$$

Onde  $y$  são os valores obtidos da penetração do cordão após a realização das soldas de verificação e o subsequente processo metalográfico.  $y_m$  refere-se aos valores de penetração desejados utilizados para prever os valores dos parâmetros do processo (tensão, velocidade de alimentação do fio, velocidade de soldagem) com os quais os cordões de solda foram produzidos.

O modelo proposto é correto, pois os resíduos não possuem uma estrutura "sistemática", mas é o resultado das perturbações aleatórias que atuam no processo.

### **4.3. CONTROLE DA PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA**

Na soldagem automática é importante controlar as condições de soldagem, a fim de se obter soldas com a penetração adequada. Por isso, os fenômenos da poça de fusão são analisados e a estimativa da penetração através da detecção da frequência da poça de fusão é utilizada nesta etapa para o controle da profundidade de penetração do cordão de solda.

#### **4.3.1. Determinação do tipo de controlador**

Entre as técnicas de Inteligência Artificial usadas no Controle Inteligente opta-se pelo controle difuso, já que o controle do processo de soldagem requer a intervenção de pessoal humano para conseguir determinados objetivos de alto nível (segurança, qualidade,

produção). A automação exige que o sistema de controle possa substituir o soldador nas tarefas, para o que se precisa um grande conhecimento do processo e habilidades específicas. Neste tipo de situações, o controle difuso oferece perspectivas interessantes pela sua capacidade de subministrar metodologias que permitem realizar de forma automática algumas das tarefas realizadas tipicamente pelos humanos. Além disso, é comumente aceitado o fato que no controle de sistemas complexos (plantas não lineares com parâmetros internos que variam no tempo, dependentes do entorno, etc.), se tem requerimentos que na atualidade não podem se alcançar exclusivamente com a teoria de controle convencional. Já que a presença das incertezas, mal definidos pela falta de informação, ou a descrição analítica do sistema é inabordável ou leva a uma excessiva complexidade computacional.

#### **4.3.2. Definição das ações de controle (variáveis manipuladas e controladas)**

O problema de controle consiste então em determinar os sinais adequados a serem aplicados a partir da saída desejada em relação ao conhecimento do processo. Neste caso decidiu-se controlar a profundidade de penetração com a manipulação da velocidade de alimentação de arame e velocidade de soldagem, 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 penetração do cordão de solda, além da experiência adquirida no laboratório. Não ser mantidas fixas as variáveis: distância bico de contato peça, vazão de gás de proteção e um ângulo de inclinação da tocha.

Como a entrada do controlador toma-se os valores dos erros nas medida da frequência e na faixa de variação, os quais são a diferença entre a frequência ou a faixa de variação da oscilação da poça fusão desejada e o valor da medida da oscilação (media e desvio padrão) obtida pelo sistema de filmagem. Para as variáveis de entrada foram utilizadas cinco funções de pertinência de forma triangular e dois de forma trapezoidal como são Negativo Alto (NA), Negativo Baixo (NB), Nulo (N), Positivo Baixo (PB) e Positivo Alto (PA). A representação difusa e as variáveis linguísticas dos erros nas medidas são apresentadas na Figura 4. 11.

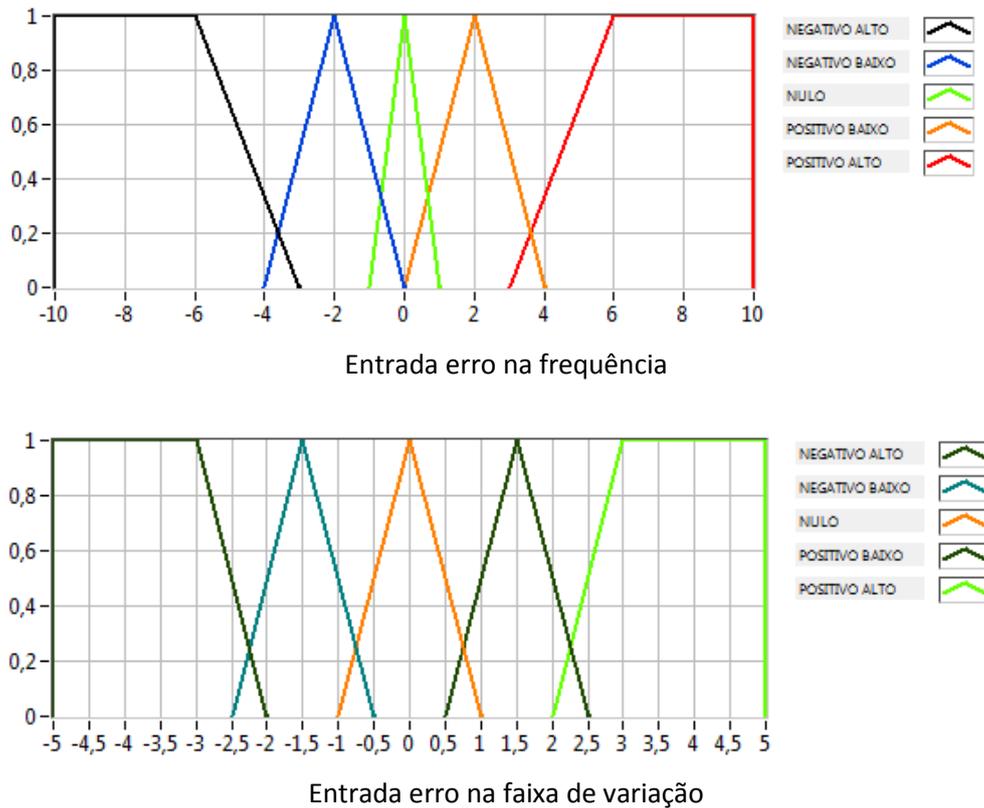


Figura 4. 11: Representação difusa e variáveis linguísticas das entradas do controlador.

Para o controlador, as saídas que se propõem partem da necessidade de corrigir o processo para chegar à profundidade da penetração desejada no cordão, isto mediante a modificação da velocidade de alimentação do arame e velocidade de soldagem. A saída do controlador velocidade arame e velocidade soldagem corresponde ao ajuste que se deve fazer em dito parâmetro de processo em procura de diminuir o erro na medida. Para a velocidade arame o 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 o valor medido e o desejado. Para esta variável de saída foram utilizadas cinco funções de pertinência dois de forma trapezoidal e três de forma triangular, chamadas Baixar Muito (BM), Baixar Pouco (BP), Manter (M), Subir Pouco (SP) e Subir Muito (SM). Para a velocidade soldagem o ajuste é positivo se o erro na faixa de variação é muito negativo, negativo se o erro é muito positivo e sem ajuste no caso de que o erro seja aceitável. Foram utilizadas três funções de pertinência dois de forma trapezoidal e uma de forma triangular, chamadas Baixar (B), Manter (M) e Subir (S). A Figura 4. 12, exhibe a representação difusa e as variáveis linguísticas da saída do controlador. Os parâmetros de cada função de pertinência tem por base a experiência

e se encontram em uma faixa de -0.5 a 0.5 no caso da velocidade de alimentação de arame e -0.3 a 0.3 no caso da velocidade de soldagem, ou seja, o controlador aumenta ou diminui de cada vez as velocidades determinadas pela rede neural em um valor dentro da referida faixa.

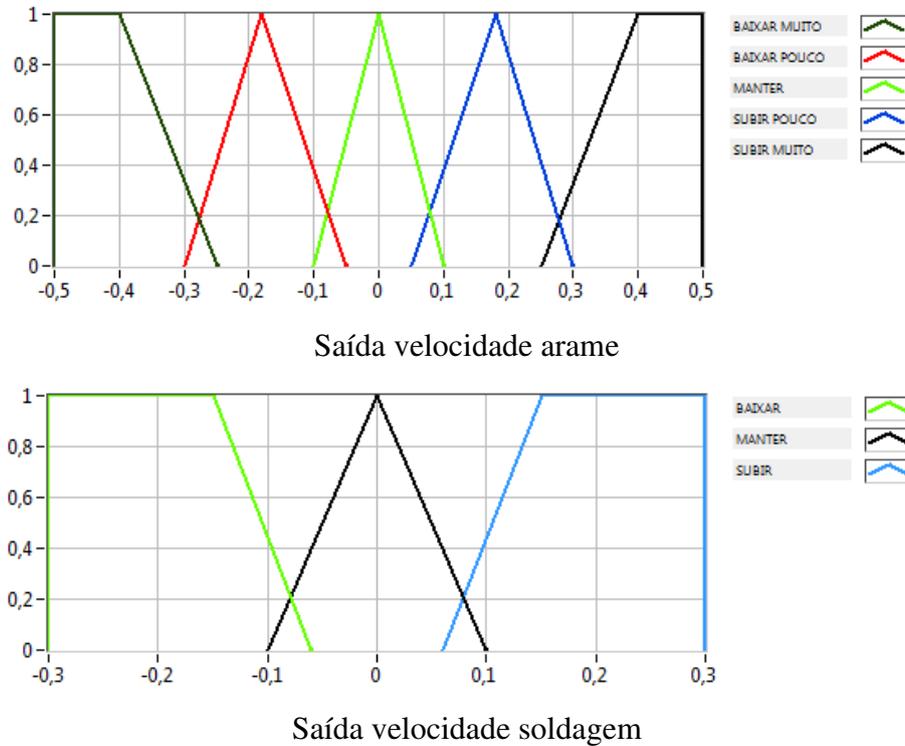


Figura 4. 12: Representação difusa e variáveis linguísticas da saída do controlador.

- Estabelecimento do Sistema de Inferência

Com as entradas e saídas do controlador definidas podem-se estabelecer as relações existentes a partir das regras de inferência difusa tipo Mamdani. Tomando a estrutura IF - THEN são deduzidas 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 Tabela 4. 6, a seguir, para o controle da profundidade da penetração do cordão de solda.

Tabela 4. 6: Regras de Inferência Difusa para o controlador.

N° da regra		ENTRADAS				SAIDAS		
		ERRO FREQUENCIA		ERRO FAIXA VARIAÇÃO		VELOCIDAD E ARAME		VELOCIDADE DE SOLDAGEM
1	IF	NA	AND	NA	THEN	SM	AND	B
2	IF	NA	AND	NB	THEN	SM	AND	M
3	IF	NA	AND	N	THEN	SM	AND	M
4	IF	NA	AND	PB	THEN	SM	AND	M
5	IF	NA	AND	PA	THEN	SM	AND	S
6	IF	NB	AND	NA	THEN	SP	AND	B
7	IF	NB	AND	NB	THEN	SP	AND	M
8	IF	NB	AND	N	THEN	SP	AND	M
9	IF	NB	AND	PB	THEN	SP	AND	M
10	IF	NB	AND	PA	THEN	SP	AND	S
11	IF	N	AND	NA	THEN	M	AND	B
12	IF	N	AND	NB	THEN	M	AND	M
13	IF	N	AND	N	THEN	M	AND	M
14	IF	N	AND	PB	THEN	M	AND	M
15	IF	N	AND	PA	THEN	M	AND	S
16	IF	PB	AND	NA	THEN	BP	AND	B
17	IF	PB	AND	NB	THEN	BP	AND	M
18	IF	PB	AND	N	THEN	BP	AND	M
19	IF	PB	AND	PB	THEN	BP	AND	M
20	IF	PB	AND	PA	THEN	BP	AND	S
21	IF	PA	AND	NA	THEN	BM	AND	B
22	IF	PA	AND	NB	THEN	BM	AND	M
23	IF	PA	AND	N	THEN	BM	AND	M
24	IF	PA	AND	PB	THEN	BM	AND	M
25	IF	PA	AND	PA	THEN	BM	AND	S

Negativo Alto (NA), Negativo Baixo (NB), Nulo (N), Positivo Baixo (PB) e Positivo Alto (PA), Baixar Muito (BM), Baixar Pouco (BP), Manter (M), Subir Pouco (SP) e Subir Muito (SM), Baixar (B), Manter (M) e Subir (S).

Finalmente 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. O método utilizado 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 difuso de saída. O ponto obtido na etapa de defuzzificação é a saída do controlador, o qual será transformado num sinal equivalente no sistema de comunicação e controle do alimentador de arame e da mesa de deslocamento linear e assim exercer as ações de controle pertinentes.

### 4.3.3. Implementação do controlador para a profundidade da penetração do cordão de solda

Uma vez cumpridas as etapas de processamento de imagens, a modelagem e projeto do controlador, procede-se à implementação do sistema de controle integrando os sistemas inteligente e o processamento proposto das imagens. A malha de controle a ser empregada para a profundidade de penetração do cordão de solda é apresentada na Figura 4. 13, onde a frequência de oscilação da poça de fusão – que é obtida pelo sistema de aquisição de imagens, se compara com o valor de referência (modelo rede neural artificial), sinal que ingressa ao 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 alimentação de arame e velocidade de soldagem. A caracterização da oscilação da poça permite estimar a penetração do cordão de solda.

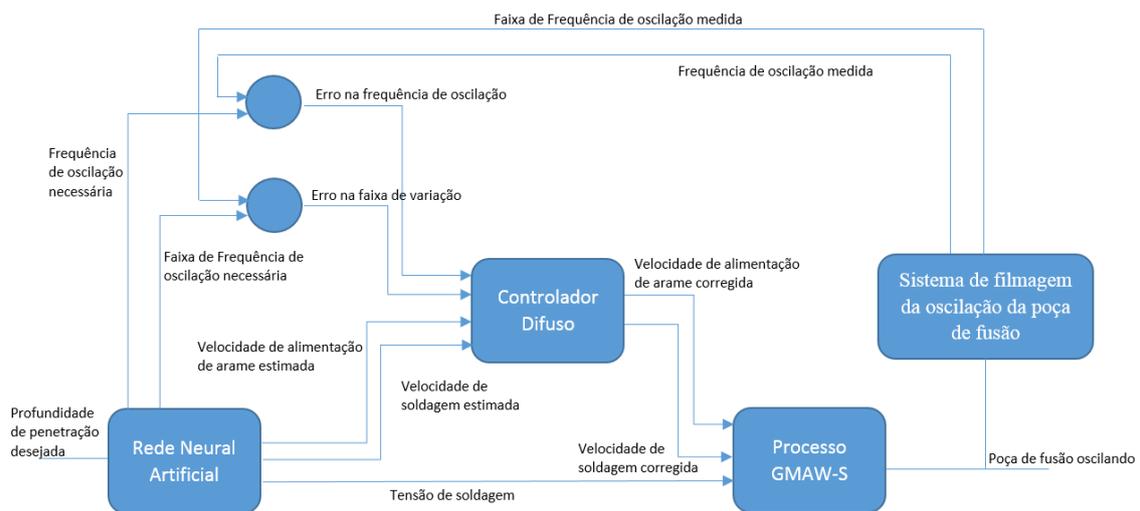


Figura 4. 13: Malha de controle.

De outro lado, mesmo que o monitoramento da oscilação da poça seja feito a cada 1 ms, cada etapa de controle é realizada a cada 350 ms. Esta janela de tempo permite em cada caso que as variáveis de controle atuem de forma individual sobre o parâmetro controlado, tendo em conta o tempo de resposta da máquina, a obtenção do espectro de frequência por transformada de Fourier e o tempo de resposta dos parâmetros de processo que influenciam a formação do cordão.

## 4.4. ANALISES DA FORMAÇÃO DE ESCAMAS NOS CORDÕES DE SOLDA

A presente seção, vai se concentrar na relação entre a frequência de oscilação da poça, a penetração e a formação de escamas, as quais são ondulações deixadas no cordão

solidificado, como mostrado na Figura 4. 14, são muito comuns na soldagem por arco elétrico com gás de proteção. Compreender os mecanismos que conduzem à formação de escamas vai ser útil para determinar a geometria do cordão de solda, incluindo mordeduras e sobreposição que pode afetar a qualidade da solda.



Figura 4. 14: Escamas no cordão de solda.

Uma vez que a formação de uma escama está intimamente relacionada com o comportamento dinâmico da poça de fusão, é interessante verificar se o ciclo de vida de uma oscilação formada pelo curto circuito é aproximadamente a mesma que a criação de uma escama.

Várias causas possíveis das ondulações e discontinuidades internas têm sido sugeridas em trabalhos anteriores, incluindo a variação na entrada de calor durante a fusão, tempo de esfriamento, movimento mecânico, expansão térmica ou contração do cordão de solda e instabilidade no fluxo de calor. Este trabalho apresenta outro enfoque, o qual visa obter pelo processamento digital de imagens a dinâmica da poça de fusão que caracteriza a profundidade da penetração e a correlação com a formação destas escamas. Por contagem do número de instantes de tempo sobre as imagens obtidas entre a repetição de um dado padrão de reflexão, o período de oscilação da poça gerado pelos curtos circuitos pode ser medido.

As taxas médias de formação de escamas podem também ser medidas a partir das imagens do cordão de solda, e comparadas com a informação obtida durante um determinado período de tempo. A Figura 4. 15 apresenta uma vista da superfície de resposta para a relação na produção de escamas nos cordões obtidos, nas quais ilustra-se o comportamento da resposta em função das medidas da penetração dos cordões (media e desvio padrão). Com o que se tem a relação do número de escamas presentes na superfície do cordão com respeito à penetração do cordão de solda, a qual como apresentado anteriormente se correlaciona com os parâmetros de processo e a frequência de oscilação da poça de fusão.

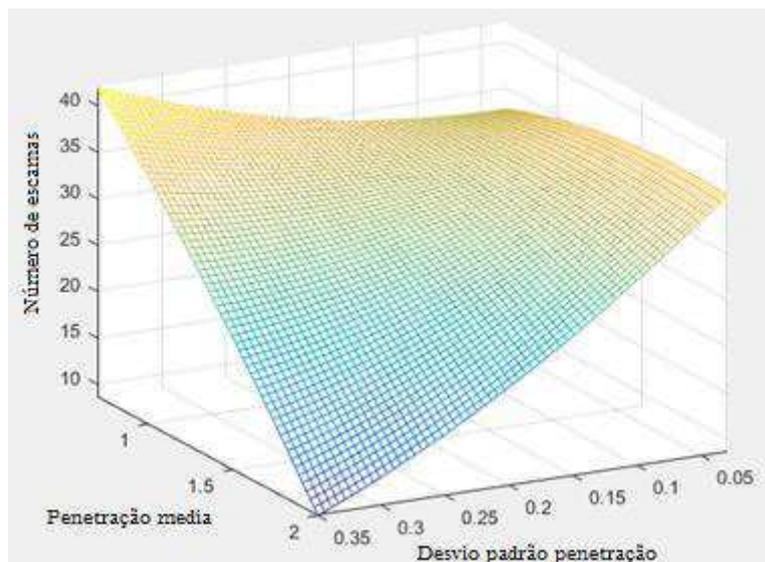


Figura 4. 15: Superfície de resposta da relação na produção de escamas na superfície dos cordões.

A Figura 4. 15 evidencia a tendência das escamas reduzirem a sua quantidade a medida em que aumenta a penetração média. Há uma redução no desvio padrão da penetração para maiores concentrações de escamas. Pode-se observar também que a diminuição da quantidade de escamas não é linear e que muda mais rápido para valores dos fatores de entrada maiores que o ponto central.

## 5. RESULTADOS

No presente capítulo, têm-se os resultados obtidos no referencial metodológico exposto anteriormente, divididos em três 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 para o controle da profundidade da penetração do cordão de solda; a segunda, os resultados da implementação do sistema desenvolvido e a terceira, os resultados obtidos na análises da formação de escamas nos cordões de solda para o processo GMAW-S.

### 5.1. RESULTADOS DA METODOLOGIA

#### 5.1.1. Avaliação da metodologia de medição

No processo de aquisição das imagens para a determinação da oscilação da poça de fusão, 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. 1, a seguir.

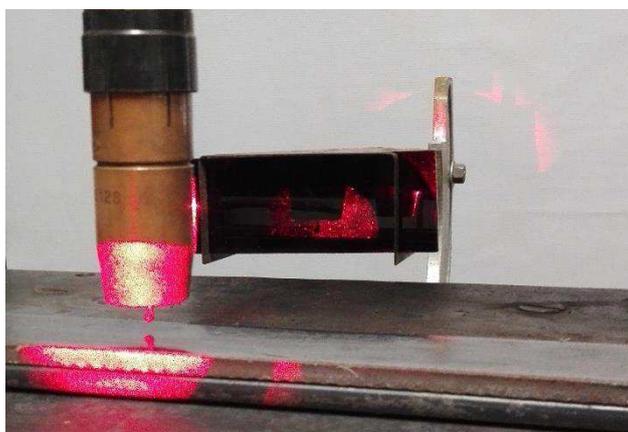


Figura 5. 1: Zona da imagem para a aquisição das imagens da poça de fusão.

Para avaliar o rendimento do sistema de aquisição e processamento de imagens apresentam-se, a título de exemplo, as sequências de algumas imagens capturadas e processadas num intervalo de 8 ms durante a formação de dois cordões de solda produzidos com parâmetros de processo estabelecidos no planejamento experimental. O primeiro com uma tensão de 19.5 V, velocidade de alimentação de Arame 4.5 m/min e velocidade de soldagem 6.5 mm/s (Figura 5. 2), o segundo com valores de tensão de 19.5 V, velocidade de alimentação de Arame 7.5 m/min e velocidade de soldagem 9.5 mm/s (Figura 5. 3).

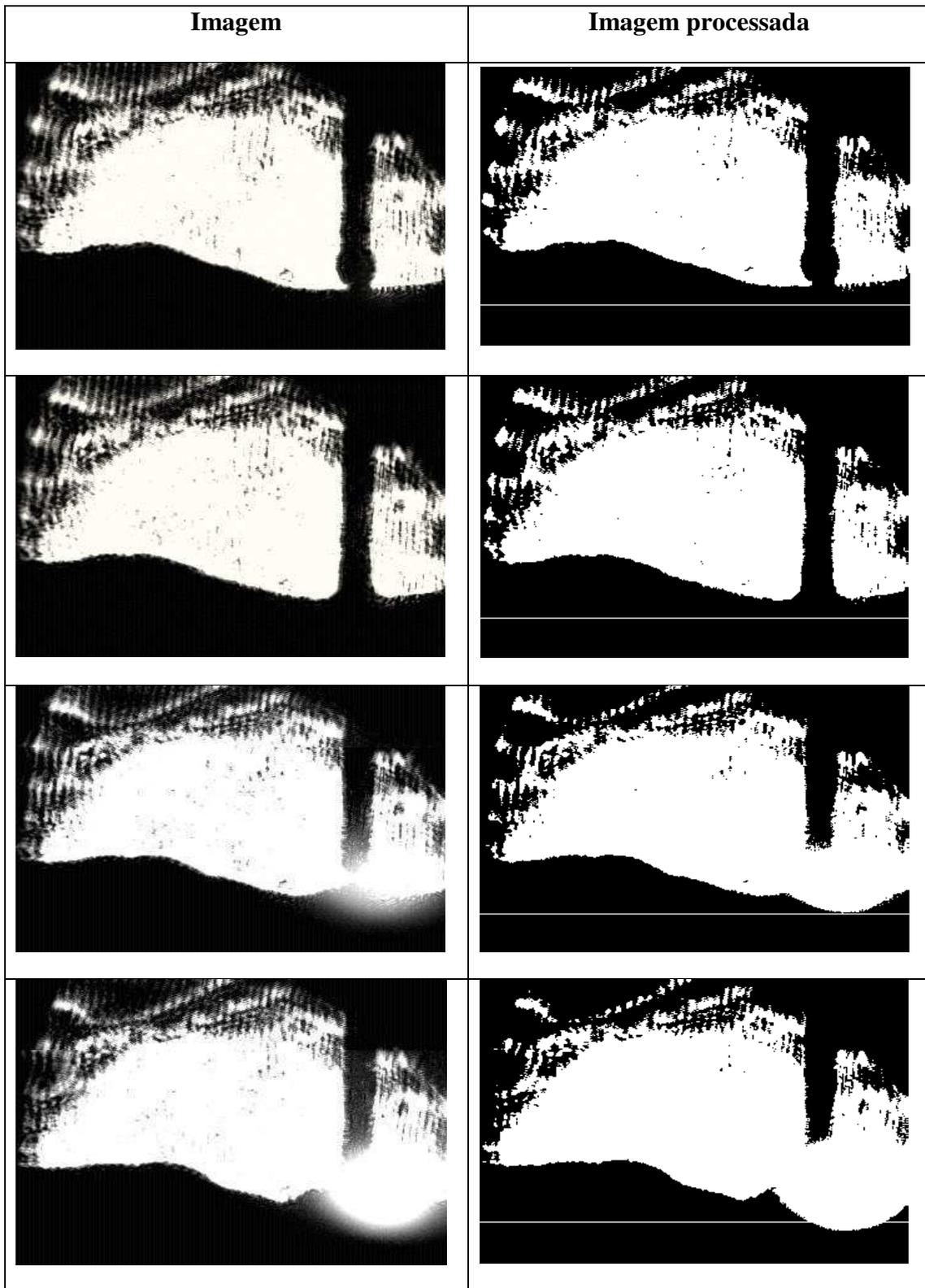


Figura 5. 2: Sequência de imagens da oscilação da poça de fusão durante formação do cordão 1, adquiridas a uma taxa de 1 frame/s. (Continua).

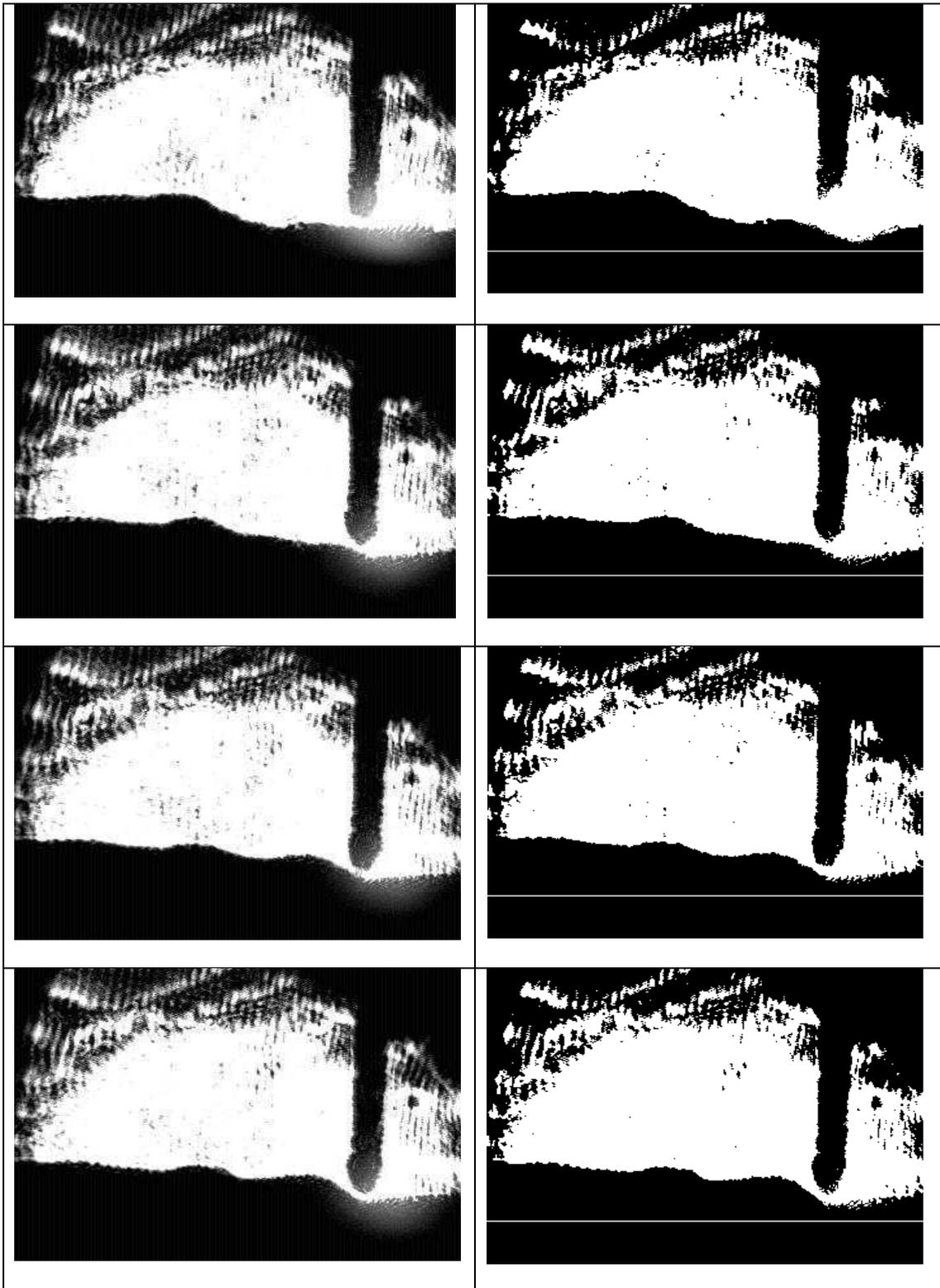


Figura 5. 2: Sequência de imagens da oscilação da poça de fusão durante formação do cordão 1, adquiridas a uma taxa de 1 frame/s.

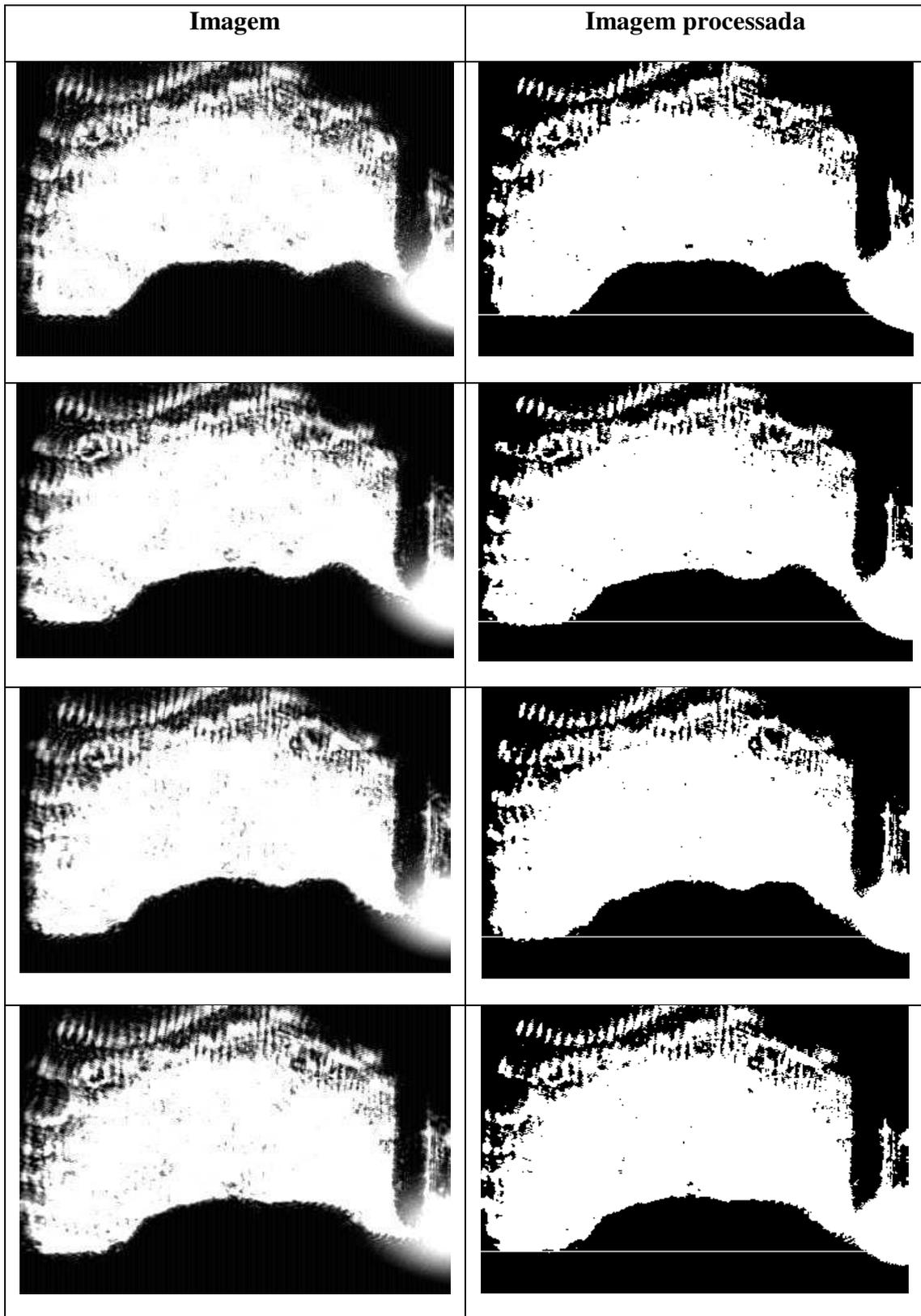


Figura 5. 3: Sequência de imagens da oscilação da poça de fusão durante formação do cordão 2, adquiridas a uma taxa de 1 frame/s. (Continua).

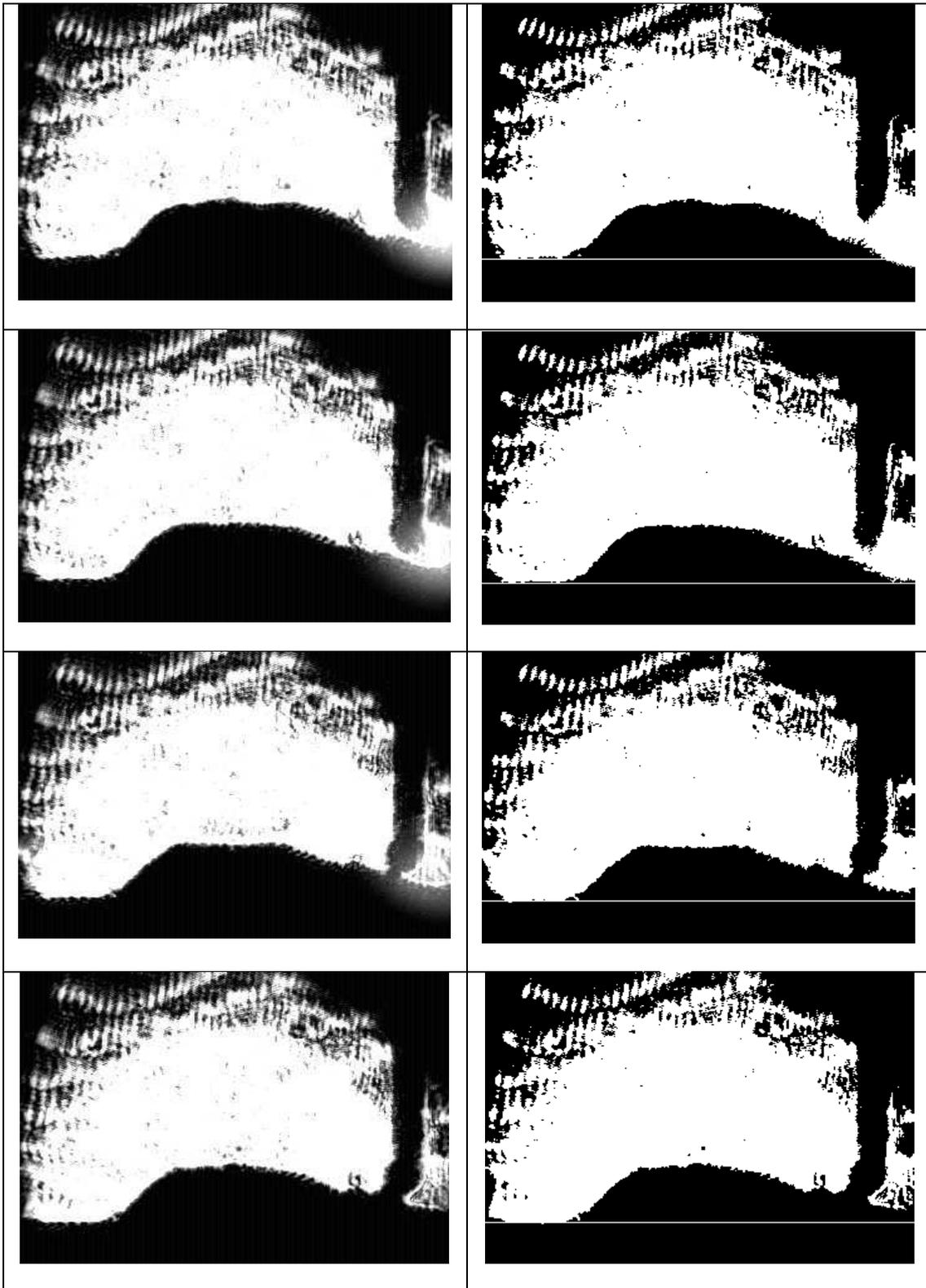
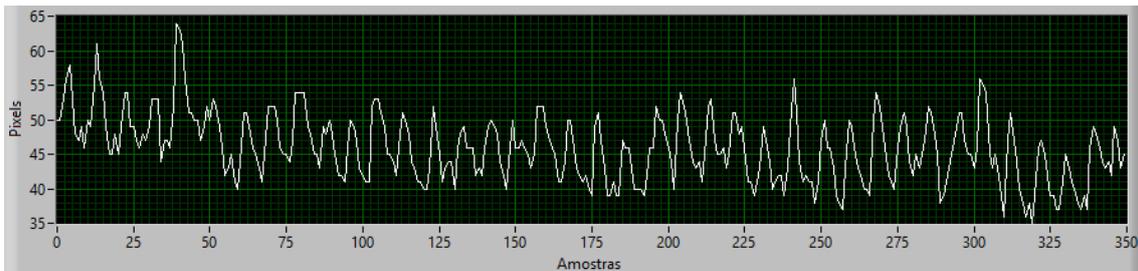


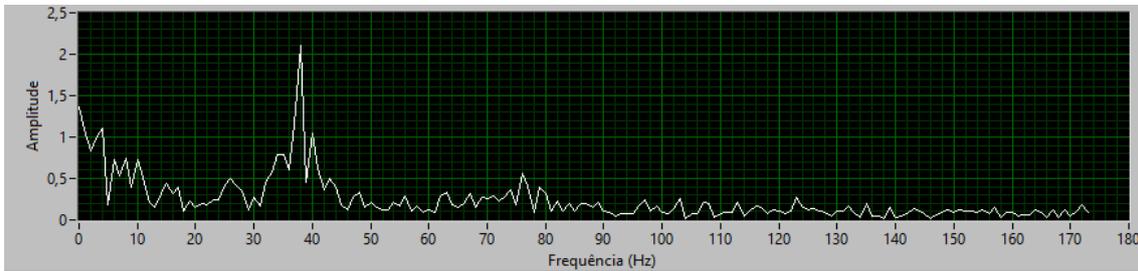
Figura 5. 3: Sequência de imagens da oscilação da poça de fusão durante formação do cordão 2, adquiridas a uma taxa de 1 frame/s.

A Figura 5. 4 mostra a vibração e a frequência de oscilação do ponto em relação a um valor central de 215 (coluna 215 na imagem), após processamento. Foram analisados diversos pontos igualmente espaçados para verificar frequências de diferentes regiões do

cordão, além de ser utilizados no sistema para delimitar a região de interesse da imagem para obter a zona específica quando da medida da frequência de oscilação da poça de fusão. Primeiro um ponto mais próximo do arco, um intermediário no cordão e outro mais ao extremo. A análise desses pontos pode se observar nas Figura 5. 5, Figura 5. 6 e Figura 5. 7. Observa-se que a amplitude de oscilação diminui com o deslocamento do ponto, aumentando a interferência de mais frequências por causa dos outros fenômenos físicos.

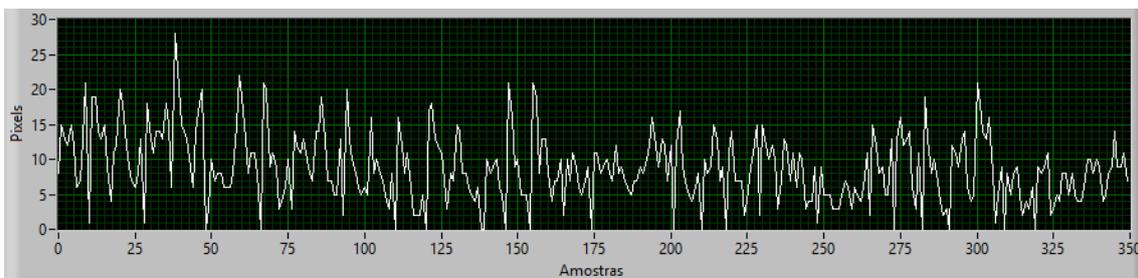


(a)

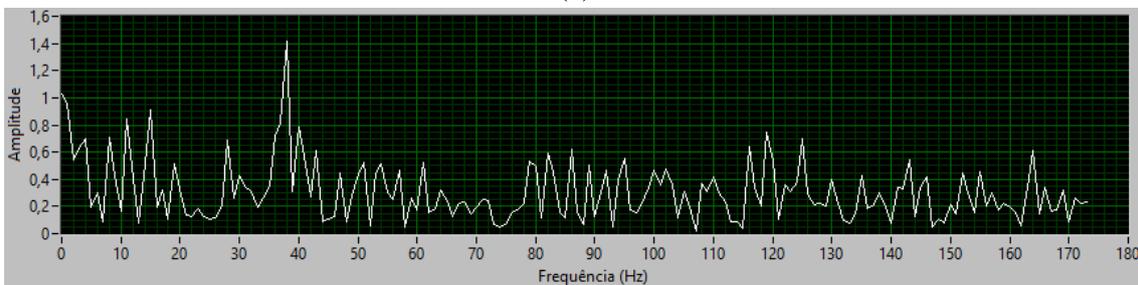


(b)

Figura 5. 4: Análises do poça de fusão no ponto X=215. (a) Sinal obtido da oscilação no ponto. (b) espectro de frequência.

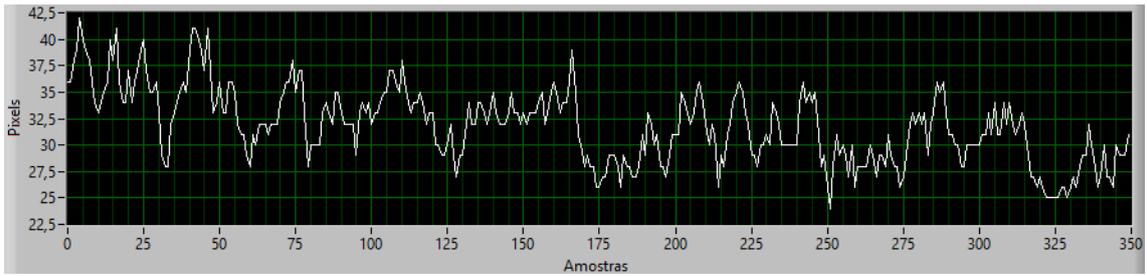


(a)

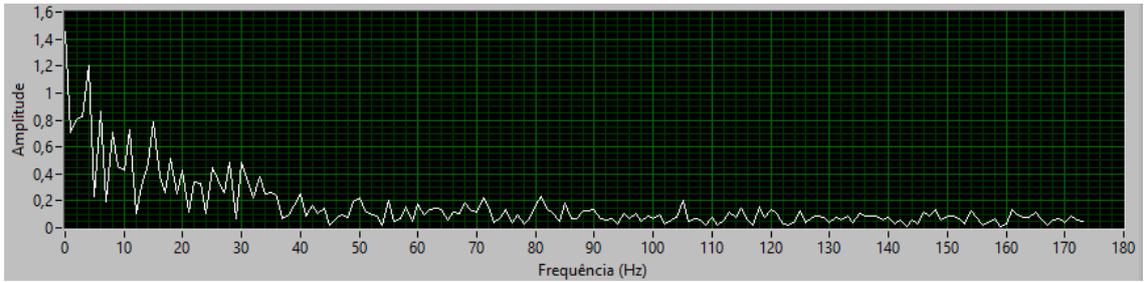


(b)

Figura 5. 5: Análises de oscilação em X=255 (mais perto do arco). (a) sinal oscilante. (b) espectro de frequência.

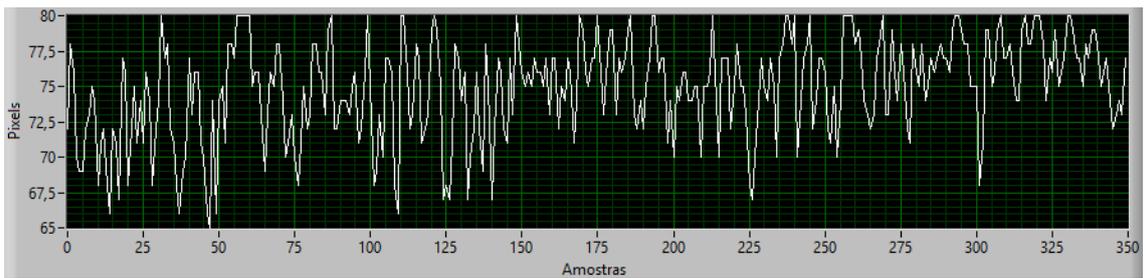


(a)

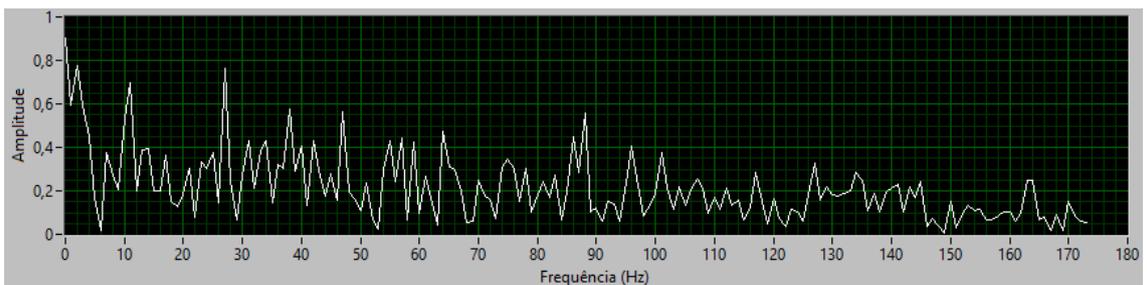


(b)

Figura 5. 6: Análises de oscilação em X=175 (intermediário). (a) sinal oscilante. (b) espectro de freqüência.



(a)



(b)

Figura 5. 7: Análises de oscilação em X=35 (longe do arco). (a) sinal oscilante. (b) espectro de freqüência.

### 5.1.2. Modelagem da oscilação da poça de fusão por meio de redes neurais artificiais

Com os dados obtidos referentes aos ensaios apresentados nas Tabela 4. 4 e Tabela 4. 5, criou-se uma rede neural artificial, referente à característica geométrica estudada, que utiliza como entrada os valores médios da penetração do cordão e da frequência de oscilação da poça de fusão para os cordões produzidos ( $\mu$ ) e suas respectivas medidas dos desvios-padrões ( $\sigma$ ); 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 no esquema da Figura 5. 8.

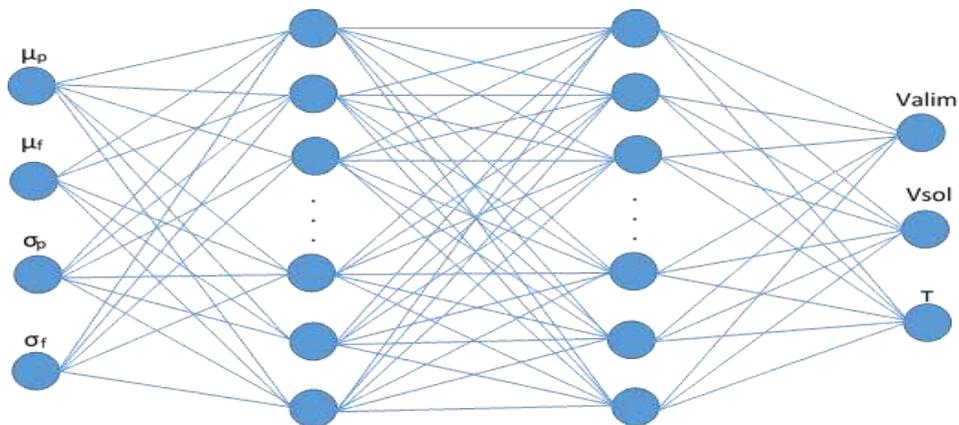


Figura 5. 8: Representação da topologia da rede neural artificial implementada.

Foram realizados diferentes testes para selecionar a topologia da rede, sendo escolhidas aquelas que forneceram os menores erros de simulação. A Figura 5. 9, a seguir, evidencia o monitor de progresso do treinamento da rede, permitindo a visualização da evolução da capacidade 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. 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.

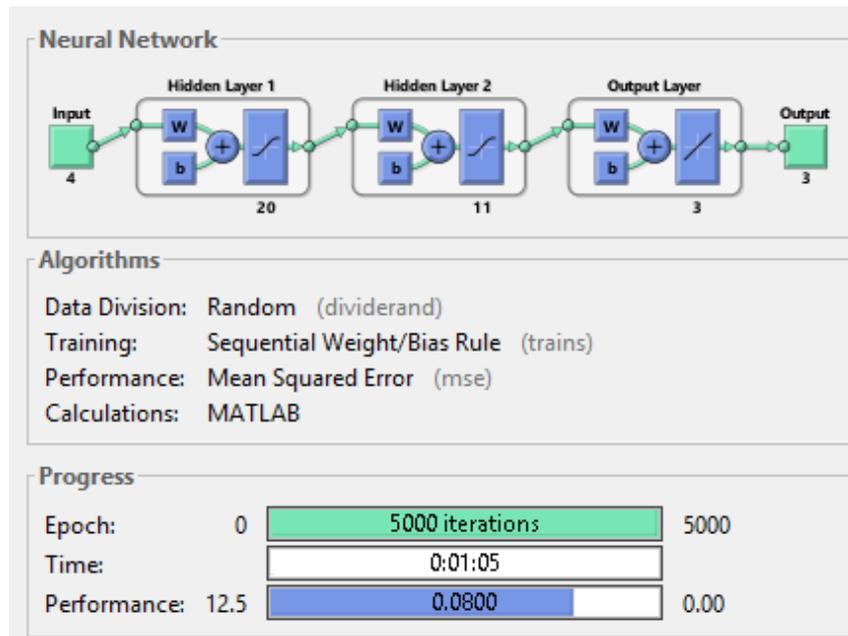


Figura 5. 9: Monitor de progresso do treinamento da rede neural artificial para a penetração do cordão de solda.

Na Figura 5. 9, apresentada anteriormente, foi possível observar que a rede neural artificial atinge um erro de 0.08 mm nos valores da penetração em 5000 iterações, ou seja, com a utilização da configuração da rede, é possível obter erros baixos, adequados para a modelagem da profundidade de penetração do cordão de solda.

Na Figura 5. 10, a seguir, têm-se o gráfico de busca do vetor gradiente na superfície de erro para a penetração do cordão de solda em função do número de iterações para o treinamento e teste. 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.

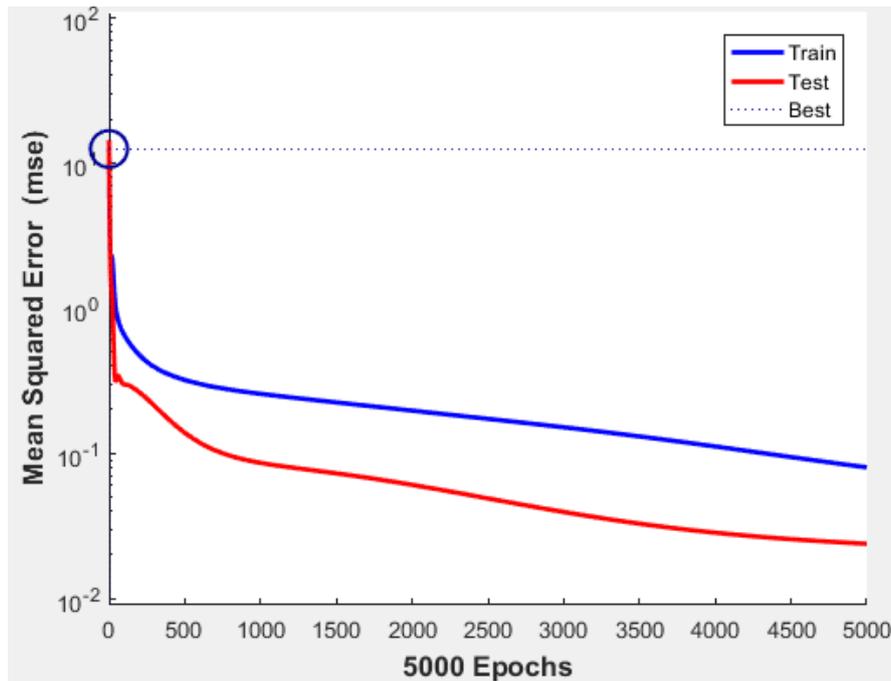


Figura 5. 10: Comportamento do erro para a penetração do cordão de solda do mse da rede neural artificial.

Dos resultados obtidos tanto da Figura 5. 10, apresentada anteriormente, é possível observar que os erros de treinamento 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 profundidade da penetração do cordão de solda.

Para avaliar a dispersão dos dados, foram plotados os valores reais versus os valores estimados pela rede neural. Na Figura 5. 11, a seguir, mostram-se as retas que melhor ajustam os valores desejados e os valores obtidos pela rede treinada; nestas, percebe-se a quase coincidência dos valores, confirmando uma porcentagem de acerto muito elevado. Os coeficientes de correlação obtidos pela rede neural artificial 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 de 1.

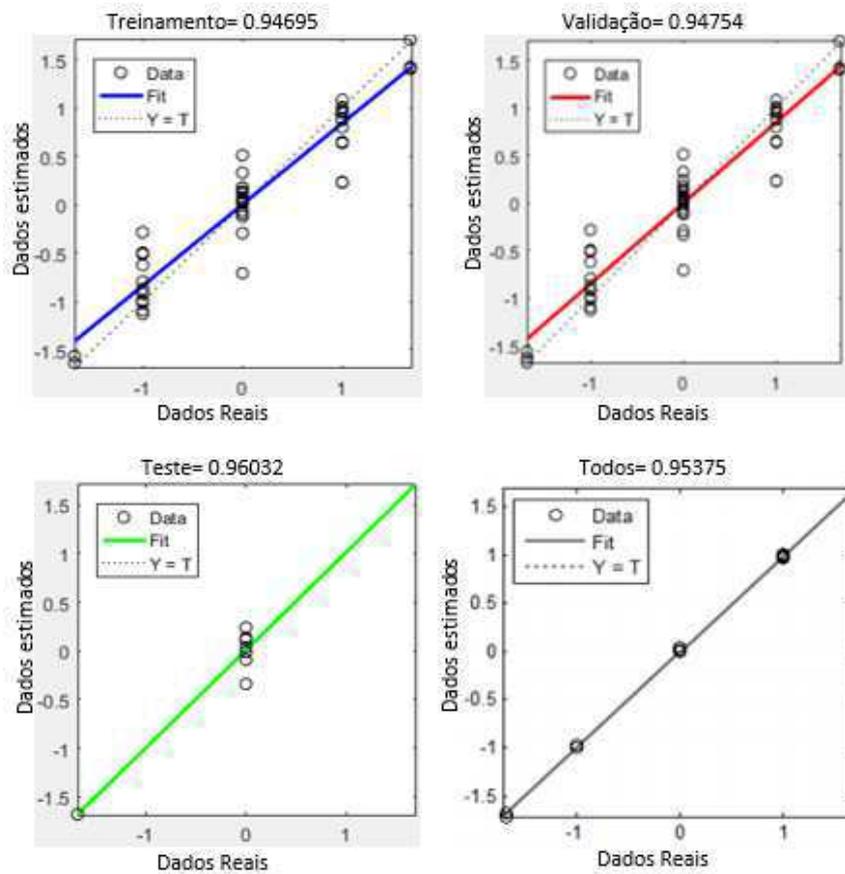


Figura 5. 11: Ajuste conseguido pela rede neural artificial.

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, de modo a produzir um conjunto de dados de verificação dos modelos obtidos com as redes neurais. Os dados são apresentados na Tabela 5. 1, a seguir, a fim de facilitar a visualização de uma tendência que permita estabelecer uma relação entre a profundidade da penetração do cordão de solda com os parâmetros de processo de soldagem, de modo a concluir se a rede neural está fornecendo resultados condizentes com o conhecimento empírico do processo de soldagem.

Tabela 5. 1: Parâmetros de soldagem preditos pela rede neural artificial para diferentes penetrações do cordão de solda.

Penetração do cordão de solda (mm)	Tensão (Volt)	Velocidade de alimentação do arame (m/min)	Velocidade de soldagem (mm/s)
0.9	23.21	7.18	8.75
1.5	21.88	7.26	8.23
2.3	21.19	7.85	6.99
2.8	20.47	7.56	6.16

Com os modelos obtidos mediante o treinamento da rede, foram construídos os gráficos apresentados nas Figura 5. 12, Figura 5. 13 e Figura 5. 14, a seguir, buscando evidenciar o comportamento dos parâmetros do processo em relação às diferentes profundidades de penetração do cordão de solda.

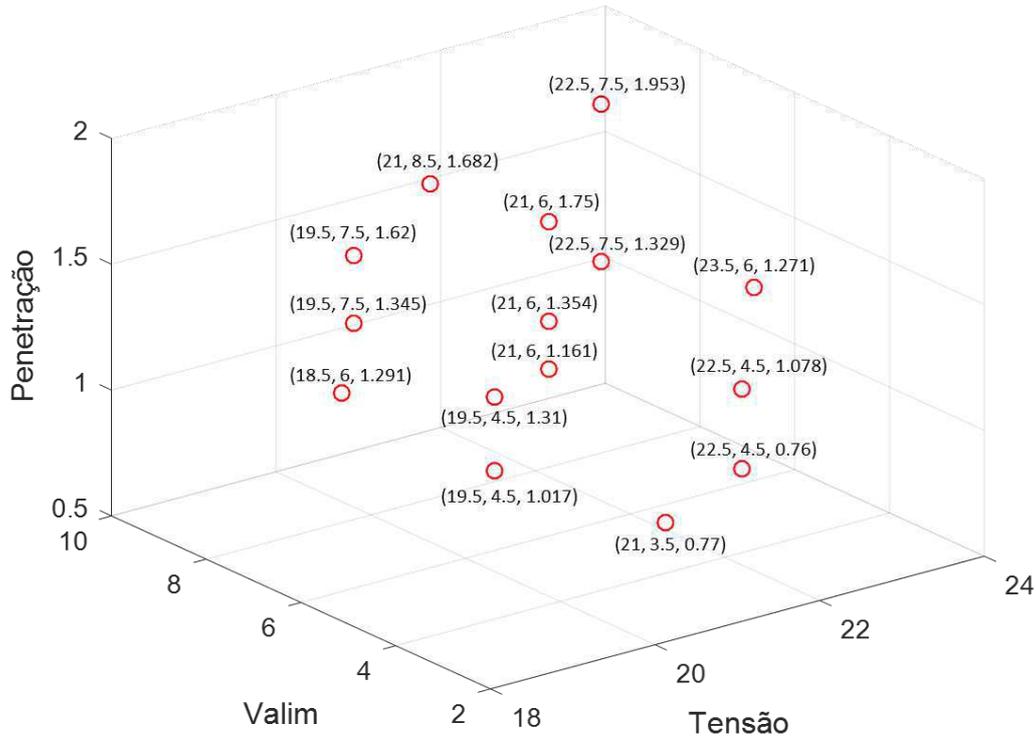


Figura 5. 12: Comportamento da tensão e da velocidade de alimentação de arame com respeito a diferentes profundidades de penetração do cordão de solda.

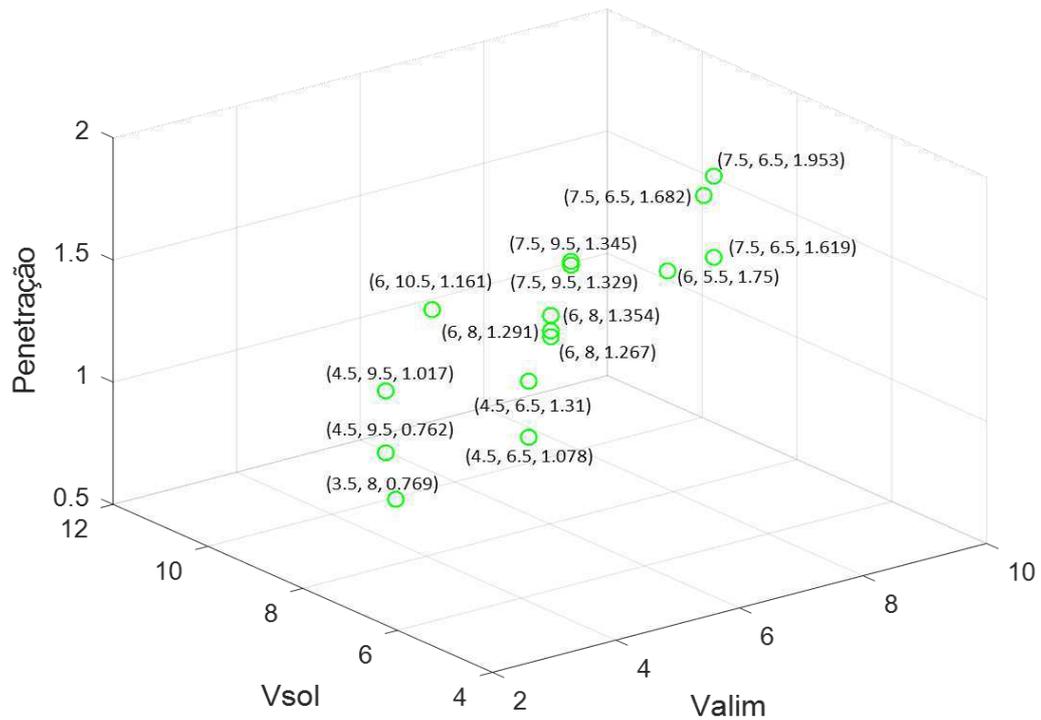


Figura 5. 13: Comportamento da velocidade de alimentação de arame e da velocidade de soldagem com respeito a diferentes profundidades de penetração do cordão de solda.

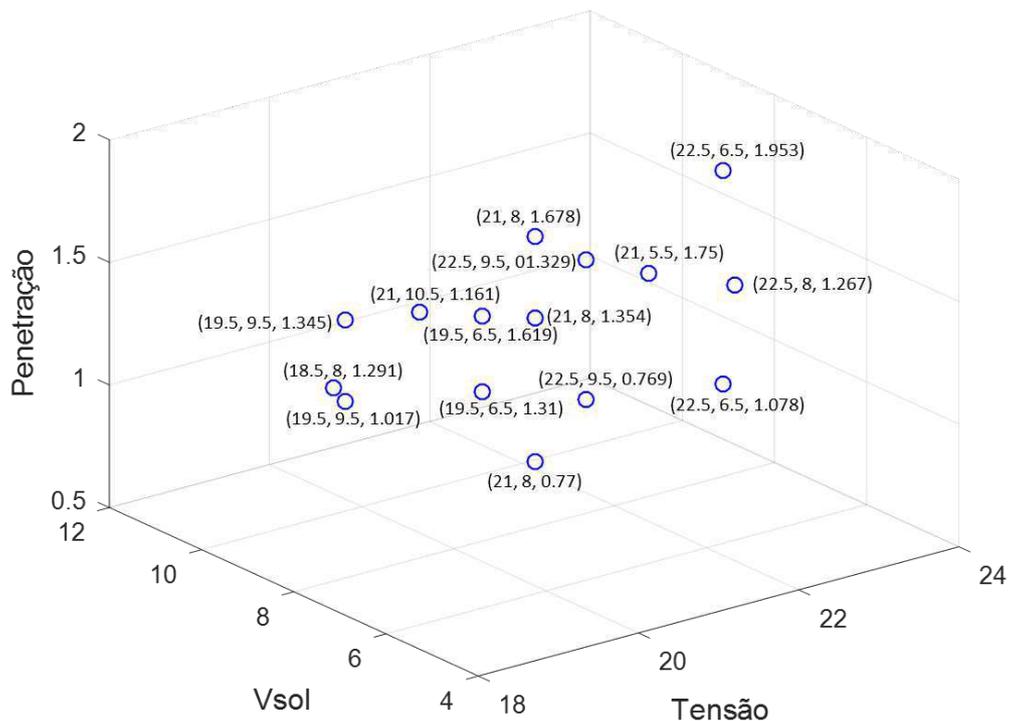


Figura 5. 14: Comportamento da tensão e da velocidade de soldagem com respeito a diferentes profundidades de penetração do cordão de solda.

As medidas numéricas das discrepâncias entre a resposta do modelo e os dados experimentais desejados de alguns testes são apresentados na Tabela 5. 2 a maneira de cálculo de resíduos conforme Equação (4.1). Onde  $y$  é o valor medido nos testes e  $y_m$  os estimados pela rede neural artificial.

Tabela 5. 2: Tabela de resíduos das respostas do modelo e dos experimentos.

$y$	$y_m$	$e$
0,93	0,9	0,03
1,48	1,5	-0,02
2,04	2	0,04
2,36	2,3	0,06
2,43	2,5	-0,07
2,83	2,8	0,03
2,98	3	-0,02

A Figura 5. 15 indica uma distribuição adequada dos resíduos em torno do valor zero em ambos os casos, com similar desvio padrão.



Figura 5. 15: Distribuição adequada dos resíduos.

Uma vez definidos os modelos para a predição dos parâmetros de processo em função da penetração do cordão de solda, foram utilizados para a implementação e integração do sistema de controle.

### 5.1.3. Desenvolvimento do controlador difuso

Para o desenvolvimento da base de conhecimento que faz uso do controlador para governar a profundidade da penetração do cordão de solda, 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, 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 e velocidade de soldagem. A Figura 5. 16, a seguir, apresenta um exemplo sobre a questão, fazendo uso da aplicação de simulação gráfica do Fuzzy System Designer de LAbVIEW: no caso, quando se tem um erro na frequência de 2.7 Hz e um erro na faixa de -0.5 Hz, tem-se a geração de uma mudança nas variáveis manipuladas velocidade de alimentação de arame e velocidade de soldagem de -0.175 e 2.18e-5 respectivamente, o que significa que o controlador vai diminuir 0.175 m/min do valor atual da velocidade de alimentação do arame e vai aumentar 2.18e-5 mm/s a velocidade de soldagem, gerando, assim, um ajuste no processo de soldagem para corrigir o erro e obter a penetração desejada no cordão. Além disso, pode se analisar as regras de inferências invocadas nesta situação.

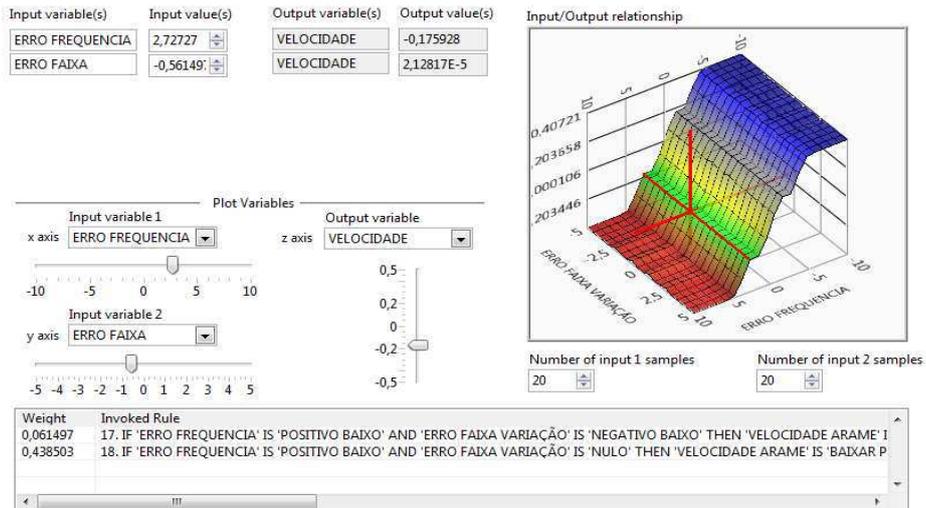


Figura 5. 16: Simulação do cenário factível durante o controle.

As Figuras 5. 17 e Figura 5. 18 apresentam as relações resultantes das entradas e saídas estabelecidas no sistema de inferência proposto.

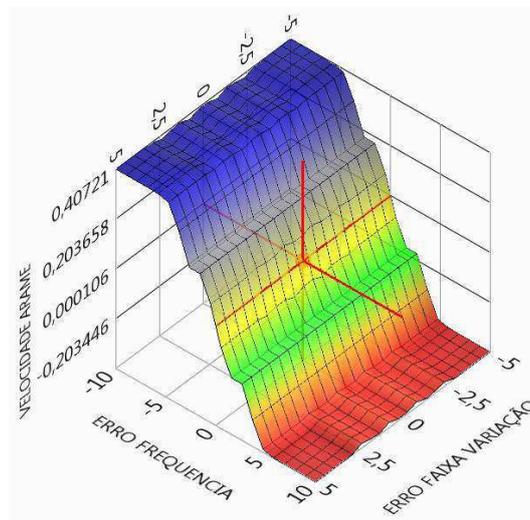


Figura 5. 17: Relação erro na frequência e erro na faixa com respeito da velocidade de alimentação de arame.

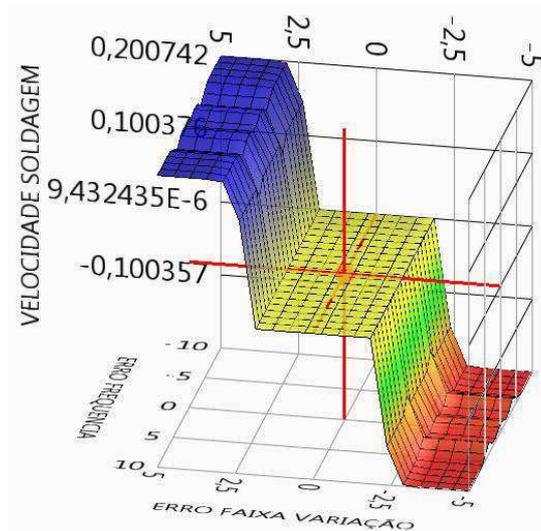


Figura 5. 18: Relação erro na frequência e erro na faixa com respeito da velocidade de soldagem.

A Tabela 5. 3 destaca a informação resultante de alguns testes para a comprovação do sistema de regras e inferências do controlador difuso projetado. Conforme evidenciado, o estado, a identificação das regras e a saída defuzzificada para diferentes valores de entrada é adequado já que determina corretamente a ação necessária para diminuir o erro na penetração do cordão se solda, ajustando na faixa de valores as variáveis manipuladas.

Tabela 5. 3: Informação obtida nos testes de avaliação das regras e saídas do controlador.

Entradas					Saídas			
Erro na Frequência de oscilação (Hz)		Erro na faixa de variação da frequência (Hz)			Velocidade de alimentação de arame		Velocidade de soldagem	
Valor de entrada	Variável linguística de entrada	Valor de entrada	Variável linguística de entrada	Número da regra invocada	Variável linguística de saída	Valor de saída defuzzificado (m/min)	Variável linguística de saída	Valor de saída defuzzificado (mm/s)
0.5	N	0.2	N	13	M	-0.07	M	-8.16e-5
1.2	PB	0.4	N	18	BP	-0.17	M	-1.93e-4
-6.4	NA	4.1	PA	5	SM	0.40	S	0.2
5.2	PA	-0.2	N	23	BM	-0.39	M	-6.44e-5
-2.8	NA	0.16	N	8	SP	0.17	M	-1.84e-4
5.8	PA	3	PA	25	BM	-0.40	S	0.199
7.8	PA	-3.2	NA	21	BM	-0.41	B	-0.2
-1.7	NB	-0.33	N	8	SP	0.17	M	-6.30e-5
-8.3	NA	-4.6	NA	1	SM	0.40	B	-0.2
3.5	PA	-0.2	N	18/23	BM	-0.26	M	-8.16e-5

## 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.

A realização dos testes fez-se utilizando o modelo da característica geométrica obtido da rede neural artificial – apresentado no capítulo anterior –, onde se ingressa como entrada a profundidade da penetração do cordão desejada, obtendo-se como saída os respectivos valores das variáveis do processo (vide Tabela 5. 4, a seguir).

Tabela 5. 4: Testes selecionados para avaliar o controle da penetração do cordão de solda.

<b>Entrada ao modelo</b>	<b>Saídas do modelo</b>			
<b>Profundidade da penetração do cordão desejada (mm)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Velocidade de alimentação do arame (m/min)</b>	<b>Velocidade de soldagem (mm/s)</b>	<b>Frequência de oscilação da poça de fusão (Hz)</b>
1.5	21.88	7.25	8.23	13
1.8	21.44	7.48	7.6	14
2.0	21.28	7.58	7.16	30
2.5	20.92	7.89	6.67	33

Para a realização das provas, os valores dos parâmetros de soldagem foram arredondados e enviados do computador à fonte de soldagem e mesa linear mediante o sistema de comunicação e controle da fonte de soldagem.

Na Figura 5. 19, a seguir, tem-se o conjunto de sinais adquiridos com este tipo de controle para a profundidade da penetração de referência de 1.5 mm.

Para a verificação do controle da penetração 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, tem-se a imagem do cordão de solda obtido, bem como as medidas extraídas com a técnica de metalografia 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.

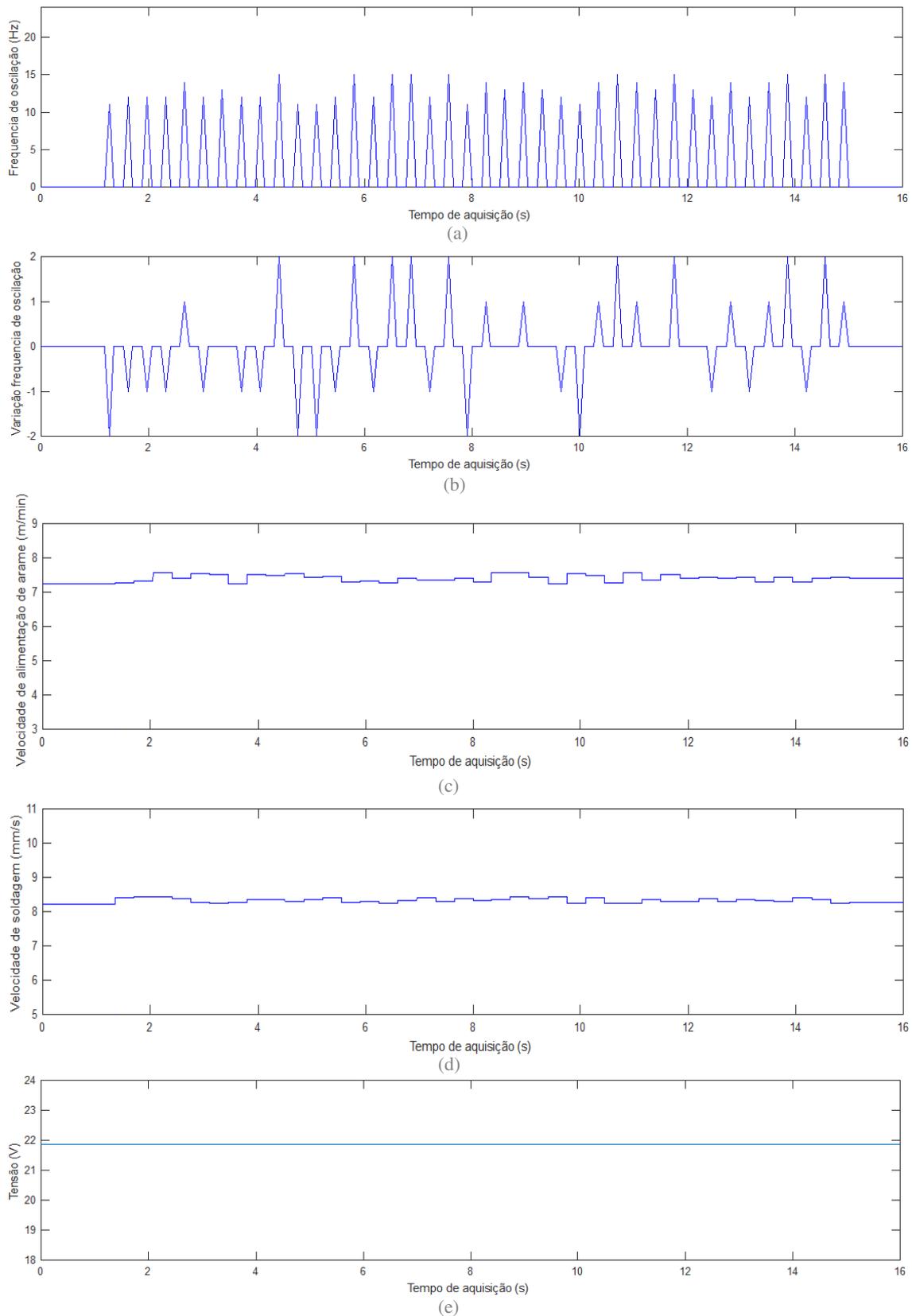


Figura 5. 19: Controle de profundidade da penetração. Tensão inicial: 21.8 V; velocidade de alimentação do arame inicial: 7.2 m/min; velocidade de soldagem inicial: 8.2 mm/s; penetração de referência: 1.5 mm. Sinais adquiridos: (a) Frequência de oscilação da poça de fusão; (b) Variação da frequência de oscilação; (c) Velocidade de alimentação do arame; (d) Velocidade de soldagem; (e) Tensão.

Na Figura 5. 20, a seguir, tem-se o cordão de solda obtido para a penetração de referência de 1.5 mm e as seções transversais para a determinação das medidas.

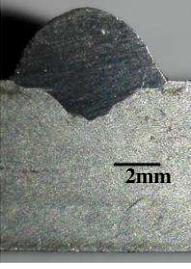
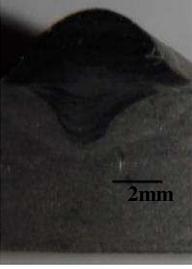
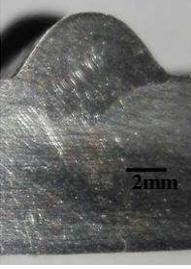
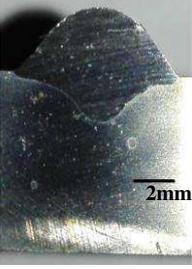
			
Seção transversal	Medida da penetração	Seção transversal	Medida da penetração
	1.49 mm		1.40 mm
	1.44 mm		1.61 mm

Figura 5. 20: Cordão final obtido depois do controle para uma penetração de 1.5 mm.

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 soldagem. Na Figura 5. 21, a seguir, têm-se os sinais de corrente e tensão obtidos do processo. Neste sentido, é possível corroborar que a transferência de massa seja por curto circuito, com uma corrente média de aproximadamente 149 amperes e uma tensão média de aproximadamente 21.6 volts. A taxa de amostragem utilizada para a aquisição dos sinais foi de 10000 amostras por segundo.

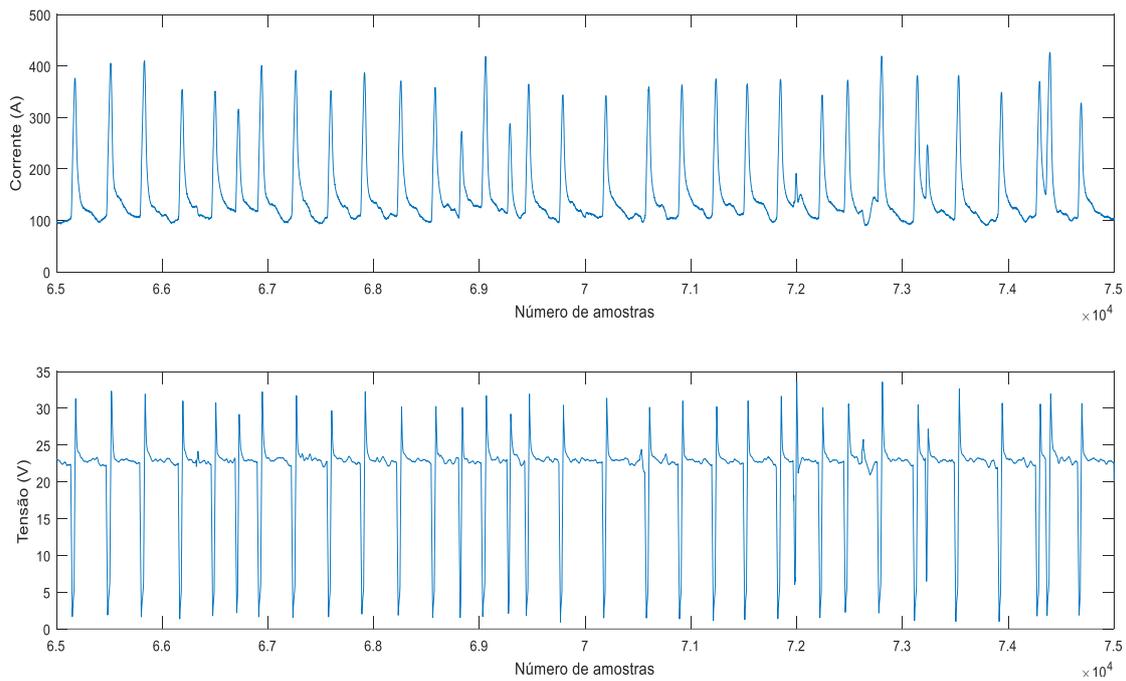


Figura 5. 21: Medidas dos sinais do processo para o controle da penetração com um valor de referência de 1.5 mm.

Nas Figura 5. 22, Figura 5. 23, Figura 5. 24, a seguir, tem-se o conjunto de sinais adquiridos com este tipo de controle para os outros testes selecionados para avaliar a profundidade da penetração de referência apresentados na Tabela 5. 4.

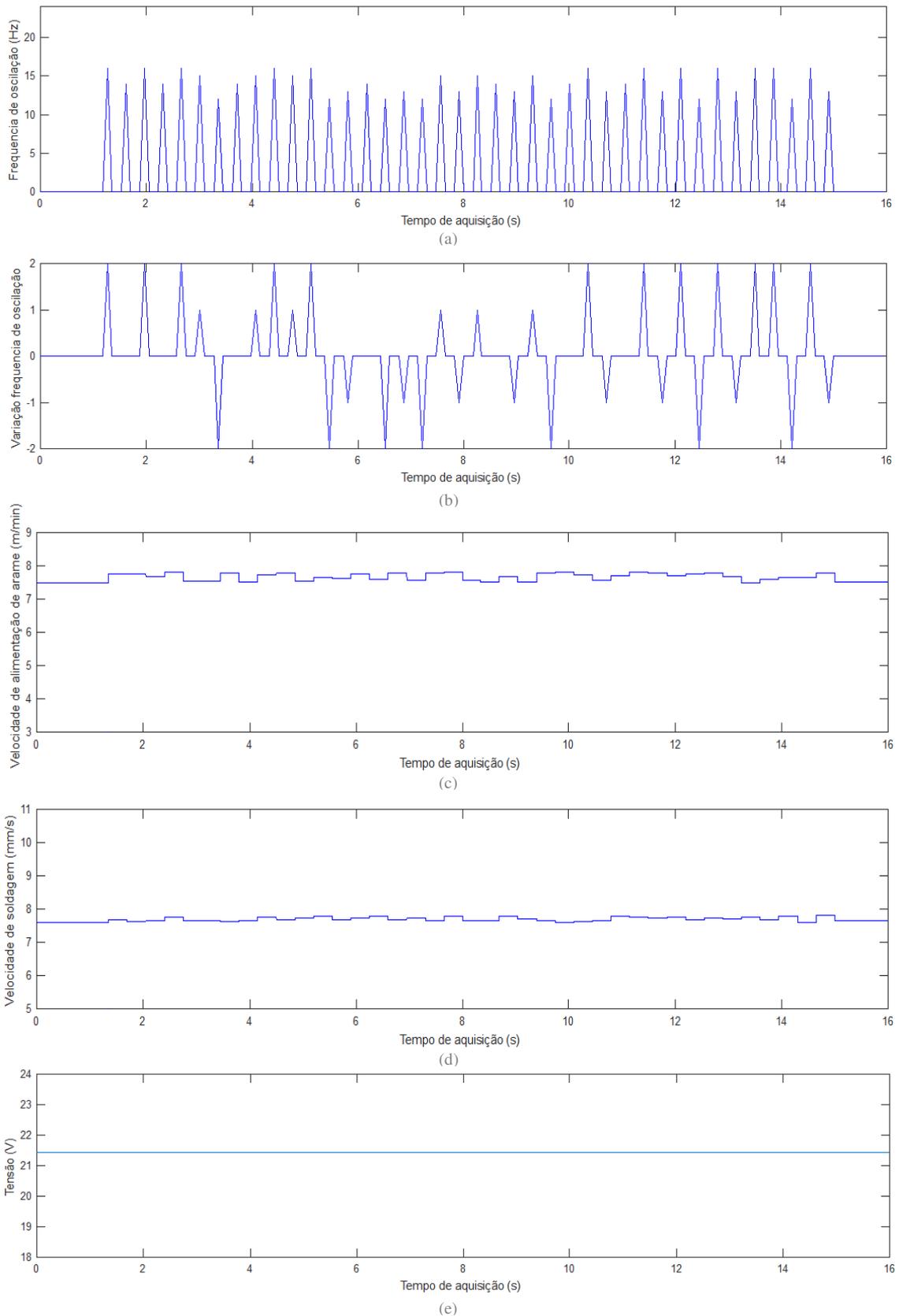


Figura 5. 22: Controle de profundidade da penetração. Tensão inicial: 21.4 V; velocidade de alimentação do arame inicial: 7.5 m/min; velocidade de soldagem inicial: 7.6 mm/s; penetração de referência: 1.8 mm. Sinais adquiridos: (a) Frequência de oscilação da poça de fusão; (b) Variação da frequência de oscilação; (c) Velocidade de alimentação do arame; (d) Velocidade de soldagem; (e) Tensão.

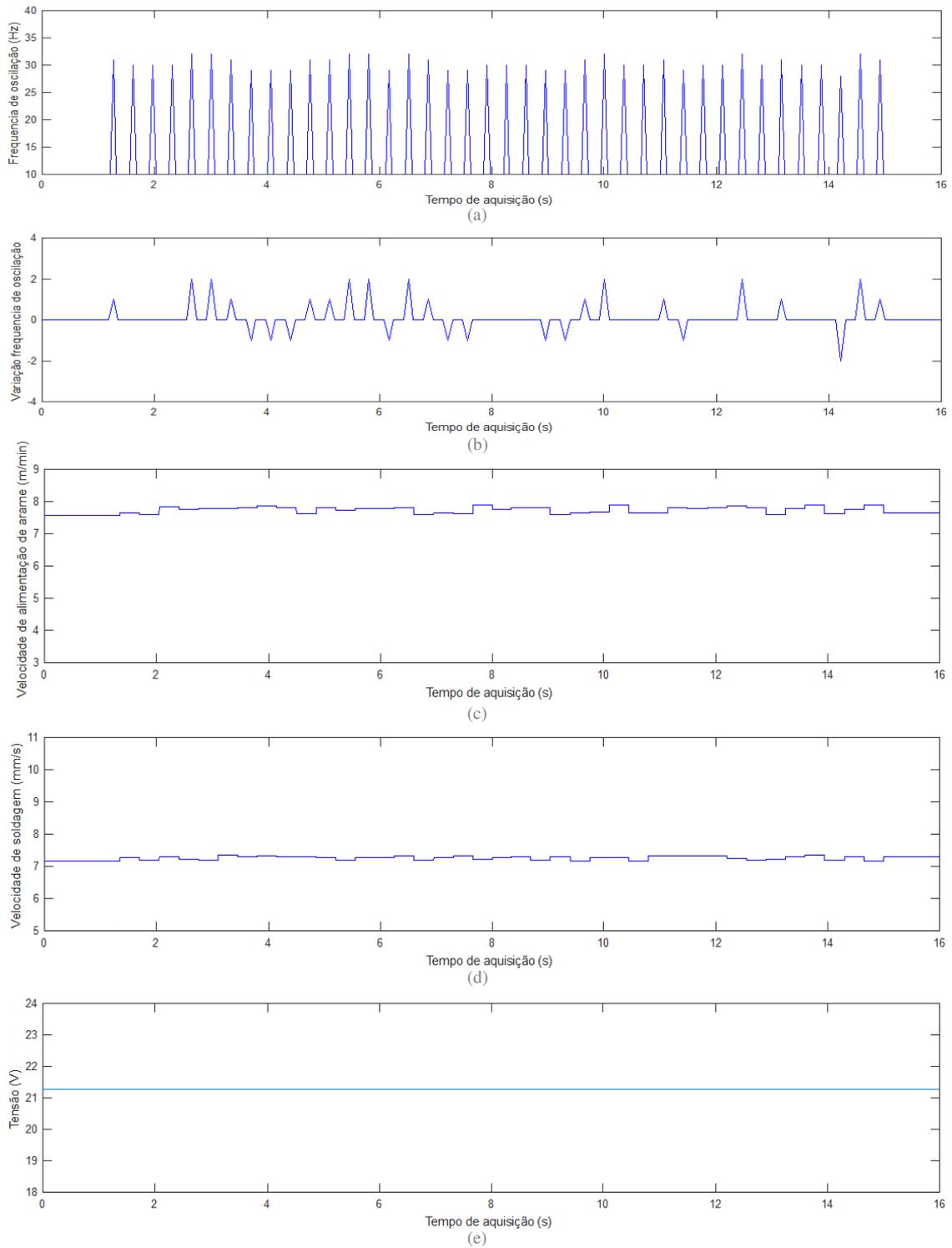


Figura 5. 23: Controle de profundidade da penetração. Tensão inicial: 21.3 V; velocidade de alimentação do arame inicial: 7.6 m/min; velocidade de soldagem inicial: 7.2 mm/s; penetração de referência: 2 mm. Sinais adquiridos: (a) Frequência de oscilação da poça de fusão; (b) Variação da frequência de oscilação; (c) Velocidade de alimentação do arame; (d) Velocidade de soldagem; (e) Tensão.

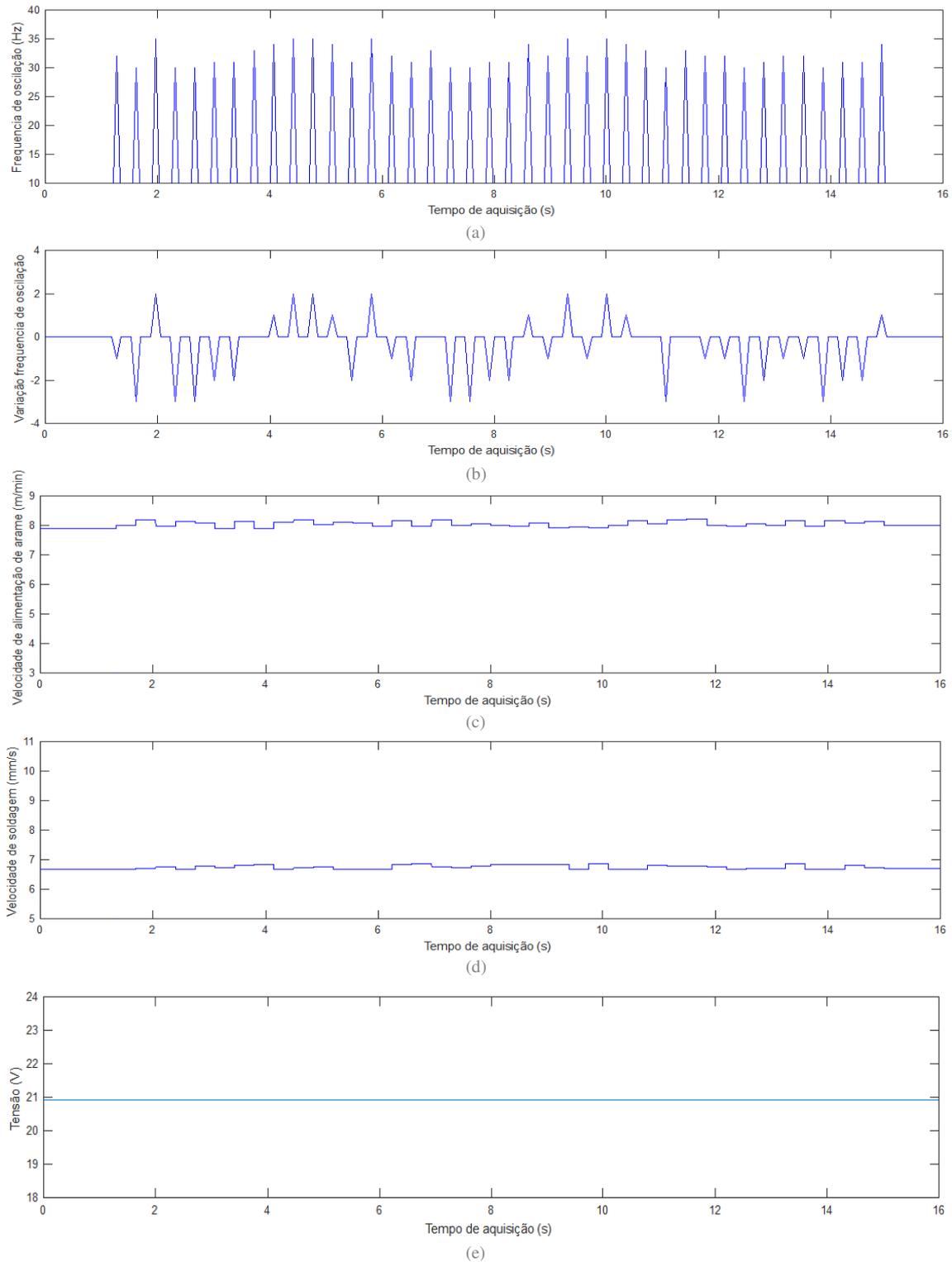


Figura 5. 24: Controle de profundidade da penetração. Tensão inicial: 20.9 V; velocidade de alimentação do arame inicial: 7.9 m/min; velocidade de soldagem inicial: 6.7 mm/s; penetração de referência: 2.5 mm. Sinais adquiridos: (a) Frequência de oscilação da poça de fusão; (b) Variação da frequência de oscilação; (c) Velocidade de alimentação do arame; (d) Velocidade de soldagem; (e) Tensão.

Os cordões de solda e as medidas obtidas nos referidos testes são apresentados na Figura 5. 25, a seguir.

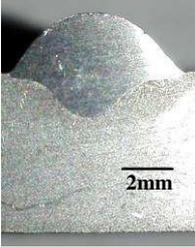
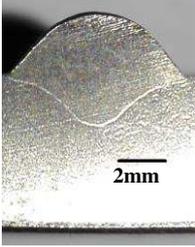
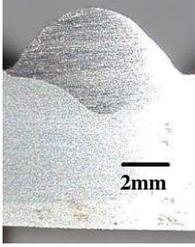
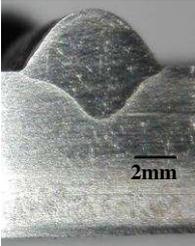
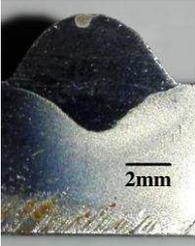
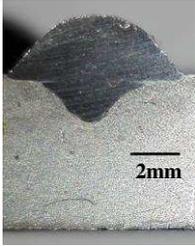
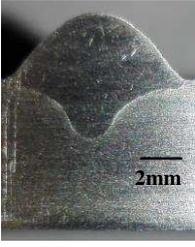
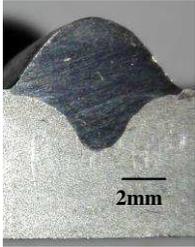
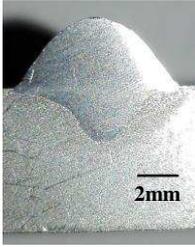
1.8 mm			
			
	1.82 mm	1.77 mm	1.81 mm
2 mm			
			
	1.97 mm	2.04 mm	2.00 mm
2.5 mm			
			
	2.47 mm	2.56 mm	2.46 mm

Figura 5. 25: Cordões finais obtidos depois do controle da penetração dos cordões de solda de 1.8 mm, 2 mm e 2.5 mm.

Na Figura 5. 26, a seguir, têm-se os sinais de corrente e tensão obtidos do processo. Nesta figura é possível observar o comportamento dos sinais de processo para cada cordão obtido.

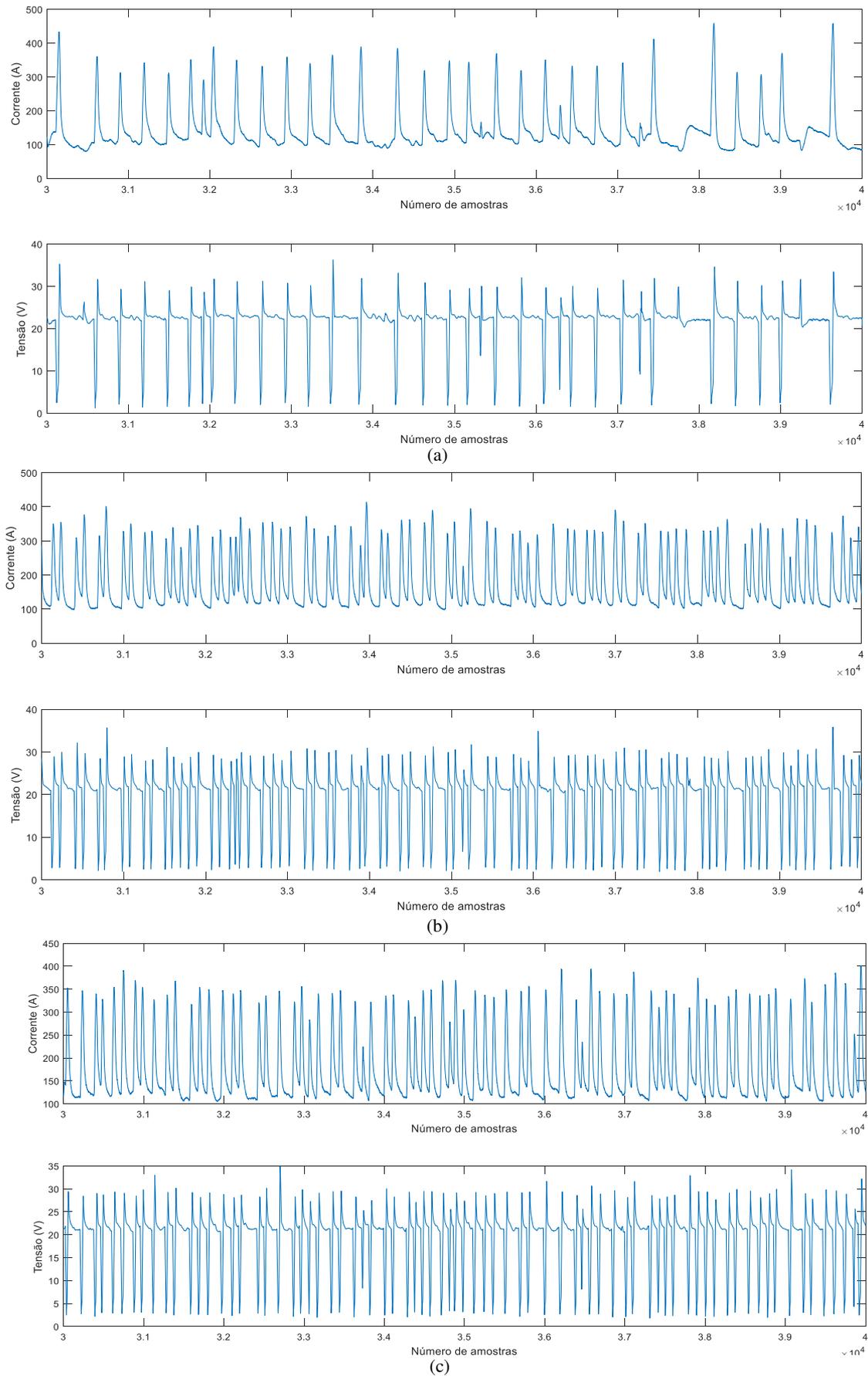


Figura 5. 26: Medidas dos sinais do processo para o controle da penetração para os valores de referência. (a) 1.8 mm, (b) 2 mm e (c) 2,5 mm.

Da Figura 5. 26, acima, pode-se confirmar igualmente que o modo de transferência de massa seja o esperado. Dos resultados, se tem uma corrente média aproximada de 142 amperes e uma tensão média de 21.4 volts para a profundidade de penetração de 1.8 mm. Para o cordão de solda com penetração de referência de 2 mm obteve-se uma corrente de 175 amperes e uma tensão média de 20.7 volts. Finalmente para uma penetração desejada de 2.5 mm se tem uma corrente média de 179 amperes e uma tensão de 20.4 volts.

### 5.3. ANÁLISES DA FORMAÇÃO DE ESCAMAS NOS CORDÕES DE SOLDA

Nesta seção se apresentam os resultados obtidos nas análises da formação das escamas nos cordões de solda. Na Tabela 5. 5 correlaciona o número de escamas presentes na superfície do cordão com a penetração do cordão de solda produzida pelos parâmetros de processo e a frequência de oscilação da poça de fusão.

Tabela 5. 5: Dados para a correlação com o padrão das escamas na superfície do cordão.

Experimento	Tensão (V)	Velocidade de alimentação de arame (m/min)	Velocidade de soldagem (mm/s)	Quantidade média de curto circuitos	Frequência de oscilação poça de fusão (Hz)	Penetração (mm)		Média do número de Escamas
						Media	Desvio	
1	19,5	4,5	6,5	23,83	15-20	1,30	0,26	32
2	22,5	4,5	6,5	10,54	8--12	1,07	0,18	28
3	19,5	7,5	6,5	34,87	28--40	1,61	0,25	21
4	22,5	7,5	6,5	19,33	27--33	1,95	0,13	27
5	19,5	4,5	9,5	26,04	45--51	1,01	0,05	35
6	22,5	4,5	9,5	11,06	8--12	0,76	0,07	34
7	19,5	7,5	9,5	36,94	35--42	1,34	0,04	32
8	22,5	7,5	9,5	19,4	13--17	1,32	0,32	26
9	18,5	6	8	40,64	37--48	1,29	0,06	25
10	23,5	6	8	11,11	8--13	1,26	0,07	31
11	21	3,5	8	12,80	19--26	0,76	0,07	33
12	21	8,5	8	31,09	12--16	1,68	0,10	33
13	21	6	5,5	26,42	34--39	1,74	0,08	28
14	21	6	10,5	23,52	19--23	1,16	0,06	34
15	21	6	8	24,38	33--39	1,35	0,03	41
16	21	6	8	26	32--37	1,45		41
17	21	6	8	26,71	30--39	1,23	0,03	34
18	21	6	8	26,23	31--38	1,41	0,11	34
19	21	6	8	26,33	33--39	1,24	0,07	36
20	21	6	8	25,52	33--36	1,23	0,14	37

Na Figura 5. 27 se tem a superfície de resposta que ilustra a conexão descrita anteriormente.

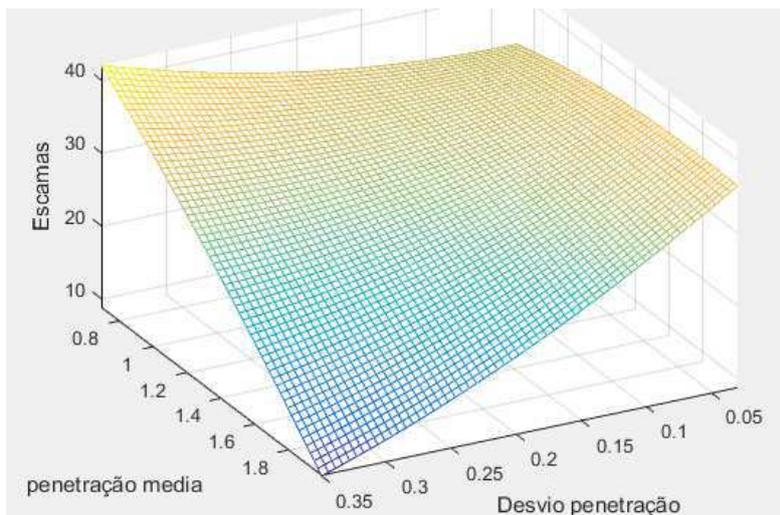


Figura 5. 27: Superfície de resposta da relação das escamas na superfície dos cordões com a penetração.

A relação entre diferentes medidas de profundidade de penetração e a quantidade de escamas formadas na superfície do cordão de solda (número de escamas por segundo) pode ser evidenciada na Figura 5. 28, apresentada a seguir. O cordão número 1 foi produzido com uma velocidade de alimentação de arame de 3.6 m/min, 7.8 mm/s de velocidade de soldagem e tensão de 21.3 V. O segundo com uma tensão de 19.6 V, velocidade de alimentação de arame de 7.3 m/min e 6.4 mm/s de velocidade de soldagem. Por último, para obter um cordão com uma penetração de 1 mm foi utilizada uma tensão de 22.3 V, velocidade de alimentação de arame de 4.3 m/min e uma velocidade de soldagem de 6.4 mm/s.

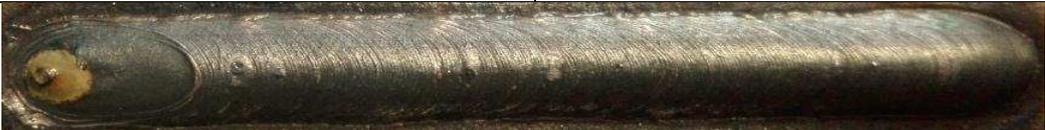
	<b>Penetração do cordão de solda (mm)</b>	<b>Número de escamas (escamas/cm)</b>
1	0.76 mm ( $\pm 0.07$ mm)	33 escamas
		
2	1.61 mm ( $\pm 0.2$ mm)	21 escamas
		
3	1.07 mm ( $\pm 0.1$ mm)	28 escamas
		

Figura 5. 28: Relação entre diversas medidas de penetração e as escamas formadas na superfície do cordão de solda.

## 6 . DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No presente capítulo, tem-se a discussão dos resultados obtidos a partir de diversas pesquisas e experiências realizadas no trabalho. 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. Pode-se dizer que, embora trabalhos como Shi *et al.* (2015) e Liu e Zhang (2013) consigam monitorar e medir os parâmetros característicos da poça de fusão em tempo real, não são focados no processo de soldagem GMAW-S e no controle da penetração do cordão de solda. Por outro lado, as metodologias apresentadas por Shi *et al.* (2015) e Liu e Zhang (2013) oferecem obstáculos técnicos no caso de vindouras aplicações industriais, devido à necessidade de recursos e de metodologias particulares focalizadas no apropriado alinhamento do sistema. Porém, os métodos de medição baseados em linha o malha laser são vantajosas em medição off-line, mas seu uso em sistemas de controle pode representar um atraso temporal com referência à formação do cordão de solda devido ao posicionamento e o reconhecimento do padrão refletido do feixe laser em relação à poça de fusão.

De forma geral, conforme as pesquisas referidas na revisão bibliográfica e considerando a complexidade do processo GMAW-S, optou-se por adotar a inteligência artificial (IA) para realizar uma aproximação que possibilitasse a obtenção dos resultados esperados, uma vez que os sistemas de controle baseados na IA destacam nas áreas onde os processos são não lineares ou o modelo do sistema é difícil de se obter – graças a sua habilidade para atuar corretamente em um ambiente não definido, à capacidade para se adaptar a situações variantes e para enfrentar problemas complexos.

O trabalho focado em processos de soldagem GMAW-S na posição plana, apresenta uma metodologia de monitoramento que permite medir a oscilação da poça de fusão durante a formação do cordão de solda. A metodologia de medição utilizada baseada no reconhecimento de pontos de referência em padrões de altura e em superfícies planas, não representa um desafio importante para as tendências atuais em processamento digital de imagens. Os gráficos do sinal ondulatório gerado pelas coordenadas dos pontos a cada imagem obtidos na metodologia de medição (Figura 4. 6) exibem uma forma oscilatória adequada em torno de um valor central em todos os casos, pelo qual se determinou como apropriado para ser utilizado no sistema de monitoramento da frequência de oscilação da

poça de fusão, já que para a aplicação da transformada de Fourier se precisa de um sinal equivalente a uma série infinita periódica e contínua por janelas. Além disso, como o número de imagens processadas por intervalo de tempo (350 ms) conseguiu-se uma boa quantidade de informação sem afetar o tempo de resposta do sistema e ter as ações de controle necessárias para obter as características geométricas desejadas nos cordões de solda.

Os resultados apresentados na avaliação da metodologia de monitoramento corroboram o procedimento como adequado para estimar a oscilação da poça de fusão e permitem a sua utilização no sistema de controle. No processamento digital das imagens, a técnica de limiarização possibilita segmentar de forma eficiente a poça de fusão, permitindo tempos de processamento muito curtos. O tempo de processamento não supera um milissegundo, obtendo uma quantidade de amostras estatisticamente significativa nas janelas de medição no processo de aplicação da transformada de Fourier, fato importante visando o uso do comportamento do espectro de frequência da oscilação da poça nas etapas de controle. Os resultados na análise dos diversos pontos igualmente espaçados para verificar frequências de diferentes regiões do cordão (Figura 5. 4, Figura 5. 5, Figura 5. 6 e Figura 5. 7) validam a metodologia apresentada para encontrar o ponto para determinar a dinâmica da poça de fusão. Nesse contexto foi possível perceber que como o ponto 255 está mais próximo do arco foi observado que a frequência dele se aproxima mais à frequência do arco. No ponto mais distante (ponto 35) a temperatura é um pouco menor, o que faz com que a tensão superficial aumente e é de se esperar que a frequência de oscilação diminua. Neste ponto aparece interferência de mais frequências que não apareciam nos demais pontos, o qual pode ser explicado pelo recuo da onda devido à transformação de líquido para sólido, gerando ondas estacionárias que tem efeito na frequência de oscilação em dito ponto.

Na maioria dos trabalhos no referencial bibliográfico, fizeram-se ênfases na predição da geometria do cordão de solda com base nos parâmetros do processo. Uma das novidades obtidas a partir da pesquisa aqui desenvolvida é a predição de parâmetros de processo adequados para uma penetração determinada. Neste sentido, foi tomado como guia os resultados da aplicação do Planejamento Composto Central para realizar o treinamento da rede neural artificial. Foram testados vinte pontos de trabalho dentro dos limites dos parâmetros de processo, a fim de obter uma boa velocidade de busca do envelope de parâmetros de processo pela rede neural para um determinado valor de referência da

profundidade de penetração do cordão de solda. Os cordões obtidos em cada ponto de trabalho foram cortados, preparados e atacados quimicamente para a extração das medidas das penetrações e a posterior análises estatístico para a obtenção das medias e seus desvios padrões.

Como entradas para o modelo com rede neural artificial, empregaram-se os valores das medidas médias e do desvio padrão, para a penetração e frequência de oscilação da poça de fusão. Como saídas do modelo, fez-se a escolha dos parâmetros de processo: tensão, velocidade de alimentação de arame e velocidade de soldagem. Como os valores dos erros de treinamento e de simulação apresentaram grande variação em função do número de neurônios, número de camadas, 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, a rede neural artificial com duas camadas ocultas com 20 e 11 neurônios (Figura 5. 8) forneceu os valores dos parâmetros de processo em relação à profundidade da penetração do cordão de solda que se aproximaram mais dos valores reais.

O modelo produzido utilizando rede neural artificial é, de fato, viável, dada sua grande exatidão evidenciada com os resultados obtidos a partir da comparação dos dados experimentais e os estimados pela RNA (vide Figura 5. 11 e Figura 5. 15). Os quais permitem ressaltar que o modelo apresenta uma apropriada aproximação às respostas encontradas nas medições, corroborando sua validade e expandindo a possibilidade aos avanços em sistemas automáticos nos processos de soldagem.

No caso do controlador as variáveis de controle são determinadas finalmente pelos modelos linguísticos. Estes modelos não representam um modelo matemático do processo, mas têm a capacidade de agir na forma de um operário soldador, ajustando o valor das variáveis de controle na porcentagem apropriada, conforme o erro apresentado entre o sinal monitorado e os valores de referência (Figura 4. 11). Este controlador difuso é um sistema inteligente composto por sistemas de inferência baseados em regras heurísticas, o qual encarrega-se de monitorar e controlar a frequência de oscilação da poça de fusão e corrige a velocidade de alimentação de arame e a velocidade de soldagem (Figura 4. 12). Neste caso, o controlador toma a representação difusa e as variáveis

linguísticas dos erros nas medidas da frequência e na faixa de variação e gera uma ação definida nas regras de inferência sobre as velocidades no processo (Tabela 5. 3).

No caso do controlador, baseado na velocidade de alimentação de arame e velocidade de soldagem, os gráficos das Figuras 5. 19, 5. 22, 5. 23 e 5. 24 permitem observar resultados satisfatórios, nos quais o controlador consegue atingir os valores de referência para a frequência de oscilação da poça de fusão. No entanto, este controlador, além de se limitar à região de trabalho na qual foram coletados os dados na etapa de modelagem (modo de transferência por curto-circuito), é limitado ao ajuste das variáveis de entrada que garantam a estabilidade do processo de soldagem (Vide figura 5. 21 e Figura 5. 26).

Um tempo de 350 ms é empregado em cada etapa de controle. Cada ciclo de controle pode empregar uma mudança máxima de entre -0.5 e 0.5 m/min para a velocidade de alimentação de arame e de 0.3 a 0.3 mm/s para a velocidade de soldagem. O uso destes valores e as relações utilizadas no sistema de inferência de cada parâmetro de processo correspondem aos valores considerados como mínimos durante os processos de soldagem. Por outro lado, as taxas de alteração dos parâmetros de processo dependem principalmente da análise da transformada de Fourier para caracterização da poça de fusão, pelo qual uma generalização da quantidade de alterações máximas das variáveis manipuladas e tempos de reação (aproximadamente 3 mudanças por segundo) correspondem com o tempo de reação humano, permitindo taxas de variação apropriadas na profundidade da penetração do cordão de solda, favorecendo também a estabilidade dos parâmetros no processo de controle.

As Figuras 5. 20 e 5. 25 indicam os resultados da penetração nos cordões de solda nos testes da implementação do sistema de controle, onde se tem cordões com bom acabamento e aparência superficial após o processo de monitoração e correção da frequência de oscilação da poça de fusão visando atingir ao final os valores de referência. Conforme o exposto, vale destacar que os cordões de solda não apresentam defeitos, tais como: falta de fusão, acumulação lateral do material de aporte, porosidades, mordeduras ou respingos. Tais aspectos podem ser atribuídos a um adequado controle e uma boa seleção dos parâmetros de processo.

As escamas resultantes no cordão de solda solidificado, como mostrado na Figura 4. 14, São muito comuns no processo GMAW. Compreender os mecanismos que levam à

formação de escamas será útil na determinação da forma do cordão de solda, incluindo mordeduras e sobreposições que podem afetar a qualidade da solda e as condições do processo de soldagem. Isto implica a interpretação física de diferentes ciências da física térmica, hidrodinâmica, eletromagnetismo, óptica, morfologia, seleção de padrões e metalurgia. As transições de fase entre sólido e líquido também estão incluídas. As quantidades, os espaços e as amplitudes das escamas podem ser reveladas efetivamente a partir do ajuste de um equilíbrio de forças entre pressões de gás, líquido perturbado e tensão superficial. Observou-se que qualquer fator que pode induzir diferenças de pressão ou influenciar a tensão superficial é responsável por padrões de escamas específicos. O presente trabalho conseguiu fornecer uma interpretação geral e relevante das relações envolvidas na rugosidade da superfície e na penetração do cordão de solda estimada.

No presente estudo, uma vez que a formação de uma onda está intimamente relacionada ao comportamento dinâmico da poça de fusão, foi interessante descobrir que o ciclo de vida da ondulação é aproximadamente o mesmo para criar uma escama. A distância entre duas ondas no cordão de solda final é medida e relacionada à velocidade de soldagem, com o qual foi possível determinar o tempo para produzir uma escama. Como é sabido a partir do estudo da penetração do cordão de solda, da frequência de curto-circuito é possível deduzir a quantidade de curtos-circuitos por unidade de tempo necessária para excitar a poça de fusão e obter um certo padrão de escamas, além de estabelecer a relação com a profundidade de penetração. Portanto, com o tempo necessário para um ciclo de ondulação, as escamas podem ser correlacionadas com os diferentes parâmetros de soldagem, incluindo a profundidade de penetração do cordão de solda, a frequência de oscilação do poça de fusão, a frequência de curtos-circuitos, a velocidade de alimentação de arame, a velocidade de soldagem e a tensão (Tabela 5. 5). Observa-se que todos esses parâmetros e condições de soldagem são acoplados, por isso, finalmente, se tem um sistema que combina controle e estimativa de características funcionais, como a qualidade da soldagem (Profundidade da penetração e padrões de escamas no cordão de solda).

## 7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 7.1. CONCLUSÕES

O objetivo geral do presente estudo foi o desenvolvimento de um sistema de monitoração, análises, modelagem e controle da penetração do cordão de solda no processo GMAW-S através da observação da oscilação da poça de fusão e aplicação da inteligência artificial. Além da caracterização do processo de formação de escamas na superfície do cordão de solda. Os resultados adquiridos permitiram concluir os seguintes aspectos:

- No caso da penetração dos cordões de solda, as referências bibliográficas apresentam diferentes modelos matemáticos ou experimentais utilizados para caracterizar o parâmetro geométrico. Estes controladores não escapam das limitações próprias dos modelos e das complicações e atrasos impostos no caso de monitorar, analisar e processar todos os fenômenos envolvidos na formação do cordão.
- Conclui-se que as técnicas implementadas no processamento digital das imagens permitem segmentar a poça de fusão e extrair a informação requerida de forma rápida e correta. Os métodos utilizados para encontrar um limiar adequado para segmentar a poça de fusão que dependem unicamente da informação de intensidade dos pixels são recomendados, pois a poça apresenta uma grande diferença entre os seus níveis de intensidade e os níveis de intensidade do fundo nas imagens adquiridas mediante a técnica de perfilografia no processamento digital das imagens.
- No processo de obtenção da frequência de oscilação da poça de fusão, os resultados dos espectros de frequência apresentam uma distribuição adequada e um comportamento acorde com o esperado, o que permite concluir que a metodologia é adequada para ser utilizada no sistema de monitoramento. No caso da metodologia de processamento, esta permite medir de forma prática e simultânea a dinâmica da poça de fusão durante a formação dos cordões de solda. Os resultados apresentados na avaliação desta metodologia validam a técnica da transformada rápida de Fourier como apropriada para aquisição da frequência de oscilação da poça de fusão e permitem a sua utilização nos respectivos sistemas de controle da penetração das soldas. Neste sentido, conclui-se que o ponto localizado a uma distância de 60 pixels

com respeito do eletrodo pode ser utilizado para obter o perfil oscilante da poça de fusão.

- Tendo em vista que as relações entre as características geométricas do cordão e os parâmetros do processo são difíceis de serem obtidas na prática, o procedimento para a modelagem aqui desenvolvido é de grande valia como forma metodológica para a obtenção dos parâmetros do processo que garantam qualquer combinação em prol da penetração do cordão de solda desejada. Foram encontrados os valores para a tensão, a velocidade de alimentação do arame e a velocidade de soldagem, que garantem a resposta, ou seja, soldas de boa aparência e qualidade com as características desejadas. Neste sentido, é possível afirmar que a modelagem a partir de redes neurais bem projetadas, prediz adequadamente os parâmetros do processo para uma profundidade da penetração do cordão de solda.
- Conclui-se que a principal vantagem do controlador difuso que foi possível 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 é satisfatório, levando-se em conta a faculdade de aumentar ou diminuir o valor das variáveis de controle na porcentagem adequada, de acordo com o erro entre o sinal monitorado e os valores de referência. Conclui-se também que, segundo os resultados experimentais atingidos, a referida técnica possibilita que o sistema se adapte imediatamente às variações nas características durante todo o processo de soldagem, com boas características de robustez e de correção das instabilidades frente à mudança das condições de operação.
- Devido à forte relação entre os curtos-circuitos e o comportamento da poça de fusão, a distribuição da concentração de escamas no cordão de solda para o processo GMAW-S é bastante comum. A modelagem desenvolvida no presente estudo estabeleceu as bases necessárias para realizar estudos paramétricos para compreender os efeitos de vários parâmetros de soldagem na forma do cordão e a qualidade da solda. Na modelagem, foram considerados os parâmetros do processo, a quantidade de curto-circuito, a frequência de oscilação do poça de fusão e a penetração do cordão de solda. A forma e a frequência das escamas na superfície do cordão foram calculadas, o que foi associado experimentalmente com os resultados obtidos de

como a incidência periódica dos curtos-circuitos, a dinâmica da poça de fusão, a penetração contribuíram para a formação de ditas escamas.

## 7.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar novas metodologias que podem ser implementadas para monitorar a frequência de oscilação da poça fora da posição plana e as novas técnicas que podem ser aplicadas para realizar a medição.
- Implementar novas técnicas de iluminação para a filmagem da dinâmica da poça de fusão, utilizando como base a metodologia de monitoramento proposta.
- Estudar mecanismos para implementar as metodologias de monitoramento e controle nos modos de transferência metálica globular e goticular.
- Determinar os mecanismos para integrar o sistema de monitoramento e controle proposto com outros sistemas de controle para os outros parâmetros geométricos do cordão de solda como a largura, o reforço e o ângulo do reforço.
- Analisar ações de monitoramento, modelagem e controle, como as definidas no presente trabalho, para sua aplicação em outros tipos de parâmetros de soldagem como saídas do modelo, mudando-se, por exemplo, o ângulo de inclinação da tocha, o *stickout*, o fluxo de gás, etc., o que permita avaliar sua influência na geometria dos cordões de solda e sua utilização como possível variável manipulável no controle da geometria final do cordão de solda no processo GMAW.
- Estudar novas metodologias para realizar o controle da produção das escamas resultantes na superfície dos cordões de solda.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULLAH, B. M.; SMITH, J. S.; LUCAS, B. Vision System for Monitoring Arc Welding Processes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE COMPUTER TECHNOLOGY IN WELDING AND MANUFACTURING, 16, 2006, Kiev, Ukraine. **Proceedings of Joint International Conference, Computer Technology in Welding and Manufacturing 16th International Conference & Mathematical Modeling and Information Technologies in Welding and Related Processes 3rd International Conference**: E.O. Paton Electric Welding Institute, June 6-8, p. 13-19, 2006.
- ABDULLAH, B. M. Monitoring of Welding Using Laser Diodes. In: PATIL D.S. **Semiconductor Laser Diode Technology and Applications**. InTech, cap. 14, p. 241-262, April. 2012.
- ABENDE (Associação Brasileira de Ensaios não Destrutivos e Inspeção). Web site: <http://www.abende.org.br>. 2008.
- ABT, F.; HEIDER, A.; WEBER, R.; GRAF, T.; BLUG, A.; CARL, D.; HÖFLER, H.; NICOLOSI, L.; TETZLAFF, R. Camera Based Closed Loop Control for Partial Penetration Welding of Overlap Joints. **Physics Procedia**, v. 12, p. 730–738, 2011.
- ALAM, M.M.; BARSOUM, Z.; JONSÉN, P.; KAPLAN, A.F.H.; HÄGGBLAD, H.A. The influence of surface geometry and topography on the fatigue cracking behavior of laser hybrid welded eccentric fillet joints. In: **Journal Applied Surface Science**, V. 256, p. 1936–1945, 2010.
- ALBUQUERQUE, M. P. **Processamento de imagens: métodos e análises**. Rio de Janeiro: Editora da FACET, Brazil, 2001.
- ALBUQUERQUE, S. F.; MACIEL, T. M.; SANTOS, M. A.; BRACARENSE, A. Q. Avaliação da Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Metais de Solda Obtidos por Processos de Soldagem Manual e Automatizado utilizado na Soldagem de Aço API 5L X80. **Soldagem e Inspeção (Impresso)**, v. 16, p. 322-332, 2011.
- ALBUQUERQUE, S. F.; SILVA, R. S.; MACIEL, T. M.; ALMEIDA, D. M.; BRACARENSE, A. Q., Estudo do comportamento do aço API 5L X80 quando

submetido à soldagem por processo automatizado, **Soldagem & Inspeção**, Vol. 17, Nº 2 [Abr / Jun], p. 137-146, 2012.

ANDRADE JUNIOR, B. C.; BRACARENSE, A. Q.; COSTA, T. M. G.; NEPOMUCENO, D. Caracterização da solda FCAW, utilizando na transferência metálica oscilação magnética do arco. **Proceedings of 64 congresso Anual da ABM, Belo Horizonte. ABM**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 1. p. 1-8, 2009.

ANREN, Y.; ZHEN, L.; SANSAN, A. A CMOS Visual Sensing System for Welding Control and Information Acquirement in SMAW Process. **Physics Procedia**, v. 25, p. 22 – 29, 2012.

ARIVARASU. M, DEVENDRANATH RAMKUMAR K, ARIVAZHAGAN. N. Comparative Studies of High and Low Frequency Pulsing On the Aspect Ratio of Weld Bead in Gas Tungsten Arc Welded AISI 304L Plates. **12th GLOBAL CONGRESS ON MANUFACTURING AND MANAGEMENT, GCOMM 2014, Procedia Engineering**, v. 97, p. 871 – 880, 2014.

AWS. **Recommended Practices for Gas Metal Arc Welding**, Lejeune Road Miami, Florida, E.U.A., 1989.

BACHMANN, M.; KUNZE, R.; AVILOV, V.; RETHMEIER, M. Finite element modeling of an alternating current electromagnetic weld pool support in full penetration laser beam welding of thick duplex stainless steel plates. **Journal of Laser Applications**, v. 28 (2), p. 1-9, 2016.

BALASUBRAMANIAN, M. Prediction of optimum weld pool geometry of PCTIG welded titanium alloy using statistical design. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 19, n. 1, p. 15–21, 2016.

BEREZOVSKY, B.; PUJKO, A.; PILNIK, O. Mathematical computer modeling and optimization of welded joint formation for multi-pass welding of gas pipeline fittings. **Proceeding of Joint 16th International Conference «Computer Technology in Welding and Manufacturing» & 3rd International Conference «Mathematical Modelling and Information Technologies in Welding and Related Processes»**, 6-8 June, Kiev, Ukraine, p. 136-142, 2006.

- BRACARENSE, A. Q.; SORAGGI, C. C.; FELIZARDO, I. Parametrização para soldagem orbital robotizada de tubos com arame tubular. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais (São Paulo. Impresso)**, São Paulo, v. 2, n.3, p. 6-10, 2006.
- BINGUL, Z.; COOK, G. E. A Real-Time Prediction Model of Electrode Extension for GMAW, **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, v. 11, n. 1, p. 13-17, 2006.
- CHEN, D.; CHEN, M; WU, C. Effects of phase difference on the behavior of arc and weld pool in tandem P-GMAW. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 225, p. 45–55, 2015.
- CHEN, H. B.; LIN, T.; CHEN S. B.; WANG, J. F.; JIA, J. Q.; ZHANG, H. Adaptive Control on Wire Feeding in Robot Arc Welding System. **Proceedings of the IEEE Intl. Conf. on Robotics, Automation, and Mechatronics (RAM 2008)**, Sep. 2008.
- CHEN, H.; MENG, Y.; WANG, X. Combined Planning between Welding Pose and Welding Parameters for an Arc Welding Robot. **Robotic Welding, Intelligence and Automation. Lecture Notes in Electrical Engineering**, v. 88, p. 73-80, 2011.
- CHEN, S. B.; LOU, Y. J.; WU, L.; ZHAO, D. B. Intelligent Methodology for Sensing, Modeling and Control of Pulsed GTAW: Part I Bead-on-Plate Welding. **Welding Journal**, p. 151-163, June 2000a.
- CHEN, S. B.; ZHANG, Y.; QIU, T.; LIN, T. Robotic Welding Systems with Vision-Sensing and Self-learning Neuron Control of Arc Welding Dynamic Process. **Journal of Intelligent and Robotic Systems**, v. 36, p. 191–208, 2003.
- CHEN, S. B. Visual information acquirement and real-time control methodologies for weld pool dynamics during pulsed GTAW, **MATERIALS SCIENCE FORUM**, Dec 2006.
- CHEN, S. B.; WU, J. A Survey on Intelligentized Technologies for Visual Information Acquirement, modeling and Control of Arc Welding Pool Dynamics. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY, 33, 2007, Taipei, China, Nov. 5-8. IECON 2007: IEEE, p. 781-785, 2007.

- CHEN, X. Q.; LUO H.; LIN, W. J. Integrated Weld Quality Control System Based on Laser Strobe Vision. *Robotic Welding, Intelligence and Automation. Proceedings of Lecture Notes in Control and Information Sciences*, v. 362, p. 257-266, 2007.
- CHO, J.; FARSON, D.F.; HOLLIS, K.J.; MILEWSKI, J. O. Numerical analysis of weld pool oscillation in laser welding. *Journal of Mechanical Science and Technology*. v. 29, p. 1715-1722, 2015. Doi: 10.1007/s12206-015-0344-2.
- CHOI, S.; KIM, J.; RYU, S.; KWON, B. Development of Tandem MIG Welding Control System. *ICROS-SICE International Joint Conference 2009*. August 18-21, Fukuoka, Japan, p. 820-823, 2009.
- CHRISTIANSSON, A.; GOUGEON, P. Sensor and control system for metal deposition using robotized laser welding. *Proceeding of Joint 16th International Conference «Computer Technology in Welding and Manufacturing» & 3rd International Conference «Mathematical Modelling and Information Technologies in Welding and Related Processes»*, 6-8 June, Kiev, Ukraine, p 29-31, 2006.
- COELHO, G. F.; PINTO, D. P.; LIMA II, E. J.; BRACARENSE, A. Q. Modelagem da geometria de cordões de solda utilizando Lógica Fuzzy. *Proceedings of Congresso Nacional de Soldagem, Recife. XXXVI CONSOLDA*. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, v. 1. p. 1-10, 2010.
- CORTÉS, P.A., GÓMEZ, D.A., POSADA, D. E GIRALDO, J.E. 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, 2011.
- COSTER, M.; CHERMANT, J.L. *Precis d'analyse d'images*. Editora do CNRS, 1989.
- CRUZ, J. A. *Uma Metodologia para Modelagem e Controle da Altura do Reforço e da Largura do Cordão de Solda no Processo GMAW*. Dissertação (Mestrado em Sistemas Mecatrônicos), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, 2014.
- CRUZ, J. A.; TORRES, E. M.; ABSI ALFARO, S. C. A methodology for modeling and control of weld bead width in the GMAW process. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 1, p. 1-5, 2015.

- CRUZ, J. G.; TORRES, E. M.; ABSI ALFARO, S. C. Modelling and control of weld height reinforcement in the GMAW process. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**. V. 40. p. 164, 2018. <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1080-1>
- DE REZENDE, G., M., C.; LISKÉVYCH, O.; VILARINHO, L., O.; SCOTTI, A. Um critério para determinar a regulagem da tensão em soldagem MIG/MAG por curto-circuito, **Soldagem & inspeção. (Impr.)**, vol.16, no.2, São Paulo, [Apr/June], 2011.
- DINHAM, M.; FANG, G. Low Cost Simultaneous Calibration of a Stereo Vision System and a Welding Robot. **Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics**. December 14-18, Tianjin, China, 2010.
- DHAS, J. R.; KUMANANA, S. ANFIS for prediction of weld bead width in a submerged arc welding process. **Journal of Scientific & industrial Research**, v. 66, April, p. 335-338, 2007.
- DOUMANIDIS, C.; KWAKA, Y-M. Multivariable adaptive control of the bead profile geometry in gas metal arc welding with thermal scanning. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 79, n. 04, p. 251-262, abr. 2002.
- DUMAN, U. Modeling of weld penetration in high productivity GTAW. **Doctoral thesis in Philosophy (Metallurgical and Materials Engineering)**. Colorado School of Mines. Department of Metallurgical and Materials Engineering, p. 224, 2009.
- FAN, D.; HUANG, J.; LU, L.; SHI, Y. Simulation of Decoupling Control of Pulsed MIG Welding for Aluminum Alloy. **Robotic Welding, Intelligence and Automation. Lecture Notes in Electrical Engineering**, v. 88, p. 279-284, 2011.
- FARIA, F. A.; MOTTA, L. P. G.; TAVARES, A. M.; LAS CASAS, M. S.; RAMALHO FILHO, F. A.; LIMA II, E. J.; BRACARENSE, A. Q. Machine vision and artificial neural networks for seam tracking and weld inspection. **Proceedings of ABCM Symposium Series in Mechatronics**, v. 4, p.768-775, 2010.
- FELIZARDO, I.; BRACARENSE, A. Q. Una Nueva Concepción de los Métodos de Aplicación Para la Clasificación de los Procesos de Soldadura Basado en los

Conceptos de Automatización y Control. **Proceedings of VII Conferencia Científica Internacional de Ingeniería Mecánica, COMEC 2012**. Santa Clara - Cuba: Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. v. 1. p. 1-1, 2012.

FORTES C. ESAB. **Metalurgia da soldagem**. Disponível em: <[http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/biblioteca/upload/1901104rev0\\_ApostilaSoldagemMIGMAG.pdf](http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/biblioteca/upload/1901104rev0_ApostilaSoldagemMIGMAG.pdf)>. Acesso em: Julho, 2015.

FU, K.S.; MUI, J. K. A survey on image segmentation. **Pattern Recognition**, v.1, n. 13 p. 3-16, 1980.

GIRALDO, J. Aspectos básicos del control de calidad de estructuras metálicas soldadas. **In: Aciem**, v.1, n. 1, p. 10-15, 1997.

GONZALEZ, R.; WOODS, R. **Digital Image Processing**. Addison Wesley editorial, 1992.

GUYON, I. Neural Networks and application tutorial. **Physics Reports**. V. 207, p. 215-259, 1991.

HARTMAN, D.; COOK, G.; MADIGAN, R.; DELAPP, D. Arc Welding Process Control. **Welding Fundamentals and Processes. ASM Handbook**, Volume 6A, p. 285-295, 2011.

HU, J.; GUO, H.; TSAI, H. L. Weld pool dynamics and the formation of ripples in 3D gas metal arc welding. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 51, p. 2537–2552, 2008.

HUANG, J.; SHI, Y.; LU, L.; ZHU, M.; ZHANG, Y.; FAN, D. Modeling and Decoupling Control Analysis for Consumable DE-GMAW. **Robotic Welding, Intelligence and Automation. Lecture Notes in Electrical Engineering**, v. 88, p. 285-292, 2011.

JAIDI, J.; DUTTA, P. Three-dimensional turbulent weld pool convection in gas metal arc welding process. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 9, n. 5, p. 407-414, Dec 2013.

- JIFENG WANG, J.; ZUO, Y.; HUANG, Y.; YANG, B.; PAN, S. Arc Sound Recognizing Penetration State Using LPCC Features. **Robotic Welding, Intelligence and Automation. Lecture Notes in Electrical Engineering**, v. 88, p. 229-233, 2011.
- JIMENEZ, D. G.; LOPEZ, F. M.; MONDRAGON, J. J. R.; BRACARENSE, A. Q. Influencia en la entrada de calor sobre la porosidad y susceptibilidad al agrietamiento por solidificación en soldadura húmeda de acero inoxidable austenítico 304. **Proceedings of congreso Nacional de Innovación y Vinculación Científica, 2013, México. INVICYT**. Cidade do México: Universidad Politécnica Nacional en la ciudad de México, v. 1, p. 1-10, 2013.
- JU, J.; SUGA, Y.; OGAWA, K. Penetration Control by Monitoring Molten Pool Oscillation in TIG Arc Welding. **Proceedings of The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference**, Kitakyushu, Japan, May 26–31, p. 241-246, 2002.
- JULIANI, L.; BRACARENSE, A. Q.; GONTIJO, A. F. Utilização de um sistema de controle por oscilação magnética para a deposição de metal em passe de raiz. **Proceedings of Congresso Nacional de Soldagem, 2013, Curitiba. CONSOLDA2013**. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, 2013. v. 1. p. 1-10.
- JUNFENG, W.; CHUNLONG, D. Control Method Analysis Based on Welding Process. **International Conference on Automatic Control and Artificial Intelligence (ACAI 2012)**, p 705–708, 2012.
- KANG, M-G., KIM, J-H., PARK, Y-J., WOO, G-J. Laser Vision System for Automatic Seam Tracking of Stainless Steel Pipe Welding Machine. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL, AUTOMATION AND SYSTEMS, Seul, Coreia. **ICCAS 2007: IEEE**, Oct. 17-20, p. 1046-1051, 2007.
- KARKHIN, V.A.; KHOMICH, P.N.; MICHAILOV, V.G. Prediction of microstructure and mechanical properties of weld metal with consideration for real weld geometry. **Proceeding of Joint 16th International Conference «Computer Technology in Welding and Manufacturing» & 3rd International Conference «Mathematical Modelling and Information Technologies in Welding and Related Processes»**, 6-8 June, Kiev, Ukraine, p. 162-166, 2006.

- KEJIE, D.; WENTAN, J.; JINCHENG, W.; Fuju, Z. The research of adaptive PID for the thin-walled cylinder TIG welding penetration control. **INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING, CONTROL AND INDUSTRIAL ENGINEERING**, Wuhan, china. CCIE 2010: IEEE, June 5-6, p. 30-33, 2010.
- KIM, I. S. Numerical and experimental analysis for the GMAW process, **Doctor of Philosophy thesis**, Department of Mechanical Engineering, University of Wollongong, Wollongong, Australia, 1995.
- KIM, D.; KANG, M.; RHEE, S. Determination of Optimal Welding Conditions with a Controlled Random Search Procedure. **WELDING JOURNAL**, p. 125-130, 2005.
- KIM, I. S.; BASU, A.; SIORES. Mathematical Models for Control of Weld Bead Penetration in the GMAW Process. **E. Int J Adv Manuf Technol**, V. 12, P. 393-401, 1996.
- KONG, M; CHEN, S. Al alloy weld pool control of welding robot with passive vision. **Sensor Review**, v. 29, n. 1, p. 28–37, 2009.
- KUMAR V.; KHAMBA, J. S.; MOHAN, N. Development and characterization of fluxes for submerged arc welding, **Doctor of Philosophy thesis**, Universidad Punjabi, Patiala, India, 103 -113, 2011.
- LANZETTA, M.; SANTOCHI, M.; TANTUSSI, G. Online control of robotic Gas Metal Arc Welding. **Department of mechanical, Nuclear and production engineering**, University of Pisa, Italia. 2001.
- LERTRUSDACHAKUL, I.; AUBRETON, O.; MATHIEU A. Vision-based control of wire extension in GMA welding. **Proceedings of Int J Adv Manuf Technol**, v. 78, p. 1201–1210, 2015.
- LI, X. R.; ZHANG, Y. M.; KVIDAHL, L. Penetration Depth Monitoring and Control in Submerged Arc Welding. **WELDING JOURNAL**, v. 92, n. 2, p. 48S-56S, 2013.
- LI, X. R.; SHAO, Z.; ZHANG, Y. M.; KVIDAHL, L. Monitoring and control of penetration in GTAW and pipe welding. **Welding journal**. june, v. 92. p. 190-196, 2013.

- LIMA II, E. J.; CASTRO, C. A.; BRACARENSE, A. Q.; CAMPOS, M. F. M. Determining the relationship between welding parameters, pool width and weld bead geometry using high speed filming. **Welding International**, v. 21, p. 220-226, 2007.
- LIMA II, E. J.; PINTO, D. P.; BRACARENSE, A. Q. Estudo da forma geométrica da seção de cordões de solda. **Proceedings of 10º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica**, Porto. CIBEM10, 2011.
- LIMA II, E. J.; BRACARENSE, A. Q.; PINTO, D. P.; COELHO, F. G.; CASAS, M. S. L. Comparação entre métodos de modelagem de parâmetros da geometria de cordões de solda. **Corte e Conformação de Metais**, v. fevereiro, p. 68-79, 2012.
- LIU, A.; TANG, X.; LU, F. Weld pool profile characteristics of Al alloy in double-pulsed GMAW, **Proceedings of Int J Adv Manuf Technol**, v. 68, p. 2015–2023, 2013.
- LIU, F. Research on the Laser Calibration Method for the Image Plane Center of the Visual Sensor. **Robotic Welding, Intelligence and Automation. Lecture Notes in Control and Information Sciences**, v. 362, p. 295-302, 2007.
- LIU, J. W.; RAO, Z. H.; LIAO, S. M.; TSAI, H. L. Numerical investigation of weld pool behaviors and ripple formation for a moving GTA welding under pulsed currents. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 91, p. 990–1000, 2015.
- LIU, Y.; ZHANG, W.; ZHANG, Y. Neuro-fuzzy Modeling of Human Welder's Response to 3D Weld Pool Surface in GTAW. **International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)**, p. 875-880, 2012.
- LIU, Y.; ZHANG, W.; ZHANG, Y. Data Driven Modeling of Human Welder Intelligence: A Neuro-fuzzy Approach. **IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)**, p. 663-668, 2013.
- LIU, Y.; ZHANG, W.; ZHANG, Y. Dynamic Neuro-Fuzzy-Based Human Intelligence Modeling and Control in GTAW. **IEEE transactions on automation science and engineering**, p. 324 – 335, 2013.

- LIU, Y. K.; ZHANG, Y. M. Control of 3D Weld pool surface. **Control Engineering Practice**, v. 21, p. 1469–1480, 2013.
- LIU, Y. K.; ZHANG, W. J.; ZHANG, Y. M. Dynamic Neuro-fuzzy Estimation of the Weld Penetration in GTAW Process. **IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC 2013)**, Minneapolis, May 6-9, p. 1380-1385, 2013.
- LIU, Y. K.; ZHANG, Y. M. Adaptive modeling of the weld pool geometry in gas tungsten arc welding. **Proceedings of IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON NETWORKING, SENSING AND CONTROL**, Evry, France, 10, 2013. **ICNSC 2013**: IEEE, Apr. 10-12, p. 550-555, 2013.
- LIU, Y. K.; ZHANG, Y. M. Model-Based Predictive Control of Weld Penetration in Gas Tungsten Arc Welding. **Proceedings of IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 22, n. 03, p. 955 - 966, May 2014.
- LIU, Y. K., ZHANG, W. J.; ZHANG, Y. M. A Tutorial on Learning Human Welder's Behavior: Sensing, Modeling, and Control. **Electrical and Computer Engineering Faculty Publications**. V. 1. 2014.
- LOPERA, J. E. P. Uso de Agentes Inteligentes no Controle Simultâneo da Largura e do Reforço dos Cordões de Solda no Processo GMAW-S. **Tese de Doutorado em Sistemas Mecatrônicos**, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, p. 159, 2016.
- LÓPEZ, N.; VERGARA, V.; ESPINOSA, A.; CAMUS, M.; DUTRA, J. C. GTAW Welding Process Study in Cold Wire Mode. **10th International Meeting on Mining Plant Maintenance – Mapla 2013**, September, Santiago, Chile, p. 326-335, 2013.
- LÜ, F. L.; WANG, J. F.; FAN, C. J.; CHEN, S. B. A model-free adaptive control of welding pool dynamics during arc welding. **IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, CIS 2008**, 2008.
- LU, L.; FAN, D.; HUANG, J.; FAN, J.; SHI, Y. Wire Extension Control Based on Vision Sensing in Pulsed MIG Welding of Aluminum Alloy. **Intelligence and Automation. Lecture Notes in Electrical Engineering**, v. 88, p. 153-159, 2011.

- LU, W.; ZHANG, Y. M.; ZHANG, C.; WALCOTT, B. L. Robust sensing and control of weld pool surface. **IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)**, v. 16, p. 301-306, 2005.
- LU, W.; ZHANG, Y. Robust sensing and control of the weld pool surface. **Measurement Science and Technology**, v. 17, p. 2437–2446, 2006.
- LUO, H.; DEVANATHAN, R.; WANG, J.; CHEN, X.; SUN, Z. Vision based neurofuzzy logic control of weld pool geometry. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 7, n. 5, p. 321-325, 2013.
- LV, F. L.; CHEN, S. B.; DAI, S. W. A Model-Free Adaptive Control of Pulsed GTAW. Robotic Welding, Intelligence and Automation. **Lecture Notes in Control and Information Sciences**, v. 362, p. 333-339, 2007.
- LV, N.; CHEN, S. Investigation on Acoustic Signals for On-line Monitoring of Welding. **Robotic Welding, Intelligence and Automation. Lecture Notes in Electrical Engineering**, v. 88, p. 235-243, 2011.
- LV, N.; ZHONG, J.; CHEN, H. Real-time control of welding penetration during robotic GTAW dynamical process by audio sensing of arc length. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 74, n. 1, p. 235–249, 2014.
- MA, H.; CHEN, S. Study on the MLD Modeling Method of Pulsed GTAW Process for Varied Welding Speed. **Robotic Welding, Intelligence and Automation. Lecture Notes in Electrical Engineering**, v. 88, p. 271-278, 2011.
- MA, X. J.; ZHANG, Y. Reflection of illumination laser from gas metal arc weld pool surface. **Proceedings of Meas. Sci. Technol**, v. 20, p. 1-8, 2009.
- MA, X. J.; ZHANG, Y. M.; GAY, A. M.; MALE, A. T. Image Processing for Measurement of Three-Dimensional Gas Metal Arc Weld Pool Surface. **IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering (CSAE)**, v. 2, 25-27 May 2012, p. 243-249, 2012.
- MATSUI, H.; CHIBA, T.; YAMAZAKI, K. Detection and amplification of the molten pool natural oscillation in consumable electrode arc welding. **Welding International**, v. 28, n. 1, p. 5-12, 2014.

- MIRANDA, L. H.; BRACARENSE, A. Q. Influence of refrigeration of the fusion pool using carbon dioxide in the angular distortion and microstructures in bead on plate welding in low alloy steel. **Proceedings of II INTERNATIONAL CONFERENCE on Welding and Joining of Materials, Cusco. ICJWJM.** Peru: Pontificia Universidad Católica del Perú, v. 1. p. 1-10, 2007.
- MNICH, C.M. **Development of a Synchronized, High-Speed, Stereovision System for In Situ Weld Pool Measurement.** Golden, Colorado, USA, 2004, Thesis (Master of Science, Engineering Systems) - Center for Welding, Joining, and Coatings Research, Colorado School of Mines, 2004.
- MODENESI, P. **Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais.** Editora UFMG, Belo Horizonte, Brasil, 2007.
- MODENESI, P. J. **Terminologia Usual de Soldagem e Símbolos de Soldagem.** Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Belo Horizonte, Brazil, 2008.
- MODENESI, P. J.; COSTA, M. C. M. S; SANTANA, I. J.; BERGANHOLI, J. P. P. Estudo de alguns parâmetros básicos da soldagem GMAW com transferência por curto-circuito, **Soldagem & inspeção (Impr)**, vol.16, no.1, São Paulo, Jan./Mar, 2011.
- MOKROV, O.; PAVLYK, V.; DILTHEY, U. Analysis of thermo-electrical processes and electrode metal transfer during gas-metal-arc welding with the aid of numerical modelling. **Proceeding of Joint 16th International Conference «Computer Technology in Welding and Manufacturing» & 3rd International Conference «Mathematical Modelling and Information Technologies in Welding and Related Processes»**, 6-8 June, Kiev, Ukraine, pp 250-19, 2006.
- MONCAYO, E. M.; CRUZ, J. A; LOPERA, J. E. P.; ABSI ALFARO, S. C. Parameter optimization in gmaw process with solid and metal-cored wires. **In: 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013), 2014, Ribeirão Preto. ABCM Symposium Series in Mechatronics.** Rio de Janeiro: ABCM, 2013. v. 6. p. 141-151.

- MORGAN, A. A. A; AL-MUFADI, F. A. A Novel Method to Improve Weld Uniformity by Automatic Control of Current Intensity. **American Journal of Engineering and Applied Sciences**. v. 8, n. 1, p. 17-25, 2015.
- MOTA, C. P.; MACHADO, M.V.; FERNANDES, D.B.; VILARINHO, L.O. Estudo da emissão de raios infravermelho próximo em processos de soldagem a arco. **Soldagem & Inspeção**, v. 16, n. 01, p. 44-52, Jan./Mar. 2011.
- MOTA, C. P.; MACHADO, M.V; FINZI Neto, R.B; VILARINHO, L.O. Sistema de Visão por Infravermelho Próximo para Monitoramento de Processos de Soldagem a Arco. **Soldagem & Inspeção**, v. 18, n. 01, p. 19-30, Jan. /Mar. 2013.
- MOTA, C. P.; MACHADO, M. V. R.; NETO, R. M. F.; VILARINHO, L.O. Dedicated Near-Infrared Vision System for Monitoring Welding Processes. **Welding International**, v. 29 (3), p. 187-196, 2015.
- MOON, H. S.; KIM, Y. B.; KIM, J. J.; KIM, J. C.; PARK, M. R. Automatic pipeline welding system with self-diagnostic function and laser vision sensor. **Proceeding of Joint 16th International Conference «Computer Technology in Welding and Manufacturing» & 3rd International Conference «Mathematical Modelling and Information Technologies in Welding and Related Processes»**, 6-8 June, Kiev, Ukraine, p. 46-50, 2006.
- MOUSAVI ANZEHAEE, M.; HAERI, M. Welding current and arc voltage control in a GMAW process using ARMarkov based MPC. **Control Engineering Practice**, v. 19, p. 1408–1422, 2011.
- MUKHERJEE, M.; SAHA, S.; KUMAR PAL T.; KANJILAL, P. Influence of modes of metal transfer on grain structure and direction of grain growth in low nickel austenitic stainless steel weld metals. **Materials Characterization**, v. 102, April, p. 9 –18, 2015.
- MURUGAN, M.; GUNARAJ, V. Prediction and control of weld bead geometry and shape relationships in submerged arc welding of pipes. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 168, p. 478–487, 2005.
- NADZAM J., ARMAO F., BYALL L., KOTECKI D. E MILLER D. Gas Metal Arc Welding Guide lines, Lincoln Electric literature editorial, p. 24-33, 2011.

- PACIORNIK, S.; BERNTHALER, T.; SANTOS, V. R.; MONTEIRO, M. J.; BRACARENSE, A. Q.; PESSOA, E. C. P. Characterization Of Pores And Cracks In Underwater Welds By Mct And Digital Optical Microscopy. **Proceedings of first International Conference on 3D Materials Science, Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. Seven Springs, v. 1. p. 177-182, 2012.**
- PANDEY, S.; MOHAN, N. Investigation into flux consumption. **In: International Conference on CAD, CAM, Robotics and Autonomous Factories, Delhi, India, 2003.**
- PATON, B.E.; YUSHCHENKO, K.A.; KOVALENKO, D.V.; KRIVTSUN, I.V.; DEMCHENKO, V.F.; KOVALENKO, I.V.; LESNOJ, A.B. Role of quasi-keyhole and Marangoni convection in formation of deep penetration in A-TIG welding of stainless steel (phenomenological model of A-TIG process). **Proceeding of Joint 16th International Conference «Computer Technology in Welding and Manufacturing» & 3rd International Conference «Mathematical Modelling and Information Technologies in Welding and Related Processes», 6-8 June, Kiev, Ukraine, p. 250-19, 2006.**
- PAVLYK, V.; MOKROV, O.; DILTHEY, U. Integrative welding simulation: example of GMA Welding. **Proceeding of Joint 16th International Conference «Computer Technology in Welding and Manufacturing» & 3rd International Conference «Mathematical Modelling and Information Technologies in Welding and Related Processes», 6-8 June, Kiev, Ukraine, p. 264-268, 2006.**
- PINTO, D. P.; COELHO, G. F.; LIMA II, E. J.; BRACARENSE, A. Q. Estudo de metodologias de modelagem da geometria de cordões de solda. **Proceedings of Congresso Nacional de Soldagem, Recife. XXXVI CONSOLDA. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, v. 1. p. 1-10, 2010.**
- QIAN, K. Real-time model predictive control of quasi-keyhole pipe welding. **University of Kentucky Doctoral Dissertations. Paper 8, 2010.**
- RAMOS, E. G.; CARVALHO, G. C.; ALFARO, S. C. A. Analysis of weld pool oscillation in GMAW-P by means of shadowgraphy image processing. **Welding international, v.29, n. 3, 197-205, 2015.**

- RASURE, J.; ARGIRO, D.; SAUER, T.; WILLIAMS, C. Visual Language and software development environment for image processing. **Jour. of Imaging System and Technology**. v.2, p. 183-199, 1990.
- REGTIEN, P.P.L.; VAN WIERINGEN, I.M.P. Online Measurement of the Penetration Depth in Arc Welding. MEASUREMENT 2011. **Proceedings of the 8th International Conference**, Smolenice, Slovakia, p. 174-177, 2011.
- RIBEIRO, R. Hardware para processamento digital de imagens. **Trabalho de conclusão do Curso**, Centro Universitário Positivo, Núcleo de Ciências Exatas e Tecnológicas, engenharia da computação, Curitiba, p. 70, 2007.
- RYBERG, A.; ERICSSON, M.; CHRISTIANSSON, A. K.; ERIKSSON, K.; NILSSON, J.; LARSSON, M. Stereo Vision for Path Correction in Off-Line Programmed Robot Welding. **Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology**, p. 1700-1705, 2010.
- SAEED, G.; ZHANG, Y. M. Weld pool surface depth measurement using a calibrated camera and structured light. **Measurement science and technology**, v. 18, p. 2570–2578, 2007.
- SALDI, Z. S.; KIDESS, A., KENJEREŠ, S.; ZHAO, C.; RICHARDSON, I. M.; KLEIJN, C. R. Effect of enhanced heat and mass transport and flow reversal during cool down on weld pool shapes in laser spot welding of steel. **Proceedings of International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 66, November, p. 879–888, 2013.
- SANTANA, I. J.; P. J. MODENESI, P. J. Modelagem Matemática do Processo de Soldagem GMAW - Transferência por Vôo Livre. **Soldag. insp.** São Paulo, Jul/Set, v. 16, n. 3, p. 213-222, 2011.
- SAYYAADI, H.; EFTEKHARIAN, A. A. Modeling and Intelligent Control of a Robotic Gas Metal Arc Welding System. **Scientia Iranica**, v. 15, n. 1, p. 75-93, 2008.
- SCOTTI, A. A Portrait of the Welding Research in Brazil, **In: Soldagem & Inspeção**, v. 13, n. 2, p. 160-164, 2008.
- SCOTTI, A; MONTEIRO, L. S. Uma metodologia para parametrização do processo MIG/MAG CA, **Soldagem & inspeção**, vol.17, no.3, São Paulo [jul / set], 2012.

- SHARIF, L.; YAMANE, S.; SUGIMOTO, T.; OSHIMA, K. Intelligent Cooperative Control System in Visual Welding Robot. **IECON'01: The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. P. 439-443, 2001.
- SHI, Y. H., WANG, G. R., LI, G. J. Adaptive Robotic Welding System Using Laser Vision Sensing for Underwater Engineering. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL AND AUTOMATION, 2007, Guangzhou, China. **ICCA 2007**: IEEE, May 30 - June 1, p. 1213-1218, 2007.
- SHI, Y.; ZHANG, G.; MA, X. J.; GU, Y. F.; HUANG, J. K.; FAN, D. Laser-Vision-Based Measurement and Analysis of Weld Pool Oscillation Frequency in GTAW-P. **Welding journal**, v. 94, 176-187, 2015.
- SMITH, S. **The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing**. 2nd Edition, 1999.
- SOARES, L. F.; BRACARENSE, A. Q. Uso de oscilação magnética do arco elétrico para preenchimento de passe de raiz em juntas chanfradas de aços baixo carbono através do processo GMAW. **Proceedings of Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2010, Campina Grande. CONEM**. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, v. 1. p. 1-10, 2010.
- SONG, H. S.; ZHANG, Y.M. Three-dimensional reconstruction of specular surface for a Gas Tungsten Arc Weld Pool. **Meas. Sci. Technol**, v. 18, p. 3751–3767, 2007.
- SOUZA, D.; ROSSI, M. L.; KEOCHEGUERIAN, F.; NASCIMENTO, V. C.; VILARINHO, L. O.; SCOTTI, A. Influência da regulagem de parâmetros de soldagem sobre a estabilidade do processo MIG/MAG operando em curto-circuito, **Soldagem & inspeção. (Impr)**, vol.16, no.1, São Paulo, Jan. /Mar, 2011.
- SREERAJ, P.; KANNAN, T.; MAJI, S. Prediction and Control of Weld Bead Geometry in Gas Metal Arc Welding Process Using Simulated Annealing Algorithm. **International Journal of Computational Engineering Research**, v. 3, n. 1, p. 213-222, 2013.
- STARLING, C. M. D.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. Estudo da transferência de metal de um arame tubular básico. **Soldagem e Inspeção (Impresso)**, v. 9, n.4, p. 185-191, 2004.

- STEFANOVSKI, V. **Investigating the effects of Controllable Parameters on Cold-wire Gas Tungsten Arc Weld Bead Geometry.** A thesis presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Master of Applied Science In Mechanical Engineering, Waterloo, Ontario, Canada. (2012).
- STIVANELLO, M. E. Desenvolvimento de uma biblioteca para sistemas de visão estereoscópica para robótica móvel. **Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.** Florianópolis, Fevereiro, 2008.
- SUDNIK, V.; EROFEEV, V.; RICHTER, K; HEINS, K. Numerical modelling of the EBW process. **Proceeding of Joint 16th International Conference «Computer Technology in Welding and Manufacturing» & 3rd International Conference «Mathematical Modelling and Information Technologies in Welding and Related Processes»**, 6-8 June, Kiev, Ukraine, p. 295-300, 2006.
- SUGA, Y.; TAKENAKA, D.; HIBIKIYA, Y.; OGAWA, K. Automatic Control of Penetration by Monitoring Reverse Side Shape of Molten Pool in All Position Welding of Fixed Pipes. **Proceedings of the Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference**, Stavanger, Norway, June 17-22, 2001.
- THAMILARASI, P.; RAGUNATHAN, S.; MOHANKUMAR, E. Automation of Robot Welding using Machine Vision – A Review. **Proceedings of the International Conference on Communication and Computational Intelligence**, Kongu Engineering College, Perundurai, Erode, India, Dec. 27 – 29, p. 266-268, 2010.
- THOMSEN, J. S. Control of pulsed gas metal arc welding. **Int. J. Modelling, Identification and Control**, v. 1, n. 2, p. 115–125, 2006.
- TIAN, J.; GAO, M.; HE, Y. Intelligent Control of Welding Gun Pose for Pipeline Welding Robot Based on Improved Radial Basis Function Network and Expert System. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, v. 10, p. 115, 2013.
- TRAIIDIA, A. Multiphysics modelling and numerical simulation of GTA weld pools. **Doctoral thesis in mechanical engineering.** Ecole Polytechnique. Palaiseau, Francia, 2011.

- TSAI, C. H.; HOUB, K. H.; CHUANGA, H. T. Fuzzy control of pulsed GTA welds by using real-time root bead image feedback. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 176, p 158–167, 2006.
- VILARINHO, L. O.; LUCAS, B.; RAGHUNATHAN, S. Cuidados ao se extrair dimensões de fotografia/filmagem em soldagem, **Soldagem & inspeção. (Impr.)**, vol.14, no.4, São Paulo, [Oct/Dec], 2009.
- VILLANI, P.; MODENESI, P.; BRACARENSE, A. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**, 1.ed., Editora UFMG, Belo Horizonte, Brasil, 2005.
- VON ZUBEN, F. J., Controle Robusto, Controle Adaptativo e Controle Inteligente, **Baseado em notas de aula da disciplina Tópicos Avançados: Controle Robusto, Controle Adaptativo e Controle Inteligente**, DCA/FEEC/Unicamp, 2000.
- WANG, J. J.; LIN, T.; CHEN, S. B. Obtaining weld pool vision information during aluminium alloy TIG welding. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v. 26, n. 03, p. 219-227, Aug. 2005.
- WANG, J. F.; WANG, W. Y.; CHEN, S. B. Inspection of welding pool height from shading in pulsed GTAW with wire filler. **Industrial Robot: An International Journal**, v. 36, n. 3, p. 270–276, 2009.
- WANG, L. L.; LU, F. G.; CUI, H. C.; TANG, X. H. Investigation of molten pool oscillation during GMAW-P process based on a 3D model. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 47, n. 46, 2014.
- WANG, W.; CHEN, S.; LI, W. Rough Set-Based Model for Penetration Control of GTAW. Robotic Welding, **Intelligence and Automation. Lecture Notes in Electrical Engineering**, v. 88, p. 211-218, 2011.
- WANG, Z. An Imaging and Measurement System for Robust Reconstruction of Weld Pool During Arc Welding. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 62, n. 8, p. 5109 – 5118, 2015.
- WANG, Z.; ZHANG, Y. M.; WU, L. Measurement and Estimation of Weld Pool Surface Depth and Weld Penetration in Pulsed Gas Metal Arc Welding. **Welding Journal**, p. 117-126, June 2010.

- WANG, Z.; ZHANG, Y.; WU, L. Predictive Control of Weld Penetration in Pulsed Gas Metal Arc Welding. **Robotic Welding, Intelligence and Automation. Lecture Notes in Electrical Engineering**, v. 88, p. 263-269, 2011.
- WANG, Z.; ZHANG, Y.; WU, L. Adaptive interval model control of weld pool surface in pulsed gas metal arc welding. **Automatica**, v. 48, n. 01, p. 233–238, Jan. 2012.
- WEIMAN, C. Fundamentals of welding. **In: American Welding Society Handbook**, Vol. 2, Florida, 1981.
- WESKA, J.S. A Survey of Thresholding Selection Techniques. **Computer Graphics and Image Processing**, v. 7, n. 2, p. 259-265, 1978.
- WU, C.S.; GAO, J.Q. Vision-based neuro-fuzzy control of weld penetration in gas tungsten arc welding of thin sheets. **Proceedings of Int. J. Modelling, Identification and Control**, v. 1, n. 2, p. 126–132, 2006.
- WU, J.; CHEN, S. B. Software System Designs of Real-Time Image Processing of Weld Pool Dynamic Characteristics. **Robotic Welding, Intelligence and Automation. Proceedings of Lecture Notes in Control and Information Sciences**, Volume 362, p 303-309, 2007.
- XIAO, Z. Research on a Trilines Laser Vision Sensor for Seam Tracking in Welding. **Intelligence and Automation. Lecture Notes in Electrical Engineering**. Volume 88, p 139-144, 2011.
- XIONG, J.; ZHANG, G. Online measurement of bead geometry in GMAW-based additive manufacturing using passive vision. **Measurement Science and Technology**, v. 24, n. 11, p. 1-7, Nov. 2013.
- XIONG, J., ZHANG, G., QIU, Z., LI, Y. Vision-sensing and bead width control of a single-bead multi-layer part: material and energy savings in GMAW-based rapid manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v. 41, p. 82-88, Feb. 2013.
- XU, D.; WANG, L.; TAN, M. Image Processing and Visual Control Method for Arc Welding Robot. **Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics**, August 22 - 26, Shenyang, China, p. 727-732, 2004.

- XU, W. H., LIN, S. B., FAN, C. L. Prediction and optimization of weld bead geometry in oscillating arc narrow gap all-position GMA welding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 79, n. 1, p. 183-196, 2015.
- XU, Y.; KONG, X.; CHEN, S. An Optimal Design of Multifunctional Vision Sensor System for Welding Robot. Intelligence and Automation. **Proceedings of Lecture Notes in Electrical Engineering**, Volume 88, 2011, pp 145-152.
- XU, Y.; YU, H.; ZHONG, J.; LIN, T.; CHEN, S. Real-time seam tracking control technology during welding robot GTAW process based on passive vision sensor. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 212, n. 08, p. 1654–1662, Aug. 2012.
- YAN, Y.; ZHANG, G.; WUN, L. Simulation and controlling for weld shape process in P-GMAW based on fuzzy logic. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHATRONICS AND AUTOMATION, Beijing, China. **ICMA 2011: IEEE**, Aug. 7-10, p. 2078-2082, 2011.
- YANG, C.; CHEN, S. Survey on Modeling and Controlling of Welding Robot Systems Based on Multi-agent. **Robotic Welding, Intelligence and Automation. Lecture Notes in Electrical Engineering**, v. 88, p. 107-113, 2011.
- YIN, Z.; YUAN, X.; ZHANG, G.; ZHAO, H. Research on Structured Light 3D Vision in the Remanufacturing System based on Robotic Arc Welding. **Proceedings of the 10<sup>th</sup> World Congress on Intelligent Control and Automation**, July 6-8, Beijing, China, 2012.
- YU, S.; YUYAO, Z.; DING, F.; JIANHONG, C. Development of a Visual-Based Welding Pool Width Control System for Al-P-MIG Welding Process. **Robotic Welding, Intelligence and Automation. Lecture Notes in Control and Information Sciences**, v. 362, p. 267-273, 2007.
- ZHANG, G. J.; CHEN, S. B.; WU, L. Intelligent Control of Pulsed GTAW with Filler Metal. **Welding Journal**, p. 9-16, Jan. 2005.
- ZHANG, J.; WALCOTT, B. L. Adaptive Interval Model Control of Arc Welding Process. **IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY**, v. 14, n. 6, p. 1127-1134, 2006.

- ZHANG, W.; WANG, X. W.; ZHANG, Y.M. Analytical real-time measurement of a three-dimensional weld pool surface. **Meas. Sci. Technol**, v. 24, p. 18, 2013.
- ZHANG, W. J.; ZHANG, X.; ZHANG, Y. M., Robust pattern recognition for measurement of three dimensional weld pool surface in GTAW. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 26, n. 4, p. 659–676, 2015.
- ZHANG, W. J.; XIAO, J.; ZHANG, Y. M. A mobile sensing system for real-time 3D weld pool surface measurement in manual GTAW. **Measurement Science and Technology**, Volume 27, Number 4, Feb, 2016.
- ZHANG, Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration. **IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence**, v. 22, n. 11, November, p. 1330-1334, 2000.
- ZHAO, C.; RICHARDSON, I.M.; KENJERES, S.; KLEIJIN, C.R.; SALDI, Z. A stereo vision method for tracking particle flow on the weld pool surface. **Journal of Applied Physics**, v. 105, 8 p. June 2009.
- ZHAO, C. **Measurements of fluid flow in weld pools**. Delft, Netherlands. PhD thesis of Delft University of Technology, 2011.
- ZHAO, D. B.; CHEN, S. B.; WU, L.; DAI, M.; CHEN, Q. Intelligent Control for the Shape of the Weld Pool in Pulsed GTAW with Filler Metal. **Welding Journal**, p. 253-260, Nov. 2001.
- ZHEN Y., Z.; WANG, J.; CHEN, S. Feature Selection of Arc Acoustic Signals Used for Penetration Monitoring. **Robotic Welding, Intelligence and Automation. Lecture Notes in Electrical Engineering**, v. 88, p. 203-210, 2011.