

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**USO DE AGENTES INTELIGENTES NO CONTROLE
SIMULTÂNEO DA LARGURA E DO REFORÇO DOS
CORDÕES DE SOLDA NO PROCESSO GMAW-S**

JESÚS EMILIO PINTO LOPERA

ORIENTADOR: SADEK CRISÓSTOMO ABSI ALFARO

TESE DE DOUTORADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS

PUBLICAÇÃO: ENM.TD – 95/16

BRASÍLIA/DF: MARÇO – 2016

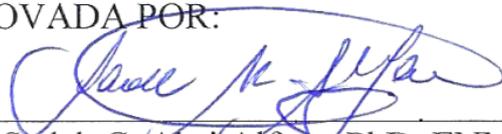
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**USO DE AGENTES INTELIGENTES NO CONTROLE SIMULTÂNEO
DA LARGURA E DO REFORÇO DOS CORDÕES DE SOLDA NO
PROCESSO GMAW-S**

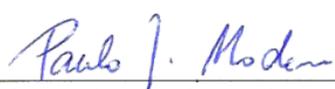
JESÚS EMILIO PINTO LOPERA

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

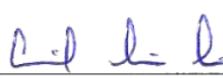
APROVADA POR:



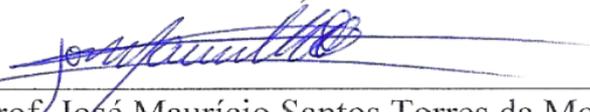
Prof. Sadek C. Absi Alfaro, PhD, ENM/UnB
(Orientador)



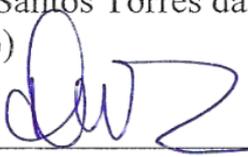
Prof. Paulo José Modenesi, PhD, DEMEC/UFMG
(Examinador Externo)



Prof. Louriel Oliveira Vilarinho, DSc, FEMEC/UFU
(Examinador Externo)



Prof. José Maurício Santos Torres da Motta, PhD, ENM/UnB
(Examinador Interno)



Prof. José Alfredo Ruiz Vargas, Dr, ENE/UnB
(Examinador Interno)

BRASÍLIA/DF, MARÇO DE 2016

FICHA CATALOGRÁFICA

LOPERA, JESÚS EMILIO PINTO

Uso de Agentes Inteligentes no Controle Simultâneo da Largura e do Reforço dos Cordões de Solda no Processo GMAW-S. [Distrito Federal] 2016.

xvii, 159p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Doutor, Sistemas Mecatrônicos, 2016). Tese de Doutorado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Cordões de Solda no Processo GMAW 2. Monitoramento da Geometria
3. Controle da Geometria 4. Agentes Inteligentes

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LOPERA, J. E. P. (2016). Uso de Agentes Inteligentes no Controle Simultâneo da Largura e do Reforço dos Cordões de Solda no Processo GMAW-S. Tese de Doutorado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.TD/16, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 159p.

CESSÃO DE DEREITOS

AUTOR: Jesús Emilio Pinto Lopera

TÍTULO: Uso de Agentes Inteligentes no Controle Simultâneo da Largura e do Reforço dos Cordões de Solda no Processo GMAW-S

GRAU: Doutor

ANO: 2016

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.

Jesús Emilio Pinto Lopera
SCLN 407 Bloco A, Sala 206
70.855-510 – Brasília – DF – Brasil.

*Dedicado aos meus pais,
Ana Tulia e Jesús Emilio*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro; ao meu orientador, Professor Sadek Absi Alfaro, pela amizade, orientação e confiança; à Edna M. Moncayo Torres, Jorge A. Girón Cruz e Antonio Marrocos pelo apoio incondicional no laboratório; à Gloria Liliana Lopez por toda uma vida compartilhada.

RESUMO

USO DE AGENTES INTELIGENTES NO CONTROLE SIMULTÂNEO DA LARGURA E DO REFORÇO DOS CORDÕES DE SOLDA NO PROCESSO GMAW-S

Autor: Jesús Emilio Pinto Lopera.

Orientador: Sadek C. Absi Alfaro.

Programa de Pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos.

Brasília, Março de 2016.

O processo de soldagem GMAW é um dos mais utilizado na produção industrial, devido, entre outras características, a seu alto grau de automação e a vantagem de se poder utilizar em diversas configurações com a maioria dos metais e ligas comerciais existentes. No caso da geometria dos cordões de solda no processo GMAW, diferentes pesquisas têm sido encaminhadas ao controle dos parâmetros operacionais que garantam as características geométricas requeridas, entre as mais importantes, a largura, o reforço e a penetração. Atualmente, diferentes modelos baseados em modelamento empírico ou em inteligência artificial são utilizados para controlar um parâmetro geométrico à vez. Este trabalho propõe uma estratégia que, independente de modelos predefinidos do processo, permite controlar simultaneamente a largura e o reforço dos cordões de solda no processo de soldagem GMAW no modo de transferência metálica por curto-circuito (GMAW-S). O controlador proposto é baseado em agentes inteligentes focados diretamente nas medições de largura e reforço dos cordões de solda. O monitoramento dos parâmetros geométricos é realizado em tempo real utilizando uma única câmera e diferentes metodologias de processamento digital de imagens. A avaliação da estabilidade do processo é realizada em tempo real e emprega-se para sair das regiões de instabilidade nas quais possa incorrer o processo durante a etapa de controle. A metodologia de monitoramento é avaliada como satisfatória utilizando o teste “*t*” para diferentes combinações de parâmetros de entrada. O tempo de processamento de cada imagem não supera os 3 *ms*, considerando-se adequado visando etapas de controle com uma taxa de amostragem de 100 Hz. Os resultados experimentais mostram que a implementação da estratégia de controle proposta é viável e consegue atingir simultaneamente diferentes valores de referência de largura e reforço dos cordões de solda.

ABSTRACT

INTELLIGENT AGENTS FOR SIMULTANEOUSLY CONTROL OF WIDTH AND HEIGHT OF WELD BEADS OF GMAW-S PROCESS

Author: Jesús Emilio Pinto Lopera.

Advisor: Sadek C. Absi Alfaro.

Programa de Pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos.

Brasília, March 2016

The GMAW process is widely used in industry due to, among others, its easier automation and high productivity. In the case of weld bead geometry in GMAW processes, different researches have been conducted to control operating parameters and to ensure required geometrical characteristics, among the most important: the width, the height and the penetration. Currently, different models, based on empirical modeling or artificial intelligence methodologies, are used to control individual geometric parameters. This work proposes a strategy that, regardless of predefined models, can simultaneously control the width and the height of the weld beads in GMAW-S process. The proposed control system is based on intelligent agents focus on measurements of the weld bead width and height. The geometric parameters monitoring is performed in real time using a single camera and different methods of digital image processing. The evaluation of process stability is performed in real time and employed to avoid the regions of instability in which may incur this process during the control stage. The monitoring methodology is assessed as satisfactory using the “t” test for different combinations of input parameters. The time of the image processing does not exceed 3 ms for each image and is considered appropriate to control steps, which use a 100 Hz sampling rate. The experimental results show that the implementation of the proposed control strategy is feasible in systems control without predefined model, achieving different width and height reference bead values.

SUMARIO

1– INTRODUÇÃO.....	1
1.1 – MOTIVAÇÃO DO TRABALHO.....	2
1.2 – OBJETIVOS.....	4
1.2.1 – Objetivo geral.....	4
1.2.2 – Objetivos específicos.....	4
1.3 – ESTRUTURA DO TRABALHO.....	5
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 – SOLDAGEM GMAW.....	7
2.1.1 – Modos de transferência metálica no processo GMAW.....	8
2.1.2 – Transferência por curto-circuito (GMAW-S).....	9
2.1.3 – Parâmetros de entrada e geometria do cordão de solda.....	11
2.1.3.1 – Tensão do arco.....	13
2.1.3.2 – Velocidade de alimentação do arame.....	14
2.1.3.3 – Velocidade de soldagem.....	14
2.1.4 – Estabilidade no processo GMAW-S.....	15
2.1.4.1 – Índices de estabilidade.....	17
2.2 – TRANSFORMAÇÃO PROJETIVA.....	20
2.2.1 – Coordenadas homogêneas.....	21
2.2.2 – Homografia 2D.....	22
2.3 – TÓPICOS ESPECIAIS EM PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS.....	25
2.3.1 – Imagem digital.....	26
2.3.2 – Pré-processamento da imagem.....	27
2.3.3 – Limiarização.....	29
2.3.4 – Rotulação.....	30
2.4 – AGENTES INTELIGENTES.....	31
2.5 – TÓPICOS EM CONTROLE.....	35
3 - ESTADO DA ARTE.....	38
3.1 – MONITORAMENTO DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS.....	38
3.1.1 – Sistemas de luz estruturada.....	40

3.1.1.1 – Triangulação laser.....	40
3.1.1.2 – Padrões de luz estruturada.....	42
3.1.2 – Sistemas para ver a poça de fusão.....	47
3.1.2.1 – Sistemas de visão com iluminação externa.....	47
3.1.2.2 – Sistemas de visão sem iluminação externa.....	49
3.1.2.3 – Sistemas de visão estereoscópica.....	58
3.1.3 – Calibração dos sistemas de visão.....	59
3.2 – MODELAGEM DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS.....	61
3.2.1 – Modelos estatísticos.....	62
3.2.2 – Sistemas baseados em inteligência artificial.....	63
3.2.3 – Modelagem numérica.....	63
3.3 – CONTROLE DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS.....	64
3.4 – SUMÁRIO DO CAPÍTULO E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	66
4 – PROPOSTA METODOLÓGICA PARA O MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS.....	70
4.1 – EQUIPAMENTO E BANCADA EXPERIMENTAL.....	70
4.2 – SISTEMA DE VISÃO.....	72
4.2.1 – Sistemas de aquisição de imagens.....	72
4.2.2 – Metodologia de calibração.....	75
4.2.3 – Processamento das imagens e medição dos parâmetros geométricos.....	78
4.2.3.1. Medição da largura.....	81
4.2.3.2 – Medição do reforço.....	82
4.3 – AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA DE MEDIÇÃO.....	84
5 – MODELAGEM EMPÍRICA E CONTROLE DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS.....	97
5.1 – CONTROLE BASEADO NA TENSÃO E NA VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO DO ARAME.....	97
5.2 – CONTROLE BASEADO NA VELOCIDADE DE SOLDAGEM E NA VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO DO ARAME.....	108

6 – CONTROLE DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS SEM MODELO PREDEFINIDO.....	119
6.1 – REGRAS DE PRODUÇÃO.....	120
6.2 – MÁQUINA DE INFERÊNCIA.....	123
7 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	130
8 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	135
7.1 – CONCLUSÕES.....	135
7.2 – TRABALHOS FUTUROS.....	136
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	138

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Sequencia de processamento de usado no sistema de triangulação laser (adaptado de Torres, 2013).....	41
Tabela 3.2. Tempo de processamento indicado por diferentes autores para o monitoramento de parâmetros geométricos dos cordões de solda.....	69
Tabela 4.1. Média amostral (μ) e desvio padrão (s) da largura dos cordões, medidos com o sistema de visão proposto e com o scanner 3D para cada ponto de trabalho.....	93
Tabela 4.2. Média amostral (μ) e desvio padrão (s) do reforço dos cordões, medidos com o sistema de visão proposto e com o scanner 3D para cada ponto de trabalho.....	94
Tabela 4.3. Teste t de Welch calculado para medições de largura e reforço.....	95
Tabela 5.1. Planejamento experimental e respostas para a modelagem baseada na velocidade de alimentação do arame e na tensão.....	99
Tabela 5.2. Níveis codificados e valões correspondentes para o planejamento composto central de três variáveis.....	109

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Componentes e distâncias principais no processo de soldagem GMAW (adaptado de Cayo, 2013)	8
Figura 2.2. Mapas esquemáticos dos modos naturais de transferência metálica no processo GMAW em função da corrente e da tensão (adaptado de Scotti e Ponomarev, 2008 e Scotti <i>et al.</i> , 2012).....	8
Figura 2.3. Efeito das Forças de Lorentz (F_L) no processo de empescoçamento. As setas dentro do arame indicam o fluxo da corrente através do arame-eletrodo (sentido convencional com eletrodo '+') (adaptado de Scotti e Ponomarev, 2008).....	10
Figura 2.4. Oscilogramas de corrente e tensão no processo GMAW-S (adaptado de Bálamo <i>et al.</i> , 2000).....	11
Figura 2.5. Características geométricas do cordão de solda.....	13
Figura 2.6. Transformações projetivas. (a) Projeção paralela; (b) projeção perspectiva.....	20
Figura 2.7. Relacionamento entre pontos dos planos A e A' . Com X'' , Y'' e Z'' , coordenadas no mundo real. X' e Y' , coordenadas num plano qualquer no mundo real. X e Y , coordenadas em outro plano, que pode ser considerado como o plano-imagem.....	22
Figura 2.8. Passos fundamentais em processamento de imagens digitais (adaptado de Gonzales e Woods, 2007).....	25
Figura 2.9. Representação de: (a) amostragem da imagem, (b) quantização em níveis de cinza (adaptado de Castleman, 1996).....	27
Figura 2.10. Digitalização de uma imagem (adaptado de Gonzales e Woods, 2002)....	27
Figura 2.11. Aplicação da técnica de limiarização. (a) Imagem original; (b) com limiar $T = 100$; (c) com limiar $T = 150$; (d) com limiar $T = 200$ (Lopera, 2010).....	30

Figura 2.12. Agente Reflexivo (adaptado de Russell e Norvig, 2003).....	34
Figura 2.13. Agente reflexivo baseado em modelo (adaptado de Russell e Norvig, 2003)	34
Figura 2.14. Agente orientados a objetivos (adaptado de Russell e Norvig, 2003)....	35
Figura 2.15. Agente baseados em utilidade (adaptado de Russell e Norvig, 2003)....	35
Figura 2.16. Esquema geral dos sistemas de controle. (a) Em malha aberta; (b) em malha fechada.....	36
Figura 2.17. Esquema de um processo de controle especialista (Traduzido e adaptado de Passino, 2001).....	37
Figura 3.1. Parâmetros utilizados por Wo e Gao (2006) para inferir penetração na poça de fusão. W: largura; L/2: metade do comprimento da poça; α : ângulo da cauda; S: área entre a cauda e a metade do comprimento, compreendida entre os pontos ACODB (Wo e Gao, 2006).....	39
Figura 3.2. Princípio de funcionamento da triangulação laser. Diferentes alturas produzem variações na detecção (traduzido e adaptado de Huang e Kovacevic, 2012).....	40
Figura 3.3. Ilustração do funcionamento da triangulação laser (Adaptado de Cruz, 2014).....	41
Figura 3.4. Uso de padrão de linhas para determinar geometria da poça de fusão (traduzido e adaptado de Kovacevic e Zhang, 1997).....	43
Figura 3.5. Uso de padrão de linhas para determinar geometria da poça de fusão com tela de projeção (traduzido e adaptado de Ma e Zhang, 2011).....	44
Figura. 3.6. Sequência de detecção de gotas no processo GMAW-P com padrão de linhas paralelas (Wang <i>et al.</i> , 2011a).....	44
Figura 3.7. Padrão de linhas cruzadas. (a) raios de luz laser incidindo na chapa plana; (b) raios de luz refletidos da poça durante o processo de soldagem. (Ma <i>et al.</i> 2012).....	45
Figura 3.8. Padrão de pontos. (a) Imagem dos pontos refletidos pela poça; (b) pontos reconhecido pelo software de processamento; (c) padrão original sem deformação (Song e Zhang W.J., 2007b).....	45
Figura 3.9. Padrão de pontos utilizado em soldagem orbital. (a) bancada experimental; (b) imagem de pontos refletidos pela poça (traduzido de Zhang W.J. <i>et al.</i> 2013).....	45
Figura 3.10. Exemplo de variações no padrão de luz refletido quando uma gota	

atinge a poça de fusão em um processo GMAW pulsado. Taxa de aquisição das imagens: 800 <i>fps</i> . Comprimento de onda do laser: 670 <i>nm</i> ; potência: 375 <i>mW</i> (Ma <i>et al.</i> 2012).....	46
Figura 3.11. Imagens adquiridas com iluminação externa de diodos laser. (a) Processo GTAW e (b) Processo GMAW, com tempo de exposição de 10 μ s (Vilarinho <i>et al.</i> , 2010); (c) Processo GMAW, com tempo de exposição de 100 μ s (Mota <i>et al.</i> , 2013).....	48
Figura 3.12. Posição das câmeras para medir (a) largura e (b) reforço com duas câmeras (Cruz, 2014).....	50
Figura 3.13. Sequência de processamento para medir a altura do reforço. Na sequencia: imagem original, imagem limiarizada, delimitação e localização dos pontos de referencia (adaptado de Cruz, 2014).....	51
Figura 3.14. Processamento de imagens para medir a largura do cordão. (a) imagem original; (b) imagem limiarizada; (c) ponto de referência para medir a largura a partir da identificação da região de influencia do arco (adaptado de Cruz, 2014).....	51
Figura 3.15. Esquema utilizado para medir a largura e o reforço dos cordões de solda com duas câmeras (Traduzido de Xiong e Zhang, 2013).....	52
Figura 3.16. Imagens utilizadas para medir largura (a) e reforço (b) com o uso de duas câmeras (Xiong e Zhang, 2013).....	52
Figura 3.17. Exemplo do detector de bordas utilizado por Wu <i>et al.</i> (2003). (a) Imagem original; (b) as bordas da poça de fusão encontradas pelo detector são ressaltadas com um nível de cinza mais escuro (Wu <i>et al.</i> , 2003).....	53
Figura 3.18. Esquema utilizado para o posicionamento da câmera em relação ao metal base e o cordão de solda (Zhang <i>et al.</i> , 2006)	53
Figura 3.19. Esquema utilizado para realizar a reconstrução tridimensional da poça de fusão. (a) modelo geométrico da poça de fusão no plano da imagem (2D); (b) transformação do modelo para a representação 3D (Zhang <i>et al.</i> , 2006).....	54
Figura 3.20. Metodologia usada por Zhang <i>et al.</i> (2006) para delimitar as regiões de interesse. (a) Imagem original; (b) localização dos postos A' e B' para	

medir a largura; (c) extração de bordas; (d) correção de ruído com transformada de Hough (Zhang <i>et al.</i> , 2006).....	56
Figura 3.21. Distribuição dos níveis de cinza na coluna da Figura 3.16(b) que tem como referencia os pontos “a”, “b”, “c”, e “d” (Traduzido de Zhang <i>et al.</i> , 2006).....	57
Figura 3.22. Imagem original com superposição de parâmetros encontrados (a) e reconstrução tridimensional (b) (Zhang <i>et al.</i> , 2006).....	57
Figura 3.23. Exemplo de busca e correlação de pontos de referência em imagens de estereoscopia (traduzido de Zhao <i>et al.</i> , 2009).....	58
Figura 3.24. Reconstrução tridimensional a partir de duas imagens de uma cena. (a) imagem esquerda; (b) imagem direita; (c) reconstrução 3D (traduzido de Mnich, 2004).....	59
Figura 3.25. Uso de papel milimétrico para calibrar o sistema de visão (Xu <i>et al.</i> , 2012).....	60
Figura 3.26. Uso de papel milimétrico para calibrar a altura do reforço o sistema de visão (Xiong e Zhang, 2013).....	60
Figura 3.27. Uso de padrão circular para calibrar o sistema de visão (Liu <i>et al.</i> , 2013).....	61
Figura 3.28. Tópicos envolvidos no monitoramento dos parâmetros geométricos dos cordões de solda.....	68
Figura 4.1. Bancada experimental.....	71
Figura 4.2. Imagens obtidas utilizando-se a metodologia de Zhang <i>et al.</i> (2006), mudando unicamente a distância de contato bico-peça. (a) DBCP = 18 mm; (b) DBCP = 15 mm; (c) DBCP = 12 mm.....	73
Figura 4.3. Esquema da proposta utilizada para monitorar a largura e o reforço dos cordões de solda com um sistema monocular.....	74
Figura 4.4. Imagem adquirida durante o processo de solda com a proposta utilizada para monitorar os parâmetros geométricos, DBCP = 12 mm.....	74
Figura 4.5. Ilustração dos objetos de interesse numa imagem adquirida com a nova proposta utilizada para monitorar a largura e reforço dos cordões de solda (off-line). Diâmetro do arame: 1.2 mm.....	75
Figura 4.6. Ilustração dos padrões utilizados para calibrar cada plano. Papel milimétrico para o plano X'-Y' e bloco padrão para o plano X'-	

Z'	76
Figura 4.7. Imagem off-line utilizada para ilustrar a localização do ponto de menor temperatura na poça de fusão. Ponto utilizado como referência para medir o reforço do cordão nas imagens adquiridas.....	77
Figura 4.8. Região preestabelecida para medir o fator de iluminação.....	80
Figura 4.9. Localização do ponto de referência para medir a largura na borda da poça de fusão.....	82
Figura 4.10. Localização do ponto de referência para medir o reforço.....	83
Figura 4.11. Exemplo de explosão apresentada durante processo de soldagem.....	84
Figura 4.12. Grafico de residuos ao longo do eixo Y' com valores de $X' = 0$ mm.....	85
Figura 4.13. Grafico de residuos ao longo do eixo X' com valores de $Z' = 2$ mm	85
Figura 4.14. Pontos de trabalho para avaliar o processo de medição de largura e reforço.....	86
Figura 4.15. Largura vs. Tempo de aquisição. Tensão: 21 V; Velocidade de alimentação do arame: 6 m/min.....	87
Figura 4.16. Reforço vs. Tempo de aquisição. Tensão: 21 V; Velocidade de alimentação do arame: 6 m/min.....	87
Figura 4.17. Densidade de probabilidade vs. Largura. Tensão: 21 V; Velocidade de alimentação do arame: 6 m/min.....	88
Figura 4.18. Densidade de probabilidade vs. Reforço. Tensão: 21 V; Velocidade de alimentação do arame: 6 m/min.....	88
Figura 4.19. Reconstrução 3D do cordão de solda. Tensão: 21 V; Velocidade de alimentação do arame: 6 m/min.....	88
Figura 4.20. Medição da largura para o ponto Tensão: 21 V; Velocidade de alimentação do arame: 6 m/min. Comparação das amostras adquiridas pelo sistema de visão com as adquiridas com o scanner. Media amostral para o sistema de visão: 6,79 mm.....	89
Figura 4.21. Medição do reforço para o ponto Tensão: 21 V; Velocidade de alimentação do arame: 6 m/min. Comparação das amostras adquiridas pelo sistema de visão com as adquiridas com o scanner. Media amostral para o sistema de visão: 2,15 mm.....	89
Figura 4.22. Medição da largura para o ponto Tensão: 19 V; Velocidade de alimentação do arame: 4,5 m/min. Comparação das amostras	

adquiridas pelo sistema de visão com as adquiridas com o scanner. Media amostral para o sistema de visão: 5,69 mm.....	90
Figura 4.23. Medição do reforço para o ponto Tensão: 19 V; Velocidade de alimentação do arame: 4,5 m/min. Comparação das amostras adquiridas pelo sistema de visão com as adquiridas com o scanner. Media amostral para o sistema de visão: 1,69 mm.....	90
Figura 4.24. Medição da largura para o ponto Tensão: 23 V; Velocidade de alimentação do arame: 4,5 m/min. Comparação das amostras adquiridas pelo sistema de visão com as adquiridas com o scanner. Media amostral para o sistema de visão: 6,87 mm.....	91
Figura 4.25. Medição do reforço para o ponto Tensão: 23 V; Velocidade de alimentação do arame: 4,5 m/min. Comparação das amostras adquiridas pelo sistema de visão com as adquiridas com o scanner. Media amostral para o sistema de visão: 1,67 mm.....	91
Figura 4.26. Medição da largura para o ponto Tensão: 19 V; Velocidade de alimentação do arame: 7,5 m/min. Comparação das amostras adquiridas pelo sistema de visão com as adquiridas com o scanner. Media amostral para o sistema de visão: 6,23 mm.....	92
Figura 4.27. Medição do reforço para o ponto Tensão: 19 V; Velocidade de alimentação do arame: 7,5 m/min. Comparação das amostras adquiridas pelo sistema de visão com as adquiridas com o scanner. Media amostral para o sistema de visão: 2,87 mm.....	92
Figura 4.28. Medição da largura para o ponto Tensão: 23 V; Velocidade de alimentação do arame: 7,5 m/min. Comparação das amostras adquiridas pelo sistema de visão com as adquiridas com o scanner. Media amostral para o sistema de visão: 8,16 mm.....	93
Figura 4.29. Medição do reforço para o ponto Tensão: 23 V; Velocidade de alimentação do arame: 7,5 m/min. Comparação das amostras adquiridas pelo sistema de visão com as adquiridas com o scanner. Media amostral para o sistema de visão: 2,39 mm.....	93
Figura 4.30. Tempo de processamento de imagens utilizado no monitoramento da largura e do reforço no ponto de trabalho tensão 21 V, velocidade de alimentação do arame 6 m/min.....	96
Figura 5.1. Planejamento composto central em níveis codificados para duas	

variáveis.....	98
Figura 5.2.Superfície de resposta para o modelo de segunda ordem da largura baseado na tensão e na velocidade de alimentação do arame.....	100
Figura 5.3.Superfície de resposta para o modelo de segunda ordem do reforço baseado na tensão e na velocidade de alimentação do arame.....	100
Figura 5.4. Ilustração do processo de medição do ângulo num sinal adquirido.....	104
Figura 5.5.Processo de controle de largura e reforço. Tensão inicial: 20 V; velocidade de alimentação do arame inicial: 5 <i>m/min</i> ; velocidade de soldagem: 10 <i>mm/s</i> ; Largura de referencia: 6,3 <i>mm</i> ; reforço de referência: 1,9 <i>mm</i> . Sinais adquiridos: (a) Largura; (b) Reforço; (c) Tensão; (d) Velocidade de alimentação do arame.....	105
Figura 5.6.Processo de controle de largura e reforço. Tensão inicial: 21 V; velocidade de alimentação do arame inicial: 6 <i>m/min</i> ; velocidade de soldagem: 10 <i>mm/s</i> ; Largura de referencia: 7 <i>mm</i> ; reforço de referência: 1,7 <i>mm</i> . Sinais adquiridos: (a) Largura; (b) Reforço; (c) Tensão; (d) Velocidade de alimentação do arame.....	106
Figura 5.7.Processo de controle de largura e reforço. Tensão inicial: 23,8 V; velocidade de alimentação do arame inicial: 6 <i>m/min</i> ; velocidade de soldagem: 10 <i>mm/s</i> ; Largura de referencia: 7,5 <i>mm</i> ; reforço de referência: 2 <i>mm</i> . Sinais adquiridos: (a) Largura; (b) Reforço; (c) Tensão; (d) Velocidade de alimentação do arame.....	107
Figura 5.8. Planejamento composto central em níveis codificados para três variáveis (x_1, x_2, x_3).....	108
Figura 5.9. Superfície de resposta do modelo de três variáveis da largura, em função da velocidade de alimentação do arame e da velocidade de soldagem, com tensão constante de 22V.....	111
Figura 5.10. Superfície de resposta do modelo de três variáveis de reforço, em função da velocidade de alimentação do arame e da velocidade de soldagem, com tensão constante de 22V.....	112
Figura 5.11. Processo de controle de largura e reforço. Tensão inicial: 21 V; velocidade de alimentação do arame inicial: 6 <i>m/min</i> ; velocidade de soldagem inicial: 8 <i>mm/s</i> ; Largura de referência: 6,5 <i>mm</i> ; reforço de referência: 2 <i>mm</i> . Sinais adquiridos: (a) Largura; (b) Reforço; (c) Velocidade de soldagem; (d) Velocidade de alimentação do arame; (e)	

Tensão; (f) IVcc.....	115
Figura 5.12. Processo de controle de largura e reforço. Tensão inicial: 21 V; velocidade de alimentação do arame inicial: 6 <i>m/min</i> ; velocidade de soldagem inicial: 8 <i>mm/s</i> ; Largura de referência: 9 <i>mm</i> ; reforço de referência: 3.5 <i>mm</i> . Sinais adquiridos: (a) Largura; (b) Reforço; (c) Velocidade de soldagem; (d) Velocidade de alimentação do arame; (e) Tensão; (f) IVcc.....	116
Figura 5.13. Processo de controle de largura e reforço. Tensão inicial: 21 V; velocidade de alimentação do arame inicial: 6 <i>m/min</i> ; velocidade de soldagem inicial: 8 <i>mm/s</i> ; Largura de referência: 6,5 <i>mm</i> ; reforço de referência: 3.5 <i>mm</i> . Sinais adquiridos: (a) Largura; (b) Reforço; (c) Velocidade de soldagem; (d) Velocidade de alimentação do arame; (e) Tensão; (f) IVcc.....	117
Figura 5.14. Parâmetros para medir o Índice de Vilarinho no experimento da Figura 5.13, entre os segundos 6 e 10. (a) Corrente; (b) Tensão; (c) Tempo de arco aberto; (d) Desvio padrão do tempo de arco aberto; (e) Tempo de curto-circuito; (f) Desvio padrão do tempo de curto-circuito; (g) IVcc.....	118
Figura 6.1. Fluxograma do algoritmo que comanda o controle da largura.....	121
Figura 6.2. Fluxograma do algoritmo que comanda o controle do reforço.....	121
Figura 6.3. Fluxograma do algoritmo de controle.....	122
Figura 6.4. Função exponencial baseado no erro e utilizada na maquina de inferência.....	124
Figura 6.5. Processo de controle de largura e reforço sem modelo predefinido. Tensão inicial: 21 V; velocidade de alimentação do arame inicial: 6 <i>m/min</i> ; velocidade de soldagem inicial: 8 <i>mm/s</i> ; Largura de referencia: 6,5 <i>mm</i> ; reforço de referência: 3.5 <i>mm</i> . Sinais adquiridos: (a) Largura; (b) Reforço; (c) Velocidade de soldagem; (d) Velocidade de alimentação do arame; (e) Tensão; (f) IVcc.....	125
Figura 6.6. Função sinusoidal baseado no erro e utilizada na maquina de inferência. (a) $\omega = 3$; (b) $\omega = 1.5$	126
Figura 6.7. Controle de largura e reforço sem modelo predefinido. Tensão inicial: 22 V; velocidade de alimentação do arame inicial: 5 <i>m/min</i> ; velocidade de soldagem inicial: 8 <i>mm/s</i> ; Largura de referência: 7 <i>mm</i> ; reforço de referência: 2.5 <i>mm</i> . Sinais adquiridos: (a) Largura; (b) Reforço; (c)	

	Velocidade de soldagem; (d) Velocidade de alimentação do arame; (e) Tensão; (f) IVcc.....	127
Figura 6.8.	Controle de largura e reforço sem modelo predefinido. Tensão inicial: 20 V; velocidade de alimentação do arame inicial: 6 <i>m/min</i> ; velocidade de soldagem inicial: 7 <i>mm/s</i> ; Largura de referência: 6 <i>mm</i> ; reforço de referência: 1.8 <i>mm</i> . Sinais adquiridos: (a) Largura; (b) Reforço; (c) Velocidade de soldagem; (d) Velocidade de alimentação do arame; (e) Tensão; (f) IVcc.....	128
Figura 6.9.	Controle de largura e reforço sem modelo predefinido. Tensão inicial: 22 V; velocidade de alimentação do arame inicial: 6 <i>m/min</i> ; velocidade de soldagem inicial: 8 <i>mm/s</i> ; Largura de referência: 8 <i>mm</i> ; reforço de referência: 2 <i>mm</i> . Sinais adquiridos: (a) Largura; (b) Reforço; (c) Velocidade de soldagem; (d) Velocidade de alimentação do arame; (e) Tensão; (f) IVcc.....	129
Figura 7.1.	Superfície de resposta do desvio padrão da largura encontrado na etapa experimental de modelagem para o controlador baseado na tensão e na velocidade de alimentação do arame.....	133
Figura 7.2.	Superfície de resposta do desvio padrão do reforço encontrado na etapa experimental de modelagem para o controlador baseado na tensão e na velocidade de alimentação do arame.....	133

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Abreviatura	Significado
AWS	<i>American Welding Society</i>
CMOS	<i>Complementary metal-oxide semiconductor</i>
DBCP	Distancia bico de contato-peça
DCI	<i>Dip Consistency Index</i>
FCAW	<i>Flux-Cored Arc Welding</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GMAW-P	<i>Gas Metal Arc Welding – Pulsed mode</i>
GMAW-S	<i>Gas Metal Arc Welding – Short Circuit Mode</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
PCC	Planejamento composto central
RMB	Símbolo monetário da moeda oficial da República Popular da China
SAW	<i>Submerged Arc Welding</i>
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i>
SVD	Decomposição em Valores Singulares
TI	<i>Transfer Index</i>
TSI	<i>Transfer Stability Index</i>

Símbolo	Significado
d	Diâmetro do arame-eletrodo
e_i	Resíduos
f_{cc}	Frequência de curto circuito
f_{ccmin}	Frequência mínima de curto-circuito
f_{ccmax}	Frequência máxima de curto-circuito
H	Matriz de homografia
IVcc	Índice de Vilarinho

k	Fator de multiplicação para estimar o diâmetro da gota
L_R	Valor da largura de referência
L_M	Valor da largura monitorada
N	Nitrogênio
Nd:YAG	<i>Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet</i>
P_{cc}	Período de curto circuito
R_R	Valor do reforço de referência
R_M	Valor do reforço monitorado
R^2 ajustado	Coefficiente de determinação múltipla ajustado
s	Desvio padrão
t	Teste t de Welch
T	Tensão
T_R	Limiar utilizado no processo de binarização para medir o reforço
T_{L_i}	Limiar utilizado no processo de binarização para medir a largura
t_{ab}	Tempo de arco aberto
t_{cc}	Tempo de curto-circuito
V_{Almt}	Velocidade de alimentação do arame
V_{Sold}	Velocidade soldagem
x_1^*, x_2^*	Saídas do controlador
x_{1_atual}, x_{2_atual}	Valores atuais das variáveis de controle
X'	Eixo no plano do metal de base ao longo da direção de soldagem
Y'	Eixo no plano do metal de base perpendicular à direção de soldagem
Z'	Eixo perpendicular ao plano do metal de base
θ	Ângulo entre a direção de soldagem e o eixo ótico da câmera
β	Ângulo entre o plano do metal base e o eixo ótico da câmera
α	Constante de proporcionalidade do controlador
μ	Média amostral
$\sigma_{t_{ab}}$	Desvio padrão do tempo de arco aberto
$\sigma_{t_{cc}}$	Desvio padrão do tempo de curto-circuito

1- INTRODUÇÃO

O processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) é referenciado como um dos mais utilizados na produção industrial devido à sua facilidade de automação e maior produtividade quando comparado, por exemplo, com processos de soldagem como GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) e SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*). O processo GMAW pode ser utilizado com a maioria dos metais comerciais e ligas tais como aços carbono, aços inoxidáveis, alumínio, cobre, titânio e ligas de níquel e, com uma escolha apropriada de parâmetros, estes materiais podem ser soldados em todas as posições de soldagem.

Como referem Kolahan e Heidari (2009), para cada produto derivado 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 entrada. Este processo de definição de parâmetros implica tempo e esforço de engenheiros e técnicos, que finalmente definem como parâmetros adequados aqueles que produzem resultados mais próximos aos requerimentos iniciais. Identificar a combinação apropriada de parâmetros que garantam as especificações técnicas requeridas 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.

Autores como Tay e Butler (1997) usando o processo GMAW, Kovacevic *et al.* (1996) e Esme *et al.* (2009) no processo GTAW, Datta *et al.* (2008) e Purohit e Digamber (2012) para o processo SAW (*Submerged Arc Welding*), afirmam que a qualidade de uma solda depende das características mecânicas e metalúrgicas da mesma que, por sua vez, dependem da geometria do cordão que está diretamente relacionada com os parâmetros utilizados no processo. Como explica Kumar (2011), em aplicações automatizadas, é fundamental o controle da geometria dos cordões devido a que propriedades como a resistência mecânica das soldas são definidas não só pela composição e microestrutura do metal, mas também pela forma do cordão.

Por outro lado, o estudo da geometria do cordão também é importante quando se precisa de requerimentos técnicos específicos em, por exemplo, processos de revestimento (Kannan e Yoganandh, 2009; Gomes *et al.*, 2012; Sreeraj *et al.*, 2013a), no estudo de custos numa

linha de produção (Oberg *et al.*, 2013), no controle e redução de desperdício de insumos (Xiong *et al.*, 2013), entre outros. Assim, e de acordo com Song e Zhang (2007a), observar a superfície da poça de fusão e medir os parâmetros geométricos do cordão de solda é um recurso importante para o desenvolvimento de máquinas de soldagem mais inteligentes, que permitirão interatuar com os parâmetros de interesse para produzir processos de soldagem mais práticos e confiáveis.

1.1 – MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

Concebido na década de 1920 e introduzido no mercado no final da década de 1940, a evolução do processo GMAW tem sido gradual, mas sobressaindo nas últimas décadas devido ao avanço da eletrônica e da informática, as quais possibilitaram consideráveis melhorias nas fontes de soldagem e a implementação de novas técnicas de monitoramento e controle. De forma geral, novos métodos e tecnologias mecanizadas e automatizadas têm sido desenvolvidos nos processos de soldagem e continuam evoluindo cada dia visando aumentar a produtividade, reduzir custos e fornecer soluções a necessidades como exigências de segurança e escassez de trabalho qualificado. Neste sentido, o “*China Welding Equipment Industry Report 2014-2017*” apresenta uma receita de \$RMB 41,18 bilhões na venda de equipamentos de soldagem no ano 2013, o que representava na época um incremento interanual de 19,49%, destacando um aumento do 8,39% no consumo de equipamentos automatizados, com uma tendência ao aumento na demanda durante os próximos anos.

Do ponto de vista do controle, os processos em malha fechada são uma das ferramentas mais importantes na automação da soldagem. No caso da geometria dos cordões de solda, este tipo de controle utiliza modelos que representam o seu comportamento através dos parâmetros operacionais do processo. Estes modelos em geral são derivados total ou parcialmente de técnicas estatísticas ou de inteligência artificial, comumente redes neurais e logica fuzzy, limitando cada processo de controle às variáveis utilizadas na concepção dos modelos. Em geral, e com suas limitações operacionais, este tipo de modelos e seus controladores derivados funcionam corretamente, o problema é devido a que mudanças nas variáveis fixas do processo forçam a realizar um novo modelamento.

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, independentemente de modelos predefinidos do processo de soldagem, permitam controlar os parâmetros geométricos dos cordões de solda em processos GMAW-S. A utilização de agentes inteligentes focados no monitoramento em tempo real dos parâmetros de interesse, neste caso largura e reforço, permitirá ao sistema emular a toma de decisões tais como as de um operário humano, além de permitir também recursos como a avaliação da estabilidade e do modo de transferência metálica do processo em tempo real a partir do monitoramento dos sinais elétricos. O monitoramento dos parâmetros geométricos sincronizado com os sinais elétricos confere ao sistema a possibilidade de adotar decisões próprias para sair de outros modos de transferência metálica ou de regiões de instabilidade em que possa entrar o processo durante a etapa de controle e das quais não teria informação antecipada sem um modelo preconcebido.

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. O sistema de monitoramento proposto neste trabalho, baseado num sistema de visão computacional com uma única câmera, permite medir simultaneamente a largura e o reforço dos cordões de solda, e utiliza uma metodologia de calibração de aplicação prática e robusta, o que permitirá uma adequada adaptação em futuros sistemas de soldagem automatizados na indústria. De forma geral, pode-se dizer que os sistemas de monitoramento simultâneo de largura e reforço implementados atualmente por outros autores, além de não ser focados no controle simultâneo de ambos os parâmetros, não apresentam uma metodologia de aplicação prática na indústria devido a problemas de obstrução de objetos, emprego de sistemas robustos de alinhamento, emprego de mais de uma câmera, problemas que ao final não permitem a sua adaptação ou aumentam significativamente os custos de implementação.

Objetivando estudar as variáveis e as estratégias de controle utilizadas pelos agentes propostos no controlador sem modelo predefinido, inicialmente este trabalho apresenta dois controladores independentes baseados em modelos estatísticos. O primeiro, baseado

na tensão do processo e na velocidade de alimentação do arame, e, o segundo, baseado na velocidade de alimentação do arame e na velocidade de soldagem. O critério para avaliar a estabilidade do processo neste trabalho é o conhecido como *Índice de Vilarinho de Regularidade da Transferência em Curto-Circuito*, IV_{cc} (Rezende *et al.*, 2010; Souza, 2010; Souza *et al.*, 2011; Rezende *et al.*, 2011), que relaciona o tempo de curto-circuito e de arco aberto com os seus respectivos desvios padrões e baseia-se na premissa de que pouca variação nos tempos de curto-circuito como de arco aberto geram estabilidade ao processo.

1.2 – OBJETIVOS

1.2.1 – Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um sistema baseado em agentes inteligentes que, independente de modelos do processo predefinidos, permita controlar simultaneamente a largura e o reforço dos cordões de solda em processos de soldagem GMAW no modo de transferência por curto-circuito.

1.2.2 – Objetivos específicos

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

- Desenvolver uma metodologia que permita medir a largura e o reforço dos cordões de solda em tempo real no modo de transferência por curto-circuito;
- Identificar uma metodologia que permita calibrar o sistema de visão computacional, de implementação prática e independente dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos do sistema;
- Implementar um sistema computacional para o cálculo do Índice de Vilarinho em tempo real;
- Comunicar o sistema de controle com os sinais elétricos do processo a fim de correlacioná-los diretamente com o IV_{cc} e a estabilidade do processo em tempo real;

- Modelar e implementar o controlador de largura e reforço baseado na tensão do processo e na velocidade de alimentação do arame;
- Modelar e implementar o controlador de largura e reforço baseado na velocidade de alimentação do arame e na velocidade de soldagem;
- Identificar as regras e a base de conhecimento que serão programadas nos agentes inteligentes utilizados no controlador sem modelo preconcebido;
- Selecionar as funções de inferência encarregadas de manipular as variáveis de controle no controlador sem modelo preconcebido;
- Programar os agentes inteligentes no controlador sem modelo preconcebido e validar o processo de controle.

1.3 – ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho divide-se da seguinte maneira:

- Capítulo 2: Revisão bibliográfica. Aborda-se aqui a fundamentação teórica básica para compreender os aspectos relacionados com o processo de soldagem GMAW por curto-circuito, a influência dos parâmetros operacionais sobre a geometria dos cordões de solda e o índice de estabilidade utilizado. Tratam-se também os conceitos relevantes ao método de calibração e às técnicas de processamento de imagens digitais utilizadas para monitorar a largura e o reforço dos cordões, assim como os fundamentos relacionados aos agentes inteligentes e seu uso nos processos de controle;
- Capítulo 3: Estado da arte. Aqui são expostas as pesquisas e metodologias relacionadas, primeiro, ao monitoramento dos parâmetros geométricos dos cordões de solda e, segundo, à modelagem e controle da geometria;
- Capítulo 4: Proposta metodológica para o monitoramento dos parâmetros geométricos. Apresenta-se aqui as metodologias utilizadas para calibrar o sistema de visão e para medir a largura e o reforço dos cordões de solda em tempo real;
- Capítulo 5: Modelagem empírica e controle dos parâmetros geométricos. Este capítulo descreve a metodologia utilizada para modelar empiricamente e controlar ao mesmo tempo o reforço e a largura dos cordões de solda. Este capítulo apresenta os resultados dos controladores e incorpora o Índice de Vilarinho para avaliar a estabilidade do processo em tempo real, determinando as ações de correção em caso de precisar;

- Capítulo 6. Controle dos parâmetros geométricos sem modelo predefinido. Apresentam-se as regras e as funções de inferência utilizadas pelos agentes inteligentes no controlador sem modelo predefinido. Apresentam-se também os resultados experimentais do controlador para diferentes conjuntos de parâmetros geométricos predefinidos;
- Capítulo 7. Conclusões e trabalhos futuros.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica referente aos temas envolvidos nesta pesquisa. Inicialmente é feita uma introdução aos processos de soldagem GMAW, ao modo de transferência por curto-circuito, à geometria dos cordões de solda, aos parâmetros envolvidos no processo e aos índices de estabilidade no processo GMAW-S. Em seguida é realizada uma revisão de conceitos que envolvem a metodologia de calibração utilizada e as noções básicas das técnicas de processamento de imagens digitais empregadas. Finalmente são apresentados os conceitos de agentes inteligentes e seu uso no controle de processos.

2.1 – SOLDAGEM GMAW

O processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) baseia seu funcionamento no calor imposto pelo arco elétrico mantido entre a ponta de um arame-eletrodo nu consumível e a peça a soldar. O arame-eletrodo é alimentado continuamente e a região de solda é protegida por uma atmosfera de gás inerte (comercialmente Ar e He) ou ativo (CO₂) ou misturas (onde pode incluir N₂ ou O₂), pelo que o processo também é conhecido por o acrograma MIG/MAG, onde MIG representa *Metal Inert Gas* (proteção por um gás, ou mistura, inerte) e MAG, *Metal Active Gas* (mistura de um ou mais gases ativos com gases inertes ou CO₂ puro). A sigla GMAW abrange o uso de qualquer tipo de gás de proteção (Scotti e Ponomarev, 2008).

A Figura 2.1 apresenta um desenho esquemático com os componentes principais que intervêm no processo GMAW. Nesta figura pode-se identificar o bocal, encarregado de direcionar o fluxo de gás de proteção até a região de soldagem durante o processo; o bico de contato, utilizado para conduzir a energia de soldagem até o arame e direcionar o arame até a peça; o arame, o qual, além de ser o material de adição no processo, conduz e energia encarregada da manutenção do arco elétrico; a poça de fusão, na qual se forma o cordão de solda. Podem-se reconhecer também na Figura 2.1 as distâncias principais envolvidas no processo como são a distância bico de contato-peça (DBCP), o comprimento energizado do arame (*stick out*) e o comprimento do arco.

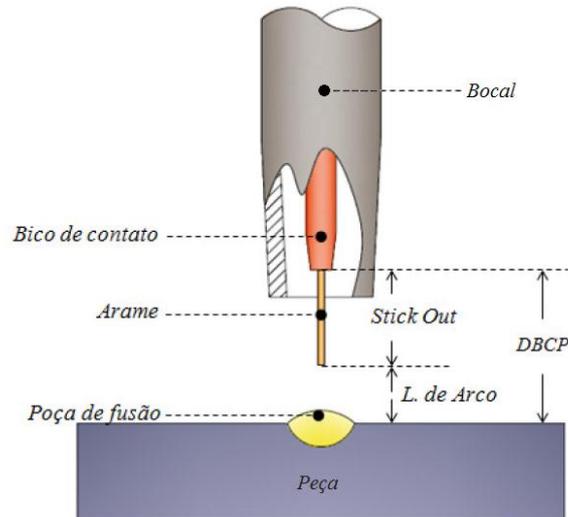


Figura 2.1. Componentes e distâncias principais no processo de soldagem GMAW (adaptado de Cayo, 2013)

2.1.1 – Modos de transferência metálica no processo GMAW

Ponomarev *et al.* (2009) explicam que os modos de transferência metálica natural classificam-se em duas classes. A primeira é denominada *transferência por contato*, na qual há contato da gota com a poça de fusão antes de ser destacada e na qual encontra-se o *modo de transferência por curto-circuito*. A segunda é conhecida como *transferência por vôo livre*, em que a gota destaca-se antes do contato com a poça. A Figura 2.2 mostra esquematicamente os campos operacionais das formas principais de transferência metálica na soldagem GMAW em função da corrente e da tensão.

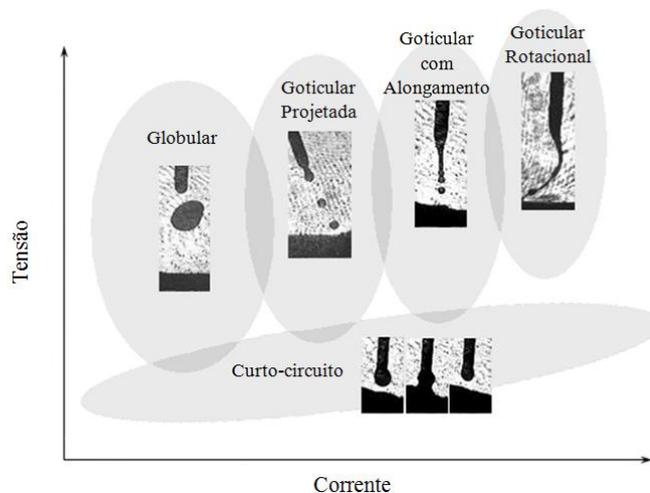


Figura 2.2. Mapas esquemáticos dos modos naturais de transferência metálica no processo GMAW em função da corrente e da tensão (adaptado de Scotti e Ponomarev, 2008 e Scotti *et al.*, 2012)

Além dos modos de transferência natural, existem no processo GMAW mais dois grupos de modos de transferência; os modos controlados de transferência e os modos combinados de transferência. O primeiro grupo procura aperfeiçoar características operacionais, por exemplo, soldar chapas finas sem geração de respingos; entre os mais comuns encontram-se as transferências pulsadas (GMAW-P) e por curto-circuito controlado, entre outros. O segundo grupo agrupa modos de transferência que se caracterizam por apresentar dois ou até mesmo três dos modos naturais, de forma intercalada, sequencial, repetitiva e sem intervenção do operador ou controle do equipamento (Ponomarev *et al.*, 2009).

2.1.2 – Transferência por curto-circuito (GMAW-S)

O processo de soldagem GMAW-S se caracteriza por um contato regular entre o arame-eletrodo e a poça de fusão. Durante a fase de curto-circuito a gota de metal líquido formada na ponta do arame toca a poça de fusão e provoca uma extinção momentânea do arco elétrico, neste ponto se inicia a transferência de metal líquido para a poça possibilitando a reabertura do arco elétrico e permitindo que o processo seja repetido periodicamente. A gota de metal é transferida para a poça de fusão principalmente pelo efeito da tensão superficial e o efeito *Pinch*.

No processo de formação da gota, esta tende a se tornar mais volumosa à medida que o eletrodo se funde, neste caso a força devida à tensão superficial retém a gota na ponta do arame e dificulta a sua transferência. Quando há contato da gota com a poça de fusão a força devida à tensão superficial puxa a gota para dentro da poça facilitando a transferência. Por outro lado, o efeito *Pinch* refere-se ao fenômeno de “empescoçamento” da gota na ponta do eletrodo produzido pelas forças de Lorentz. Estas são forças radiais no sentido do centro do eletrodo, produzidas pelo passo da corrente através do campo magnético ao redor do arame. Para um condutor sólido, o efeito destas forças pode ser desprezado, mas para um condutor líquido (como o caso da gota metálica) as forças de Lorentz conseguem deslocar o material no sentido da superfície para seu centro. Desta forma, a gota tende-se alongar na direção oposta ao eletrodo formando o empescoçamento na região de acople de metal líquido-sólido no arame. Quanto maior a corrente ou menor o diâmetro do pescoço, maior é a densidade de corrente e maiores são as forças, assim, depois de uma constrição aparecer o efeito *Pinch* tende a restringir ainda mais, pelo que

termina separando a gota do eletrodo. A Figura 2.3 representa o processo do empescoçamento e efeito Pinch produzido pelas forças de Lorentz (Scotti e Ponomarev, 2008).

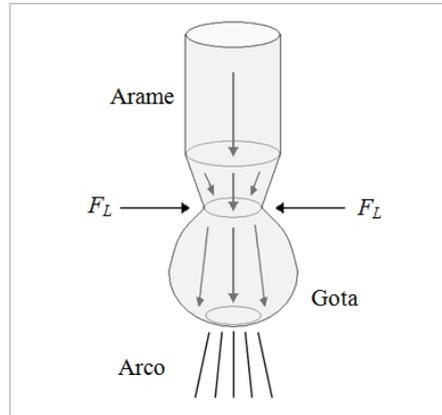


Figura 2.3. Efeito das Forças de Lorentz (F_L) no processo de empescoçamento. As setas dentro do arame indicam o fluxo da corrente através do arame-eletrodo (sentido convencional com eletrodo '+') (adaptado de Scotti e Ponomarev, 2008)

A Figura 2.4 ilustra um exemplo dos oscilogramas de corrente de soldagem e tensão do arco junto com imagens sincronizadas adquiridas pela técnica de perfilografia no processo GMAW-S. Durante a etapa de curto-circuito, a corrente tende a se elevar rapidamente e o metal fundido na ponta do arame é transferido para a poça de fusão. No final da transferência metálica as forças eletromagnéticas governam o processo e a ponte metálica na região metal liquido-solido do arame é separada, provocando a restauração do arco elétrico. O ajuste dos diferentes parâmetros no processo vai determinar a quantidade de respingos e de material vaporizado (fumaça) formados nesta etapa. Pode-se observar nos oscilogramas da Figura 2.4 que o início do curto-circuito no processo provoca a extinção do arco e uma queda brusca de tensão, a qual sobe novamente mostrando um pico de reignição uma vez o arco é reaberto. Depois da ignição do arco a corrente tende a diminuir e uma nova gota começa a se formar na ponta do arame, dando início a um novo ciclo.

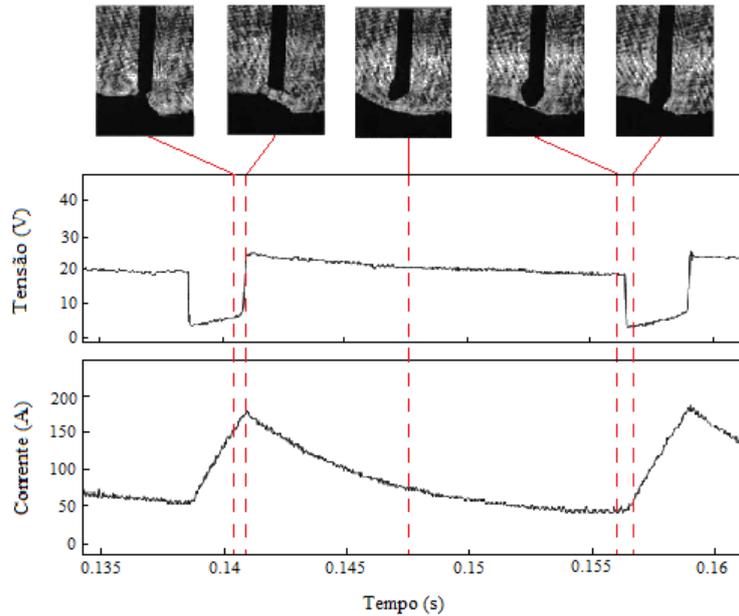


Figura 2.4. Oscilogramas de corrente e tensão no processo GMAW-S (adaptado de Bálamo *et al.*, 2000)

A transferência metálica por curto-circuito ocorre geralmente em tensões e correntes baixas. As tensões baixas representam comprimentos de arco pequenos, os quais favorecem o contato da gota na ponta do arame com a poça de fusão. Correntes baixas representam baixa força eletromagnética e desta forma maiores diâmetros na gota em formação, o que favorece o contato da gota com a poça antes do destacamento em vôo livre. O uso de correntes baixas produz poças de fusão pequenas e de solidificação rápida, o que favorece o uso do modo de transferência por curto-circuito na união de materiais de pequena espessura e passes de raiz, assim como, a possibilidade de soldar em qualquer posição.

2.1.3 – Parâmetros de entrada e geometria do cordão de solda

Os parâmetros no processo GMAW são compreendidos como toda variável que possa influenciar e alterar as transferências de calor e de metal durante o processo e, assim, as características do cordão de solda. Os parâmetros de entrada do processo, identificados também como *fatores de entrada*, são usados para preparar e regular os equipamentos, e podem ser divididos em dois subgrupos: parâmetros fixos e parâmetros ajustáveis. Os parâmetros fixos são ajustados antes de iniciar o processo de soldagem devido ao fato de ser determinados por características fixas (químicas, mecânicas, metalúrgicas), como o

diâmetro e a composição do arame e a geometria do chanfro. Os parâmetros ajustáveis podem ser regulados antes e/ou durante o processo de soldagem, por exemplo, a velocidade de alimentação do arame, a velocidade de soldagem, a tensão de regulagem. No caso de poder ajustar de forma programada um fator de entrada em um processo de controle, este parâmetro representará uma *variável de controle*.

Por outro lado encontram-se também as chamadas de *variáveis do processo* ou *respostas*. Estes são parâmetros governados pelos fatores de entrada, por exemplo, a geometria do cordão de solda e a corrente em fontes de energia de tipo tensão constante. Assim, existe uma correlação e dependência muito grande entre todos os parâmetros a serem regulados no processo e dificilmente se consegue ajustar de forma desejada um único parâmetro sem alterar as respostas de outras variáveis. O número de parâmetros a serem regulados no processo é muito grande e todos eles, em maior ou menor grau, governam as respostas, mas em termos gerais pode-se dizer que o comprimento do arco e a corrente de soldagem são os parâmetros mais importantes do processo GMAW, por serem os responsáveis pela concentração e intensidade da transferência de calor para a chapa, como também da transferência de massa e com ela da formação do cordão.

Com tudo, como explica Modenesi (2001), a seleção de parâmetros de soldagem para cada aplicação depende de fatores como:

- Disponibilidade de equipamentos e materiais;
- Considerações geométricas (espessura dos componentes, tipo de junta, posição de soldagem e facilidade de acesso);
- Considerações metalúrgicas;
- Considerações econômicas;
- A necessidade de se garantir uma estabilidade adequada para o processo;
- Reduzir a chance de formação de descontinuidades.

Além destes aspectos é importante introduzir os requerimentos geométricos dos cordões de solda, fundamentais em etapas de reparação, prototipagem e preenchimento de junta num projeto de soldagem.

Na prática, a geometria dos cordões de solda é caracterizada basicamente por três valores: largura, reforço e penetração. A Figura 2.5 esquematiza estes parâmetros geométricos na seção transversal de um cordão de solda. A geometria do cordão está diretamente relacionada com os parâmetros que governam o processo, em geral a formação do cordão depende de dois efeitos: o térmico e o mecânico. O primeiro devido principalmente ao acoplamento do arco elétrico com a peça a soldar que leva o material da peça ao ponto de fusão. De forma geral, pode-se dizer que o segundo manifesta-se no processo GMAW por três mecanismos: o primeiro devido ao jato de plasma impingindo sobre a poça de fusão, o segundo devido à pressão dos campos magnéticos criados pela corrente que atravessa o arco, e o terceiro devido ao *momentum* (quantidade de movimento) transferido das gotas para a poça de fusão em qualquer modo de transferência (Scotti e Ponomarev, 2008).

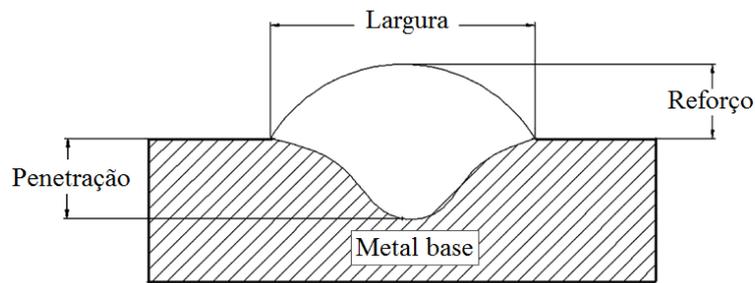


Figura 2.5. Características geométricas do cordão de solda

Como citado anteriormente, os parâmetros do processo se relacionam de muitas formas. A seguir apresentam-se os parâmetros de entrada de maior importância no controle dos parâmetros geométricos dos cordões de solda no processo de soldagem GMAW:

- Tensão do arco (relacionada ao comprimento do arco);
- Velocidade de alimentação do arame (relacionada à corrente de soldagem);
- Velocidade de soldagem (Relacionado com a quantidade de material depositado por unidade de comprimento).

2.1.3.1 – Tensão do arco

De forma geral, o comprimento do arco é proporcional à tensão do arco, nesse sentido é comum o uso da tensão como forma de controlar este comprimento. O aumento no comprimento do arco também aumenta a área de acoplamento do arco com o metal de

base, portanto, um aumento da tensão, com velocidades de alimentação do arame e de soldagem constantes, produz cordões de solda mais largos. Arcos mais longos tendem a uma menor concentração de corrente na chapa o que influencia diretamente a penetração e o formato do cordão. No caso de aumentar a tensão e fixar os outros parâmetros de entrada, o comprimento do arco aumenta e o comprimento energizado do arame diminui pelo que o calor gerado por efeito Joule no arame diminui também, assim que, a corrente tende a aumentar e a taxa de consumo é mantida constante no processo. Uma excessiva tensão produz um cordão muito largo sujeito a problemas como fissuras e mordeduras, além disto um arco muito grande pode ficar muito próximo ao bico de contato, o que pode extinguir o arco ou até provocar a fusão do bico de contato quando a relação com a velocidade de alimentação do arame não é adequada.

2.1.3.2 – Velocidade de alimentação do arame

A corrente de soldagem numa fonte de energia de tipo tensão constante é dependente e principalmente controlada pela velocidade de alimentação do arame. Assim, aumentando a velocidade de alimentação do arame e mantendo constantes a tensão e a distância bico de contato-peça, menor será o comprimento do arco e maior a corrente. O aumento da velocidade de alimentação do arame produz uma maior quantidade de metal fundido e, por conseguinte, resulta em uma maior altura no reforço, não obstante uma alta velocidade de alimentação do arame sem uma adequada regulagem da tensão pode produzir um reforço excessivo nos cordões, aumentando a contração da solda e causando deformação na peça, além do desperdício de material. Trabalhos como o de Cruz (2014) utilizam a velocidade de alimentação do arame para controlar o reforço dos cordões durante o processo.

2.1.3.3 – Velocidade de soldagem

Esta é a velocidade longitudinal de deslocamento da tocha de soldagem com respeito à peça. Em geral quanto maior a velocidade de soldagem, menor é o calor aportado por unidade de comprimento e menor é a penetração. Ressalta-se que não se deve diminuir a velocidade esperando sempre uma maior penetração, uma poça particularmente grande gera outros efeitos que dificultam a transferência de calor para o metal de base. O comportamento da penetração com respeito à velocidade de soldagem se caracteriza por

uma curva com um ponto máximo particular para cada processo e configuração. Menor velocidade de soldagem também produz maior quantidade de material de adição fundido por unidade de comprimento. Assim o reforço e a largura aumentam, com um maior destaque para o último parâmetro como referenciado por Xiong *et al.* (2013), de forma que geralmente a velocidade de soldagem é escolhida para controlar a largura do cordão em sistemas de controle, como mostrado por exemplo por Torres (2013) e por Cruz *et al.* (2015).

2.1.4 – Estabilidade no processo GMAW-S

De forma geral a estabilidade do processo GMAW é governada pelas estabilidades do arco elétrico e da transferência metálica. A estabilidade durante o processo viabiliza que a distribuição do calor transferido para a solda também seja estável, tornando a geometria do cordão e as alterações metalúrgicas também constantes (Scotti e Ponomarev; 2008). No caso do processo GMAW-S, Carvalho (1997) refere que a regularidade dos curtos-circuitos indica estabilidade no processo, e de forma geral ressalta que dois requerimentos devem ser satisfeitos para garantir estabilidade durante o processo de soldagem: (i) deve existir um equilíbrio entre a taxa de fusão do arame e a velocidade de alimentação do arame; (ii) o metal fundido na ponta do arame deve ser transferido para a poça de fusão produzindo o mínimo de distúrbios no processo.

Dutra *et al.* (1995) afirma que a estabilidade no processo GMAW-S pode ser compreendida como a regularidade na formação e separação das gotas metálicas e que pode ser avaliada a partir da repetitividade temporal dos valores instantâneos de tensão do arco e corrente do processo. Autores como Cook *et al.* (1999), Adolfsson *et al.* (1999), Wu *et al.* (2001), Suban e Tušek (2003) e Alfaro (2012) indicam quatro condições para alcançar a *máxima estabilidade* durante o processo GMAW-S:

- Um máximo número de curtos-circuitos por segundo;
- Um desvio padrão mínimo dos tempos dos curtos-circuitos;
- Uma mínima transferência de massa durante o curto-circuito;
- Um mínimo nível de respingos.

Adolfsson *et al.* (1999) e Hermans e Ouden (1999) referem também que a *máxima estabilidade* do processo GMAW-S acontece quando a oscilação da poça de fusão e a frequência dos curtos-circuitos são iguais.

No caso da *instabilidade* no processo, Hermans e Ouden (1999) citam três causas que podem ser identificadas:

- Curtos-circuitos instantâneos;
- Falha de reignição do arco;
- Variações da velocidade de alimentação do arame.

Os curtos-circuitos instantâneos, também chamados de *incidentais* ou *incipientes*, se devem principalmente ao efeito Pinch, o qual pode atuar a favor, ou contra, da transferência metálica. De forma geral o efeito Pinch separa um elemento de seção transversal maior, como a gota ou a poça de fusão, de um elemento de seção transversal menor, como o ponto de contato gota-poça na fase inicial do curto-circuito. Assim, se o valor da corrente e sua taxa de subida de corrente não são adequados, e se a força devida à tensão superficial não governa o início da transferência metálica, um curto-circuito incidental pode-se apresentar.

Em geral as falhas na reignição do arco apresentam-se principalmente quando a tensão de trabalho é muito baixa para a velocidade de alimentação do arame ou a taxa de subida da corrente (governada principalmente pela indutância utilizada na fonte) é muito elevada (em relação a outros parâmetros utilizados), o que provoca curtos-circuitos de longa duração, junto com colisões do arame com a poça de fusão e a expulsão de fragmentos de arame sólido e respingos.

De modo geral, a quantidade de respingos produzida durante o processo de soldagem é o principal indicador visível de estabilidade no processo GMAW-S. Os respingos são gerados por explosões produzidas no rompimento da ponte metálica no final dos curtos-circuitos, as quais dependem principalmente da corrente do processo nesta fase. No caso da tensão do arco, como refere Carvalho (1997), esta desempenha uma influência indireta na energia da explosão e na produção dos respingos pois regula o comprimento do arco e,

assim, as dimensões finais da gota e o comprimento da ponte metálica. A geração de respingos durante o processo é o principal problema da transferência por curto-circuito, pois diminui a capacidade de produção, seja pela perda de material de adição ou pela necessidade de gasto de recursos para sua retirada (Souza *et al.*, 2011).

2.1.4.1 – Índices de estabilidade

Ao longo de diversas pesquisas referentes à estabilidade do processo GMAW-S diferentes propostas para medir ou indicar a estabilidade têm sido utilizadas. Estas propostas, chamadas de índices de estabilidade, visam estudar a regularidade de determinados parâmetros específicos durante o processo de soldagem. Uma abordagem utilizada no estudo de índices de estabilidade são as relações (*ratios*) entre diferentes parâmetros do processo. Neste sentido, Ogunbiyi (1995) e Carvalho (1997) apresentam diferentes relações determinadas a partir dos histogramas de corrente e tensão, utilizadas para determinar o modo de transferência metálica e a estabilidade do processo, a saber: *Transfer Stability Index* (TSI), *Transfer Index* (TI) e *Dip Consistency Index* (DCI):

$$\begin{aligned} TSI &= \frac{I_{max}}{I_{mean}} \\ TI &= \frac{I_{mean} - I_{min}}{I_{mean}} \\ DCI &= \frac{V_{mean} - V_{bk}}{V_{mean}} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Onde:

- I_{mean} é a média aritmética da corrente de soldagem adquirida em um período de tempo fixo;
- I_{min} é o mínimo valor da corrente nas amostras adquiridas;
- I_{max} é o máximo valor da corrente nas amostras adquiridas;
- V_{mean} é a média aritmética da tensão do processo adquirida em um período amostrado;

- V_{bk} é a média aritmética de todos os valores de tensão menores ou iguais a V_{mean} .

Por outro lado, a estabilidade do processo também pode ser estudada utilizando uma abordagem estatística. Assim, a partir do análise dos histogramas de tensão e de corrente do processo diferentes índices de estabilidade podem ser apresentados, por exemplo, o desvio padrão do tempo de arco e de curto-curto circuito, o desvio padrão da corrente de pico, a distribuição de probabilidade dos histogramas. No entanto e de forma geral, os índices básicos nesta abordagem são:

- t_{ab} , denominado *tempo de arco aberto* e definido como o tempo de crescimento da gota metálica na ponta do eletrodo (tempo médio).
- t_{cc} , denominado *tempo de curto-circuito* e definido como o tempo de duração da transferência da gota fundida para a poça de fusão (tempo médio).

E a partir de t_{ab} e t_{cc} outros índices podem ser derivados, como o *período de curto circuito* (P_{cc}) e a *frequência de curto circuito* (f_{cc}):

$$P_{cc} = t_{ab} + t_{cc} \tag{2.2}$$

$$f_{cc} = 1/P_{cc}$$

Os quais junto com os seus respectivos desvios padrões são usados por diferentes autores, como Hermans e Ouden (1999) e Cuiuri *et al.* (2000), para indicar a estabilidade do processo nos seus correspondentes trabalhos.

De outro lado, e segundo a premissa de que a estabilidade da transferência por curto-circuito está ligada com a constância dos tempos de arco aberto e de curto-circuito, diferentes trabalhos, como de Rezende *et al.* (2010) na avaliação de uma metodologia para selecionar parâmetros no processo GMAW-S, Souza (2010) no levantamento de mapas operacionais para a soldagem GMAW de aço ao carbono, Souza *et al.* (2011) no análise da influencia da tensão de soldagem e do gás de proteção sobre a correlação entre indutância e regularidade da transferência metálica no processo GMAW-S, e de Rezende *et al.* (2011) com o fim de definir critérios que permitam determinar a regulagem da tensão

no processo GMAW-S, utilizam o *Índice de Vilarinho de Regularidade da Transferência por Curto-circuito* dado por:

$$IV_{cc} = \frac{\sigma t_{cc}}{t_{cc}} + \frac{\sigma t_{ab}}{t_{ab}} \quad (2.3)$$

Onde:

- σt_{ab} é o desvio padrão do tempo de arco aberto;
- σt_{cc} é o desvio padrão do tempo de curto-circuito.

Este índice é utilizado como critério de estabilidade no processo GMAW-S nos trabalhos citados anteriormente junto com outro índice chamado de *faixa admissível de tamanho de gota em transferência por curto-circuito* (Δf_{cc}), a qual tenta correlacionar o tamanho da gota antes do contato com a poça com as frequências de curtos-circuitos mediante a relação (Rezende *et al.*, 2010; 2011):

$$f_{cc} = \frac{V_{alim} \cdot (d)^2}{(k \cdot d)^3} \quad (2.4)$$

Onde:

- V_{alim} é a velocidade de alimentação do arame;
- d é o diâmetro do arame-eletrodo;
- k é um fator de multiplicação para estimar o diâmetro da gota em função do diâmetro do arame.

Neste caso, a faixa admissível de tamanho de gota em transferência por curto-circuito se define pelas frequências mínima (f_{ccmin} , onde se usa como k o valor que se refere a gotas de tamanho máximo) e máxima (f_{ccmax} , onde se usa como k o valor que se refere a gotas de tamanho mínimo) calculadas para atingir o tamanho de gota para uma transferência adequada. Como explica Rezende *et al.* (2011) esta faixa vai ser função do material do arame e do gás de proteção e ainda precisa ser mais bem determinado com filmagens de alta velocidade para diferentes combinações arame/gás de proteção. Esta limitação faz com que trabalhos como Meneses (2013) deixem de lado o uso do Δf_{cc} e utilizem unicamente o IV_{cc} na avaliação da estabilidade.

Finalmente, com respeito à qualidade da solda, Cayo (2013) conclui que a estabilidade no processo é um requisito necessário, porém não determinante na avaliação da qualidade, uma vez que na avaliação de qualidade são levados em consideração níveis de aceitabilidade que variam segundo a aplicação da soldagem.

2.2 – TRANSFORMAÇÃO PROJATIVA

A calibração é uma das etapas mais importantes em qualquer sistema de medição. No caso dos sistemas de visão computacional esta transforma as coordenadas de um pixel projetado sobre um ponto na imagem em coordenadas e grandezas do mundo real. Assim, dado um conjunto de pontos em um plano de referência, neste caso uma imagem, se procura encontrar uma correspondência em outro plano, neste caso, no mundo real. Esta correspondência, utilizada neste trabalho para calibrar o sistema de medição de parâmetros geométricos, é denominada de *transformação projetiva* e pode ser determinada a partir do conceito de *homografia*.

Entre as transformações projetivas duas classes especiais podem ser encontradas, *projeções paralelas* e *projeções perspectivas*. Como indicado na Figura 2.6(a) as projeções paralelas têm seu centro de projeção no infinito e todas as suas linhas de projeção têm uma única direção. No caso da projeção perspectiva, os raios de projeção não têm a mesma direção, mas convergem em um ponto definido (Figura 2.6(b)). Desta forma, as distâncias entre diferentes pontos num plano de interesse variam entre diferentes planos dependendo das posições daqueles planos com respeito ao primeiro.

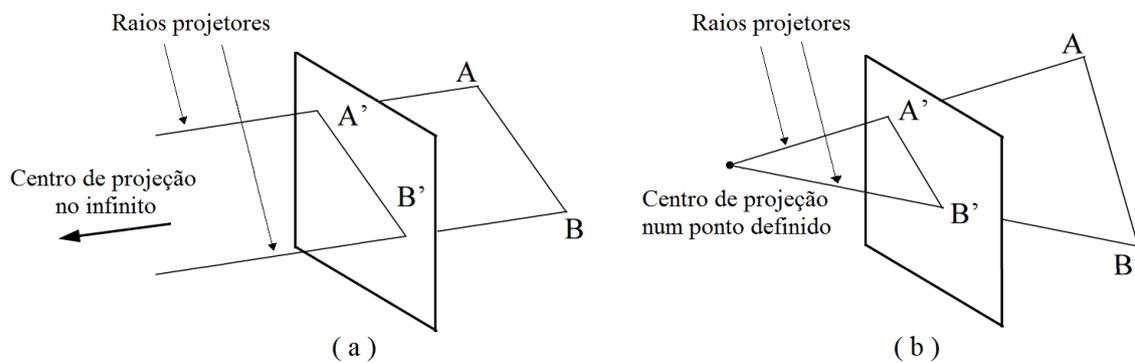


Figura 2.6. Transformações projetivas. (a) Projeção paralela; (b) projeção perspectiva

2.2.1 – Coordenadas homogêneas

De forma geral, as transformações projetivas são definidas em *coordenadas homogêneas*. Assim, um ponto num plano qualquer representado como $\mathbf{p}_{ci} = (x_i, y_i)$, pode ser expressado em coordenadas homogêneas como $\mathbf{p}_i = (x_i, y_i, w)$, onde o fator de escala w permite realizar as transformações de translação, escala e rotação ao mesmo tempo. Lembrando que para um ponto $\mathbf{p}_{ci} = (x_i, y_i)$, estas operações são dadas matricialmente por:

- Translação

$$\begin{bmatrix} x_f \\ y_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Dx \\ Dy \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

- Escala

$$\begin{bmatrix} x_f \\ y_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x & 0 \\ 0 & S_y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

- Rotação através de um ângulo θ

$$\begin{bmatrix} x_f \\ y_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

onde, x_f e y_f são as coordenadas finais, Dx e Dy são as translações correspondentes a cada eixo, e S_x e S_y são os respectivos fatores de escala em cada eixo. Desta forma, por ser a operação de translação uma soma e visando combinar facilmente as três transformações, se adiciona uma terceira coordenada w ao ponto e se representa em coordenadas homogêneas. Assim pode-se representar qualquer operação geométrica como uma matriz 3x3 e pode-se realizar toda transformação sobre um ponto com uma multiplicação de matrizes. Deste modo as transformações serão dadas por:

- Translação

$$\begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ w_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & Dx \\ 0 & 1 & Dy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ w_i \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

- Escala

$$\begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ w_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ w_i \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

- Rotação através de um ângulo θ

$$\begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ w_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ w_i \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

2.2.2 – Homografia 2D

De acordo com Aires (2009), a homografia é uma transformação que relaciona as imagens de um objeto plano a partir de duas diferentes perspectivas. Fazendo referencia à Figura 2.7, o ponto p' no plano A' é mapeado para seu correspondente ponto p no plano A . Neste caso pode-se assumir que X'' , Y'' e Z'' , são as coordenadas no mundo real, X' e Y' são coordenadas num plano qualquer no mundo real e X e Y são coordenadas em outro plano, o qual pode ser considerado como o plano da imagem (*plano-imagem*).

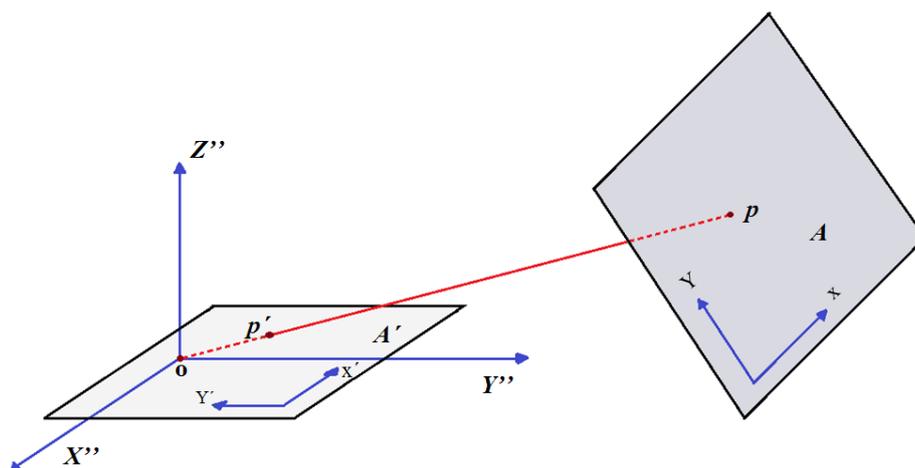


Figura 2.7. Relacionamento entre pontos dos planos A e A' . Com X'' , Y'' e Z'' , coordenadas no mundo real. X' e Y' , coordenadas num plano qualquer no mundo real. X e Y , coordenadas em outro plano, que pode ser considerado como o plano da imagem

Esta transformação pode ser escrita como $\mathbf{p}'_i = \mathbf{H}\mathbf{p}_i$ em que \mathbf{H} é a matriz de homografia e define o mapeamento dos pontos correspondentes $\mathbf{x}_i \leftrightarrow \mathbf{x}'_i$ entre os dois planos A e A' . Assim, dados um conjunto de pontos $\mathbf{p}_i = (x_i, y_i, w_i)^T$ sobre um plano A e um conjunto de pontos correspondentes $\mathbf{p}'_i = (x'_i, y'_i, w'_i)^T$ em um plano A' , o mapeamento entre os pontos correspondentes em cada plano pode ser escrito como:

$$\begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ w'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ w_i \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Onde \mathbf{H} é uma matriz de 3X3 não singular. Como exposto por Hartley e Zisserman (2004), esta matriz pode ser alterada pela multiplicação de um fator não-nulo arbitrário sem alterar a projeção que representa, pelo que pode-se dizer que a matriz \mathbf{H} é homogênea. Pode-se dizer que \mathbf{p}'_i e $\mathbf{H}\mathbf{p}_i$ representam o mesmo ponto no plano 2D, mas que ao ser analisados em coordenadas homogêneas como vetores 3D, eles têm uma magnitude diferente dada por um fator de escala não-nulo. Mesmo assim, eles têm a mesma direção e somente a relação dos elementos da matriz é significativa. A partir desta formulação, a transformação $\mathbf{p}'_i = \mathbf{H}\mathbf{p}_i$ pode ser escrita em termos de um produto vetorial como:

$$\mathbf{p}'_i \times \mathbf{H}\mathbf{p}_i = \mathbf{0}_3 \quad (2.12)$$

Uma solução linear para \mathbf{H} pode ser derivada escrevendo a j -ésima linha da matriz \mathbf{H} como h^{jT} , o produto $\mathbf{H}\mathbf{p}_i$ pode-se expressar como:

$$\mathbf{H}\mathbf{p}_i = \begin{bmatrix} h^{1T}\mathbf{p}_i \\ h^{2T}\mathbf{p}_i \\ h^{3T}\mathbf{p}_i \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Assim, o produto vetorial citado na equação (2.12) pode ser escrito como:

$$\mathbf{p}'_i \times \mathbf{H}\mathbf{p}_i = \begin{bmatrix} y'_i h^{3T}\mathbf{p}_i - w'_i h^{2T}\mathbf{p}_i \\ w'_i h^{1T}\mathbf{p}_i - x'_i h^{3T}\mathbf{p}_i \\ x'_i h^{2T}\mathbf{p}_i - y'_i h^{1T}\mathbf{p}_i \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Dado que o ponto $\mathbf{p}_i' = [x'_i \ y'_i \ w'_i]^T$, e $h^{jT} \mathbf{p}_i = \mathbf{p}_i^T \mathbf{h}^j$, a Equação (2.14) pode ser reescrita como:

$$\begin{bmatrix} 0_3^T & -w'_i \mathbf{p}_i^T & y'_i \mathbf{p}_i^T \\ w'_i \mathbf{p}_i^T & 0_3^T & -x'_i \mathbf{p}_i^T \\ -y'_i \mathbf{p}_i^T & x'_i \mathbf{p}_i^T & 0_3^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h^1 \\ h^2 \\ h^3 \end{bmatrix} = \mathbf{A}_i \mathbf{h} \quad (2.15)$$

Onde \mathbf{A}_i é uma matriz de 3×9 e suas entradas são as coordenadas de um par de pontos correspondentes conhecidos. $\mathbf{h} = (h_{11}, h_{12}, h_{13}, h_{21}, h_{22}, h_{23}, h_{31}, h_{32}, h_{33})^T$ é um vetor coluna que contem os parâmetros (não conhecidos) que constituem a matriz de homografia \mathbf{H} .

Por outro lado, se as duas primeiras colunas da Equação (2.15) são multiplicadas por -1 e somadas o resultado será a terceira linha, pode-se dizer então que este sistema de três equações tem somente as duas primeiras linhas linearmente independentes, pelo que a terceira linha pode ser omitida na solução de \mathbf{H} e desta forma esta equação pode-se escrever como:

$$\begin{bmatrix} 0_3^T & -w'_i \mathbf{p}_i^T & y'_i \mathbf{p}_i^T \\ w'_i \mathbf{p}_i^T & 0_3^T & -x'_i \mathbf{p}_i^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h^1 \\ h^2 \\ h^3 \end{bmatrix} = 0 \quad (2.16)$$

Considerando um conjunto de 4 pares de pontos correspondentes ($i = 1, 2, 3, 4$), um sistema de equações $\mathbf{S}_i \mathbf{h} = 0$ (onde \mathbf{S} é obtida a partir de cada par de correspondências) é obtido a partir da Equação (2.16) da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -w'_1 x_1 & -w'_1 y_1 & -w'_1 w_1 & y'_1 x_1 & y'_1 y_1 & y'_1 z_1 \\ w'_1 x_1 & w'_1 y_1 & w'_1 z_1 & 0 & 0 & 0 & -x'_1 x_1 & -x'_1 y_1 & -x'_1 z_1 \\ 0 & 0 & 0 & -w'_2 x_2 & -w'_2 y_2 & -w'_2 w_2 & y'_2 x_2 & y'_2 y_2 & y'_2 z_2 \\ w'_2 x_2 & w'_2 y_2 & w'_2 z_2 & 0 & 0 & 0 & -x'_2 x_2 & -x'_2 y_2 & -x'_2 z_2 \\ 0 & 0 & 0 & -w'_3 x_3 & -w'_3 y_3 & -w'_3 w_3 & y'_3 x_3 & y'_3 y_3 & y'_3 z_3 \\ w'_3 x_3 & w'_3 y_3 & w'_3 z_3 & 0 & 0 & 0 & -x'_3 x_3 & -x'_3 y_3 & -x'_3 z_3 \\ 0 & 0 & 0 & -w'_4 x_4 & -w'_4 y_4 & -w'_4 w_4 & y'_4 x_4 & y'_4 y_4 & y'_4 z_4 \\ w'_4 x_4 & w'_4 y_4 & w'_4 z_4 & 0 & 0 & 0 & -x'_4 x_4 & -x'_4 y_4 & -x'_4 z_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{21} \\ h_{22} \\ h_{23} \\ h_{31} \\ h_{32} \\ h_{33} \end{bmatrix} = 0 \quad (2.17)$$

A solução do sistema pode ser obtida utilizando a *Decomposição em Valores Singulares* (SVD) da matriz \mathbf{S} , onde mais pontos de referencia podem ser utilizados para uma melhor precisão. O SVD de \mathbf{S} é obtido como $\mathbf{S} = \mathbf{U} \mathbf{D} \mathbf{V}^T$, com \mathbf{D} sendo uma matriz diagonal de

autovalores com entradas positivas e organizadas em ordem decrescente. Neste caso, \mathbf{h} corresponde à última coluna da matriz de autovetores \mathbf{V} . Desta forma, a homografia é determinada a partir do vetor \mathbf{h} estimado (Hartley e Zisserman, 2004; Aires, 2009).

2.3 – TÓPICOS ESPECIAIS EM 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 ajudam a 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.

A ideia de processar uma imagem digital está relacionada com a transformação da sua forma original para outra onde as características desejadas pelo observador estejam evidenciadas. A Figura 2.8 apresenta de maneira geral os passos fundamentais em processamento de imagens digitais e mostra que o objetivo global é produzir um resultado a partir do domínio do problema.

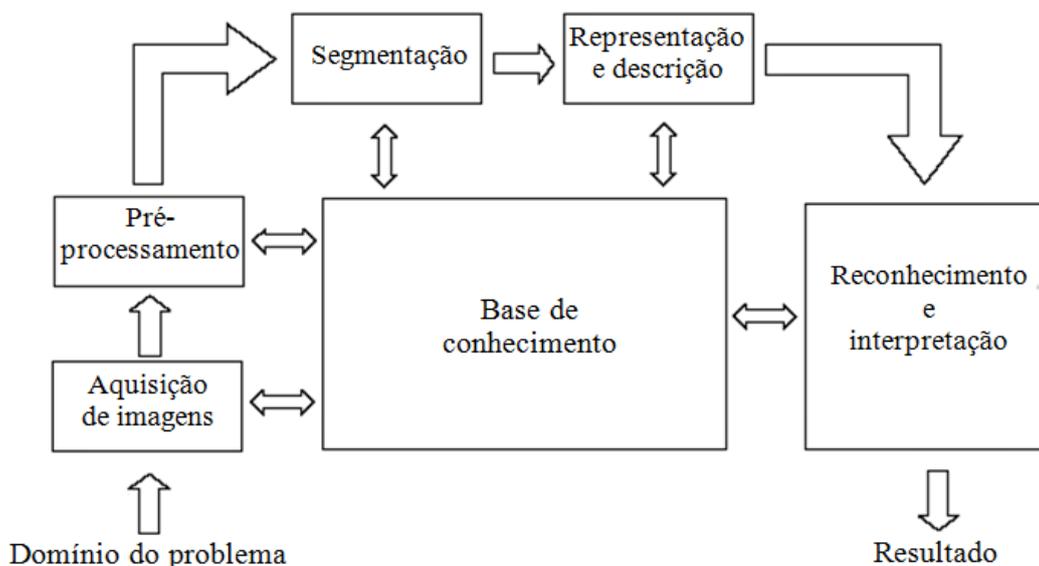


Figura 2.8. Passos fundamentais em processamento de imagens digitais (adaptado de Gonzales e Woods, 2007)

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. Esta base além de guiar as operações de cada módulo de processamento, também controla a interação entre eles. A seguir apresentam-se alguns conceitos básicos referentes aos módulos de processamento e as imagens digitais em geral.

2.3.1 – Imagem digital

O termo *imagem* pode ser descrito como uma função de intensidade luminosa bidimensional, denotada por $f(x, y)$, em que o valor de f nas coordenadas espaciais (x, y) proporciona a intensidade (brilho) 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 de tamanho $N \times M$ como mostrado na Equação (2.18) em que cada elemento é uma quantidade discreta:

$$f(x, y) \approx \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \dots & f(0, M-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \dots & f(1, M-1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f(N-1,0) & f(N-1,1) & \dots & f(N-1, M-1) \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

O lado direito da Equação (2.18) representa o que é normalmente denominado uma *imagem digital*. Cada elemento da matriz denomina-se um *elemento da imagem* ou *pixel* (Gonzales e Woods, 2007). A Figura 2.9 (a) representa a amostragem da imagem e a Figura 2.9 (b) a quantização em níveis de cinza. Os níveis de cinza são valores discretos igualmente espaçados entre ‘0’ e ‘L’, o valor de L é determinado pelo número de *bits* (m) que representam a imagem da forma $L = 2^m$, assim, uma imagem de 8 bits contará com 256 níveis de cinza.

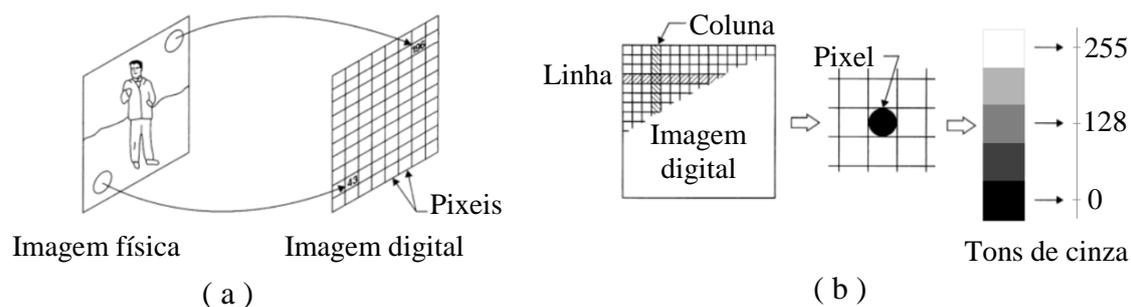


Figura 2.9. Representação de: (a) amostragem da imagem, (b) quantização em níveis de cinza (adaptado de Castleman, 1996)

Deste modo, o grau de detalhe de uma imagem é dado pela resolução espacial $N \times M$ e pelo número de níveis de cinza que a representam, os quais estão diretamente ligados às características do sensor da câmera utilizado para capturá-la. 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, mas é subjetivo porque depende do objetivo do observador. A modo de exemplo, a Figura 2.10 representa a digitalização de uma imagem, neste caso com uma baixa resolução espacial.

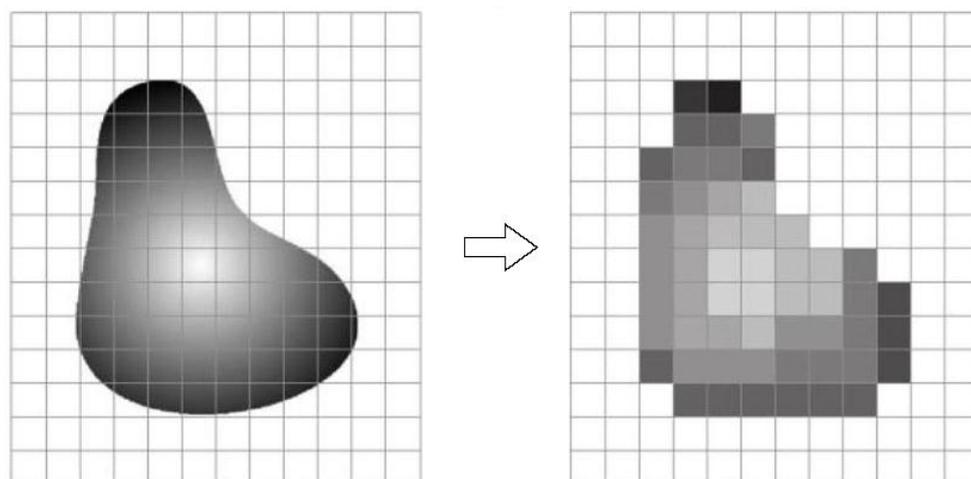


Figura 2.10. Digitalização de uma imagem (adaptado de Gonzales e Woods, 2002)

2.3.2 – Pré-processamento da imagem

O objetivo do pré-processamento das imagens é melhorar a imagem de forma a aumentar as chances para o sucesso dos processos posteriores. Tipicamente envolve técnicas para o

ajuste de contraste, remoção de ruído e isolamento de regiões (Gonzales e Wood, 2007). Em geral, no pré-processamento de imagens digitais, é comum o uso de filtros *passa-baixa* que atenuam ou eliminam os componentes de alta frequência no domínio de Fourier da imagem, de forma que o resultado é um borramento da imagem (os componentes de alta frequência na imagem caracterizam bordas e detalhes finos). Este borramento é, comumente, utilizado na remoção de pequenos detalhes e conexão de discontinuidades.

Uma das técnicas mais comuns neste sentido é o chamado filtro no domínio espacial. Este tipo de filtro faz suas operações diretamente sobre os pixels da imagem. Dois exemplos de filtros no domínio do espaço são o filtro de *máscara Gaussiana* e o filtro de *média* (ou de *suavização*). Os filtros no domínio espacial podem ser filtros lineares ou não, nos primeiros o valor do pixel é dado pela convolução da imagem com uma *máscara de convolução* (*kernel*) da seguinte forma:

$$I_A(i, j) = I * A = \sum_{h=-\frac{n}{2}}^{\frac{n}{2}} \sum_{k=-\frac{n}{2}}^{\frac{n}{2}} A(h, k) I(i - h, j - k) \quad (2.19)$$

onde:

$I_A(i, j)$ é o novo valor do pixel;

(i, j) são as posições de linha e coluna do pixel na imagem;

(h, k) são as posições de linha e coluna do pixel na máscara;

I é a imagem original;

$*$ indica uma convolução discreta;

A é a máscara quadrada utilizada;

n é o número de linhas (ou colunas) da máscara, n é um número ímpar, pelo que $n/2$ é o inteiro menor de essa relação.

A máscara de filtro de gaussiana é um filtro linear quando utilizada num filtro de suavização, da forma:

$$A(h, k) = \sum_{h=-\frac{n}{2}}^{\frac{n}{2}} \sum_{k=-\frac{n}{2}}^{\frac{n}{2}} e^{-\frac{h^2+k^2}{2\sigma^2}} \quad (2.20)$$

Pelo que se pode usar diretamente na convolução da seguinte forma:

$$I_A(i, j) = I * A = \sum_{h=-\frac{n}{2}}^{\frac{n}{2}} \sum_{k=-\frac{n}{2}}^{\frac{n}{2}} e^{-\frac{h^2+k^2}{2\sigma^2}} I(i-h, j-k) \quad (2.21)$$

Nas Equações (2.20) e (2.21) o símbolo σ indica o desvio padrão da função gaussiana. Este desvio depende do tamanho da máscara e, segundo Trucco e Verri (1998), a relação usada em geral é $\sigma_n = n/5$ (n , largura da máscara).

No filtro de média, o qual é o mais básico dos filtros de suavização, todos os coeficientes da máscara de convolução têm valor “1”. Ressalta-se que o valor da somatória deve ser dividido entre o número de coeficientes da máscara de convolução (*normalizar*), de outro modo o valor da somatória pode exceder o valor permitido de níveis de cinza da imagem. Por outro lado, no caso de querer ressaltar pontos na imagem que sejam muito escuros (níveis de cinza baixos) em contraste com regiões da imagem totalmente escuras (níveis de cinza = zero) é possível utilizar o filtro suavizado sem normalizar, aumentando de modo significativo o valor dos pixels.

Os filtros não lineares utilizam também uma máscara kernel, mas a resposta do processo não depende da somatória referida na Equação (2.19), senão de relações diretas entre os valores dos pixels incluídos. Por exemplo, no filtro de mediana o valor de cada pixel é substituído pela mediana dos níveis de cinza da imagem que estão na sua vizinhança (limitada pelo tamanho do kernel), assim, para calcular a mediana desta região, os valores são ordenados num vetor na ordem crescente e depois é determinado o valor da mediana (valor da posição central do vetor) que finalmente é atribuído ao pixel. Este método é bastante efetivo na remoção de pixels isolados por exemplo.

2.3.3 – Limiarização

A limiarização, ou 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, aplicando um limiar de tom de cinza (T) à imagem $f(x,y)$, transformando-a numa binária $g(x,y)$ com a relação:

$$g(x,y) = \begin{cases} 0 & \text{se } f(x,y) < T \\ 1 & \text{se } f(x,y) \geq T \end{cases} \quad (2.22)$$

Considerando-se '0' os pixels correspondentes ao objeto e '1' aqueles do fundo ou vice-versa (segundo o caso dos objetos de interesse). A Figura 2.11 apresenta um exemplo da técnica usada com diferentes valores de limiar (T) e aplicada em uma imagem de transferência metálica goticular projetada (adquirida mediante o uso da técnica conhecida como perfilografia).

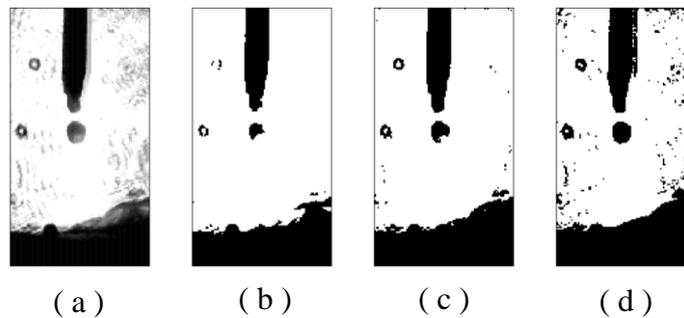


Figura 2.11. Aplicação da técnica de limiarização. (a) Imagem original; (b) com limiar $T = 100$; (c) com limiar $T = 150$; (d) com limiar $T = 200$ (Lopera, 2010)

Weska (1978) classifica os métodos de limiarização em três grupos: *global*, *local* e *dinâmico*, dependendo do operador do limiar. Assim, se o operador for determinado usando apenas as intensidades é classificado como global, se usa as intensidades e alguma informação espacial da imagem é classificado como local e se utiliza ambas informações mais as coordenadas espaciais é classificado como dinâmico. Sahoo *et al.* (1988) divide as técnicas em dois grandes grupos: globais e locais. Os limiares globais são aquelas que trabalham sobre toda a imagem usando apenas um limiar e os locais dividem a imagem em sub-imagens às quais é atribuído um limiar diferente (Lopes, 2003).

2.3.4– Rotulação

Uma vez que os objetos de interesse em uma imagem digital são separados do fundo é necessário diferenciá-los entre si e/ou localizar as suas posições na imagem. Para isso, todos os pixels que pertencem ao mesmo objeto ou que definem as suas bordas serão

identificados com o mesmo rótulo. Este processo é comumente conhecido como *rotulação* e baseia-se principalmente nas características de conectividade entre pixels de um mesmo objeto. Castleman (1996) define que dois pixels de um objeto encontram-se conectados se existir um caminho de conexão entre eles completamente contido dentro do objeto.

Para estabelecer se dois pixels estão conectados, é preciso determinar se eles são adjacentes e se seus níveis de cinza satisfazem certo critério de similaridade. Em geral encontram-se dois tipos de conectividade, a conectividade-4, onde o pixel possui vizinhos horizontais ou verticais e a conectividade-8, onde o pixel possui vizinhos horizontais, verticais e diagonais. Depois de atribuir um rótulo a cada objeto separado na imagem é possível acessar as posições dos pixels de cada objeto e, assim, fazer qualquer tipo de medida (em unidades de pixel) sobre o objeto, ou utilizar as posições para determinar novas áreas de trabalho na imagem.

2.4 – AGENTES INTELIGENTES

Albus (1991) define a *inteligência de máquina* como a capacidade de um sistema para agir adequadamente em um ambiente incerto, onde as ações apropriadas aumentam a probabilidade de sucesso, entendendo sucesso como a realização de objetivos específicos que suportam o objetivo final do sistema. Da mesma forma, Smartt *et al.* (2002) afirmam que as máquinas inteligentes são aquelas que já sabem ou podem aprender tudo o que precisam saber para executar uma tarefa ou processo. Estas máquinas podem ser capazes de executar as tarefas ou processos de forma autônoma (sem intervenção do operador) ou semi-autônoma (com a intervenção do operador).

Por outro lado, no contexto da *inteligência artificial*, sem precisar ser uma máquina, Russell e Norvig (2003) definem um *agente* como qualquer “coisa” que tenha a faculdade de perceber o seu ambiente através de *sensores* e que aja sobre aquele ambiente através de *atuadores*. Assim como um agente humano tem como sensores olhos, ouvidos e outros órgãos e como atuadores as mãos, pernas, boca, etc., um agente robótico pode ter câmeras e microfones como sensores e diferentes motores como atuadores. Um agente de software, por exemplo, pode utilizar como sensores as teclas digitadas, o conteúdo de arquivos e

pacotes da internet e pode agir sobre seu meio através da exibição na tela do computador, de uma gravação de arquivos ou do envio de pacotes na internet.

No decorrer do desenvolvimento das técnicas de inteligência artificial, diferentes autores têm apresentado diversas definições de um agente inteligente, Franklin e Graesser (1996) compilam algumas das mais importantes com a finalidade de aclarar a diferença entre um agente inteligente e um programa de computador. De forma geral, pode-se dizer que um agente inteligente tem as seguintes características básicas:

- Objetivos próprios;
- Autonomia, tendo a capacidade de agir sem intervenção de outros agentes;
- Reatividade, tendo a habilidade de reagir a estímulos do ambiente;
- Proatividade, a qual permite ao agente de agir guiado pelos seus objetivos, a partir de iniciativa própria;

No caso da Autonomia de raciocínio, o agente requer uma máquina de inferência (funções de inferência) e uma base de conhecimento. Por outro lado, o resultado do agente é medido a partir de uma “medida de desempenho”. Assim, quando um agente é colocado em um ambiente e uma sequência de ações é gerada com base nas suas percepções, as ações levam o ambiente a modificar-se passando por uma sequência de estados, os quais serão “desejáveis”, entanto o agente tenha um bom desempenho. No entanto, não existe uma medida de desempenho fixa para todos os agentes. Deve-se optar por uma medida de objetiva e determinada pelo projetista.

Outras características adicionais que aumentam as capacidades dos agentes inteligentes são:

- Adaptabilidade;
- Aprendizagem;
- Comunicação e Cooperação;
- Personalidade;
- Continuidade temporal;
- Mobilidade;

A adaptabilidade e a aprendizagem se referem à capacidade de adaptação a situações novas, para as quais não foi fornecido todo o conhecimento necessário com antecedência. A comunicação e a cooperação (sociabilidade) são essenciais em sistemas multiagentes, neste caso se requer essencialmente protocolos padrões de comunicação e arquiteturas de interação entre agentes. A personalidade é útil no caso de sistemas de entretenimento digital, realidade virtual e interfaces amigáveis. A Continuidade temporal é essencial em sistemas de monitoramento e controle. A mobilidade é usada em agentes de exploração.

Com respeito aos tipos de agentes, podem-se encontrar os seguintes quatro tipos básicos:

- Reflexivos (Reativo Simples)
- Reflexivos baseado em modelo
- Orientados a objetivos
- Baseados em utilidade

As Figuras 2.12, 2.13, 2.14, 2.15 ilustram os tipos de agentes e as suas respectivas características. O agente reflexivo age por ações baseadas no estado atual do mundo por meio de regras condição-ação, desconhecendo a evolução do processo. O agente reflexivo baseado em modelo utiliza modelos do ambiente e assim tem em conta a evolução apresentada no mundo e as possíveis consequências que ocasionem as decisões a tomar. O agente orientado a objetivos é mais flexível que o anterior, ele infere as decisões a tomar e as possíveis consequências destas decisões a partir do estado atual e do objetivo final do agente. O agente baseado em utilidade foca sua atenção nos estados atuais e futuros que apresentem maior utilidade ao seu objetivo final, tendo em conta que nem sempre se consegue atingir os objetivos com exatidão.

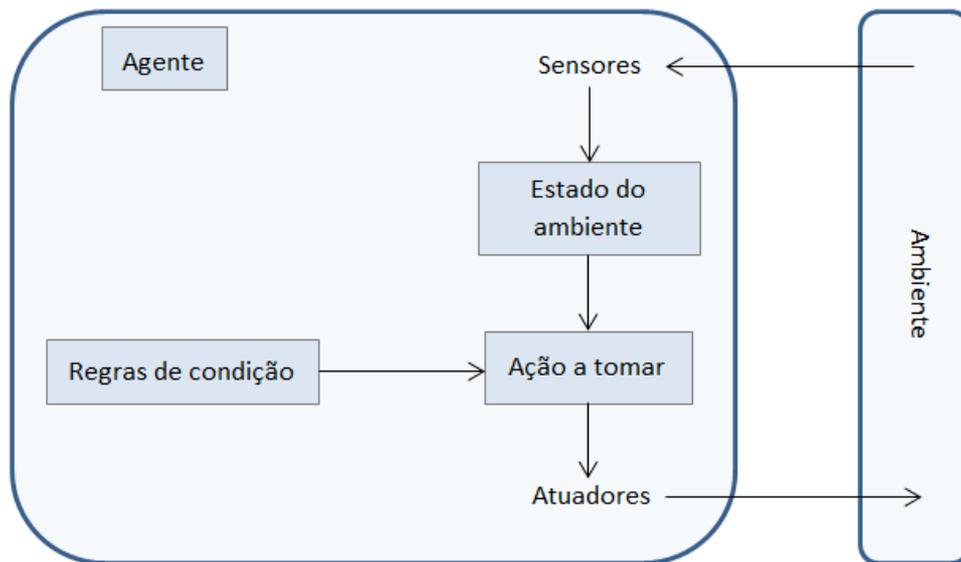


Figura 2.12. Agente Reflexivo (adaptado de Russell e Norvig, 2003)

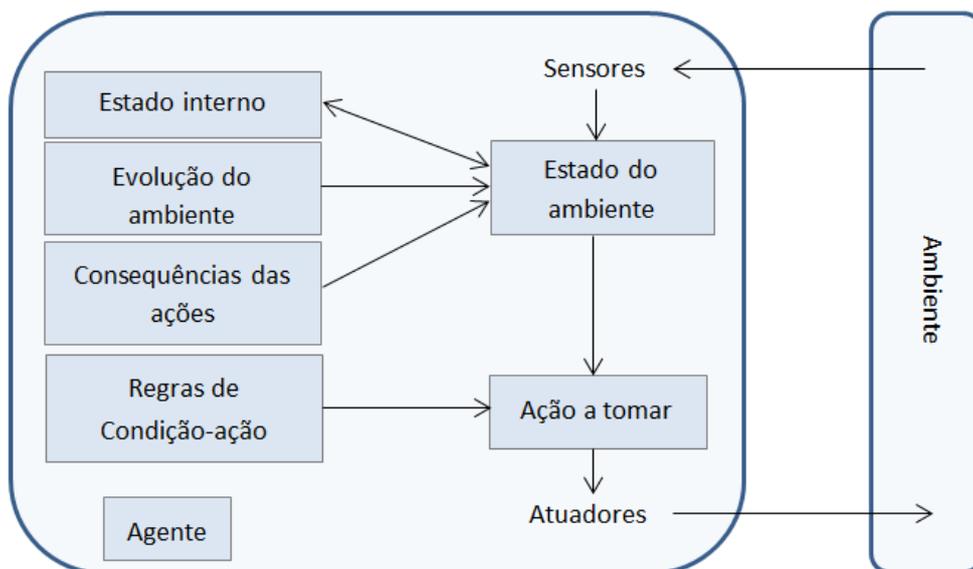


Figura 2.13. Agente reflexivo baseado em modelo (adaptado de Russell e Norvig, 2003)

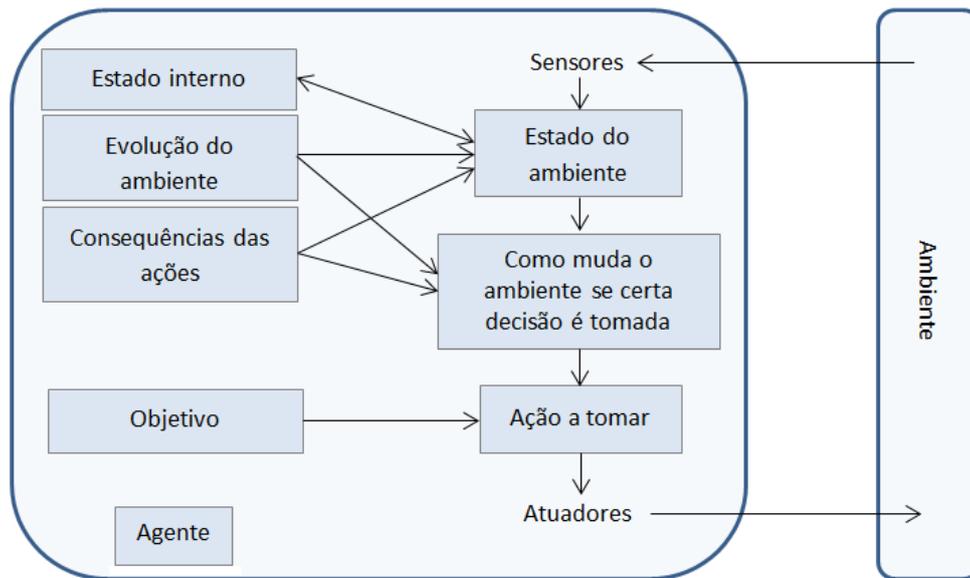


Figura 2.14. Agente orientados a objetivos (adaptado de Russell e Norvig, 2003)

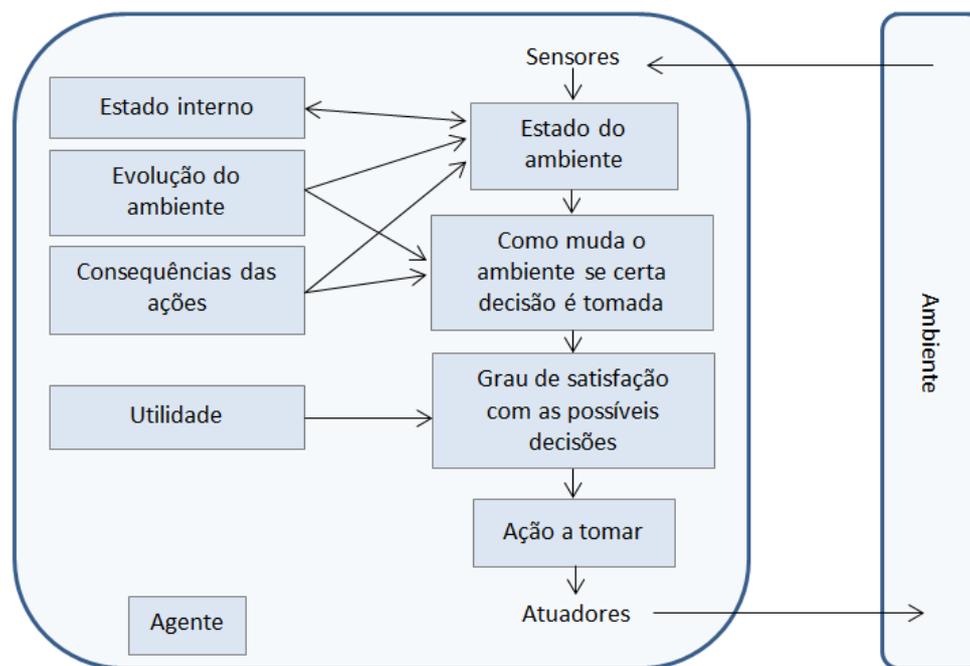


Figura 2.15. Agente baseados em utilidade (adaptado de Russell e Norvig, 2003)

2.5 – TÓPICOS EM CONTROLE

Controle é ação de regulação, ajuste e comando das saídas dos sistemas dinâmicos e/ou processos a fim de alcançar um valor desejado a partir da regulação de determinadas

entradas no sistema (Cayo, 2013). Basicamente existem duas configurações nos sistemas de controle: em malha aberta e em malha fechada (Figura 2.16). De forma geral o controlador em malha aberta trabalha a modo de encontrar os parâmetros ótimos que entrem ao sistema, neste caso a saída do sistema não afeta as decisões do controlador. Por outro lado, o controlador em malha fechada monitora acompanha e avalia a variável controlada alimentando o controlador com o erro entre a saída desta variável e o valor pretendido na saída do sistema, a fim de reduzir o erro e levar a saída ao valor esperado.

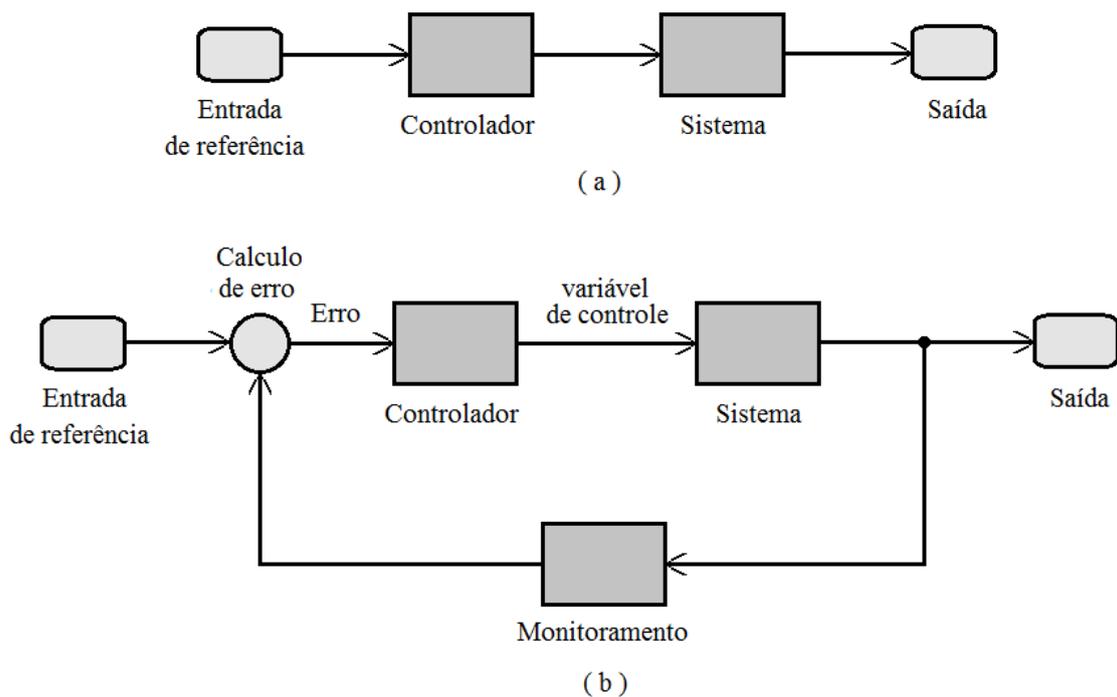


Figura 2.16. Esquema geral dos sistemas de controle. (a) Em malha aberta; (b) em malha fechada

Como explica Passino (2001), o controle inteligente se realiza através da emulação da inteligência biológica, tomando idéias de como resolver problemas e aplicando-as para a solução dos problemas de controle. As principais áreas no controle inteligente são o controle fuzzy, as redes neurais, os algoritmos genéticos, os sistemas especialistas e de planejamento.

No caso dos sistemas especialistas, estes são conceitualmente similares ao controle fuzzy devido a que muitas operações de controle em geral estão fora da área de problemas de controle tradicionais (baseados em modelos do sistema/processo). Não obstante um

sistema especialista pode utilizar estruturas de representação e de inferência muito mais focadas ao problema tratado. A Figura 2.17 mostra um esquema representando de forma geral um sistema de controle especialista.

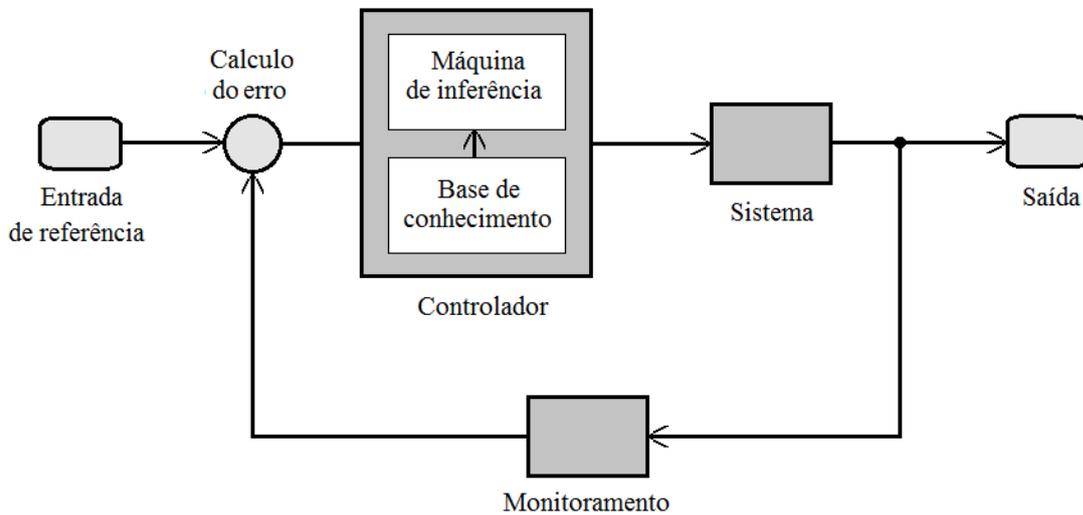


Figura 2.17. Esquema de um processo de controle especialista (Traduzido e adaptado de Passino, 2001)

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

3 - ESTADO DA ARTE

Com o propósito de encontrar parâmetros que satisfaçam os requerimentos de produção nos processos de soldagem, são encontradas na literatura diferentes estratégias para controlar a geometria dos cordões de solda. Entre as mais comuns destacam-se as baseadas em modelos de regressão linear e redes neurais. Contudo, antes de controlar é necessário medir e o método mais comum de medir os parâmetros geométricos dos cordões de solda é a inspeção dimensional mediante medição direta bem seja com paquímetros, micrômetros ou, para maior precisão, com macrografia. Estes métodos são classificados dentro do conjunto denominado *off-line*, ou seja, feitos depois de concluído o processo de soldagem. Atualmente, e visando desenvolver sistemas de controle em tempo-real, são usados novos métodos de monitoramento e medição *online*, isto é, durante o processo. Neste capítulo apresentam-se os trabalhos mais relevantes que envolvem o monitoramento, a modelagem e o controle das características geométricas dos cordões de solda com base em sistemas de visão computacional.

3.1 – MONITORAMENTO DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

A altura do reforço, a largura e a penetração são os principais atributos na caracterização geométrica 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, estes por sua vez, estão ligados aos parâmetros fixos do processo como gás de proteção, metal de base e metal de adição, entre outros. Os trabalhos de Nagesh e Datta (2002), Karadeniz *et al.* (2007), e Kanti e Rao (2008) se ajustam nesta técnica de medição indireta.

Outros estudos apresentam medições diretas da penetração utilizando técnicas especializadas como ultrassom (Graham e Ume, 1997; Kita e Ume, 2007) e raios X (Rokhlin e Guu, 1990; Guu e Rokhlin, 1992), este tipo de sistemas exibem bons resultados, mas são difíceis de utilizar na prática. Outros estudos relacionam a penetração com o monitoramento de variáveis específicas como a quantidade da luz no lado oposto do cordão (Bentley e Marburger, 1992), as oscilações da poça (Xiao e Ouden, 1990; Xiao e

Ouden, 1993; Aendenroomer e Ouden, 1998), o espectro eletromagnético (Hoffmeister *et al.*, 1992) e a temperatura (Song e Hardt, 1993; Banerjee *et al.*, 1995; Farson *et al.*, 1998).

Em alguns casos particulares utiliza-se o monitoramento de outras características geométricas dos cordões de solda para inferir a penetração. Por exemplo, Zhang *et al.* (1996) utilizam a largura e a área do cordão de solda (medida na secção transversal) para controlar processos de penetração total em GTAW; Wo e Gao (2006) realizam inferências da penetração no processo GTAW usando as variáveis geométricas descritas na Figura 3.1. Zhang *et al.* (2008) utilizam o monitoramento da largura do cordão junto com a corrente, a velocidade de soldagem, a velocidade de alimentação do arame, a tensão do arco e a distância de contato bico-peça, para estimar a profundidade de penetração no processo de soldagem FCAW (*Flux-Cored Arc Welding*). Devido aos contínuos avanços na capacidade computacional e a diminuição dos custos dos sistemas de visão computacional, atualmente, estes tipos de estudos são considerados como convenientes por apresentar relações diretas da geometria dos cordões de solda com as variáveis do processo.

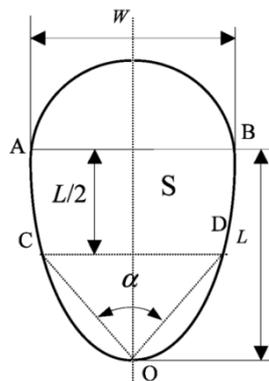


Figura 3.1. Parâmetros utilizados por Wo e Gao (2006) para inferir penetração na poça de fusão. W: largura; L/2: metade do comprimento da poça; α: ângulo da cauda; S: área entre a cauda e a metade do comprimento, compreendida entre os pontos ACODB (Wo e Gao, 2006)

No caso do monitoramento da largura e do reforço, diferentes abordagens são apresentadas na literatura. Por um lado estão os baseados em luz estruturada, a maioria destes sistemas utiliza um único feixe de luz gerado por laser. Esta técnica é referida por Huang e Kovacevic (2012) como triangulação laser (chamada de Perfilometria óptica laser por Melo, 2012). Outras técnicas fazem uso de luz laser com padrões especiais de várias linhas ou pontos. Em todos os casos a geometria é inferida com base na alteração (com

respeito à sua posição original) desses padrões de luz em sua passagem pela poça de fusão ou pelo cordão.

3.1.1 – Sistemas de luz estruturada

3.1.1.1 – Triangulação laser

Esta técnica é a mais referenciada e utilizada a fim de determinar parâmetros geométricos (externos) em cordões de solda, funciona com o princípio da triangulação e permite quantificar fielmente proporções e defeitos nos cordões. Como se apresenta nas Figuras 3.2 e 3.3, o sistema consiste de uma câmera e um laser que gera um feixe em forma de linha. O feixe passa pela superfície do cordão perpendicularmente ao seu eixo principal (direção de soldagem), assim, variações na altura do cordão são vistas como mudanças na posição do feixe laser em relação a sua posição original na base da chapa.

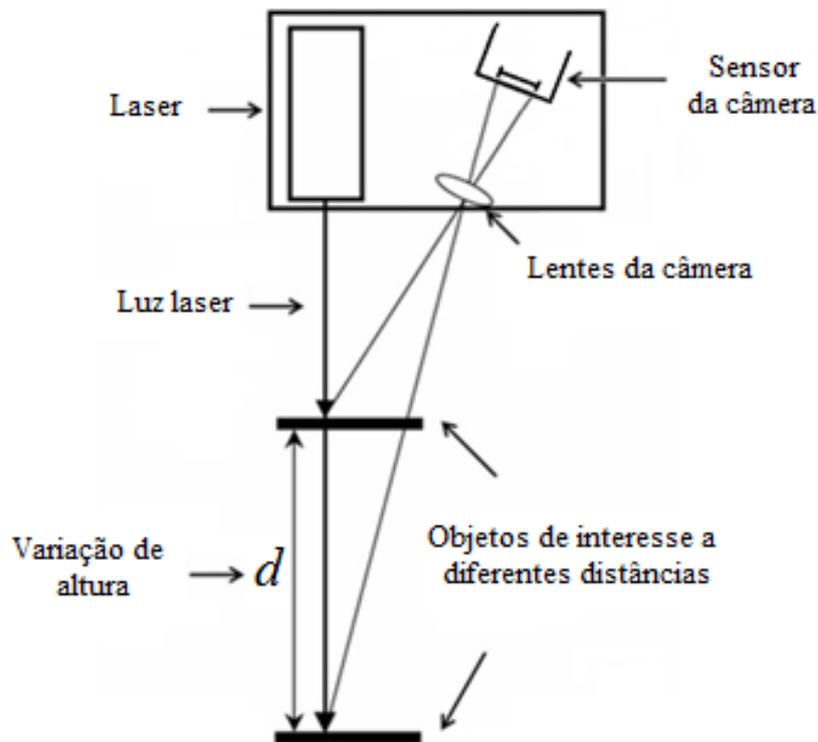


Figura 3.2. Princípio de funcionamento da triangulação laser. Diferentes alturas produzem variações na detecção (traduzido e adaptado de Huang e Kovacevic, 2012)

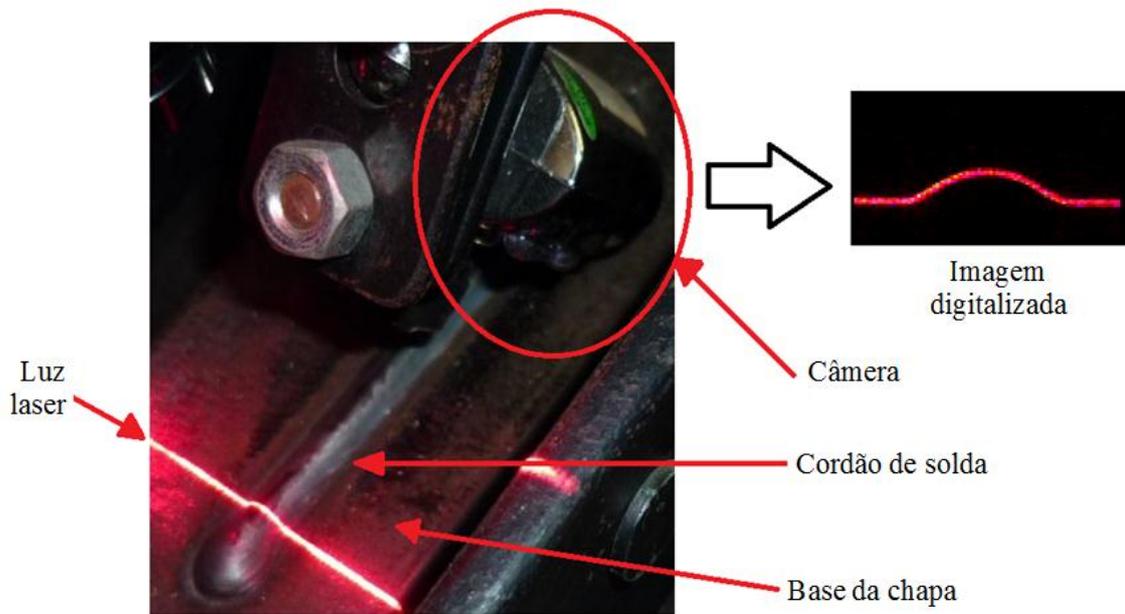


Figura 3.3. Ilustração do funcionamento da triangulação laser (Adaptado de Cruz, 2014)

Depois da digitalização da imagem, diferentes técnicas de processamento de imagens podem ser utilizadas para reconstruir a superfície do cordão de solda; o sistema deve ser calibrado para proporcionar medições em unidades de comprimento (geralmente milímetros para a dimensão do cordão). Os trabalhos de Cayo (2013), Torres (2013), Torres *et al.* (2013), Cruz (2014), Cruz *et al.* (2015) apresentam o uso desta técnica no modo off-line para o processo GMAW. A Tabela 3.1 apresenta um resumo do processamento utilizado nas imagens adquiridas.

Tabela 3.1. Sequencia de processamento de usado no sistema de triangulação laser (adaptado de Torres, 2013)

Fase	Processo	Representação na imagem
1	Obtenção da imagem digitalizada	
2	Conversão da imagem a tons de cinza e aplicação de filtro de <i>mediana</i> para eliminar pixels isolados	
3	<i>Binarização</i> da imagem, representada em preto e branco (0 e 1).	
4	Medição dos pixels e conversão das medidas em milímetros	

Autores, como Kim *et al.* (2012), utilizam mais de um feixe laser (paralelos) com o fim de calcular a posição da câmera com relação ao cordão e re-calibrar o sistema. Por outro lado, autores como White *et al.* (1994), Wu *et al.* (1996), Zhang e Kovacevic (1997), Doumanidis e Kwaka (2002), Zhang *et al.* (2008), Xu *et al.* (2010) e Li *et al.* (2010) apresentam o uso da técnica em processos *on-line*. A maioria de trabalhos deste tipo tem como objetivo o controle dos parâmetros geométricos, mas também se utilizam para a localização de defeitos nos cordões. Em todos os casos, o feixe laser percorre a superfície do cordão já solidificado de modo que, em etapas de controle, deve passar tão perto quanto possível da poça de fusão, mas, sem comprometer o correto funcionamento do sistema; esta condição não é trivial e gera um atraso nos sistemas de controle que deve ser considerada no projeto.

Outro uso frequente dos perfilômetros laser é nos processos de identificação e planejamento de trajetórias para sistemas robotizados e automatizados, como referido nos trabalhos de Kang *et al.* (2007), Shi *et al.* (2007), Tian *et al.* (2007), Kim *et al.* (2008), Fang *et al.* (2011), Fernández *et al.* (2011), Cui *et al.* (2013). Trabalhos como o de Liu *et al.* (2006) e Liu (2010) apresentam técnicas de processamento de imagens digitais para remover o ruído causado por respingos durante o processo; as metodologias se focam em localizar as linhas paralelas ao feixe laser nas imagens, eliminando o ruído apresentado em forma de linhas mais ou menos perpendiculares ao feixe. Liu *et al.* (2010) emprega algumas técnicas interessantes como a equalização de histogramas, transformada de *Hough*, filtros morfológicos, entre outras, para processar imagens em ambientes subaquáticos.

3.1.1.2 – Padrões de luz estruturada

Os padrões de luz estruturada utilizam-se em maior medida para determinar o comportamento da poça de fusão. Os padrões utilizados na literatura são de linhas paralelas, de linhas cruzadas (*grade*) e de pontos que são projetados sobre a poça de fusão e redirecionados para a câmera por *reflexão especular*. Ao contrário dos perfilômetros laser, os quais observam um padrão de luz a partir da *reflexão difusa* dos raios sobre a chapa e o cordão já fundido, os sistemas baseados em luz especular são utilizados diretamente sobre a poça de fusão e aproveitam com maior eficiência a potência do laser.

Na reflexão difusa um raio que incide sobre uma superfície é refletido em todas as direções. Ao contrário, a reflexão especular para espelhos obedece à “lei da reflexão”, na qual o ângulo de reflexão de um feixe de luz é sempre igual ao ângulo de incidência (em relação à superfície normal do espelho). A poça de fusão comporta-se como um espelho, côncavo ou convexo de acordo a sua forma, devido às propriedades refletivas do metal fundido sobre sua superfície. Finalmente, o sistema é ajustado para que a luz proveniente do laser seja direcionada ao plano da imagem adquirida (Kovacevic e Zhang, 1996).

Alguns exemplos deste tipo de sistemas são referidos em Kovacevic e Zhang (1996, 1997), que usam um padrão de linhas paralelas e apontam a câmera diretamente para a poça em direção do ângulo de reflexão, como ilustra a Figura 3.4. Nestes trabalhos se utiliza um laser pulsado e sincronizado com o obturador da câmera onde os tempos de obturação são suficientemente pequenos para permitir a passagem da luz refletida do laser e para interromper satisfatoriamente a passagem da luz do arco.

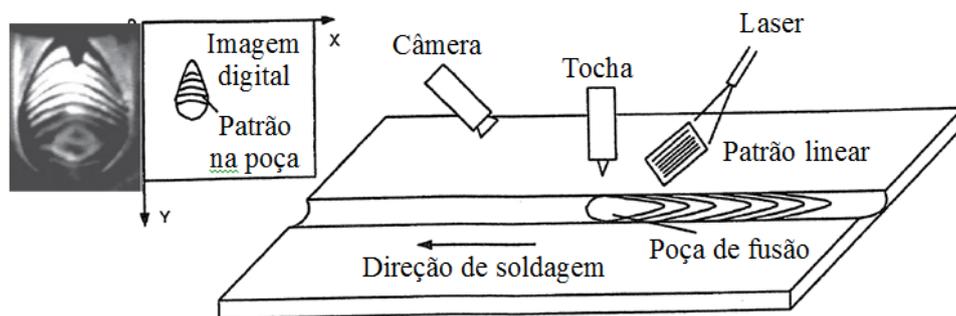


Figura 3.4. Uso de padrão de linhas para determinar geometria da poça de fusão (traduzido e adaptado de Kovacevic e Zhang, 1997).

O trabalho de Ma e Zhang (2011) apresenta a mesmo princípio aplicado ao processo GMAW pulsado. Neste caso o padrão é gerado pelo próprio sistema óptico do laser, o qual tem uma potência de 375 *mW*, com um comprimento de onda de 670 *nm*. Por outro lado, o sistema utiliza um filtro óptico de interferência passa-faixa (na região do laser) para eliminar a maior parte da luz do arco elétrico e uma superfície plana (tela) semitransparente para projetar os raios refletidos do laser como se ilustra na Figura 3.5. Esta montagem minimiza a luz do arco que pode passar pelo filtro, ajuda a uniformizar o fundo das imagens e facilita a visualização dos padrões de luz refletidos. Em Wang *et al.* (2011a, 2011b), se apresenta o mesmo sistema e se adiciona o acompanhamento das gotas

na sua passagem através do arco mediante o seguimento de descontinuidades presentes nas linhas de luz no padrão projetado (Figura 3.6).

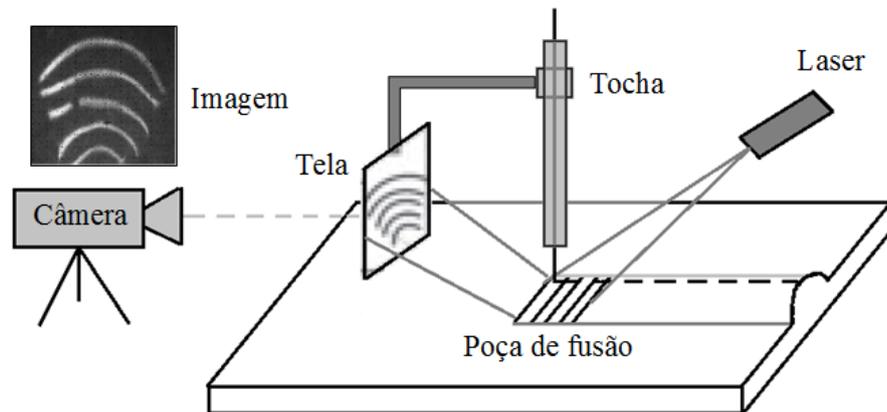


Figura 3.5. Uso de padrão de linhas para determinar geometria da poça de fusão com tela de projeção (traduzido e adaptado de Ma e Zhang, 2011)



Figura. 3.6. Sequência de detecção de gotas no processo GMAW-P com padrão de linhas paralelas (Wang *et al.*, 2011a)

Ma *et al.* (2012) apresentam uma configuração similar e utilizam um padrão de linhas cruzadas, como pode ser visto na Figura 3.7. Song e Zhang (2007a, 2007b, 2008,2009) apresentam o uso da técnica com padrões de pontos (Figura 3.8), assim como Zhang W.J. *et al.* (2012a, 2012b, 2013) desta vez aplicado à soldagem orbital. A Figura 3.9 mostra a configuração da bancada experimental e a imagem capturada pela câmera.

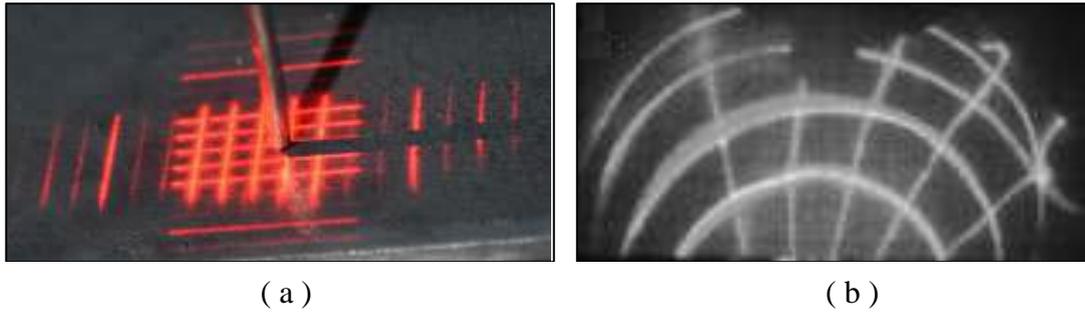


Figura 3.7. Padrão de linhas cruzadas. (a) raios de luz laser incidindo na chapa plana; (b) raios de luz refletidos da poça durante o processo de soldagem. (Ma *et al.* 2012)

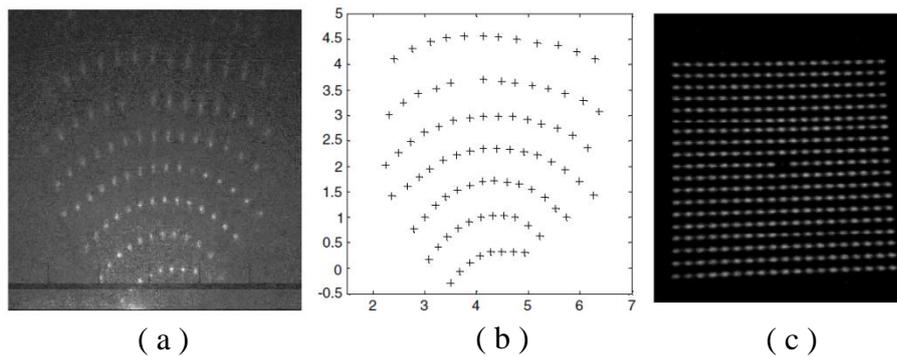


Figura 3.8. Padrão de pontos. (a) Imagem dos pontos refletidos pela poça; (b) pontos reconhecido pelo software de processamento; (c) padrão original sem deformação (Song e Zhang W.J., 2007b)

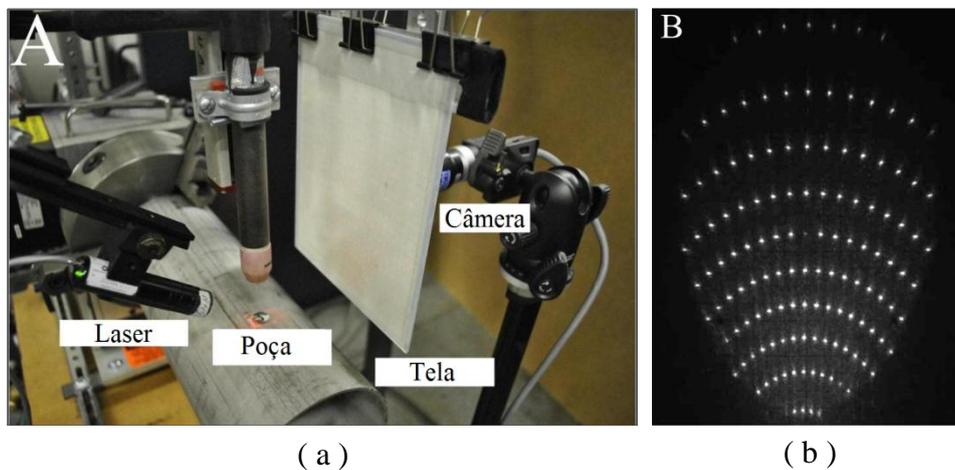


Figura 3.9. Padrão de pontos utilizado em soldagem orbital. (a) bancada experimental; (b) imagem de pontos refletidos pela poça (traduzido de Zhang W.J. *et al.* 2013)

Como o ângulo de reflexão dos raios incidentes depende da forma da superfície de reflexão, neste caso a poça de fusão, estas técnicas funcionam bem no processo GTAW, no qual não existe metal de adição sobre a poça e seu comportamento é relativamente estável. Em processos com metal de adição como o GMAW, as perturbações que acontecem

continuamente na poça mudam a forma da superfície especular e com ela as direções dos raios refletidos (Figura 3.10). Mesmo assim, um rastreamento da geometria pode ser feito em processos com metal de adição, mas requer-se especial atenção nas limitações e configuração do sistema.

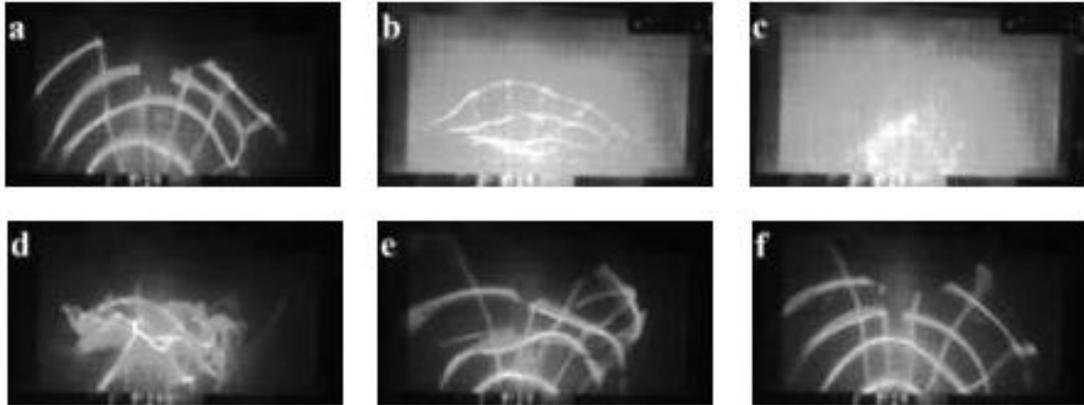


Figura 3.10. Exemplo de variações no padrão de luz refletido quando uma gota atinge a poça de fusão em um processo GMAW pulsado. Taxa de aquisição das imagens: 800 *fps*. Comprimento de onda do laser: 670 *nm*; potência: 375 *mW* (Ma *et al.* 2012)

Assim, de forma geral, pode-se dizer que os padrões de pontos são limitados ao processo GTAW devido a que apresenta menor quantidade de distúrbios no padrão de pontos refletidos. Os padrões de linhas paralelas e cruzadas podem ser utilizados em processos como GMAW pulsado, mas estes devem ser limitados às condições que favoreçam flutuações pequenas na poça de fusão. Os padrões de linhas cruzadas fornecem maior informação que os padrões de linhas paralelas porque incluem informação no sentido longitudinal da poça, além de informação sobre a posição dos nós (pontos em que se cruzam as linhas).

Finalmente, alguns sistemas utilizam luz estruturada para ver os cordões de solda numa perspectiva geral na peça, seu uso está focado no posicionamento de robôs e sistemas automatizados. Alguns exemplos deste tipo são vistos em Zhang L. *et al.* (2012,2013), onde se utiliza um padrão de duas linhas cruzadas, e em Rodriguez (2013), no qual se apresenta um sistema de digitalização 3D com padrões lineares de luz branca.

3.1.2 – Sistemas para ver a poça de fusão

Em alternativa aos padrões de luz estruturada, outras técnicas utilizadas para monitorar os parâmetros geométricos dos cordões de solda baseiam-se na extração de características específicas do cordão e/ou da poça de fusão a partir de imagens adquiridas durante o processo de soldagem. A ideia de visualizar diretamente a poça de fusão ou o cordão de solda tem duas alternativas, com ou sem iluminação externa.

3.1.2.1 – Sistemas de visão com iluminação externa

Muitos trabalhos têm sido realizados e continuam sendo aperfeiçoados com o fim de adquirir imagens nítidas da poça de fusão. Com este objetivo são utilizados principalmente sistemas com iluminação externa ou chamados também de sistemas de visão ativos. A ideia desta técnica é empregar um filtro óptico de interferência passa-faixa na frente da câmara, com uma faixa muito estreita e, preferivelmente, numa região espectral do arco elétrico com pouca intensidade. O filtro óptico tem a faculdade de diminuir a maior parte da radiação proveniente do arco, mas ao mesmo tempo dificulta a observação dos objetos de interesse e, por conseguinte, um sistema de iluminação com comprimento de onda compatível se utiliza para prover a radiação necessária para ver os objetos.

Como é referido em Mota *et al.* (2011), o arco elétrico nos processos de soldagem emite radiação em comprimentos de onda desde ultravioleta até o infravermelho no espectro eletromagnético. Igualmente, determina-se que a intensidade luminosa emitida pelo arco elétrico nos comprimentos de onda infravermelha superiores a 850 *nm* é pequena quando comparada com a intensidade emitida pelo arco no espectro visível. Como é resumido em Abdullah (2012), o arco elétrico apresenta maior intensidade nas regiões visível e ultravioleta do espectro, e a poça de fusão apresenta maior intensidade na região do infravermelho, de modo que a janela espectral ideal para filmar a poça está no infravermelho, considerada por Abdullah em valores que estejam compreendidos entre 800 e 950 *nm* e atendendo as limitações normais acima de 1000 *nm* que têm as respostas espectrais das câmeras de filmagem comuns (de alta velocidade ou não). Bons resultados são apresentados em Abdullah *et al.* (2006) para o espectro visível, concretamente em 532

nm (luz verde), mas utilizando um laser *Nd:YAG* com pulsos intensos em tempos de obturação muito pequenos.

Nos sistemas de visão com iluminação externa diversos sistemas de laser, contínuos e pulsados, são utilizados em diferentes configurações, Abdullah *et al.* (2006) apresentam alguns bons exemplos a respeito. Certamente os problemas relacionados com estes sistemas são o custo e a flexibilidade, que, no momento, limitam uma aplicação prática na indústria e na maioria de centros de pesquisa. Alternativamente se apresentam sistemas de iluminação tipo “lâmpadas” de diodos laser de alta potência e com radiações no infravermelho próximo. Estes utilizam vários diodos laser ao mesmo tempo e respondem com uma boa relação custo-benefício comparados aos sistemas laser já utilizados. Alguns exemplos deste tipo de sistemas são encontrados em Vilarinho *et al.* (2009,2010), Abdullah (2012), Mota *et al.* (2013). A Figura 3.11 apresenta exemplos de imagens adquiridas com este tipo de sistemas.

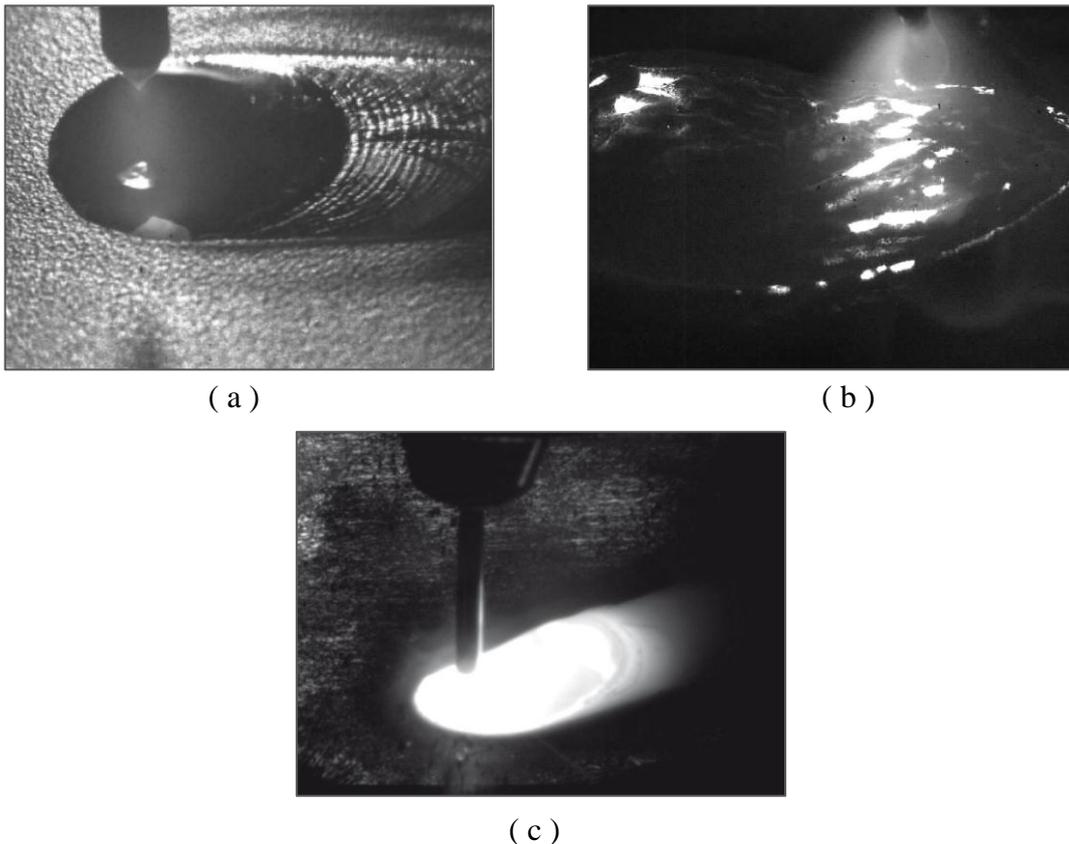


Figura 3.11. Imagens adquiridas com iluminação externa de diodos laser. (a) Processo GTAW e (b) Processo GMAW, com tempo de exposição de $10\mu s$ (Vilarinho *et al.*, 2010); (c) Processo GMAW, com tempo de exposição de $100\mu s$ (Mota *et al.*, 2013)

Deve-se ressaltar que o uso do filtro de interferência óptico é acompanhado de tempos de exposição muito pequenos no sensor da câmera (unidades ou, no máximo, dezenas de μs) e aberturas adequadas do diafragma da lente. Tempos de exposição pequenos permitem capturar menor quantidade de radiação do arco, de modo que, além de evitar a saturação em regiões específicas da imagem (Figura 3.11 (c)), se produz um efeito de “congelamento” nos objetos e, portanto, aumenta-se a nitidez. A abertura do diafragma na lente da câmera deixa passar mais ou menos luz ao sensor e influencia a profundidade de campo na imagem: quanto maior abertura do diafragma menor profundidade de campo e menor área da imagem nítida. Por outro lado, a quantidade de radiação registrada nas imagens, também depende de fatores como o gás de proteção, a corrente, a tensão, o metal base, e certamente do processo de soldagem utilizado, sendo maior para GMAW que para GTAW (Mota *et al.*, 2011).

3.1.2.2 – Sistemas de visão sem iluminação externa

Este tipo de sistemas de visão utiliza a própria radiação do arco e da poça de fusão como fonte de iluminação, pelo que são chamados de “*passivos*” por autores como Shen *et al.* (2008), Zou *et al.* (2011), Xiong e Zhang (2013). Os sistemas de visão passivos não empregam iluminação externa, mas utilizam os mesmos princípios para diminuir a radiação que atinge o sensor da câmera, como filtros óticos e ajuste do tempo de exposição, no entanto, em faixas maiores. Embora a nitidez das imagens não tenha a qualidade obtida com um sistema de visão ativo, o sistema passivo apresenta um alto contraste entre a poça de fusão, a chapa e o cordão solidificado, o que oferece uma vantagem a fim de extrair informação das imagens em tempo-real.

Os sistemas de visão sem iluminação externa são utilizados para extrair informação diretamente da poça de fusão, logo, a base do processamento das imagens adquiridas com este tipo de sistemas é a segmentação da poça. Com este objetivo, duas abordagens são utilizadas: descontinuidades e similaridades dos valores de níveis de cinza dos pixels nas imagens, sendo os detectores de bordas baseados no gradiente dos níveis de cinza os mais utilizados na primeira abordagem e a limiarização na segunda.

Além do filtro passa-faixa, existem dois tipos de filtros utilizados regularmente: o filtro passa-longa e o filtro de atenuação. Os filtros passa-longa (de comprimento de onda longa ou baixa frequência), deixam passar as radiações do espectro com comprimentos de onda maiores do que um limiar determinado, geralmente o limiar é fixado no início da radiação infravermelha ao redor de 700 nm , pelo qual são chamados também de filtros infravermelhos; os filtros de atenuação, chamados também de densidade neutra, diminuem a intensidade da radiação de todos os comprimentos de onda por igual.

Trabalhos como Baskoro *et al.* (2011), Torres (2013) e Cruz *et al.* (2015) apresentam o uso de filtros de atenuação e utilizam a técnica de limiarização nas imagens para medir a largura dos cordões de solda em processos de soldagem GMAW. Cruz (2014) também utiliza o mesmo tipo de filtro e de técnica, mas mede a largura e o reforço dos cordões com duas câmaras, uma para cada parâmetro. A Figura 3.12 apresenta fotografias do posicionamento das câmaras no trabalho de Cruz (2014) e as Figuras 3.13 e 3.14 ilustram as metodologias baseadas em limiarização utilizadas nesse trabalho para encontrar o reforço e a largura dos cordões.

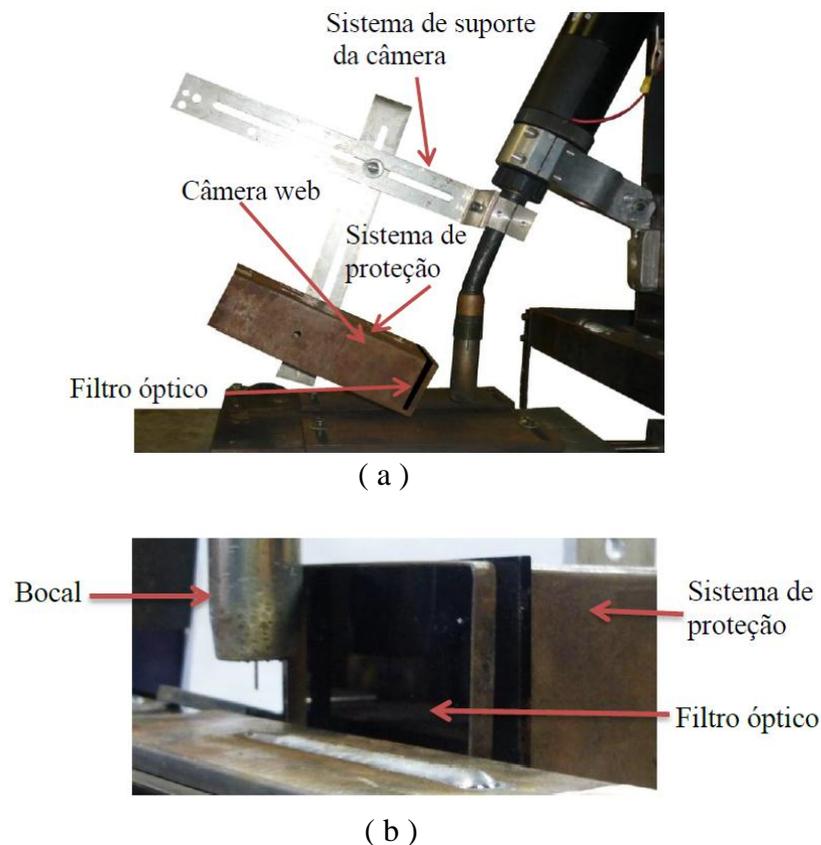


Figura 3.12. Posição das câmeras para medir (a) largura e (b) reforço com duas câmaras (Cruz, 2014)



Figura 3.13. Sequência de processamento para medir a altura do reforço. Na sequencia: imagem original, imagem limiarizada, delimitação e localização dos pontos de referencia (adaptado de Cruz, 2014).

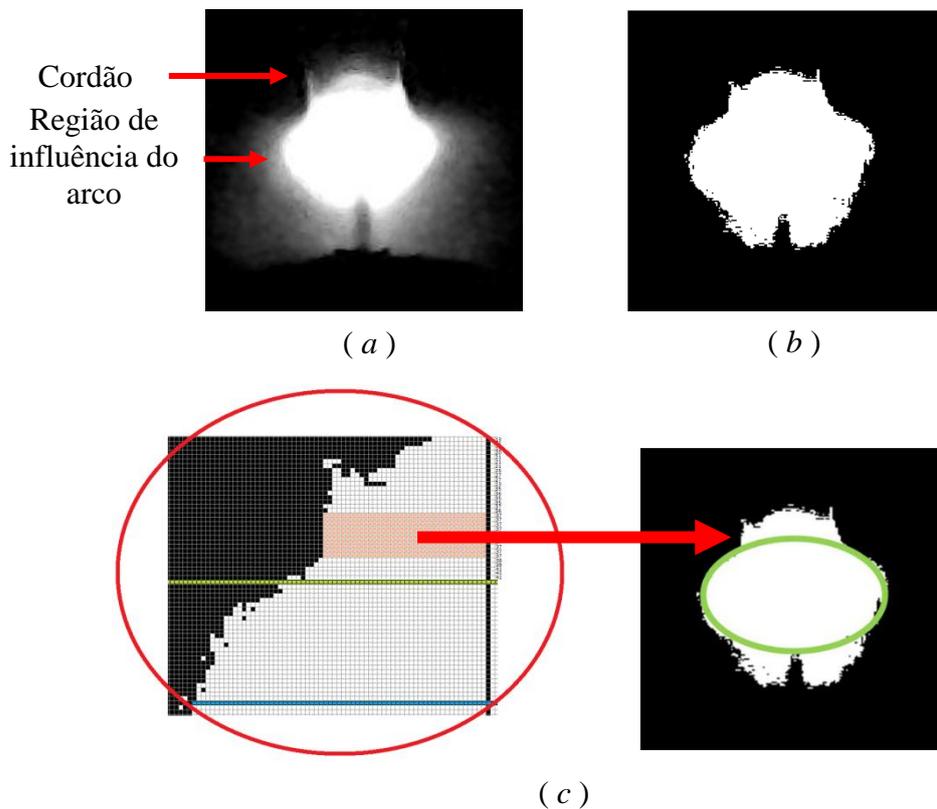


Figura 3.14. Processamento de imagens para medir a largura do cordão. (a) imagem original; (b) imagem limiarizada; (c) ponto de referência para medir a largura a partir da identificação da região de influencia do arco (adaptado de Cruz, 2014)

O esquema empregado por Cruz (2014) para adquirir as imagens, empregando um filtro de atenuação, foi utilizado também por Xiong e Zhang (2013) para encontrar os mesmos parâmetros, mas usando um filtro passa-faixa ao redor de 650 nm e técnicas de extração de bordas para medir a largura e o reforço. A Figura 3.15 apresenta o esquema utilizado por Cruz e por Xiong e Zhang para o posicionamento das câmeras, a Figura 3.16 apresenta exemplos de imagens capturadas por Xiong e Zhang com esta configuração.

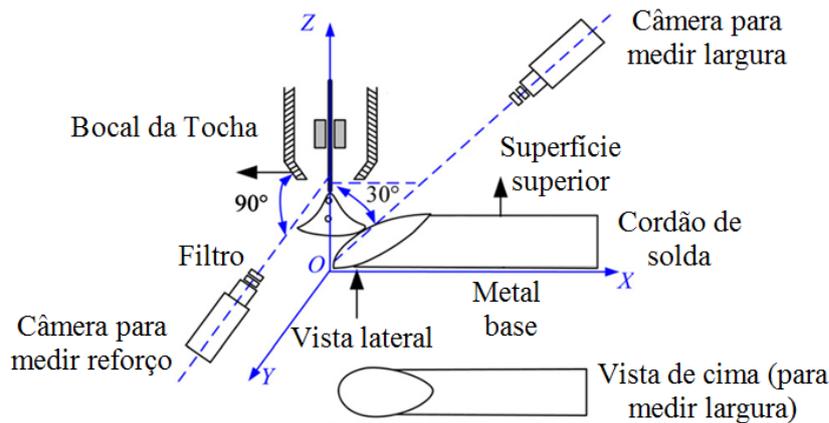


Figura 3.15. Esquema utilizado para medir a largura e o reforço dos cordões de solda com duas câmeras (Traduzido de Xiong e Zhang, 2013).

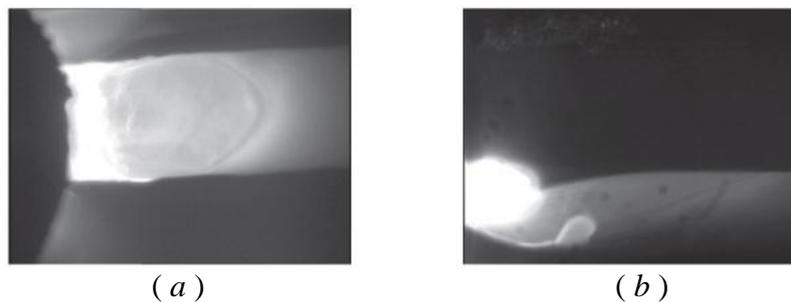


Figura 3.16. Imagens utilizadas para medir largura (a) e reforço (b) com o uso de duas câmeras (Xiong e Zhang, 2013).

O emprego de filtros passa-faixa na região do infravermelho próximo encontra-se também em trabalhos como Chen *et al.* (2000a), Zhao *et al.* (2001), Gao e Wu (2001), Suga *et al.* (2001), Wu *et al.* (2003), Wang *et al.* (2005), Zhang *et al.* (2005) e Chen e Wu (2007, 2009). Estes trabalhos realizam a segmentação da poça de fusão com base em detectores de bordas com funções baseadas no gradiente dos níveis de cinza. A Figura 3.17 apresenta um exemplo do detector de bordas utilizado em Wu *et al.* (2003). Chen *et al.* (2000b) utilizam os detectores para localizar e acentuar as bordas da poça na imagem, em seguida utilizam a limiarização para completar o processamento. Ressalta-se que estes trabalhos foram desenvolvidos para o processo GTAW, o qual apresenta um comportamento mais regular em comparação com o GMAW. As medições em geral são de área e largura da poça, e a configuração da câmera é semelhante à utilizada por Xiong e Zhang (2013) e Cruz (2014) na frente ou atrás do cordão de solda em diferentes ângulos em relação ao metal de base. Abta *et al.* (2011) e Blug *et al.* (2011) utilizam limiarização e Gao *et al.* (2011) os

detectores de bordas para encontrar os parâmetros de interesse na poça de fusão em processos de soldagem a laser.

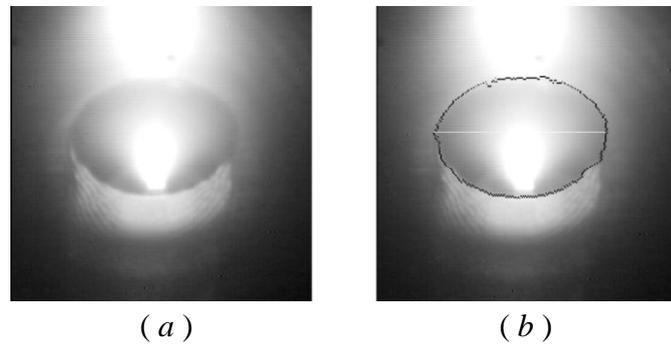


Figura 3.17. Exemplo do detector de bordas utilizado por Wu *et al.* (2003). (a) Imagem original; (b) as bordas da poça de fusão encontradas pelo detector são ressaltadas com um nível de cinza mais escuro (Wu *et al.*, 2003)

No caso do processo GMAW, autores como Zhang *et al.* (2006), Xiong *et al.* (2013) e os mesmos Xiong e Zhang (2013) utilizam a “*transformada de Hough*” para encontrar retas (e parábolas no último caso) que caracterizem os parâmetros geométricos requeridos. Zhang *et al.* (2006) trabalharam com GMAW pulsado e seu caso é particular porque utiliza só uma câmera com somente uma perspectiva (plano-imagem) da poça para encontrar as medidas de reforço e largura do cordão de solda. O modelo de reconstrução tridimensional da poça está baseado nos esquemas das Figuras 3.18 e 3.19, onde o eixo x está ao longo da direção de soldagem e paralelo ao sensor da câmera.

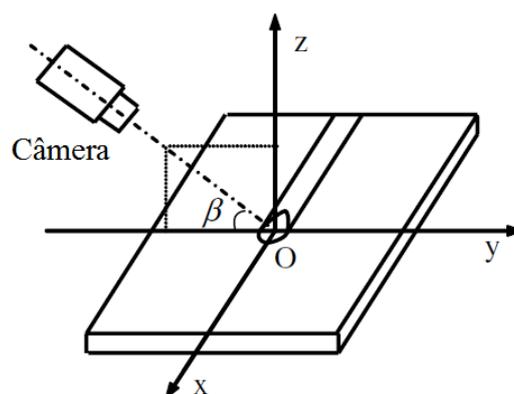
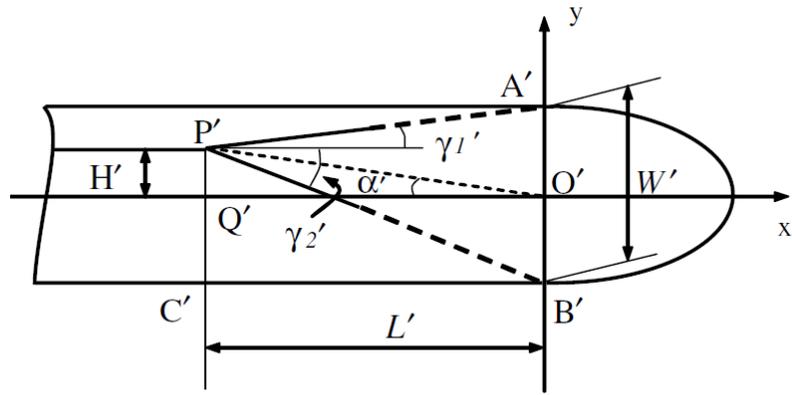
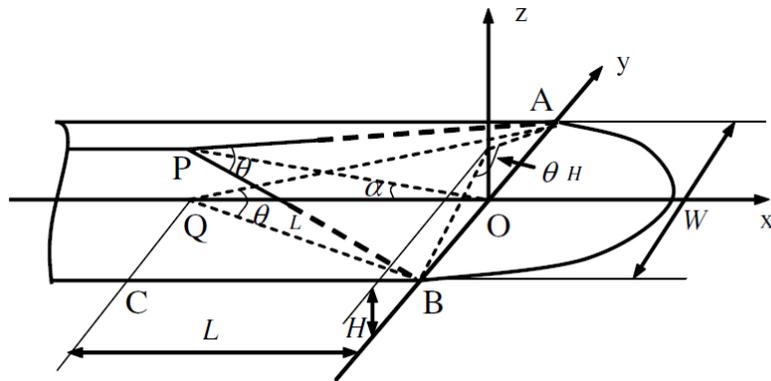


Figura 3.18. Esquema utilizado para o posicionamento da câmera em relação ao metal base e o cordão de solda (Zhang *et al.*, 2006)



(a)



(b)

Figura 3.19. Esquema utilizado para realizar a reconstrução tridimensional da poça de fusão. (a) modelo geométrico da poça de fusão no plano da imagem (2D); (b) transformação do modelo para a representação 3D (Zhang *et al.*, 2006)

As variáveis identificadas nas Figuras 3.18 e 3.19 são:

- β , ângulo entre o plano do metal base e o eixo óptico da câmera;
- H, altura do reforço do cordão;
- P, ponto da poça de menor temperatura na cauda da poça, localizado à altura H;
- Q, ponto da poça de menor temperatura projetado no metal base;
- C, projeção lateral do ponto da poça de menor temperatura;
- A, ponto de referência lateral ao longo do centro da poça;
- B, ponto de referência lateral ao longo do centro da poça;
- O, ponto de referência, centro da poça, metade entre AB;
- W, largura da poça de fusão, comprimento medido entre AB;
- L, comprimento desde o centro até ponto da poça de menor temperatura (OQ);

- α' , ângulo formado pela projeção desde centro “O” até o ponto de menor temperatura “P” da poça com o plano do metal base como referencia;
- θ , ângulo entre os extremos do rastro da poça (AP e BP);
- θ_L , ângulo entre os extremos do rastro da poça projetado no metal base;
- γ_1 , declive da projeção A'P' no plano da imagem.
- γ_2 , declive da projeção B'P' no plano da imagem.
- H', P', C', Q', L', A', O', B', W', α' , representam os valores apresentados anteriormente, mas no plano da imagem.

A partir dos esquemas das figuras 3.18 e 3.19, Zhang *et al.* (2006) utilizam as seguintes equações para encontrar os parâmetros geométricos do cordão:

$$W = \frac{W'}{\text{sen}(\beta)} = \frac{A'B'}{\text{sen}(\beta)} \quad (3.1)$$

$$H = \frac{H'}{\text{cos}(\beta)} = \frac{P'Q'}{\text{cos}(\beta)} = \frac{A'B'/2}{\text{cos}(\beta)} \quad (3.2)$$

O ângulo α pode ser calculado a partir de:

$$\tan(\alpha) = \frac{\tan(\alpha')}{\text{cos}(\beta)} \quad (3.3)$$

O ângulo θ pode-se calcular a partir de:

$$\tan(\theta/2) = \frac{(\tan(\gamma'_2) - \tan(\gamma'_1)) \text{cos}(\alpha)}{2\text{sen}(\beta)} \quad (3.4)$$

$$\tan(\theta_L/2) = \frac{\tan(\gamma'_2) - \tan(\gamma'_1)}{2\text{sen}(\beta)} \quad (3.5)$$

L é definida como a distância Q'O', pode ser calculada como a distância entre o ponto P' e o plano formado entre os pontos A' e B' com o plano de referência z. A Figura 3.20 apresenta uma imagem capturada utilizando-se o esquema da Figura 3.18 com um ângulo β de 45°. De acordo com a Figura 3.19, os pontos de referencia A' e B' na imagem são

encontrados utilizando detectores de bordas baseados no gradiente dos níveis de cinza. À direita da Figura 3.20(b) indicam-se os pontos encontrados na imagem original. A Figura 3.20(c) resalta as bordas da poça de fusão, as quais são encontradas utilizando a distribuição dos níveis de cinza na imagem; esta distribuição é exemplificada na Figura 3.21 para os pontos de referencia “a”, “b”, “c”, e “d” à esquerda da Figura 3.20(b). Os problemas de detecção apresentados na etapa anterior podem-se ver na Figura 3.20(c) na forma de ruído, que são corrigidos utilizando-se a transformada de Hough, a qual localiza as duas retas principais e elimina o resto (Figura 3.20(d)).

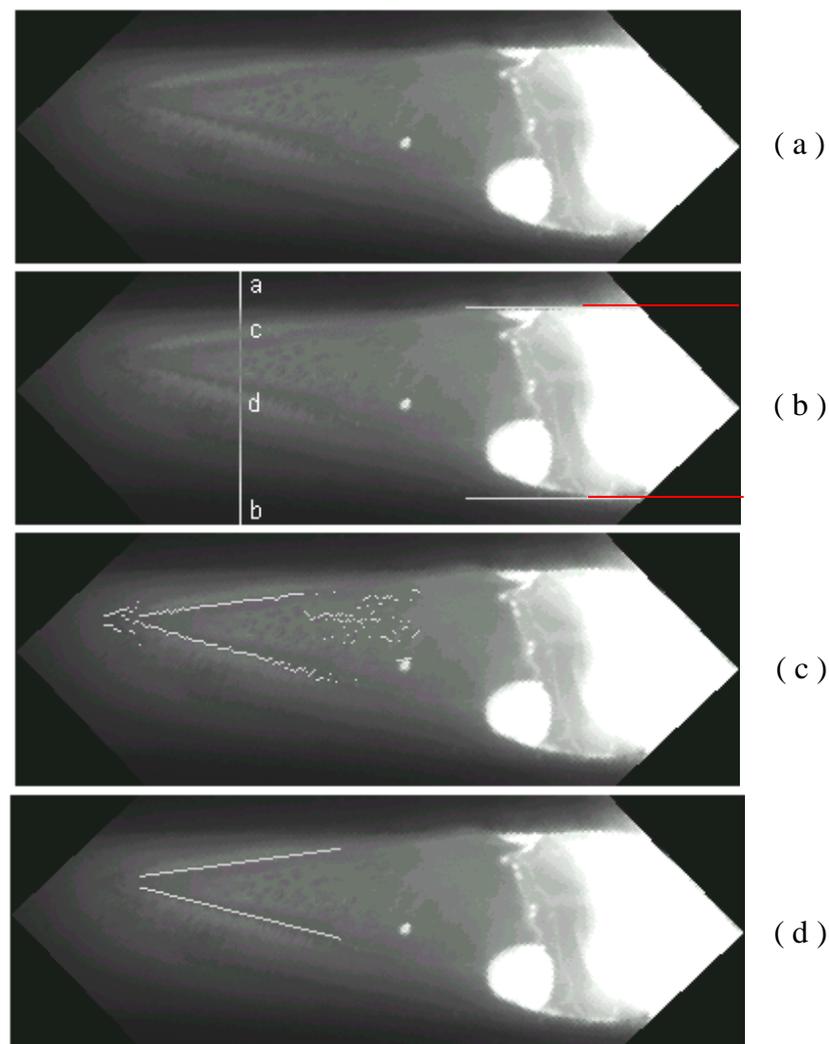


Figura 3.20. Metodologia usada por Zhang *et al.* (2006) para delimitar as regiões de interesse. (a) Imagem original; (b) localização dos postos A' e B' para medir a largura; (c) extração de bordas; (d) correção de ruído com transformada de Hough (Zhang *et al.*, 2006)

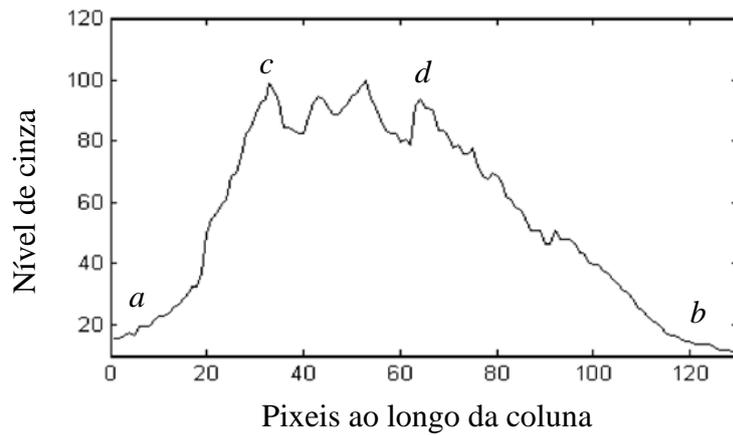
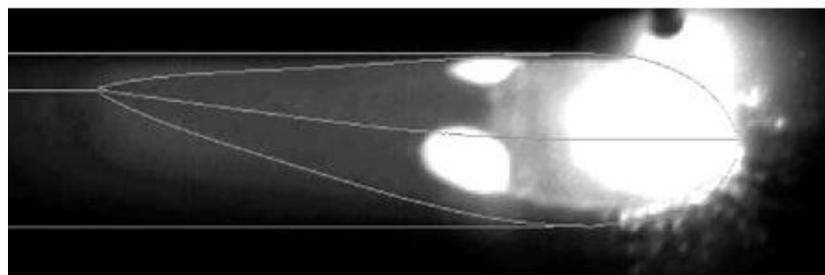
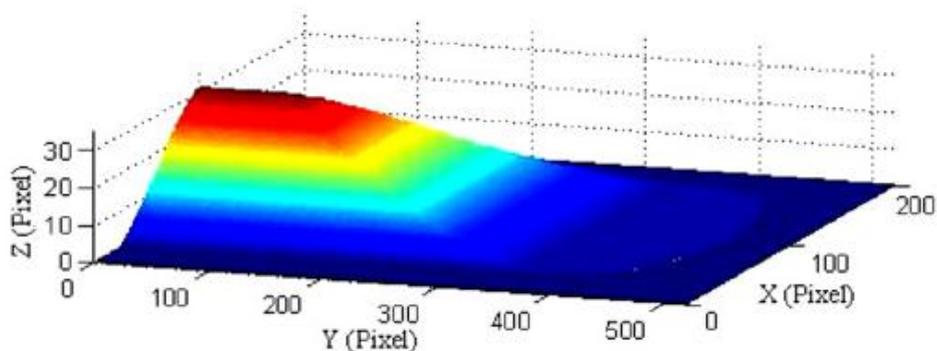


Figura 3.21. Distribuição dos níveis de cinza na coluna da Figura 3.16(b) que tem como referencia os pontos “a”, “b”, “c”, e “d” (Traduzido de Zhang *et al.*, 2006)

A Figura 3.22 apresenta uma imagem original com superposição de parâmetros encontrados, indicado com linhas, e a sua representação tridimensional para um processo (GMAW-P) com corrente media de 79,5 A. A geometria na frente da poça não é calculada e sim simplesmente sugerida. Ressalta-se que o nos experimentos realizados por Zhang *et al.*, (2006) utiliza-se uma distância entre a peça e o bocal de 17 mm, alturas menores podem dificultar a visualização correta da poça de fusão.



(a)



(b)

Figura 3.22. Imagem original com superposição de parâmetros encontrados (a) e reconstrução tridimensional (b) (Zhang *et al.*, 2006)

3.1.2.3 – Sistemas de visão estereoscópica

Os sistemas de visão estereoscópica geram mapas de profundidade a partir das imagens adquiridas por sistema binoculares. Os mapas são obtidos pela avaliação do deslocamento relativo de um ponto de referência nas imagens capturadas desde planos-imagens diferentes. Alguns sistemas podem utilizar sistemas de visão monocular empregando arranjos de espelhos para capturar as duas imagens ou utilizar uma câmera que se movimenta para ter dois planos da mesma cena. Este tipo de sistema não é comumente utilizado nos estudos relacionados ao monitoramento de parâmetros geométricos em cordões de solda devido ao problema que representa encontrar pontos de correspondência em imagens da poça de fusão.

De forma geral, os trabalhos desenvolvidos neste sentido baseiam-se no reconhecimento de elementos estranhos na superfície da poça de fusão, por exemplo, partículas de óxido (Zhao *et al.*, 2009). Outros trabalhos relacionados são os de Mnich (2004), Steele *et al.* (2005), interessados na reconstrução tridimensional da poça de fusão e sua integração em processos de controle, e Zhao (2011) que procura rastrear partículas que descrevam o comportamento da poça de fusão. A Figura 3.23 apresenta duas imagens de uma cena e se exemplifica o uso de pontos de referência nas imagens.

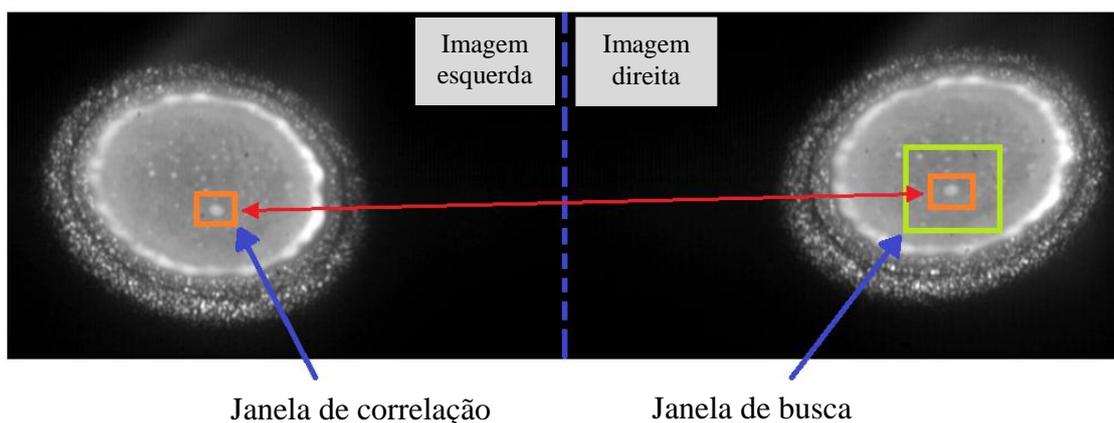


Figura 3.23. Exemplo de busca e correlação de pontos de referência em imagens de estereoscopia (traduzido de Zhao *et al.*, 2009)

A Figura 3.24 apresenta as imagens utilizadas por Mnich (2004) e sua correspondente reconstrução tridimensional. O processamento realizado nas imagens obtidas do sistema

estereoscópico é geralmente feito *off-line* por requerer muito tempo e pela complexidade no processo de casamento de pontos esta técnica ainda não se apresenta superior às mencionadas anteriormente.

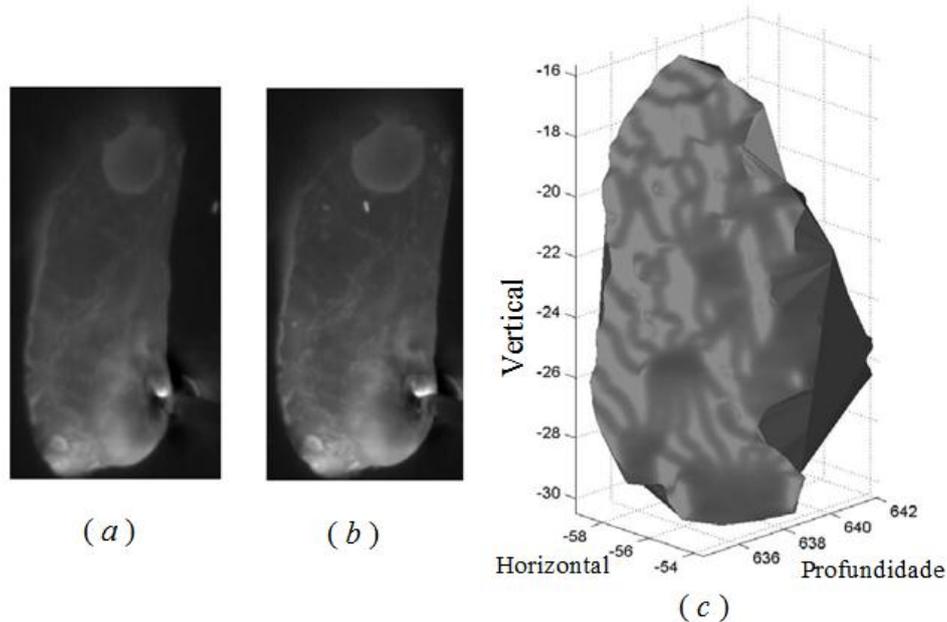


Figura 3.24. Reconstrução tridimensional a partir de duas imagens de uma cena. (a) imagem esquerda; (b) imagem direita; (c) reconstrução 3D (traduzido de Mnich, 2004)

3.1.3 – Calibração dos sistemas de visão

No caso da calibração dos sistemas de visão computacional em processos de soldagem, em geral, todas as referências que tratam o caso das características geométricas dos cordões de solda trabalham com o modelo de projeção paralela. Utiliza-se em geral a calibração fotogramétrica a qual se baseia na observação de um objeto cuja geometria seja conhecida. Esta técnica apresenta-se muito eficiente, mas a sua dificuldade reside em encontrar objetos calibrados, especialmente no caso milimétrico das características geométricas dos cordões de solda. Assim, os padrões de calibração encontrados comumente nas referências são gerados a partir da impressão em papel de um padrão digitalizado, como exemplifica a Figura 3.25.

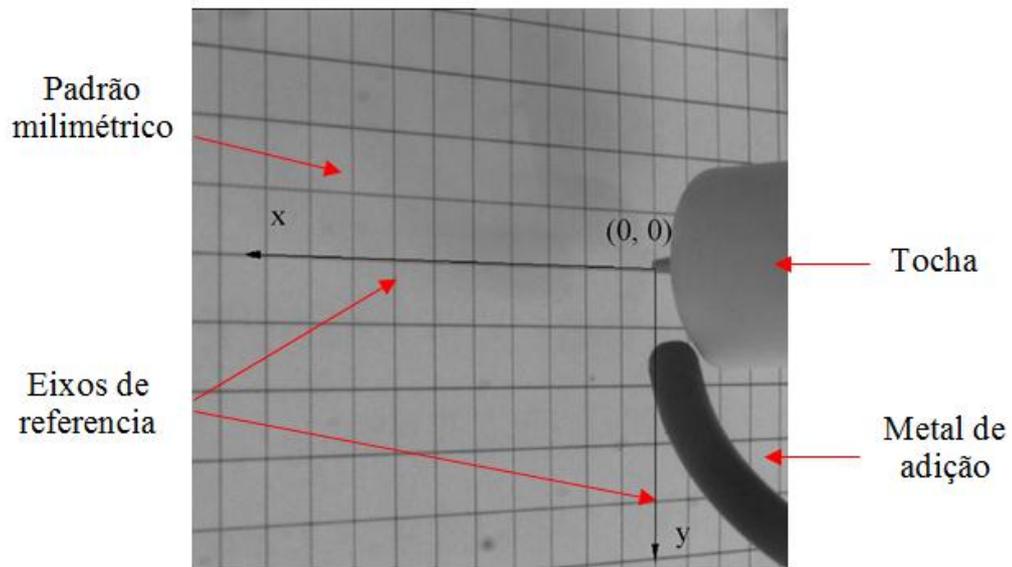


Figura 3.25. Uso de papel milimétrico para calibrar o sistema de visão (Xu *et al.*, 2012)

Neste tipo de trabalho, as relações são determinadas num plano de referência, o plano x-y na Figura 3.25. Inclusive no trabalho de Zhang *et al.* (2006), o valor da coordenada “z” é transformado a partir dos valores da calibração no eixo “y” da imagem (Figura 3.19a). Em Xiong e Zhang (2013) e Cruz (2014) a calibração para medir a altura do reforço realiza-se com o padrão milimétrico diretamente ao longo do eixo z como apresenta a Figura 3.26.

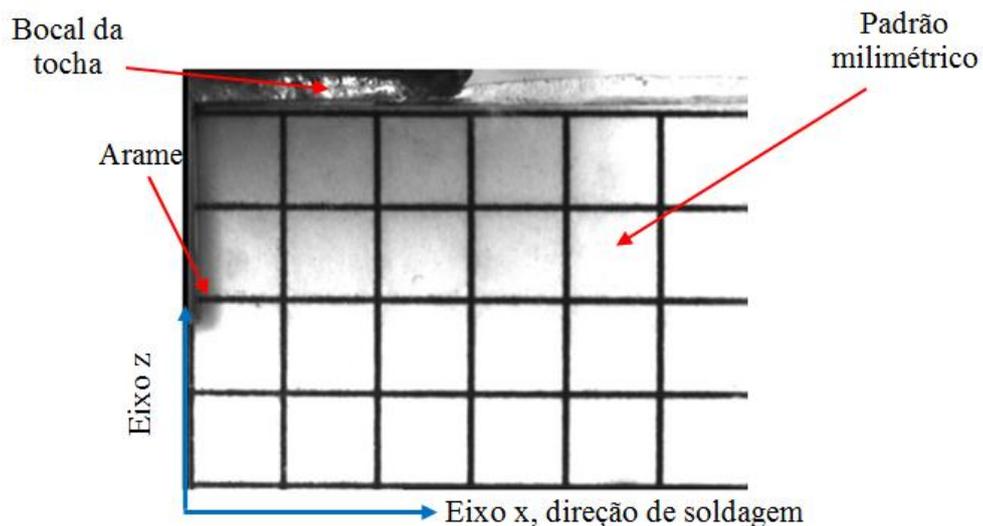


Figura 3.26. Uso de papel milimétrico para calibrar a altura do reforço o sistema de visão (Xiong e Zhang, 2013)

Uma opção aos padrões tipo grade ou xadrez são os padrões circulares, como exemplifica a Figura 3.27. Devido à natureza mais ou menos circular da poça de fusão, este tipo de padrão pode aumentar a precisão do sistema, caso sejam utilizados na calibração diferentes pontos ao longo de cada círculo. Wang *et al.* (2010) comenta que por ser o círculo onidirecional permite manter um padrão de calibração desde qualquer perspectiva sem precisar de eixos de referência.

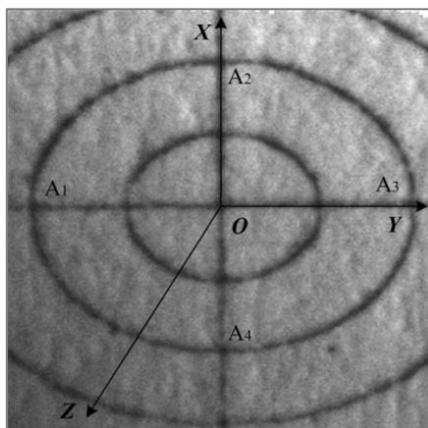


Figura 3.27. Uso de padrão circular para calibrar o sistema de visão (Liu *et al.*, 2013)

3.2 – MODELAGEM DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

Na modelagem dos parâmetros geométricos, visando posteriores etapas de controle, existem três abordagens principais: a modelagem estatística, a modelagem baseada em inteligência artificial e a modelagem numérica. De forma geral, nos processos de soldagem existe uma grande correlação entre todos os parâmetros e as variáveis envolvidas, por exemplo, a corrente do processo, a tensão do arco elétrico, a velocidade de soldagem, a velocidade de alimentação do arame (no caso da soldagem GMAW), as propriedades do gás de proteção, do metal de base e do eletrodo, entre outras. Em Kim *et al.* (2003) se apresenta um claro exemplo deste fenômeno de correlação de parâmetros para um processo de soldagem GMAW. Esses autores expõem que o calor é transferido do arco para a poça de fusão, mas, as gotas de metal também transportam calor e massa desde a ponta do arame para a poça, além disso, dependendo da corrente e da tensão, o arco pode exercer uma pressão significativa sobre a superfície da poça o que contribui, junto com a transferência de massa, na deformação da superfície, que por sua vez, afeta a superfície de transferência de calor e desta forma a eventual geometria do cordão. Esta complexa correlação faz com

que os estudos na modelagem dos processos de soldagem continuem evoluindo e incorporando novas metodologias e variáveis.

3.2.1 – Modelos estatísticos

Os modelos estatísticos ou empíricos são derivados de processos experimentais nos quais as respostas das variáveis de interesse nos experimentos são utilizadas para gerar uma equação matemática que descreva o processo em função dos parâmetros de entrada escolhidos durante o planejamento experimental. De forma geral, pode-se dizer que estes tipos de modelos apresentam respostas estatisticamente aceitáveis, a desvantagem é que são limitados aos valores dos parâmetros utilizados durante o procedimento experimental. Mesmo assim, pela sua confiabilidade, esta abordagem é uma das mais utilizadas 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.* (2008), Kannan e Yoganandh (2009) e Sathiya *et al.* (2010).

Por outro lado, uma vez estabelecidos os modelos, estes podem ter dois propósitos principais: encontrar as respostas do modelo com base nas variáveis de entradas conhecidas ou encontrar as variáveis de entrada que satisfazem uma resposta conhecida (requerida). Para os sistemas de controle o segundo objetivo tem maior importância, de modo que, outras técnicas estatísticas podem ser empregadas nos chamados processos de otimização. Uma das técnicas mais utilizadas na otimização de parâmetros nos processos de soldagem em geral é a *metodologia de superfícies de resposta*. Alguns exemplos deste tipo de abordagem referentes a parâmetros geométricos podem ser vistos em Palani e Muruganb (2007), Bhadauria e Ojha (2012) e Torres *et al.* (2013).

Outra técnica estatística comumente utilizada na otimização de processos de soldagem é o método *Taguchi*, o qual foca-se em encontrar as variáveis de entrada mais representativas para o processo, restringindo a análise às variáveis de maior peso no modelo. Exemplos focados na otimização de parâmetros geométricos podem-se encontrar em Kolahan e Heidari (2009,2010), Na *et al.* (2011) e Son *et al.* (2013).

3.2.2 – Sistemas baseados em inteligência artificial

Outra abordagem comumente utilizada para o modelamento de parâmetros geométricos é a baseada em técnicas de *inteligência artificial* (IA). Em particular, os modelos de *redes neurais artificiais*, junto com os de modelos estatísticos de *regressão*, são os mais utilizados para modelar processos de soldagem. De forma geral, pode-se dizer que um modelo de redes neurais artificiais é basicamente um modelo de regressão, com a diferença que utiliza um algoritmo iterativo para sua elaboração. Por conseguinte, os modelos baseados em redes neurais têm as mesmas limitações que os modelos estatísticos, sua vantagem e principal atrativo é que podem ser programados para se atualizar continuamente. Alguns trabalhos que utilizam redes neurais para modelar parâmetros geométricos em GMAW podem ser vistos em Kanti e Rao (2008), Campbell *et al.* (2012) e Sreeraj e Kannan (2012).

No caso da otimização, entre as técnicas de inteligência artificial mais utilizadas encontra-se a técnica conhecida como *algoritmos genéticos*. Similar às redes neurais, os algoritmos genéticos são técnicas iterativas que procuram as melhores soluções em função das condições e respostas que apresente o modelo estudado. A filosofia destes algoritmos é baseada na geração de populações (possíveis respostas do sistema) que interatuam com os modelos propostos a fim de encontrar as que melhor se adaptem aos requerimentos e as variáveis que as geram. Exemplos deste tipo de otimização são referidos em Kanti *et al.* (2013) e Sreeraj *et al.* (2013b,2013c).

3.2.3 – Modelagem numérica

Em geral, os modelos numéricos propostos na literatura que abrangem a geometria do cordão de solda envolvem a resolução de equações de conservação de massa, de momentum e de calor, e são utilizados em processos de simulação que permitem entender a interação dos fenômenos envolvidos no processo. Estes modelos são limitados a regiões e parâmetros de trabalho específicos e utilizam geralmente constantes determinadas experimentalmente, como apresenta Murphy (2011). As simulações são realizadas, em sua grande maioria, mediante técnicas de análises numérica como *elementos finitos* ou VOF (*Volume of Fluid*) e, pela sua complexidade, podem compreender tempos de

processamento de até 62 horas como no caso de Cho *et al.* (2006) ou 328 horas como no caso de Cho e Na (2009). Outros trabalhos para destacar neste contexto são apresentados por Hu e Tsai (2008), Hu *et al.* (2008) e Guo *et al.* (2010).

3.3 – CONTROLE DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

Uma grande quantidade de trabalhos de controle dos parâmetros geométricos no processo de soldagem baseia-se no emprego de modelos estatísticos e de redes neurais. Nestas metodologias, as variáveis de controle dependem principalmente das variáveis de controle das fontes de soldagem. Por exemplo, para controlar o processo GMAW empregando uma fonte do tipo *tensão constante*, as variáveis típicas de controle são a velocidade de alimentação do arame e a tensão. Também podem ser envolvidos outros parâmetros independentes da fonte, como a velocidade de soldagem, a distância bico de contato-peça, variações no gás de proteção, entre outros.

Modelos estatísticos e de inteligência artificial também podem ser utilizados com modelos analíticos simplificados. Por exemplo, Smartt e Einerson (1993) utilizam o processo GMAW e controlam o calor transferido para o metal base e o reforço do cordão a partir de funções baseadas na corrente do processo (utilizada como variável do processo, variável medida), e as variáveis de controle são a velocidade de alimentação do arame e de soldagem, o controlador utilizado é um *proporcional-integral (PI)* e o sistema é limitado para os modos de transferência em voo livre (globular e goticular). Esta estratégia é também utilizada por Moore *et al.* (1999) com parâmetros semelhantes. Nestes casos, os parâmetros de interesse são controlados indiretamente a partir do monitoramento de outras variáveis (mais fáceis de medir), de modo que o controle é limitado às condições que relacionam estas variáveis. Este é o tipo de controle mais utilizado no caso da penetração devido à dificuldade que apresenta seu monitoramento direto.

Outro exemplo deste tipo é apresentado por Wang *et al.* (2012), que, monitorando mudanças na tensão do arco, no período de corrente de pico, controlam a penetração da solda no processo GMAW-P. Neste caso, a relação da penetração com a tensão é uma equação linear encontrada estatisticamente, a qual se utiliza em um modelo FIR (*Finite Impulsive Response*) para representar a função de transferência do sistema por meio de

uma somatória. Neste caso, o tempo de base do processo é referido como a variável de controle. Li *et al.* (2013), no processo GTAW, também monitoram a tensão para controlar o processo, e utilizam a corrente como variável de controle.

Kejie *et al.* (2010) apresentam o controle da penetração no processo GTAW. Neste caso, a velocidade de soldagem é utilizada como variável de controle, e o monitoramento é realizado a partir de um sistema de visão computacional que mede a largura e o comprimento da poça de fusão a partir da radiação infravermelha na parte oposta do cordão. Suga *et al.* (2001) também monitoram os parâmetros geométricos na parte oposta do cordão no processo GTAW e utilizam a corrente para controlar a penetração da solda, mas utilizam um controle em malha aberta com um modelo de rede neural. Chen *et al.* (1997,2000a.), Zhao *et al.* (2001), Zhang *et al.* (2005) e Chen e Wu (2007) também utilizam modelos de redes neurais e medições da área da poça na parte oposta do cordão, mas adicionalmente incluem medições da área na parte superior da poça e utilizam como estratégia de controle a *logica nebulosa (Fuzzy)*.

Os sistemas de visão computacional em processos de controle são principalmente utilizados em GTAW devido à regularidade da poça de fusão e do arco elétrico, os quais facilitam a extração de características nos processos de medição. Outras aplicações deste tipo encontram-se em Zhang *et al.* (1993), os quais utilizam uma estratégia de *controle preditivo generalizado (GPC-generalized predictive control)* para controlar a penetração do cordão. Aqui se utiliza a triangulação laser para monitorar a largura e a área do cordão, e o comprimento do arco e a corrente do processo como variáveis de controle. Kovacevic e Zhang (1994) monitoram a área da poça de fusão utilizando um sistema de visão com iluminação externa e a corrente como variável de controle. Liu e Zhang (2013,2014) simulam um controlador preditivo (MCP, *MPC-Model Predictive Control*) da geometria da poça e empregam um padrão de pontos (luz estruturada) para controlar o processo de soldagem orbital, utilizando como variáveis de controle a velocidade de soldagem e a corrente.

No caso da soldagem GMAW, Doumanidis e Kwaka (2002) apresentam um sistema de duas equações (empíricas) de primeira ordem: uma para controlar a largura do cordão em função da velocidade de soldagem (variável de controle) e outra para controlar a altura do

reforço em função da velocidade de alimentação do arame (variável de controle). Os autores utilizam um controlador proporcional-integral (PI) e um algoritmo MIMO (*multiple-input, multiple-output control*) para controlar os dois parâmetros ao mesmo tempo. No entanto, o controlador apresenta um atraso considerável com respeito ao processo devido ao uso de um sistema de triangulação laser como sistema de monitoramento, o qual pela sua natureza, fixa-se a uma distância considerável da poça de fusão (32 mm).

Yan *et al.* (2011) controlam a penetração da solda no processo GMAW-P utilizando lógica Fuzzy como estratégia de controle e baseados em dois modelos de redes neurais. Um que utiliza a largura da poça de fusão, medida a partir da radiação oferecida na parte de baixo do metal base, e outro que utiliza a largura e a altura do reforço, medidos ao mesmo tempo com uma câmera acima da poça (sistema de visão passivo na configuração apresentada por Zhang *et al.*, 2006). Em ambos utiliza-se a corrente do processo como variável de controle.

Xiong *et al.* (2013) empregam um sistema de visão passivo com um filtro passa-faixa para controlar a largura dos cordões em um processo GMAW de múltiplas camadas. Utiliza-se um controlador tipo *proportional summational differential* (PSD) e a velocidade de soldagem como variável de controle. Torres (2013) e Cruz *et al.* (2015) utilizam um sistema de visão passivo com um filtro de atenuação e controla a largura do cordão de solda utilizando um modelo de redes neurais e um controlador fuzzy. A velocidade da mesa, a tensão do processo e a velocidade de alimentação do arame são utilizadas como variáveis de controle. Cruz (2014) utiliza a mesma configuração que Torres (2013) e acrescenta o controle do reforço medido desde outra perspectiva. Neste caso cada variável é controlada separadamente.

3.4 – SUMÁRIO DO CAPÍTULO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

De forma geral pode-se dizer que devido à complexa inter-relação que existe entre todos os fenômenos que governam o processo de soldagem os sistemas de controle mais utilizados são baseados em lógica fuzzy. Estes tipos de controladores têm a vantagem de não precisar de um modelo matemático do sistema e funcionam segundo as necessidades do processo. Os controladores tipo PID não são recomendados devido à dificuldade que

implica ajustar as constantes em um processo tão complexo como este e, quando utilizados, devem-se acompanhar de algoritmos adaptativos ou definir-se em regiões de trabalho com limites reduzidos e bem definidos.

Na modelagem dos processos, as metodologias mais utilizadas são de regressão estatística e de redes neurais, embora alguns trabalhos utilizam modelos analíticos simplificados e modelos estatísticos para encontrar as constantes desconhecidas. Devido à sua dependência dos parâmetros calculados experimentalmente, estes tipos de modelos funcionam em regiões específicas de trabalho que dependem de todas as variáveis e parâmetros utilizados no planejamento experimental. Pode-se dizer que não existe atualmente um modelo analítico que se possa utilizar num sistema de controle e que dependa exclusivamente das variáveis de controle.

No caso do monitoramento dos parâmetros geométricos, pode-se dizer que existem duas abordagens principais: o monitoramento baseado em luz estruturada e o monitoramento baseado em sistemas de visão focados na poça de fusão. No primeiro caso apresentam-se duas metodologias, na primeira utiliza-se um único feixe laser que atravessa o cordão no sentido perpendicular à direção de soldagem. Este é o sistema mais genérico e popularizado de todos os sistemas de monitoramento de parâmetros geométricos e pode ser feito em modo *online* (durante o processo de soldagem), mas apresenta um atraso espacial e temporal considerável com respeito à formação do cordão. Logo encontram-se os padrões de luz estruturada que se utilizam para inferir o comportamento da poça de fusão e, assim, determinar a geometria do cordão. De forma geral, este tipo de sistemas são limitados aos processos de soldagem GTAW devido à necessidade de poças de fusão que não apresentem variações bruscas na sua superfície.

No segundo caso encontram-se dois tipos de sistemas de visão: com iluminação externa (ativos) e sem iluminação externa (passivos). De um lado, os sistemas ativos permitem observar com fidelidade o comportamento da poça de fusão e geralmente se utilizam para estudar as características qualitativas da poça. De outro lado, a principal vantagem dos sistemas passivos é a não utilização de um sistema externo de iluminação e aproveitam a própria radiação do arco e da poça de fusão para encontrar as características pretendidas. Neste tipo de sistemas geralmente é difícil observar com detalhe o comportamento da

superfície da poça de fusão, mas apresenta-se uma boa relação de contraste entre a poça e os complementos a menor temperatura (chapa e cordão), pelo qual é preferivelmente utilizado em processos de monitoramento e controle *online*.

A metodologia apresentada por Zhang *et al.* (2006) é a única que apresenta modelos para encontrar os valores do reforço e da largura do cordão a partir de um único plano-imagem da poça de fusão. Esta metodologia utiliza um sistema de visão passivo com um filtro passa-faixa e um plano-imagem paralelo à direção de soldagem. A metodologia é limitada a distâncias entre a peça e o bocal da tocha de soldagem que não obstaculizem a visão da poça e diminuir o ângulo de referência entre a câmera e a peça (ângulo β na Figura 3.18) pode desfavorecer as medições no eixo “y” (perpendicular à direção de soldagem). Esta metodologia requer de um estrito cuidado no posicionamento da câmera, o ângulo β deve ser medido desde o plano (x-y) do metal base e o eixo ótico da câmera, a qual deve estar livre de rotações sobre seu eixo ótico. Além disso, pela sua metodologia o sistema limita-se a processos que apresentem uma poça de fusão com uma cauda pronunciada, o que não acontece com qualquer combinação de parâmetros no processo. A Figura 3.28 apresenta um resumo e o relacionamento dos tópicos envolvidos no monitoramento dos parâmetros geométricos dos cordões de solda.

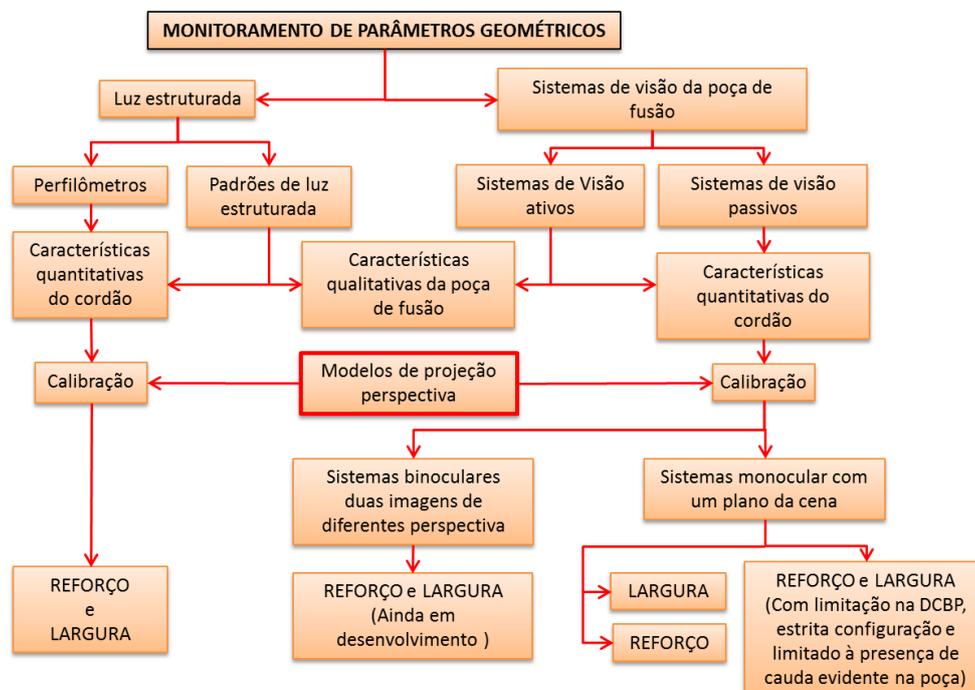


Figura 3.28. Tópicos envolvidos no monitoramento dos parâmetros geométricos dos cordões de solda

Finalmente, com respeito ao tempo de processamento utilizado pelos diferentes sistemas para monitorar os parâmetros geométricos dos cordões de solda, pode-se dizer que este depende do tipo de *hardware* e *software* disponível e das metodologias e técnicas empregadas no processamento das imagens. A Tabela 3.2 apresenta um resumo dos tempos de processamento indicados por diferentes autores para diferentes sistemas de visão computacional que visam medir este tipo de parâmetros.

Tabela 3.2. Tempo de processamento indicado por diferentes autores para o monitoramento de parâmetros geométricos dos cordões de solda

Referência	Tempo (ms)	Parâmetro a monitorar	Tipo de sistema de medição
White <i>et al.</i> (1994)	169	Largura e reforço do cordão	Triangulação laser (provas <i>off-line</i>)
Zhang <i>et al.</i> (1996)	200		
Liu <i>et al.</i> (2006)	250		
Liu (2010)	210		
Huang e Kovacevic (2011,2012)	3		
Kovacevic <i>et al.</i> (1995)	150	Largura e área da poça de fusão	De visão com iluminação externa
Xiong <i>et al.</i> (2013)	20	Largura do cordão	De visão sem iluminação externa
Zhang <i>et al.</i> (2012b,2013)	3 a 20	Reconstrução 3D da poça de fusão	Padrão de luz estruturada (pontos)

4 – PROPOSTA METODOLÓGICA PARA O MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

O primeiro passo a desenvolver no trabalho é a criação de uma metodologia capaz de medir a largura e o reforço dos cordões de solda a partir de um sistema de visão computacional que seja “significativamente rápido” (ao redor de 3 *ms*), prevendo posteriores etapas de controle. A largura e o reforço foram escolhidos como parâmetros para descrever a geometria dos cordões de solda por representar diretamente o seu formato externo. Neste capítulo apresenta-se inicialmente a bancada experimental, os equipamentos e os materiais consumíveis utilizados no trabalho, seguido da metodologia utilizada para medir os parâmetros geométricos e finalmente a avaliação da metodologia de monitoramento.

4.1 – EQUIPAMENTO E BANCADA EXPERIMENTAL

Este trabalho utiliza a tocha de soldagem em uma posição fixa e uma mesa de deslocamento linear para movimentar o metal de base e realizar os cordões de solda. O deslocamento da mesa linear é transmitido por um motor de passo através de um parafuso sem fim. A velocidade, a direção e o tempo de deslocamento da mesa são ajustados por meio de um programa de computador que comanda o sistema de medição de parâmetros. O envio dos sinais de controle para a mesa linear e para a fonte de soldagem é realizado utilizando as placas da *National Instrument* de referência USB 6009. A manipulação da fonte de soldagem através das placas USB 6009 é feita por meio de uma interface para robôs ROB 5000. O programa de medição de parâmetros foi realizado na plataforma de programação Visual C++ na linguagem de programação C em um computador com processador de 2.4 GHz e 3 GB de memória RAM. Nesta configuração, a câmera empregada no sistema de visão computacional localiza-se numa posição fixa em relação à tocha de soldagem (Figura 4.1).

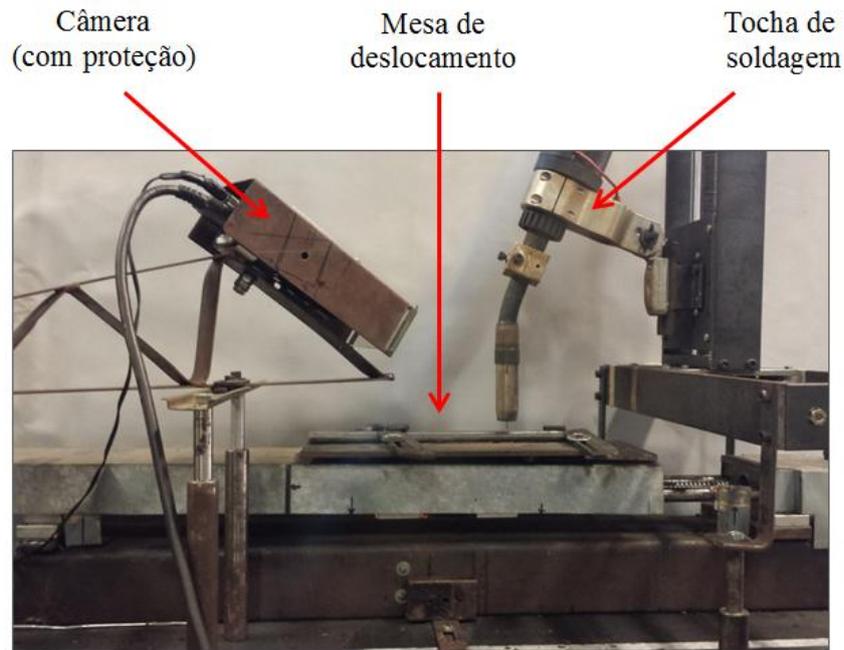


Figura 4.1. Bancada experimental

A fonte de soldagem utilizada foi uma *Fronius TransPuls Synergic 5000*, a qual no processo GMAW trabalha no modo tensão constante. 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, com 6,35 mm de espessura, previamente limpo e esmerilado;
- Gás de proteção: mistura comercial 94% Ar + 6% CO₂.

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

- Distância bico de contato-peça igual a 15 mm;
- Vazão de gás de proteção igual a 15 litros/min;
- Ângulo de ataque reto (eletrodo perpendicular à chapa);
- Polaridade positiva (com o eletrodo no ânodo).

4.2 – SISTEMA DE VISÃO

O monitoramento da largura e do reforço dos cordões de solda é realizado em tempo real a partir de um sistema de visão computacional passivo. A calibração é realizada em duas etapas, uma para a largura e outra para o reforço, e utiliza como base a projeção perspectiva e a matriz de homografia de planos calibrados. Os algoritmos de processamento digital de imagens, além da robustez exigida pelo monitoramento, visam minimizar o tempo de processamento, tendo em vista as próximas etapas de controle.

4.2.1 – Sistemas de aquisição de imagens

O sistema de aquisição de imagens utiliza um filtro de interferência óptico infravermelho com limiar de 800 *nm*. 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 foi fixado em 50 μs visando observar os pontos de menor temperatura na poça de fusão. A abertura utilizada no diafragma da lente foi de *f/8.0* visando uma profundidade de campo que permita observar em foco os objetos de interesse em cada imagem (padrões de calibração e poça de fusão durante o processo de soldagem).

Inicialmente foi testada a metodologia utilizada por Zhang *et al.* (2006), referida no capítulo anterior, a fim de obter os parâmetros geométricos dos cordões. A Figura 4.2 apresenta as imagens obtidas nesta configuração, com um ângulo entre o plano do metal base e o eixo ótico da câmera $\beta = 45^\circ$ e DBCP de 18, 15 e 12 *mm* respectivamente. Neste caso, utilizando os consumíveis citados anteriormente, com uma velocidade de alimentação do arame de 6 *m/min* e uma tensão de 20 *V*.

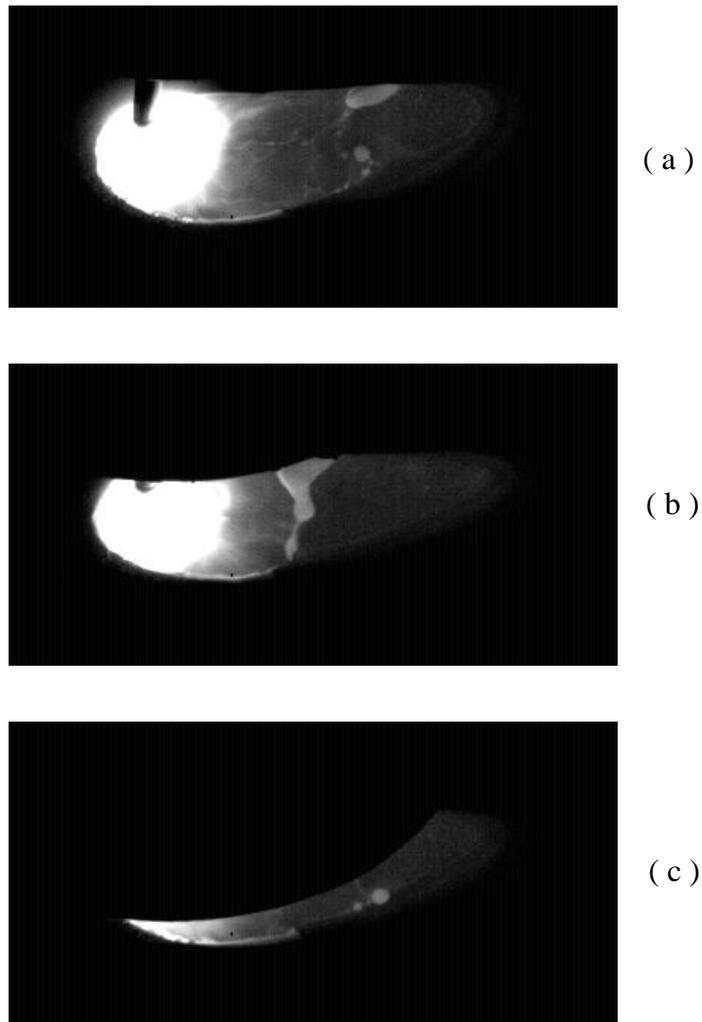


Figura 4.2. Imagens obtidas utilizando-se a metodologia de Zhang *et al.* (2006), mudando unicamente a distância de contato bico-peça. (a) DBCP = 18 mm; (b) DBCP = 15 mm; (c) DBCP = 12 mm.

Na Figura 4.2 pode-se observar a desvantagem que apresenta esta técnica em relação à distância bico contato-peça. Mesmo com uma DBCP de 18 mm, se a velocidade de alimentação do arame e a tensão aumentam, e com eles a largura do cordão, é possível que exista uma obstrução da poça de fusão por parte do bocal da tocha, impedindo aplicar a técnica de reconstrução tridimensional referida por Zhang *et al.* (2006). Uma diminuição no ângulo β , referido na Figura 3.18, acaba permitindo a visualização da poça de fusão, mas apresenta uma severa diminuição na resolução espacial do eixo y (Figura 3.18).

Assim, devido às dificuldades apresentadas na implementação da metodologia de Zhang *et al.* (2006), propõe-se uma nova estratégia de visualização, neste caso a câmara já não é localizada ao lado da tocha com o sensor paralelo à direção de soldagem, senão, como se

esquematisa na Figura 4.3, diagonal à poça de fusão com um ângulo intermédio θ entre a direção de soldagem (eixo X') e o eixo ótico da câmera. Uma diminuição no ângulo β permite observar completamente a poça de fusão e, graças ao ângulo θ , é possível corrigir a perda de resolução no eixo Y' . Neste caso, os eixos X' e Y' encontram-se na superfície da peça e o eixo Z' é fixo através do arame-eletrodo (perpendicular ao plano do metal base, X' - Y').

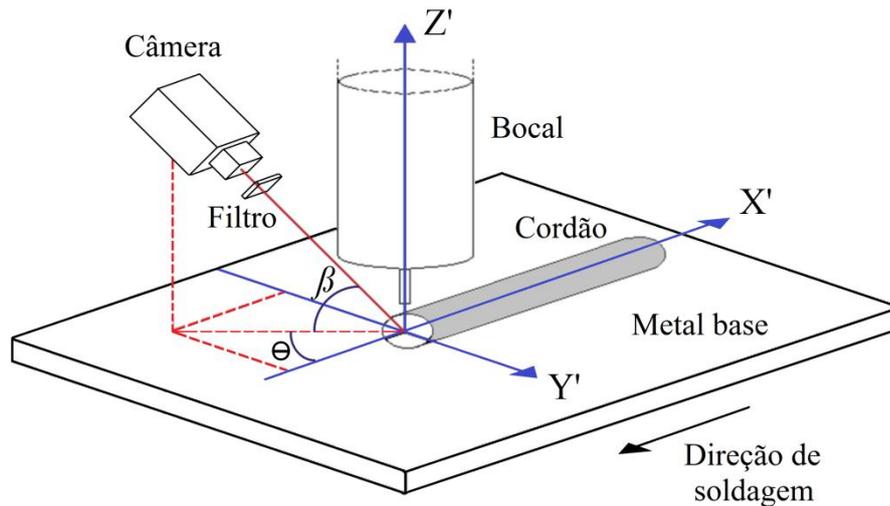


Figura 4.3. Esquema da proposta utilizada para monitorar a largura e o reforço dos cordões de solda com um sistema monocular

A Figura 4.4 apresenta uma imagem adquirida com esta configuração, utilizando uma distância de contato bico-peça de 12 mm e os mesmos parâmetros de soldagem utilizados nos experimentos da Figura 4.2. A Figura 4.5 é uma imagem ilustrativa sem arco elétrico (*off-line*), mas empregada como referência para identificar os objetos de interesse na perspectiva gerada no sistema de visão com a nova configuração.

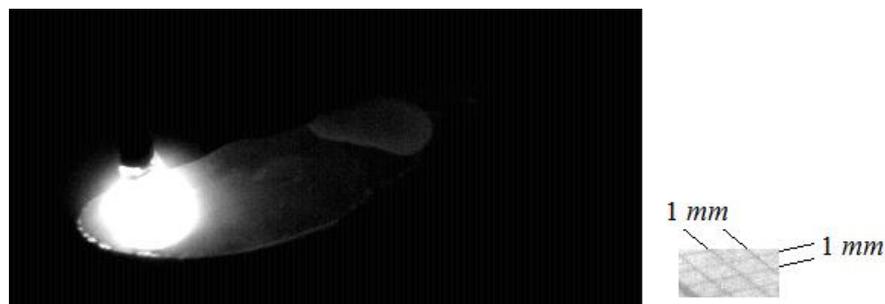


Figura 4.4. Imagem adquirida durante o processo de solda com a proposta utilizada para monitorar os parâmetros geométricos, DBCP = 12 mm

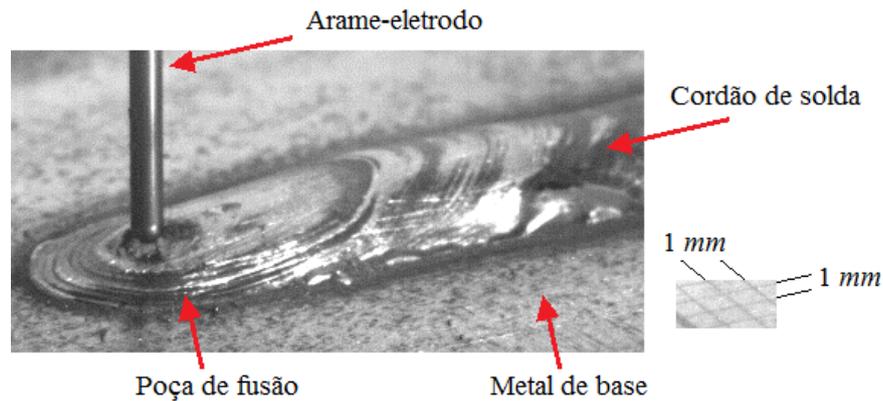


Figura 4.5. Ilustração dos objetos de interesse numa imagem adquirida com a nova proposta utilizada para monitorar a largura e reforço dos cordões de solda (*off-line*).
Diâmetro do arame: 1.2 mm

4.2.2 – Metodologia de calibração

A calibração de um sistema óptico, na forma clássica, faz referência ao processo de determinar os parâmetros extrínsecos (posição e orientação da câmera em relação a um referencial externo) e intrínsecos (distância focal da lente e tamanho dos pixels, entre outros), de uma câmera, com o fim de utilizá-los como parâmetros para uma transformação de pontos de referência de uma imagem (2D), em pontos do mundo real (3D).

Neste trabalho emprega-se uma metodologia de calibração baseada na matriz de homografia H , a qual relaciona diretamente um plano calibrado (no mundo real) com sua respectiva imagem 2D. O uso da matriz de homografia evita o uso dos parâmetros extrínsecos e intrínsecos do sistema de visão, fazendo desnecessário o conhecimento dos ângulos β e θ e também da distância compreendida entre a câmera e a poça de fusão e dos valores dos ângulos de rotação da câmera sobre seu eixo ótico. Neste caso, utiliza-se o plano do metal de base, $X'-Y'$ (Figura 4.3) para calibrar e realizar as medições de largura do cordão, e o plano $X'-Z'$ para calibrar e realizar as medições de reforço do cordão.

A Figura 4.6 apresenta os padrões utilizados para calibrar cada plano, $X'-Y'$ e $X'-Z'$. A ponta do arame está incluída na imagem como referência e a posição em que o arame toca o metal de base é adotada como ponto de referência ($X' = 0, Y' = 0, Z' = 0$). Neste caso utiliza-se papel milimétrico como objeto calibrado para o plano $X'-Y'$ e dois blocos padrão calibrados para o plano $X'-Z'$. Na Figura 4.6 cada quadrado no papel milimétrico correspondem a 1 mm^2 ($1 \times 1\text{ mm}$), e o bloco de calibração, neste caso, tem uma altura de 1

mm. Ressalta-se que o papel milimétrico está sujeito aos problemas de desgaste normal que apresenta qualquer papel, principalmente pela humidade, e deve ser mudado em cada calibração.

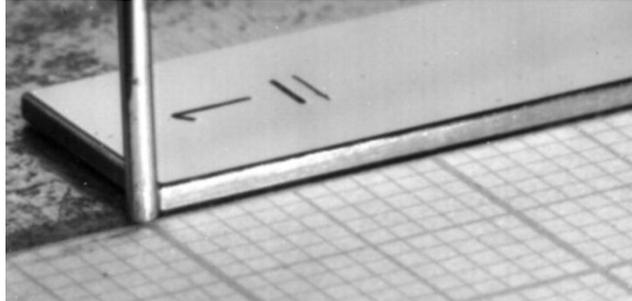


Figura 4.6. Ilustração dos padrões utilizados para calibrar cada plano. Papel milimétrico para o plano $X'-Y'$ e bloco padrão para o plano $X'-Z'$

Visando realizar cada calibração nas regiões de interesse, seis pontos de referência foram utilizados para calibrar cada caso. No caso do plano $X'-Y'$ os pontos utilizados são escolhidos de zero a 2 *mm* no eixo X' e de zero a 6 *mm* no eixo Y' (Figura 4.3), com a notação $(x'; y')$ e as unidades em milímetros, os pontos de calibração foram: (0;1), (0;6), (1;3), (1;4), (2;1), (2;6). Para os quais sua equivalente posição na imagem (*coluna, linha*) foi: (102;154), (157;193), (143;165), (153;172), (140;145), (194;183).

No caso do plano $X'-Z'$ (Figura 4.3), foram utilizados dois pontos na referência $Z' = 0$ e dois pontos em cada bloco padrão com alturas $Z' = 1,5 \text{ mm}$ e $Z' = 3 \text{ mm}$. Com a notação $(x'; z')$ e as unidades em milímetros, os pontos de calibração foram: (1;0), (15;0), (3;1,5), (12;1,5), (1;3), (15;3). Para os quais o equivalente na imagem (*coluna, linha*) foi: (110;139), (367;80), (146;104), (313;66), (110;81), (367;23).

Os pontos de referência nos planos $X'-Y'$ e $X'-Z'$ são utilizados de forma independente para gerar, em cada caso, o sistema matricial da Equação (2.17), para o qual utiliza-se em todos os pontos w_i e w'_i igual a “1”. Seguidamente, cada matriz \mathbf{H} é determinada a partir da solução de cada sistema utilizando a decomposição em valores singulares respectiva. Desta forma, a partir da Equação (2.11) cada posição na imagem é transformada para as coordenadas do correspondente plano no mundo real. Ressalta-se que as transformações realizadas são geradas em coordenadas homogêneas, pelo que para obter a posição no

mundo real a partir da matriz de homografia uma ultima transformação em cada coordenada correspondente tem que ser feita da forma:

$$X'_i = \frac{x'_i}{w'_i}; \quad Y'_i = \frac{y'_i}{w'_i}; \quad Z'_i = \frac{z'_i}{w'_i} \quad (4.1)$$

As matrizes de homografia encontradas com os pontos referidos anteriormente para os planos X'-Y' e X'-Z', respectivamente, foram:

$$H_{X-Y} = \begin{bmatrix} -0.002253621623137 & 0.003161406769207 & -0.256802773706241 \\ -0.001331015840390 & -0.005760905663835 & 0.965096026814793 \\ 0.000020955583090 & -0.000060093266258 & -0.050911270386139 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$H_{X-Z} = \begin{bmatrix} -0.005421807241257 & 0.000019549025724 & 0.491590884645707 \\ 0.001202472655272 & 0.005243034011338 & -0.864802076942602 \\ 0.000005281632031 & 0.000003168111854 & -0.101967828696228 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

A medição da largura do cordão é realizada diretamente sobre a poça de fusão sobre o eixo Y' do referencial da Figura 4.3. No caso do reforço, uma hipótese é sustentada: a altura do reforço é medida no ponto de menor temperatura da poça de fusão, o qual, de forma geral, localiza-se no centro e ao final da poça. Para um melhor entendimento, na Figura 4.7 especifica-se a posição do ponto de menor temperatura (ponto de maior reforço) em uma imagem adquirida *off-line*.

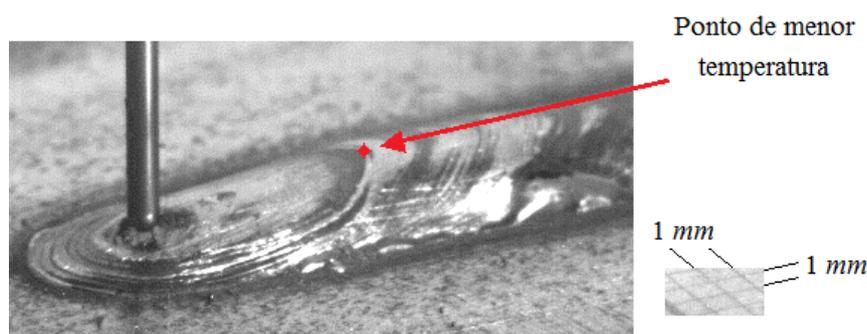


Figura 4.7. Imagem off-line utilizada para ilustrar a localização do ponto de menor temperatura na poça de fusão. Ponto utilizado como referência para medir o reforço do cordão nas imagens adquiridas

4.2.3 – Processamento das imagens e medição dos parâmetros geométricos

As imagens são adquiridas a uma taxa de 100 quadros (*frames*) por segundo com uma resolução espacial de 416 colunas por 200 linhas, o que representa uma resolução espacial em relação ao eixo X' em cada plano de: $0,08 \text{ mm/pixel}$ para o plano $X'-Y'$ e $0,05 \text{ mm/pixel}$ para o plano $X'-Z'$. As medições de largura e reforço nas imagens adquiridas são baseadas nos conceitos de limiarização da imagem, em ambos os casos, utiliza-se limiarização local, segundo a classificação apresentada em Weska (1978) e Lopes (2003).

Para cada caso, antes da etapa de limiarização um pré-processamento da imagem é utilizado, com o fim de garantir uma boa segmentação da poça de fusão. Seguido à limiarização, a técnica de rotulação é empregada para identificar os pontos de referência na poça de fusão, os quais permitem medir a largura e o reforço.

Considerando-se diferentes estratégias para medir ambos parâmetros geométricos, e visando diminuir ao máximo o tempo de processamento computacional, cada quadro adquirido é “dividido” em duas imagens com um eixo vertical na metade. Assim, na parte esquerda da imagem original é medida a largura e na parte direita é medido o reforço. Embora as medições de largura e reforço utilizem diferentes abordagens, em geral, a metodologia de processamento de cada imagem em ambos os casos, faz uso das seguintes características:

- Pré-processamento;
- Limiarização;
- Rotulação;
- Localização dos pontos de referência.

O Pré-processamento de imagem é realizado a partir da Equação (2.19) utilizando um filtro de máscara Gaussiana para medir a largura e um filtro de média para medir o reforço. Neste caso utilizam-se os filtros para conectar todos os pixels pertencentes à poça de fusão. Para o caso especial de medição do reforço, onde a região de interesse é a parte traseira da poça de fusão, utiliza-se o filtro de média sem normalizar por apresentar um resultado mais pronunciado na concatenação de cadeias de pixels isolados. Esta abordagem foi adotada

porque esta região tem pixels com menor nível de cinza (mais escuros) que a parte da poça em contato direto com o arco elétrico. A máscara gaussiana utilizada no filtro é obtida a partir da Equação (2.20) com $n = 5$, número que se considera indicado por não invadir de forma significativa as bordas da poça, e tem a forma:

$$A = \begin{bmatrix} 0.0030 & 0.0133 & 0.0219 & 0.0133 & 0.0030 \\ 0.0133 & 0.0596 & 0.0983 & 0.0596 & 0.0133 \\ 0.0219 & 0.0983 & 0.1621 & 0.0983 & 0.0219 \\ 0.0133 & 0.0596 & 0.0983 & 0.0596 & 0.0133 \\ 0.0030 & 0.0133 & 0.0219 & 0.0133 & 0.0030 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

A técnica de limiarização é empregada na segmentação das imagens para separar o fundo dos objetos de interesse segundo a Equação (2.22). No caso da medição do reforço, depois do pré-processamento a intensidade dos pixels na poça de fusão comparada com a intensidade dos pixels da peça de trabalho é altamente diferente (caso de alto contraste). Isto permite que um simples valor de limiar $T_R = 10$ seja utilizado para segmentar.

Por outro lado, na medição da largura considera-se que: durante o tempo de arco aberto a radiação de arco, além de ser refletida pela poça de fusão, pode ser refletida também pela peça de trabalho (ao redor da poça). Assim, se propõe um limiar dinâmico calculado para cada imagem adquirida segundo a seguinte expressão:

$$T_{L_i} = \begin{cases} (-10 * W_{i-1}) + 100, & \text{if } W_{i-1} < 10 \text{ mm} \\ 0, & \text{if } W_{i-1} \geq 10 \text{ mm} \end{cases} \quad (4.5)$$

onde W_{i-1} é a largura calculada na imagem “anterior”. Neste caso utiliza-se um limiar fixo $T_{L_i} = 0$ durante os primeiros 100 quadros capturados, a fim de obter informação inicial da largura do cordão. A Equação (4.5) implica que:

- O maior limiar que se pode apresentar é 100;
- Para menores dimensões do cordão, a radiação afeta de forma mais significativa à chapa ao redor da poça, por tanto um maior valor de limiar é necessário;

- Para cordões com larguras maiores ou iguais a 10 *mm*, o valor do limiar é zero. Assume-se que para larguras maiores as dimensões do arco elétrico não atingem as bordas da poça de fusão e não se apresentam reflexões na chapa;
- A primeira parte da equação representa uma reta com coeficiente angular (-10), neste caso assumem-se os limites de maior limiar 100 e maior largura influenciada pelo arco 10 *mm*.

De outro lado, um caso especial apresenta-se quando se adquire uma imagem do processo no instante de curto-circuito. Neste caso, o arco elétrico é extinto e a intensidade dos pixels na chapa é zero (totalmente escura), assim que pode-se utilizar um valor de limiar $T = 0$. Para determinar se a imagem do processo pertence a um instante de curto-circuito ou de arco aberto, utiliza-se um chamado *fator de iluminação*. Se o fator de iluminação é menor que um limiar predefinido, neste caso de valor 10, determina-se que a imagem pertence a um instante do processo em curto-circuito.

A função que determina o fator de iluminação é a porcentagem de pixels com nível de cinza igual a 255 em uma região preestabelecida ao redor do ponto $X^w = 0$, $Y^w = 0$ e $Z^w = 0$ do referencial do mundo estabelecido na etapa de calibração. A Figura 4.8 apresenta uma imagem do processo na qual a região preestabelecida é demarcada a fim de destacar a sua posição em cada imagem. Ultrapassar o limiar do fator de iluminação com valor 10 significa que no mínimo o 10% dos pixels na região preestabelecida têm níveis de cinza igual a 255, pertencem ao arco elétrico, segundo a seguinte expressão:

$$\text{processo} \begin{cases} \text{em arco aberto} & \text{se } \text{fator de iluminação} > 10 \\ \text{em curto - circuito} & \text{se } \text{fator de iluminação} \leq 10 \end{cases} \quad (4.6)$$

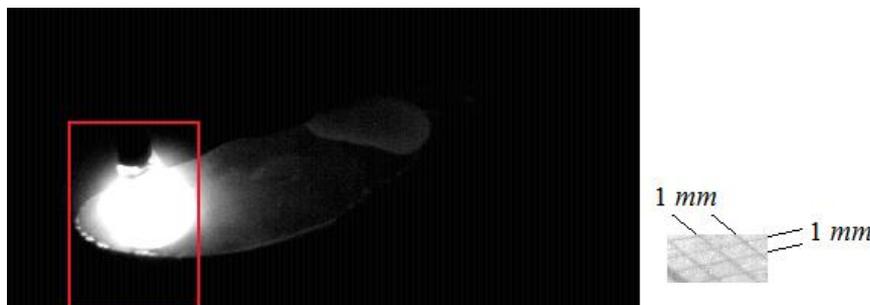


Figura 4.8. Região preestabelecida para medir o fator de iluminação

De forma geral, os métodos automatizados para encontrar o limiar que dependem unicamente da informação de intensidade dos pixels, tipo Otsu (1979), não são recomendados, devido ao arco elétrico e a poça de fusão terem pixels com níveis de intensidade altamente diferentes, o que favorece a segmentação do arco, mas gera uma segmentação errada da poça.

Depois da segmentação pela técnica de limiarização, a poça de fusão é identificada com o valor “1”. No caso da medição de largura o processo de rotulação atravessa o meio da poça de fusão até encontrar a borda. Para a medição do reforço, o processo de rotulação se movimenta unicamente nos pixels que se encontram na borda da poça de fusão. A partir do processo de rotulação são encontrados os pontos de referência utilizados para calcular respectivamente a largura e o reforço dos cordões. Estes processos são descritos a seguir.

4.2.3.1. Medição da largura

Este processo é realizado seguindo uma trajetória predefinida no processo de calibração, ao longo do eixo Y' (Figura 4.3) e determinada pelas posições no plano $X'-Y'$ que coincidem com o valor de $X' = 0 \pm 0.05 \text{ mm}$. Nesta etapa considera-se que a poça de fusão é simétrica com respeito ao eixo X' , assim que, a medição é realizada desde a posição inicial $X' = 0, Y' = 0$ até uma única borda, sendo a largura total o dobro de este valor.

Neste processo cada pixel desde a posição inicial e com valor “1” é rotulado como pertence à poça de fusão até encontrar um pixel com valor “0”, o qual indica que pertence à peça. Esta posição toma-se como ponto de referência e utiliza-se na matriz de homografia correspondente para encontrar o valor da largura na grandeza indicada (mm).

A Figura 4.9 apresenta um exemplo indicando os processos de limiarização e rotulação na região de interesse. A trajetória percorrida (de cor azul) e o ponto de referência encontrado no processo (de cor vermelha) são assinalados, nas imagens limiarizada e original respectivamente, indicando o resultado do processo de medição. Neste caso para um processo de soldagem com uma tensão de trabalho de 23 V e uma velocidade de alimentação do arame de 7,5 m/min. A posição do ponto de referência na imagem é coluna 132 e linha 175, a largura do cordão de solda é 7,46 mm.

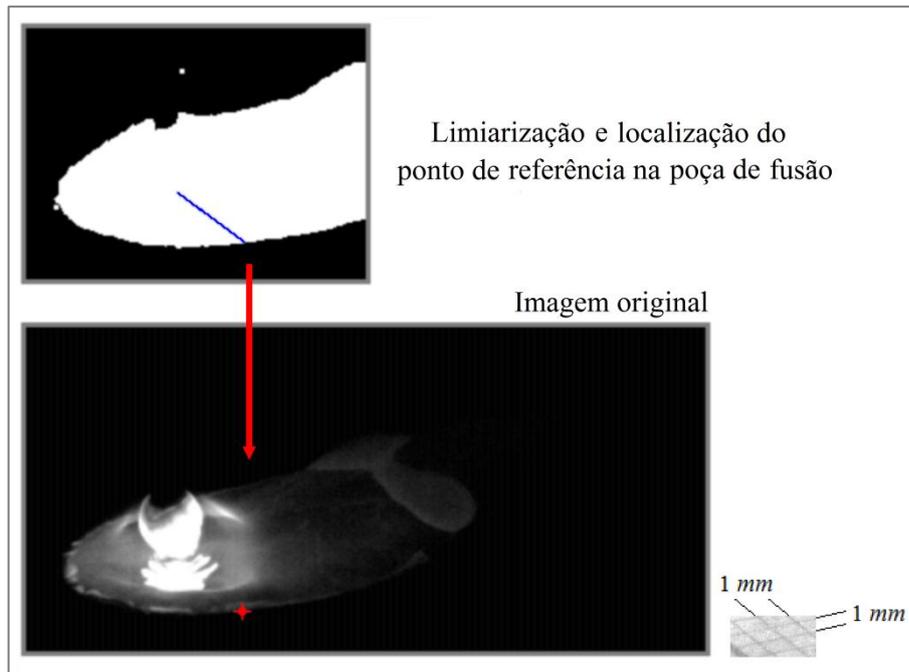


Figura 4.9. Localização do ponto de referência para medir a largura na borda da poça de fusão

4.2.3.2 – Medição do reforço

Na imagem correspondente para medir o reforço, depois do processo de limiarização, o processo de rotulação inicia na primeira coluna (esquerda) e na última linha (fundo) desta imagem, que, neste caso, 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 primeira coluna, pixel por pixel, de baixo para cima até encontrar um pixel com nível de cinza “1”. Esta posição considera-se pertence ao objeto e é a posição inicial no processo de rotulação. Em seguida, partindo de esquerda para direita, o algoritmo rotula os pixels localizados unicamente na borda da poça de fusão até encontrar novamente a primeira coluna. Este processo de rotulação realiza-se utilizando conectividade-8 como critério de busca.

Por outro lado, para determinar o ponto de referência, cada pixel rotulado é avaliado a fim de encontrar a posição com a distância euclidiana mais afastada do ponto de referência $X' = 0, Z' = 0$. Neste caso, a posição de cada pixel é normalizada em relação ao número de linhas e colunas na imagem, a fim de não ter preferências por uma posição de linha ou coluna particular.

O ponto de referência localizado nesta etapa é considerado como o ponto de menor temperatura da poça de fusão. Este ponto é aceito como o mais alto da poça e, portanto, determina o reforço do cordão de solda. Supõe-se que este ponto está localizado no plano $X'-Z'$ (Figura 4.3).

Como exemplo, a Figura 4.10 mostra uma imagem adquirida, na qual se indica a trajetória percorrida no processo de rotulação (de cor azul na imagem) e o ponto de referência encontrado (de cor vermelho), neste caso, na posição de coluna 280 e de linha 58, localizado a uma altura (Z') de 2.23 mm com respeito da superfície da chapa. A tensão de trabalho utilizada neste caso foi de 21 V e a velocidade de alimentação de arame de 6 m/min.

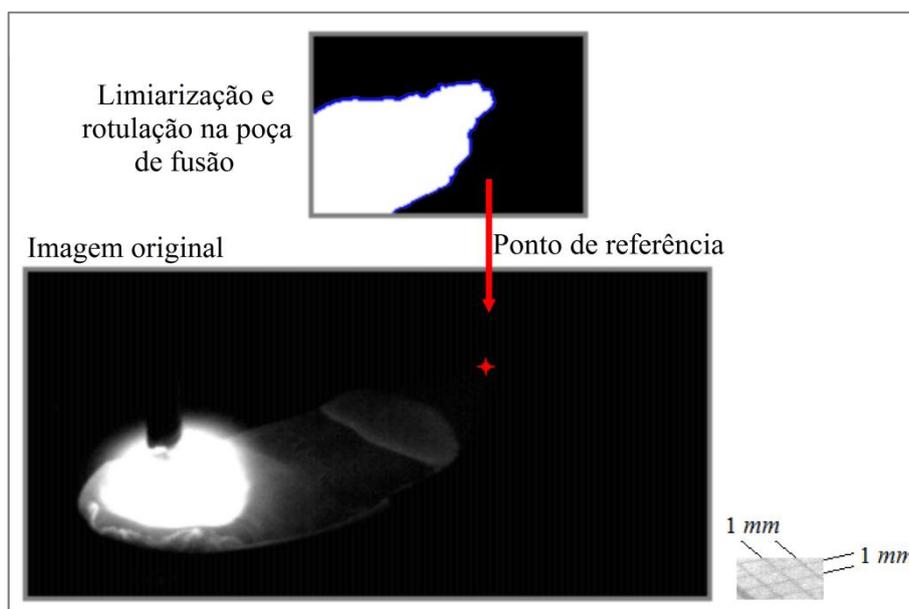


Figura 4.10. Localização do ponto de referência para medir o reforço

Finalmente, as imagens são adquiridas a uma taxa de 100 *frames/s*, assim, os dados são processados e coletados em tempo real a cada 10 *ms*. Por outro lado, ao longo do processo de monitoramento, emprega-se, em tempo-real, um filtro gaussiano de 10 dados sobre cada sinal, a fim de minimizar os eventuais erros de medição que podem se apresentar, na sua maioria, por explosões no final da fase de curto-circuito, como exemplifica a Figura 4.11. No caso deste tipo de erros (devido a explosões durante o processo), para os quais, nas imagens correspondentes se apresenta um aumento repentino e brusco da iluminação, os

processos de medição de largura e reforço não conseguem responder de forma confiável devido à natureza da técnica de limiarização.

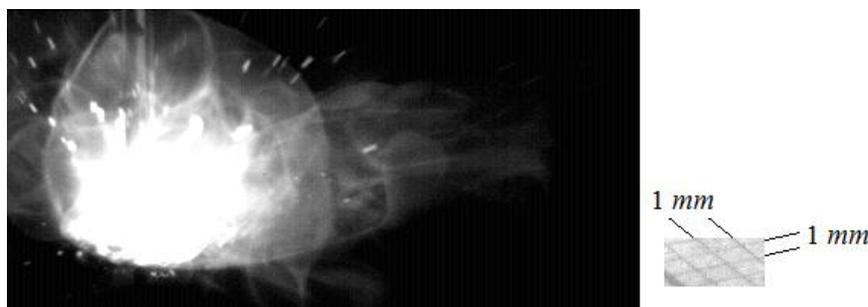


Figura 4.11. Exemplo de explosão apresentada durante processo de soldagem

4.3 – AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA DE MEDIÇÃO

A metodologia da medição tem duas etapas fundamentais: calibração e localização de pontos de referência. A fim de avaliar o processo de calibração, diferentes pontos predefinidos foram escolhidos nos dois planos do referencial do mundo $X'-Y'$ e $X'-Z'$ (escolhidos diretamente do papel milimétrico e dos blocos padrões), e foram comparados com as respostas calculadas pela relação da Equação (2.11). As diferenças entre as posições predefinidas (x'_i) e as respostas encontradas (\hat{x}'_i) a partir da matriz de homografia são conhecidas como os *resíduos* e são dados por:

$$e_i = x'_i - \hat{x}'_i \quad (4.7)$$

A Figura 4.12 mostra um gráfico de resíduos para diferentes posições computadas ao longo do eixo Y' com $X' = 0 \text{ mm}$. A Figura 4.13 apresenta o gráfico dos resíduos para diferentes posições de X' com uma altura constante $Z' = 2 \text{ mm}$. As Figuras 4.12 e 4.13 indicam uma distribuição adequada dos resíduos em torno do valor zero em ambos os casos, com similar desvio padrão $s = 0.01 \text{ mm}$. As tendências que podem-se apresentar são devidas à escolha manual dos pontos de calibração, mas com o valor de desvio padrão encontrado não são consideradas como inapropriadas. Resultados similares são obtidos utilizando diferentes pontos de referência em cada plano, pelo que a metodologia de calibração é aceita como apropriada para transformar as coordenadas dos pontos na imagem às coordenadas do mundo real e podem ser utilizada no sistema de visão computacional.

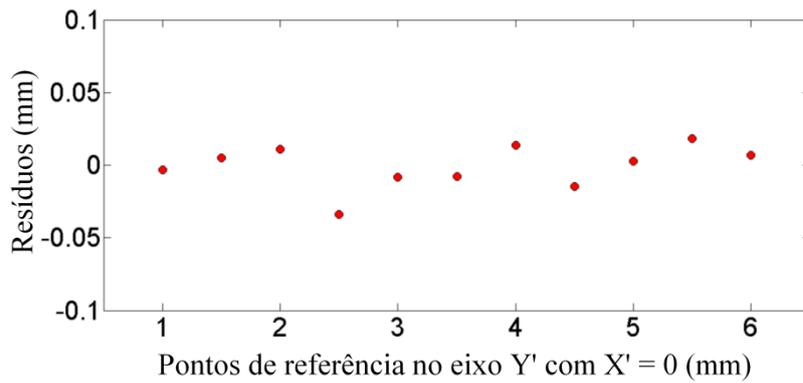


Figura 4.12. Gráfico de resíduos ao longo do eixo Y' com valores de $X' = 0 \text{ mm}$

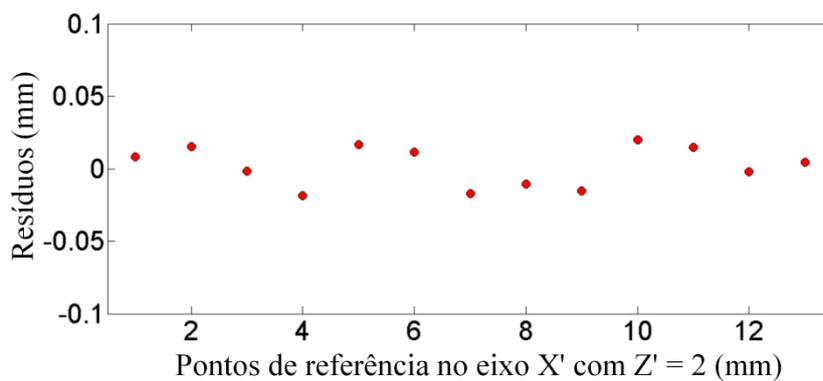


Figura 4.13. Gráfico de resíduos ao longo do eixo X' com valores de $Z' = 2 \text{ mm}$

Por outro lado, a localização dos pontos de referência é avaliada a partir de medições realizadas durante diferentes processos de soldagem, com diferentes ajustes de tensão e velocidade de alimentação do arame. Os resultados de largura e reforço encontrados nos processos de medição são comparados com um sistema de triangulação laser (off-line), chamado aqui também de scanner 3D (utilizado nos trabalhos de Cayo, 2013; Torres, 2013; Cruz 2014 e Cruz *et al.* 2015), com resolução de 0.05 mm nas medições de largura e reforço.

A Figura 4.14 apresenta nove pontos de trabalho utilizados para avaliar a metodologia de medição dos parâmetros geométricos. Cada ponto corresponde a uma dupla de tensão e velocidade de alimentação do arame, testadas com uma velocidade de soldagem constante de 10 mm/s . Os pontos de trabalho na Figura 4.14 são distribuídos de acordo com um *planejamento composto central* (PCC) focado numa região estável do modo de transferência por curto-circuito.

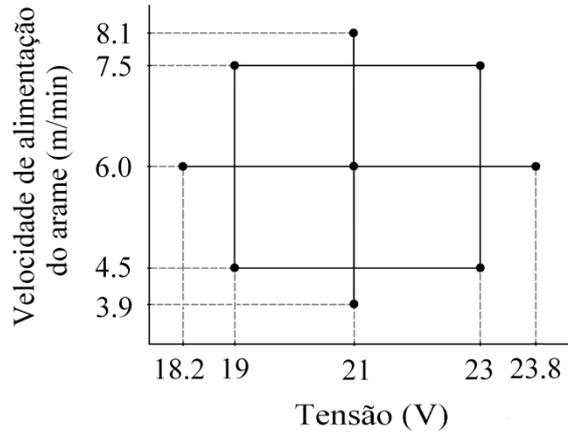


Figura 4.14. Pontos de trabalho para avaliar o processo de medição de largura e reforço

Em geral, numa região estável do processo a largura e o reforço dos cordões apresentam um valor uniforme ao longo do cordão. Assim, as comparações com o scanner 3D são realizadas usando um teste comum de hipótese nula, no qual as médias amostrais das duas populações são iguais, como o caso do *teste t de Student*. Por outro lado, o teste t de Student só pode ser usado se as variâncias das duas populações comparadas são iguais, em outro caso, como o apresentado aqui, pode-se utilizar o *teste t de Welch*, o qual pode ser usado em amostras não emparelhadas, mas com a premissa que cada população avaliada deve seguir uma distribuição normal (teste não paramétrico). No caso de amostras não emparelhadas o teste t de Welch se define como:

$$t = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (4.8)$$

onde μ_1 e μ_2 são as respectivas médias amostrais, s_1^2 e s_2^2 são as variâncias das amostras, e n_1 e n_2 são os tamanhos das amostras. Os graus de liberdade associados com o teste são calculados como:

$$v = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{(s_1^2/n_1)^2}{n_1 - 1} + \frac{(s_2^2/n_2)^2}{n_2 - 1}} \quad (4.9)$$

Assim, t e v podem ser utilizados juntos com os valores das tabelas da distribuição t de Student para testar se as duas médias amostrais das populações comparadas são iguais, geralmente para p -valores inferiores a 0,10; 0,05 ou 0,01.

As Figuras 4.15 e 4.16 apresentam, respectivamente, os sinais de largura e reforço monitorados num processo de soldagem com tensão de trabalho de 21 V e velocidade de alimentação do arame de 6 m/min (ponto central do PCC), as Figuras 4.17 e 4.18 apresentam os respectivos gráficos de densidade de probabilidade de cada sinal adquirido, nos quais pode-se observar que o comportamento das medições correspondem a uma distribuição normal. A Figura 4.19 apresenta uma visão geral da reconstrução realizada pelo scanner 3D e as Figuras 4.20 e 4.21 comparam diretamente as medições de largura e reforço realizadas pelo sistema de visão proposto e as medições realizadas pelo scanner 3D.

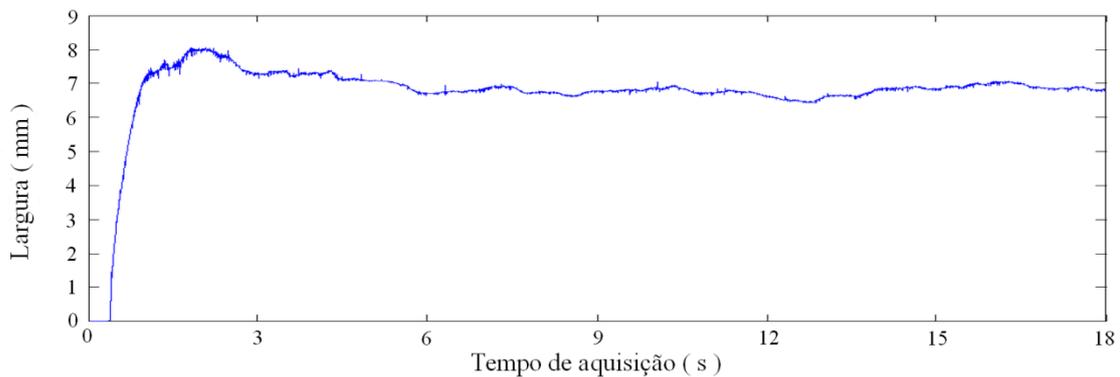


Figura 4.15. Largura vs. Tempo de aquisição. Tensão: 21 V; Velocidade de alimentação do arame: 6 m/min

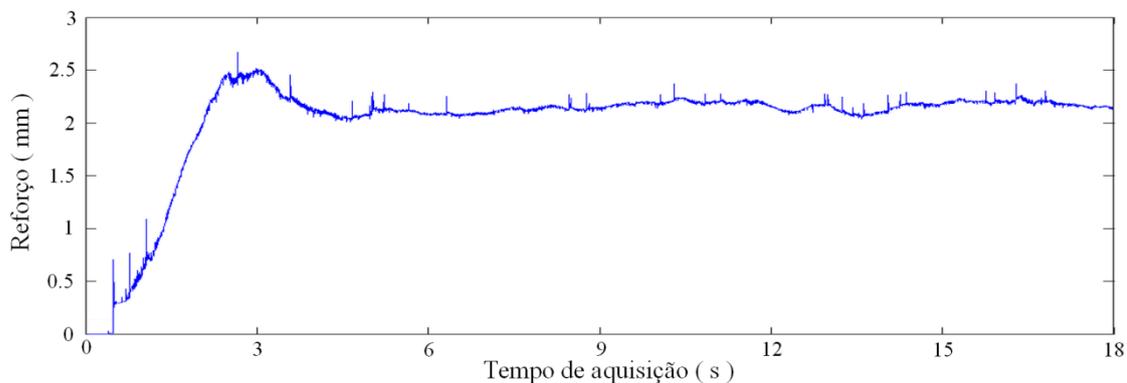


Figura 4.16. Reforço vs. Tempo de aquisição. Tensão: 21 V; Velocidade de alimentação do arame: 6 m/min

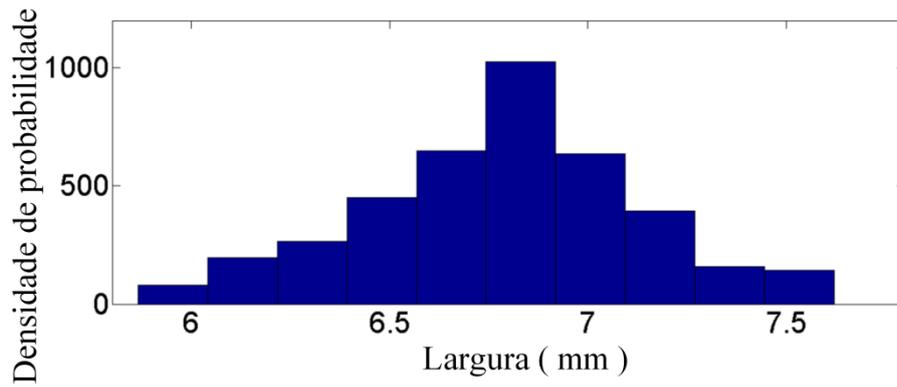


Figura 4.17. Densidade de probabilidade vs. Largura. Tensão: 21 V; Velocidade de alimentação do arame: 6 m/min

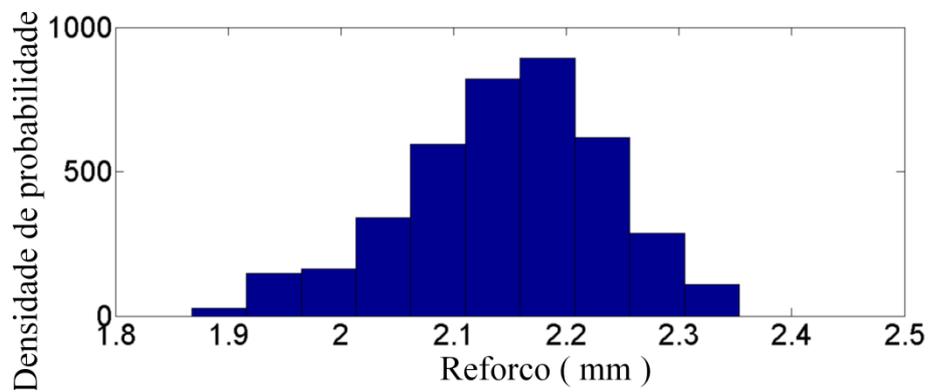


Figura 4.18. Densidade de probabilidade vs. Reforço. Tensão: 21 V; Velocidade de alimentação do arame: 6 m/min

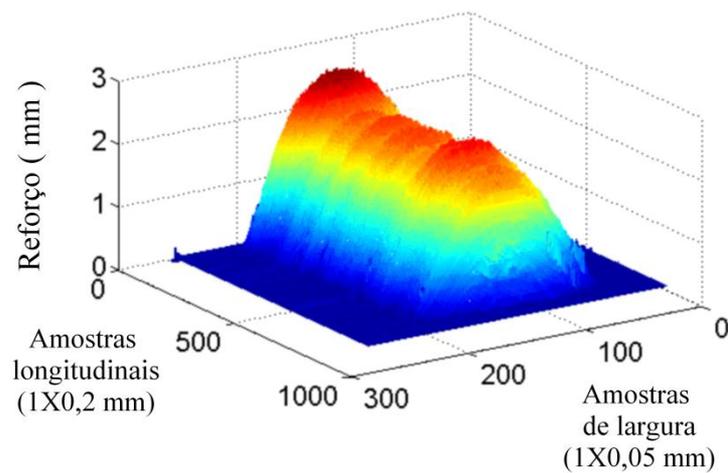


Figura 4.19. Reconstrução 3D do cordão de solda. Tensão: 21 V; Velocidade de alimentação do arame: 6 m/min

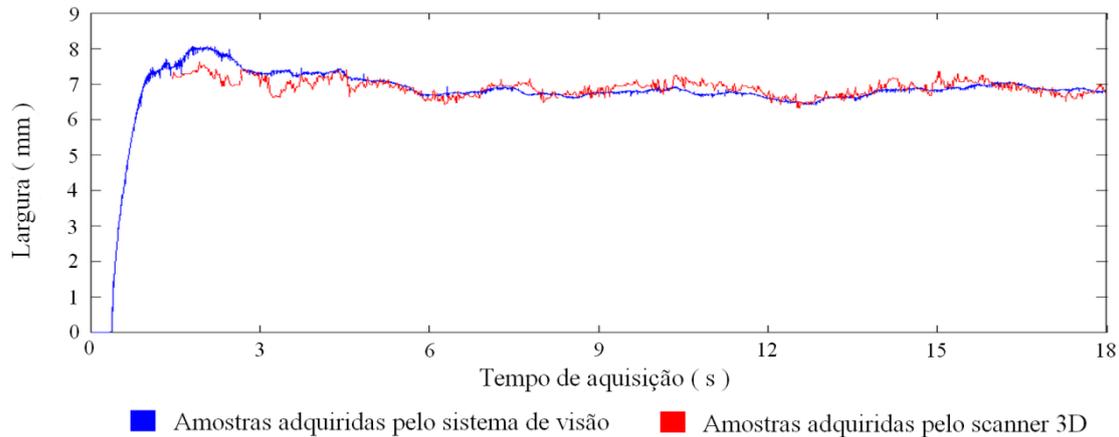


Figura 4.20. Medição da largura para o ponto Tensão: 21 V; Velocidade de alimentação do arame: 6 m/min. Comparação das amostras adquiridas pelo sistema de visão com as adquiridas com o scanner. Media amostral para o sistema de visão: 6,79 mm

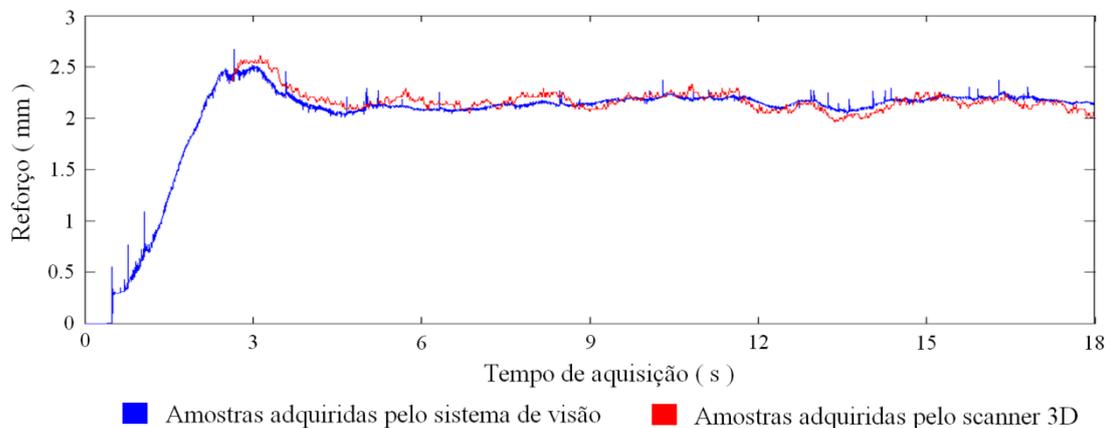


Figura 4.21. Medição do reforço para o ponto Tensão: 21 V; Velocidade de alimentação do arame: 6 m/min. Comparação das amostras adquiridas pelo sistema de visão com as adquiridas com o scanner. Media amostral para o sistema de visão: 2,15 mm

Nas Figuras 4.22 a 4.29 apresentam-se medições de largura e reforço realizadas pelo sistema de visão computacional proposto e comparações com as realizadas pelo scanner 3D para diferentes pontos de trabalho na região analisada. A Tabela 4.1 apresenta as médias amostrais (μ) e o desvio padrão (s) nas medições de largura dos nove pontos de trabalho do PCC da Figura 4.14 (calculadas depois da estabilização do parâmetro, 4 s em cada caso), realizadas com o sistema de visão proposto e com o scanner. A Tabela 4.2 apresenta as médias amostrais e o desvio padrão das medições de reforço nos nove pontos de trabalho (calculadas depois da estabilização do parâmetro) com o sistema de visão proposto e com o scanner.

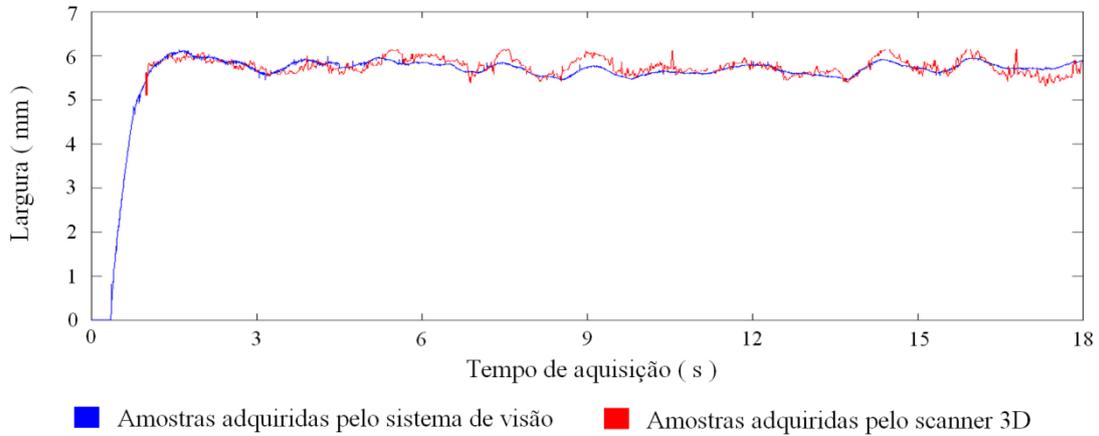


Figura 4.22. Medição da largura para o ponto Tensão: 19 V; Velocidade de alimentação do arame: 4,5 m/min. Comparação das amostras adquiridas pelo sistema de visão com as adquiridas com o scanner. Media amostral para o sistema de visão: 5,69 mm

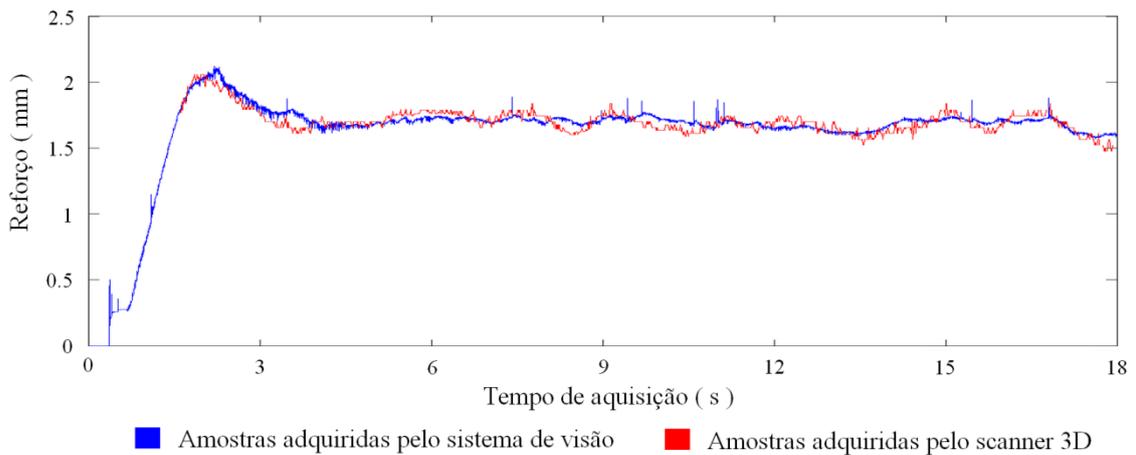


Figura 4.23. Medição do reforço para o ponto Tensão: 19 V; Velocidade de alimentação do arame: 4,5 m/min. Comparação das amostras adquiridas pelo sistema de visão com as adquiridas com o scanner. Media amostral para o sistema de visão: 1,69 mm

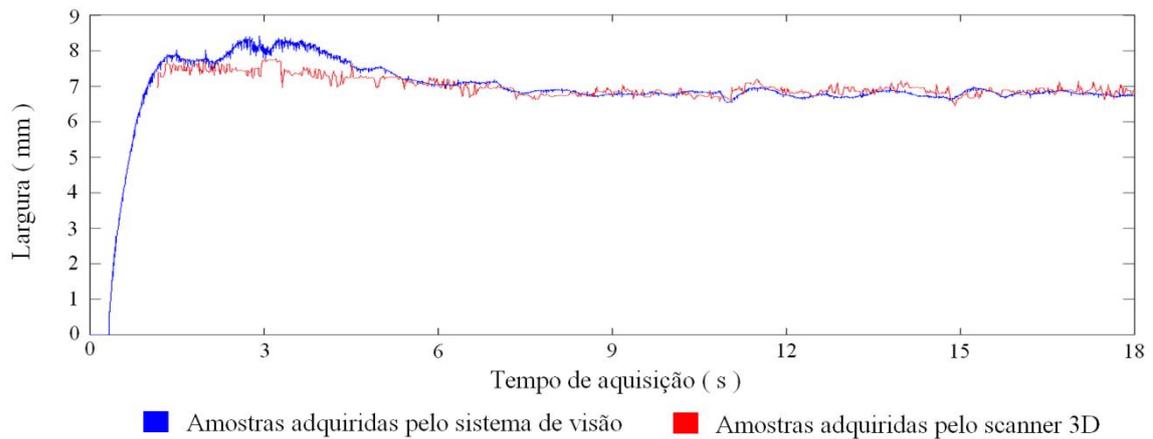


Figura 4.24. Medição da largura para o ponto Tensão: 23 V; Velocidade de alimentação do arame: 4,5 m/min. Comparação das amostras adquiridas pelo sistema de visão com as adquiridas com o scanner. Media amostral para o sistema de visão: 6,87 mm

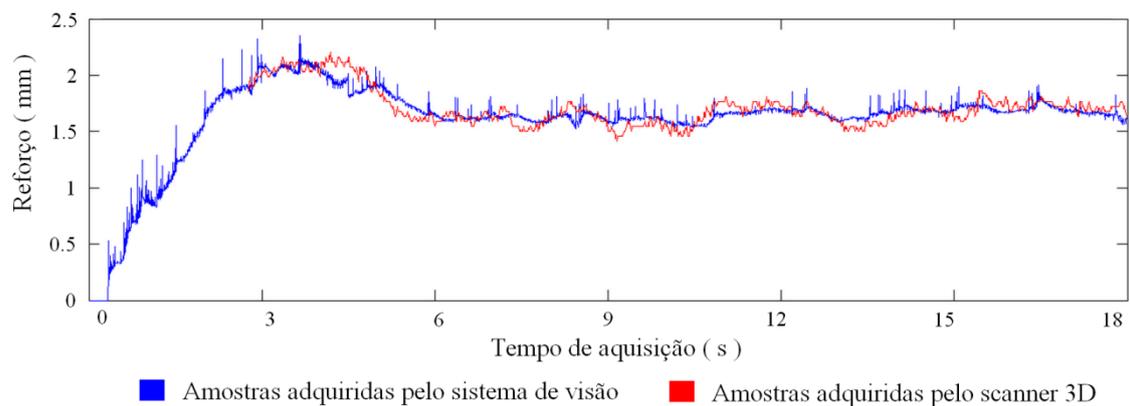


Figura 4.25. Medição do reforço para o ponto Tensão: 23 V; Velocidade de alimentação do arame: 4,5 m/min. Comparação das amostras adquiridas pelo sistema de visão com as adquiridas com o scanner. Media amostral para o sistema de visão: 1,67 mm

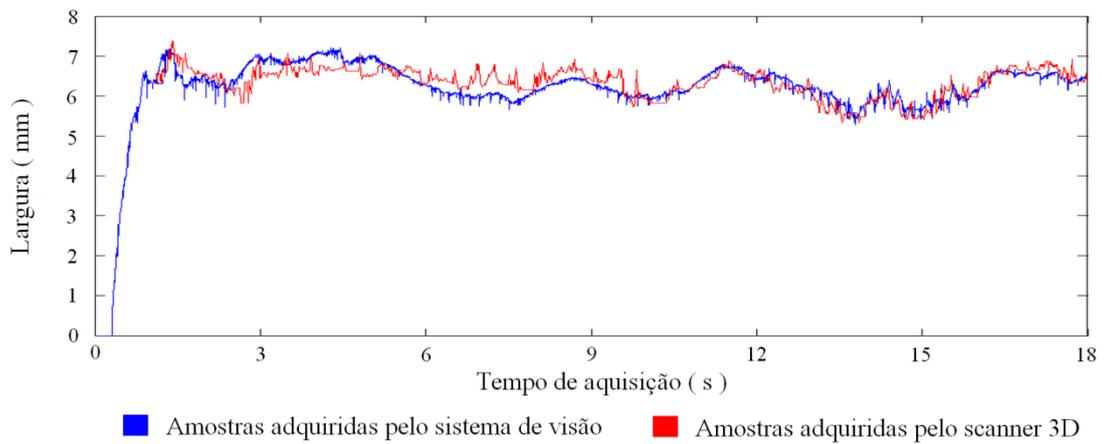


Figura 4.26. Medição da largura para o ponto Tensão: 19 V; Velocidade de alimentação do arame: 7,5 m/min. Comparação das amostras adquiridas pelo sistema de visão com as adquiridas com o scanner. Media amostral para o sistema de visão: 6,23 mm

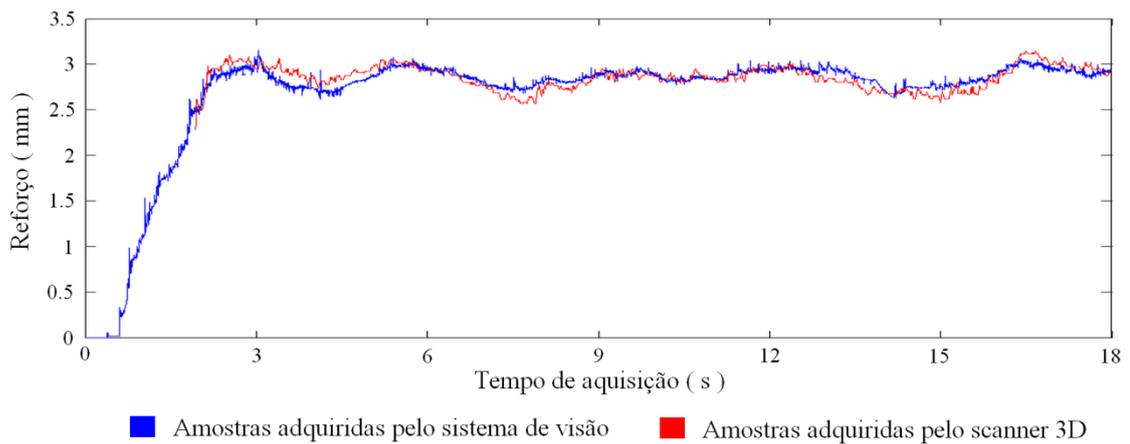


Figura 4.27. Medição do reforço para o ponto Tensão: 19 V; Velocidade de alimentação do arame: 7,5 m/min. Comparação das amostras adquiridas pelo sistema de visão com as adquiridas com o scanner. Media amostral para o sistema de visão: 2,87 mm

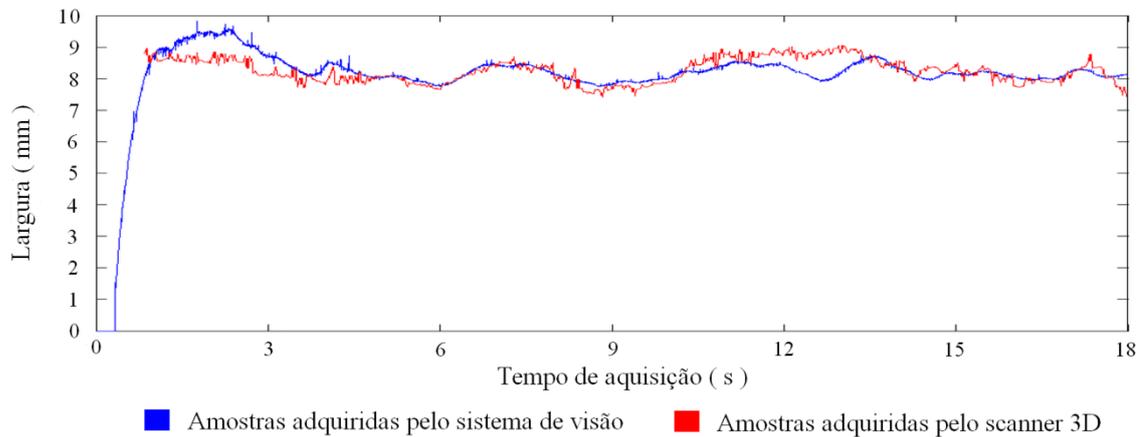


Figura 4.28. Medição da largura para o ponto Tensão: 23 V; Velocidade de alimentação do arame: 7,5 m/min. Comparação das amostras adquiridas pelo sistema de visão com as adquiridas com o scanner. Média amostral para o sistema de visão: 8,16 mm

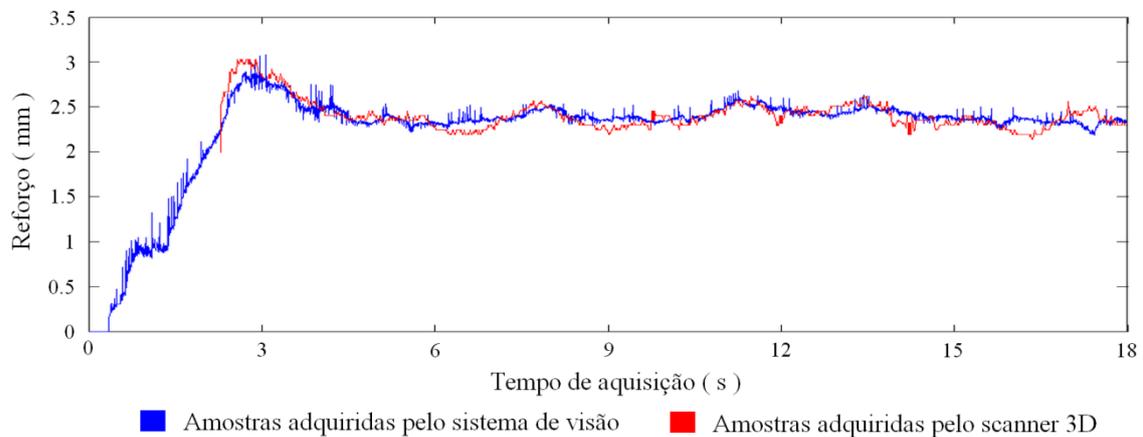


Figura 4.29. Medição do reforço para o ponto Tensão: 23 V; Velocidade de alimentação do arame: 7,5 m/min. Comparação das amostras adquiridas pelo sistema de visão com as adquiridas com o scanner. Média amostral para o sistema de visão: 2,39 mm

Tabela 4.1. Média amostral (μ) e desvio padrão (s) da largura dos cordões, medidos com o sistema de visão proposto e com o scanner 3D para cada ponto de trabalho

Velocidade de alimentação do arame (m/min)	Tensão (V)	Largura			
		Sistema de visão		Scanner 3D	
		μ (mm)	s (mm)	μ (mm)	s (mm)
3.9	21.0	6.16	0.38	6.18	0.37
4.5	23.0	6.87	0.36	6.92	0.48
4.5	19.0	5.69	0.27	5.72	0.28
6.0	23.8	7.80	0.35	7.85	0.46

Continuação Tabela 4.1. Média amostral (μ) e desvio padrão (s) da largura dos cordões, medidos com o sistema de visão proposto e com o scanner 3D para cada ponto de trabalho

6.0	21.0	6.79	0.34	6.83	0.38
6.0	18.2	5.84	0.43	5.87	0.60
7.5	23.0	8.16	0.50	8.22	0.53
7.5	19.0	6.23	0.77	6.30	0.78
8.1	21.0	7.70	0.45	7.71	0.29

Tabela 4.2. Média amostral (μ) e desvio padrão (s) do reforço dos cordões, medidos com o sistema de visão proposto e com o scanner 3D para cada ponto de trabalho

Velocidade de alimentação do arame (m/min)	Tensão (V)	Reforço			
		Sistema de visão		Scanner 3D	
		μ (mm)	s (mm)	μ (mm)	s (mm)
3.9	21.0	1.59	0.17	1.58	0.14
4.5	23.0	1.67	0.14	1.66	0.10
4.5	19.0	1.69	0.11	1.70	0.09
6.0	23.8	1.97	0.15	1.95	0.17
6.0	21.0	2.15	0.09	2.16	0.12
6.0	18.2	2.31	0.16	2.29	0.18
7.5	23.0	2.39	0.17	2.37	0.17
7.5	19.0	2.87	0.20	2.85	0.22
8.1	21.0	2.48	0.18	2.50	0.17

A Tabela 4.3 apresenta os resultados estatísticos do teste t de Welch para amostras não emparelhadas e com variâncias diferentes, comparando as medições realizadas pelo sistema de visão proposto e pelo scanner 3D (Tabelas 4.1 e 4.2). Neste caso com diferentes tamanhos de população para cada sistema, 4000 para o sistema de visão e 500 para o scanner 3D.

Tabela 4.3. Teste t de Welch calculado para medições de largura e reforço

Velocidade de alimentação do arame (m/min)	Tensão (V)	Teste t de Welch ($ t $)	
		Largura	Reforço
3.9	21.0	1.1361	1.4677
4.5	23.0	2.2514	2.0040
4.5	19.0	2.2676	2.2807
6.0	23.8	2.3471	2.5113
6.0	21.0	2.2441	1.8011
6.0	18.2	1.0838	2.3702
7.5	23.0	2.4013	2.4802
7.5	19.0	1.8946	1.9353
8.1	21.0	0.6760	2.4637

Com mais de 600 graus de liberdade a estatística do t de Welch é comparada com um limiar escolhido na tabela de distribuição t de Student bicaudal. A Tabela 4.3 mostra que os valores calculados para o teste t de Welch não excedem o limite para $\alpha = 0,01$, o qual é 2,5758 usando o tamanho da população ∞ . Assim, a hipótese nula não é rejeitada e as médias amostrais são consideradas iguais. Além disso, a Tabela 4.3 mostra que, em geral, maiores valores do teste t de Welch são apresentados para maiores valores de tensão. Isto porque a técnica de limiarização usada no processamento das imagens depende diretamente da quantidade de luz apresentada na cena, a qual é proporcional à intensidade luminosa do arco.

Finalmente, a Figura 4.30 apresenta como exemplo o tempo de processamento utilizado pela metodologia para medir a largura e o reforço simultaneamente no ponto de trabalho tensão 21 V e velocidade de alimentação do arame 6 m/min. Como apresenta o gráfico da Figura 4.30 o tempo de processamento não supera os 3 ms, o qual considera-se adequado visando que as imagens são adquiridas a cada 10 ms (taxa de aquisição: 100 frames/s). Além de ser um tempo menor que os tempos de processamento empregado no

monitoramento dos parâmetros geométricos dos cordões de solda apresentados por outros autores e referidos na Tabela 3.2.

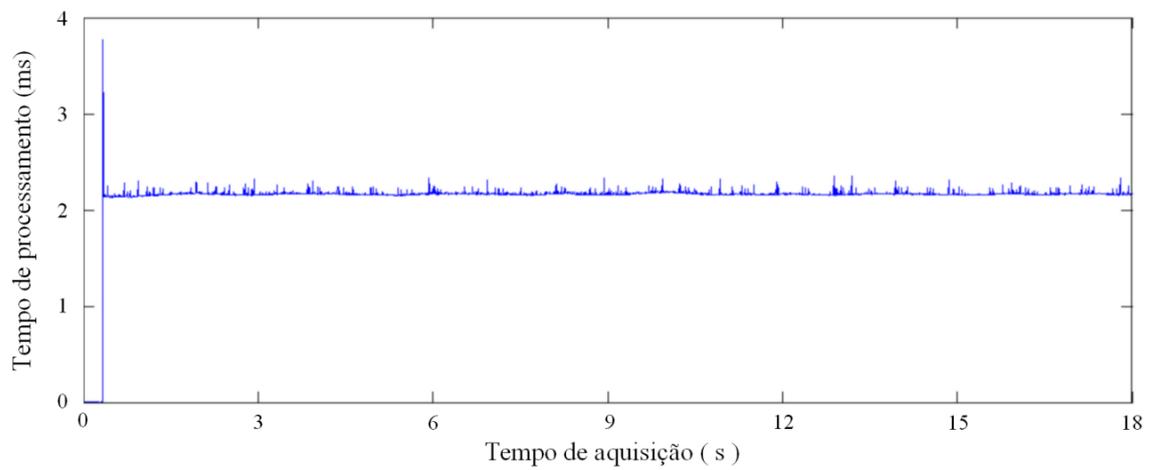


Figura 4.30. Tempo de processamento de imagens utilizado no monitoramento da largura e do reforço no ponto de trabalho tensão 21 V, velocidade de alimentação do arame 6 m/min

5 – MODELAGEM EMPÍRICA E CONTROLE DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

Este capítulo apresenta o controle da largura e do reforço dos cordões de solda, a partir de modelos predefinidos. Os modelos e o controle foram realizados visando definir as estratégias de um próximo controlador sem modelo predefinido, assim como, ter uma base que permita comparar a eficiência do novo controlador. Assim, no desenvolvimento do trabalho foram realizados dois tipos de controladores baseados em modelos. O primeiro utiliza a tensão do processo para controlar a largura do cordão e a velocidade de alimentação do arame para controlar o reforço. O segundo emprega a velocidade de alimentação do arame para controlar o reforço e utiliza a velocidade de soldagem para controlar a largura. Neste último caso incorpora-se o Índice de Vilarinho para avaliar a estabilidade do processo em tempo real, e utiliza-se a tensão do processo para compensar as instabilidades em que possa incorrer o processo de soldagem durante a etapa de controle.

5.1 – CONTROLE BASEADO NA TENSÃO E NA VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO DO ARAME

O foco deste trabalho é controlar a largura e o reforço dos cordões de solda simultaneamente durante o processo de soldagem. Assim, na primeira etapa deste trabalho é desenvolvido um controlador que utiliza a tensão para influenciar a largura e a velocidade de alimentação do arame para controlar o reforço. O comportamento das respostas do processo, neste caso, largura e reforço, são assumidas inicialmente como não lineares, pelo tanto, empregam-se modelos estatísticos de segunda ordem, com a forma:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1^2 + b_4x_2^2 + b_5x_1x_2 \quad (5.1)$$

onde \hat{y} representa as respostas do modelo, largura ou reforço, x_1 representa a tensão de soldagem e x_2 representa a velocidade de alimentação do arame. Estes modelos são obtidos, neste caso, a partir do planejamento composto central da Figura 4.14. Em níveis codificados este planejamento tem a forma da Figura 5.1, o qual, utilizando o princípio dos mínimos quadrados na forma matricial gera a seguinte expressão:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_2 & x_1^2 & x_2^2 & x_1 x_2 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & -\sqrt{2} & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & \sqrt{2} & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -\sqrt{2} & 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & \sqrt{2} & 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

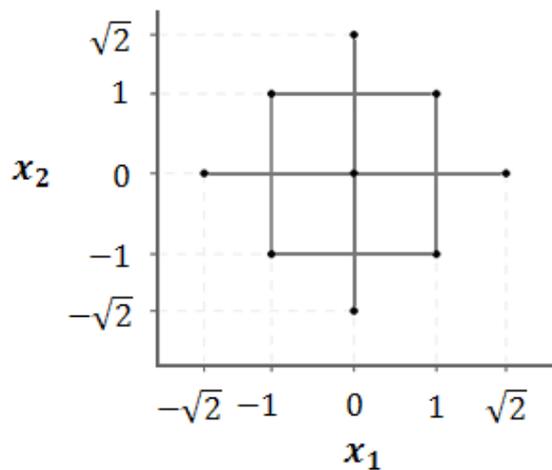


Figura 5.1. Planejamento composto central em níveis codificados para duas variáveis

De acordo com a Equação (5.2) e as respostas (\mathbf{y}) encontradas nas Tabelas 4.1 e 4.2 mais três repetições do ponto central, as medições de largura e reforço são reorganizadas na Tabela 5.1. A partir da qual, os coeficientes de regressão $\mathbf{b} = (b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5)^T$ da Equação (5.1) são encontrados fazendo:

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (5.3)$$

Tabela 5.1. Planejamento experimental e respostas para a modelagem baseada na velocidade de alimentação do arame e na tensão

Níveis codificados		Parâmetros de entrada		Respostas	
x_1	x_2	Tensão, x_1 (V)	Velocidade de alimentação do arame, x_2 (m/min)	Largura (mm)	Reforço (mm)
-1	-1	19,0	4,5	5,69	1,69
1	-1	23,0	4,5	6,87	1,67
-1	1	19,0	7,5	6,23	2,87
1	1	23,0	7,5	8,16	2,39
$-\sqrt{2}$	0	18,2	6,0	5,84	2,31
$\sqrt{2}$	0	23,8	6,0	7,80	1,97
0	$-\sqrt{2}$	21	3,9	6,16	1,59
0	$\sqrt{2}$	21	8,1	7,70	2,48
0	0	21	6,0	6,79	2,15
0	0	21	6,0	6,87	2,10
0	0	21	6,0	6,84	2,11
0	0	21	6,0	6,76	2,14

Assim, os modelos de largura, com um *coeficiente de determinação múltipla ajustado* (R^2 ajustado) de 97.92%, e de reforço, com um R^2 ajustado de 92.36 %, respectivamente, têm a forma:

$$\hat{y}_{L1} = 6,81 + 0,73x_1 + 0,50x_2 - 0,03x_1^2 + 0,02x_2^2 + 0,19x_1x_2 \quad (5.4)$$

$$\hat{y}_{R1} = 2,12 - 0,12x_1 + 0,39x_2 + 0,02x_1^2 - 0,03x_2^2 - 0,11x_1x_2 \quad (5.5)$$

Estes modelos são definidos para variáveis em níveis codificados, assim que, para obter valores a partir das variáveis de controle, tensão e velocidade de alimentação de arame, os

níveis codificados devem-se expressar, de acordo com a variável correspondente, na forma:

$$x_j = \frac{\xi_j - [\max(\xi_j) + \min(\xi_j)]/2}{[\max(\xi_j) - \min(\xi_j)]/2} \quad (5.6)$$

Onde: x_j indica o nível codificado correspondente; ξ_j é o valor da variável de controle; $\max(\xi_j)$ e $\min(\xi_j)$ são os valores reais utilizados no planejamento fatorial. As Figuras 5.2 e 5.3 apresentam as respectivas superfícies de resposta para os dois modelos, nas quais ilustra-se o comportamento das respostas em função das variáveis de controle.

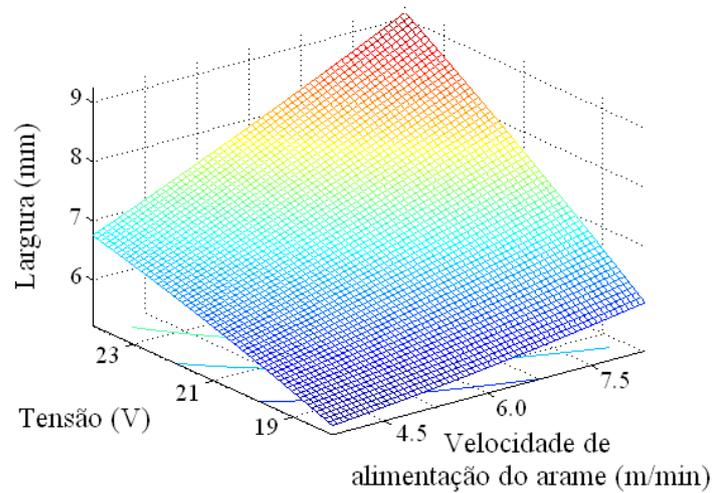


Figura 5.2. Superfície de resposta para o modelo de segunda ordem da largura baseado na tensão e na velocidade de alimentação do arame

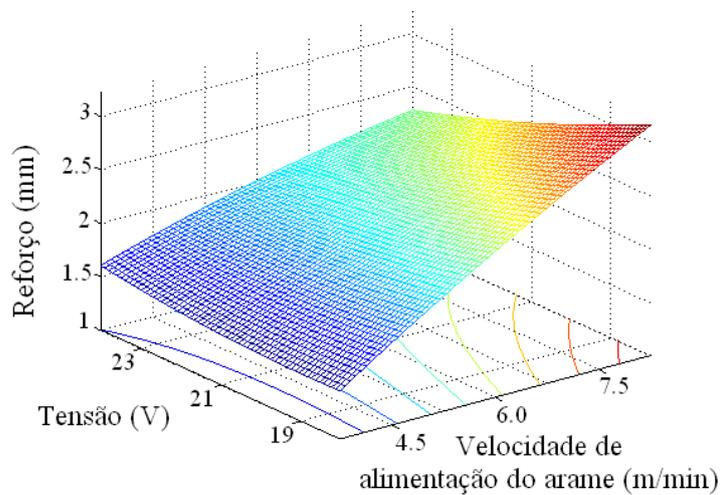


Figura 5.3. Superfície de resposta para o modelo de segunda ordem do reforço baseado na tensão e na velocidade de alimentação do arame

Adotando modelos de segunda ordem, o tipo de controle é definido como não linear. Assim, para linearizar cada modelo durante a etapa de controle em cada ponto de trabalho, ou seja, em qualquer combinação das variáveis de entrada, tensão (x_1) e velocidade de alimentação do arame (x_2), utiliza-se a inclinação da reta tangente nesse ponto. Para isto, emprega-se a série de Taylor até a primeira derivada numa função de duas variáveis $f(x_1, x_2)$, na forma:

$$f(x_1, x_2)/(x_1 \approx u, x_2 \approx v) = f(u, v) + \frac{\partial f(u, v)}{\partial x_1} \cdot (x_1 - u) + \frac{\partial f(u, v)}{\partial x_2} \cdot (x_2 - v) \quad (5.7)$$

Onde, u e v são os valores das variáveis de controle no ponto de trabalho específico e $\partial f(u, v)/\partial x_i$ representa a derivada da função com respeito da variável correspondente e avaliada no ponto de trabalho (u, v) . Assim, fazendo $f(x_1, x_2) = \hat{y}$ a Equação (5.1) pode ser expressa na forma:

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2)/(x_1 \approx u, x_2 \approx v) = & b_0 + b_1 u + b_2 v + b_3 u^2 + b_4 v^2 + b_5 uv \\ & + (b_1 + 2b_3 u + b_5 v)(x_1 - u) \\ & + (b_2 + 2b_4 v + b_5 u)(x_2 - v) \end{aligned} \quad (5.8)$$

Por outro lado, baseado nos resultados satisfatórios de controladores tipo fuzzy (Torres, 2013; Cruz, 2014; Cruz *et al.*, 2015), e aproveitando os modelos estatísticos calculados, o controlador utilizado foi definido como proporcional. Aqui, utiliza-se um controlador próprio para cada parâmetro geométrico. Neste caso, o erro entre os valores de referência e os valores monitorados pelo sistema de visão computacional são usados num sistema em malha fechada, a fim de controlar o seu parâmetro correspondente. Assim, ressaltando que a largura é controlada pela tensão (x_1) e o reforço é controlado pela velocidade de alimentação do arame (x_2), e baseados na expressão linearizada de cada modelo, Equação (5.8), o valor que relaciona as variáveis de controle, x_1 e x_2 , com o valor atual dos parâmetros monitorados (y_M) é dado pelas seguintes relações:

$$x_1 = \frac{y_M - M - Cx_2}{B} \quad (5.9)$$

$$x_2 = \frac{y_M - M - Bx_1}{C} \quad (5.10)$$

Onde:

$$B = b_1 + 2b_3u + b_5v \quad (5.11)$$

$$C = b_2 + 2b_4v + b_5u \quad (5.12)$$

$$M = A - Bu - Cv \quad (5.13)$$

Com:

$$A = b_0 + b_1u + b_2v + b_3u^2 + b_4v^2 + b_5uv \quad (5.14)$$

Neste caso, y_M pode ser qualquer um dos parâmetros monitorados, largura ou reforço, o que muda são os coeficientes de regressão de cada modelo. Deste modo, a saída do controlador, a fim de atingir o valor de entrada de referência correspondente, é dada por:

$$x_1^* = x_{1_atual} + \alpha \left(\frac{L_R - L_M}{B} \right) \quad (5.15)$$

$$x_2^* = x_{2_atual} + \alpha \left(\frac{R_R - R_M}{C} \right) \quad (5.16)$$

Onde:

- x_1^* e x_2^* são as saídas do controlador (novo valor das variáveis de controle);
- x_{1_atual} e x_{2_atual} são os valores atuais das variáveis de controle;
- L_R e L_M são, respectivamente, o valor da largura de referência e o valor da largura monitorada;
- $(L_R - L_M)$ representa o erro no valor da largura na respectiva malha de controle. Ressalta-se que o valor pode ser positivo ou negativo, o que vai influenciar o valor de x_1^* ;
- R_R e R_M são, respectivamente, o valor do reforço de referência e o valor do reforço monitorado;
- $(R_R - R_M)$ representa o erro no valor do reforço na respectiva malha de controle;
- α é a constante de proporcionalidade que acompanha cada controlador,

O valor de α deve ser escolhido de modo que o controlador atinja o valor de referência numa velocidade adequada, mas que, ao mesmo tempo, não origine perturbações no processo. Neste caso o valor de α utilizado foi de 0.30, o qual representa uma mudança de 30% do valor que deve tomar cada variável de controle, segundo o erro e os modelos computados.

De outro lado, mesmo que o monitoramento dos parâmetros geométricos seja feito a cada 10 *ms*, cada etapa de controle, uma para a largura e outra para o reforço, é realizada separadamente a cada 200 *ms*. Esta janela de tempo permite em cada caso que a variável de controle atue de forma individual sobre o parâmetro controlado, tendo em conta que o tempo de resposta da máquina de soldagem é de aproximadamente 40 *ms* e o tempo de resposta dos parâmetros geométricos dependerá de cada situação particular, envolvendo todas as variáveis que influenciam a formação do cordão.

Um tempo de monitoramento menor do que o tempo de controle permite utilizar os recursos de filtragem no sinal adquirido, além de utilizar os últimos 5 dados adquiridos em cada caso para obter uma média amostral do parâmetro monitorado, a qual utiliza-se no controlador. Outro recurso que permite um tempo de monitoramento menor ao tempo de controle é o uso do “comportamento” do sinal adquirido no controlador. Este recurso foi empregado visando às futuras etapas do controlador sem modelo predefinido.

Assim, a cada 200 *ms* o comportamento do sinal é avaliado medindo o ângulo de inclinação do sinal adquirido. Este ângulo é calculado para saber se o controlador deve atuar ou não. Assim, por exemplo, se o valor do parâmetro adquirido é menor do que o valor de referência, as variáveis de controle correspondentes deveriam atuar e influenciar o aumento do parâmetro, mas se o comportamento do sinal indica que o valor do parâmetro está aumentando de forma significativa, então não é necessário mudar as variáveis de controle. A significância do comportamento do sinal é medida utilizando um ângulo limiar de 30° para aumentar o parâmetro (se o ângulo é maior, então não aumentar) e de -30° graus para diminuir-lo (se o ângulo é menor, então não diminuir). A Figura 5.4 exemplifica a medição do ângulo num sinal adquirido, o ângulo é medido em relação ao eixo horizontal e calculado a partir da seguinte relação:

$$\text{angulo} = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Diferença no sinal do parâmetro normalizada}}{\text{Diferença no sinal de tempo normalizada}} \right) \quad (5.17)$$

onde a *Diferença no sinal do parâmetro normalizada* é a diferença entre o valor do sinal adquirido na última posição da janela do trabalho e o valor do sinal na primeira posição da janela de trabalho, e a *Diferença no sinal de tempo normalizada* é o tamanho da janela (numero de posições).

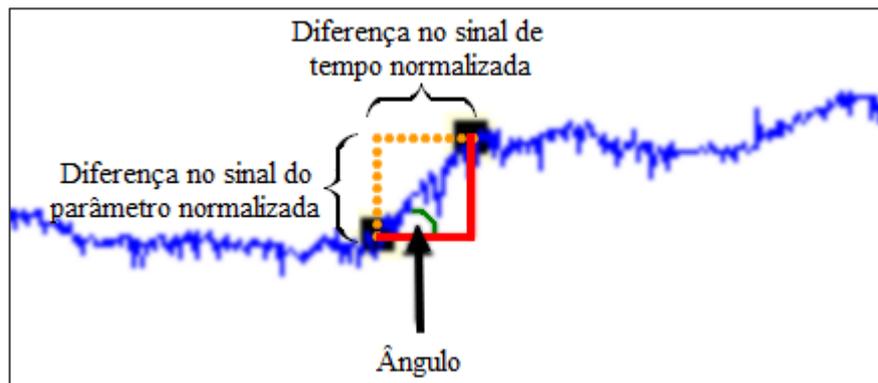


Figura 5.4. Ilustração do processo de medição do ângulo num sinal adquirido

As Figuras 5.5, 5.6 e 5.7 apresentam exemplos de sinais adquiridos durante diferentes etapas de controle. Neste caso, são apresentados os sinais de largura e reforço, junto com os valores de tensão e velocidade de alimentação do arame calculados pelo controlador e utilizados durante cada processo. A velocidade de soldagem em todos é de 10 *mm/s*. O controle em cada caso inicia depois de 10 segundos. A linha vermelha nos gráficos de largura e reforço indica o valor de referência de cada parâmetro geométrico. Ressaltar que, embora a tensão seja usada para controlar a largura e a velocidade de alimentação do arame para controlar o reforço, tanto a tensão como a velocidade de alimentação influenciam, em diferente grau, ambos os parâmetros geométricos.

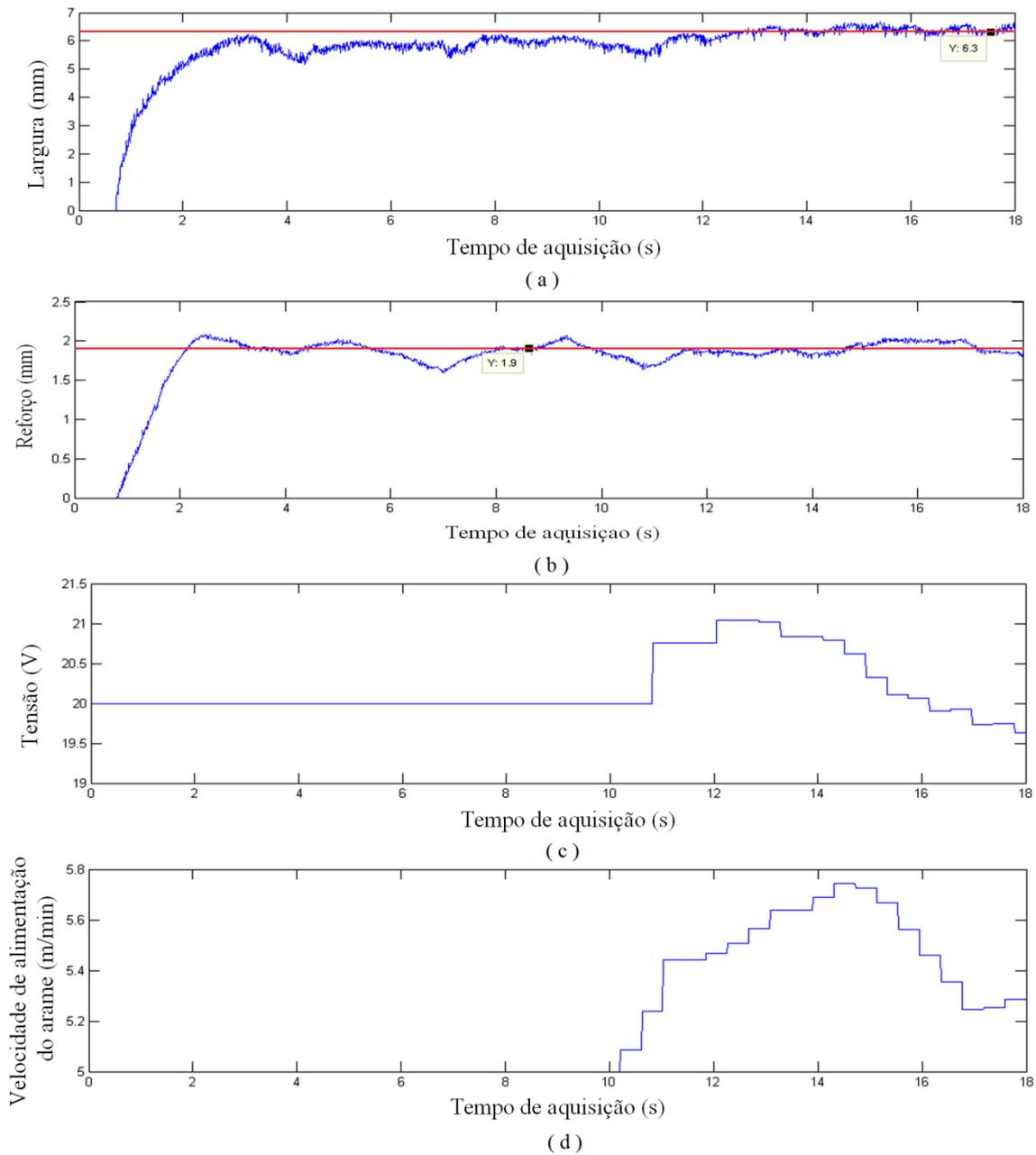


Figura 5.5. Processo de controle de largura e reforço. Tensão inicial: 20 V; velocidade de alimentação do arame inicial: 5 m/min; velocidade de soldagem: 10 mm/s; Largura de referência: 6,3 mm; reforço de referência: 1,9 mm. Sinais adquiridos: (a) Largura; (b) Reforço; (c) Tensão; (d) Velocidade de alimentação do arame. Controle depois de 10 s

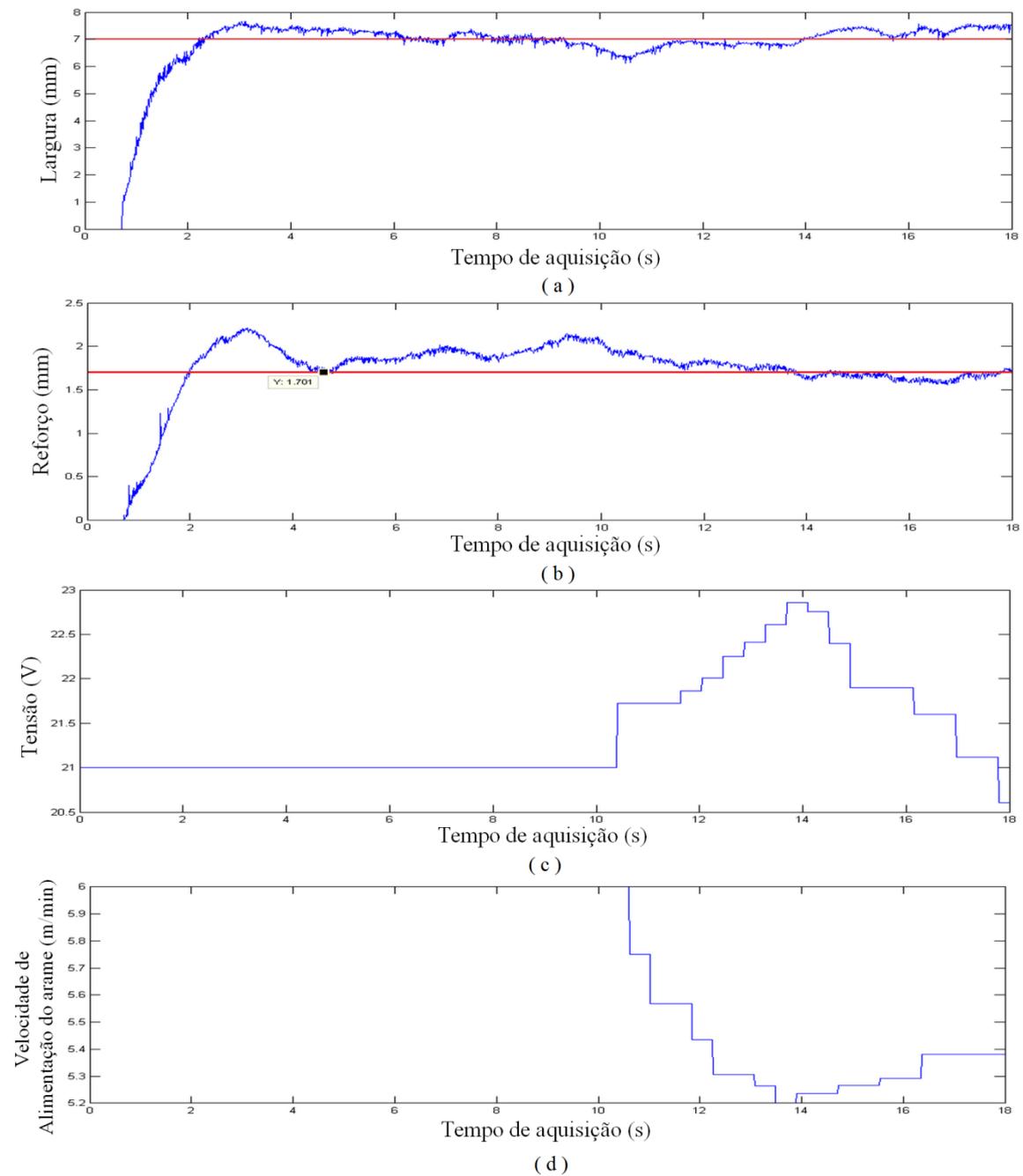


Figura 5.6. Processo de controle de largura e reforço. Tensão inicial: 21 V; velocidade de alimentação do arame inicial: 6 m/min; velocidade de soldagem: 10 mm/s; Largura de referência: 7 mm; reforço de referência: 1,7 mm. Sinais adquiridos: (a) Largura; (b) Reforço; (c) Tensão; (d) Velocidade de alimentação do arame. Controle depois de 10 s

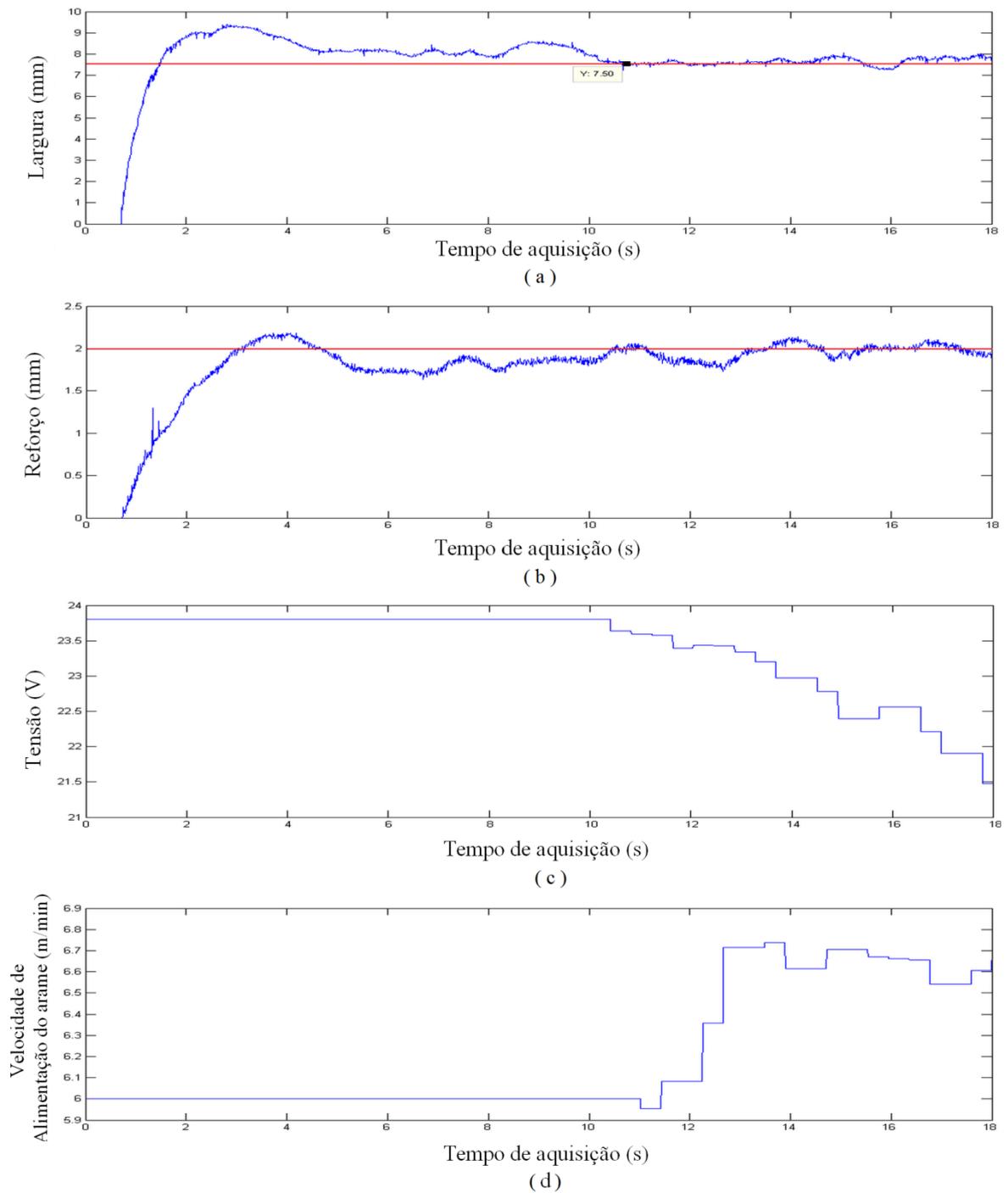


Figura 5.7. Processo de controle de largura e reforço. Tensão inicial: 23,8 V; velocidade de alimentação do arame inicial: 6 m/min; velocidade de soldagem: 10 mm/s; Largura de referência: 7,5 mm; reforço de referência: 2 mm. Sinais adquiridos: (a) Largura; (b) Reforço; (c) Tensão; (d) Velocidade de alimentação do arame. Controle depois de 10 s

5.2 – CONTROLE BASEADO NA VELOCIDADE DE SOLDAGEM E NA VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO DO ARAME

Pode-se observar nos gráficos das Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 que o controlador consegue atingir com um grau de incerteza aceitável os valores de referência de cada parâmetro geométrico. O problema neste tipo de controlador é que os parâmetros que o controlador pode usar durante a soldagem devem ser restritos aos ajustes que não gerem instabilidades no processo ou que não mudem o modo de transferência metálica de curto-circuito para globular ou goticular. Visando corrigir esta limitação, se apresenta um novo modelo, esta vez, utilizando a velocidade de soldagem para controlar a largura dos cordões de solda e a tensão do processo para corrigir os problemas de instabilidade que a etapa de controle possa apresentar.

Neste caso, durante o processo de controle são realizadas mudanças nos três parâmetros de entrada: tensão, velocidade de alimentação do arame e velocidade de soldagem. Assim, utiliza-se no modelamento um planejamento composto central de três variáveis, segundo a Figura 5.8 e um modelo de segunda ordem de três variáveis na forma:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1^2 + b_5x_2^2 + b_6x_3^2 + b_7x_1x_2 + b_8x_1x_3 + b_9x_2x_3 \quad (5.18)$$

onde \hat{y} representa as respostas do modelo, largura ou reforço, x_1 a tensão de soldagem, x_2 a velocidade de alimentação do arame e x_3 a velocidade de soldagem.

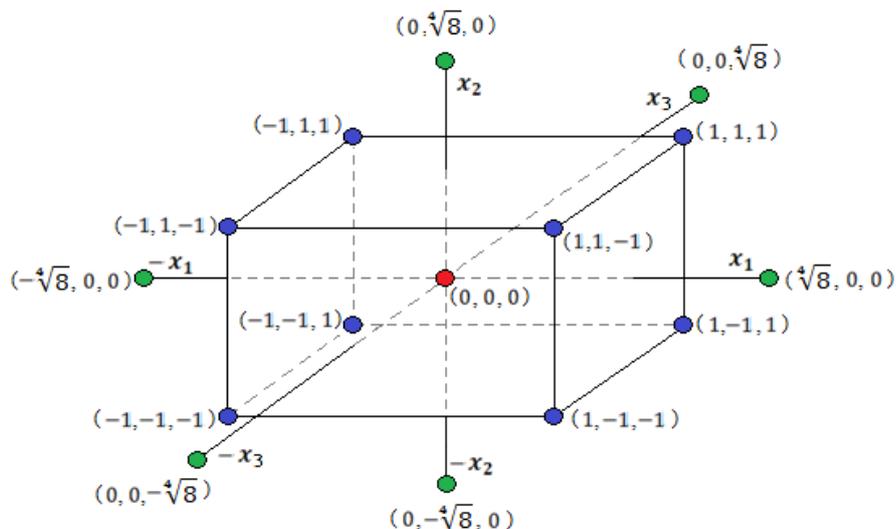


Figura 5.8. Planejamento composto central em níveis codificados para três variáveis (x_1, x_2, x_3)

A Tabela 5.2 apresenta os valores utilizados nos experimentos para as variáveis da Figura 5.8 no ponto central (nível codificado zero), nos pontos fatoriais (níveis codificados 1 e -1) e nos pontos axiais (níveis codificados $\sqrt[4]{8}$ e $-\sqrt[4]{8}$). Neste caso, os coeficientes de regressão da Equação (5.17) $\mathbf{b} = (b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9)^T$ são calculados utilizando a relação da Equação (5.3), mas com a seguinte expressão matricial para \mathbf{X} :

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_2 & x_3 & x_1^2 & x_2^2 & x_3^2 & x_1x_2 & x_1x_3 & x_2x_3 \\ 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -\sqrt[4]{8} & 0 & 0 & \sqrt[2]{8} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \sqrt[4]{8} & 0 & 0 & \sqrt[2]{8} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -\sqrt[4]{8} & 0 & 0 & \sqrt[2]{8} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \sqrt[4]{8} & 0 & 0 & \sqrt[2]{8} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -\sqrt[4]{8} & 0 & 0 & \sqrt[2]{8} & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \sqrt[4]{8} & 0 & 0 & \sqrt[2]{8} & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

Tabela 5.2. Níveis codificados e valores correspondentes para o planejamento composto central de três variáveis

Parâmetros de soldagem	Símbolo	Níveis codificados e valores reais				
		$-\sqrt[4]{8}$	-1	0	1	$\sqrt[4]{8}$
Tensão (V)	x_1	18,5	19,5	21	22,5	23,5
Velocidade de alimentação do 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

A Tabela 5.3 apresenta as respostas de largura e reforço encontradas nos experimentos segundo o planejamento experimental da Figura 5.8 a Equação (5.19) e da Tabela 5.2, mais cinco repetições do ponto central.

Tabela 5.3. Planejamento experimental e respostas para a modelagem baseada na tensão, na velocidade de alimentação do arame e na velocidade de soldagem

Parâmetros de entrada			Respostas	
Tensão, x_1 (V)	Velocidade de alimentação do arame, x_2 (m/min)	Velocidade de soldagem, x_3 (mm/s)	Largura (mm)	Reforço (mm)
19,5	4,5	6,5	7,09	2,40
22,5	4,5	6,5	8,59	2,24
19,5	7,5	6,5	8,34	3,45
22,5	7,5	6,5	10,49	2,93
19,5	4,5	9,5	6,43	1,82
22,5	4,5	9,5	7,11	1,80
19,5	7,5	9,5	6,35	2,74
22,5	7,5	9,5	8,45	2,16
18,5	6,0	8,0	6,50	2,66
23,5	6,0	8,0	8,37	2,29
21	3,5	8,0	6,24	1,77
21	8,5	8,0	8,63	2,91
21	6,0	5,5	10,18	3,09
21	6,0	10,5	7,11	1,91
21	6,0	8,0	7,86	2,32
21	6,0	8,0	8,02	2,24
21	6,0	8,0	7,58	2,34
21	6,0	8,0	8,27	2,22
21	6,0	8,0	7,88	2,27
21	6,0	8,0	7,94	2,38

Os modelos, respectivos, de largura e reforço para este planejamento experimental são:

$$\hat{y}_{L2} = 7,92 + 0,70x_1 + 0,62x_2 - 0,83x_3 - 0,17x_1^2 - 0,17x_2^2 + 0,26x_3^2 + 0,26x_1x_2 - 0,11x_1x_3 - 0,24x_2x_3 \quad (5.20)$$

$$\hat{y}_{R2} = 2,29 - 0,14x_1 + 0,36x_2 - 0,33x_3 + 0,06x_1^2 + 0,01x_2^2 + 0,07x_3^2 - 0,11x_1x_2 + 0,01x_1x_3 - 0,06x_2x_3 \quad (5.21)$$

Novamente, nos modelos das Equações (5.20) e (5.21), os coeficientes de regressão estão em função dos níveis codificados, assim que, para usar diretamente as variáveis de trabalho nos modelos deve-se utilizar a equação (5.6) em cada uma. As Figuras 5.9 e 5.10 apresentam as superfícies de resposta dos modelos correspondentes em função da velocidade de alimentação do arame e da velocidade de soldagem para uma tensão constante de 22 V. Pode-se observar como ambos os parâmetros geométricos, largura e reforço, aumentam com a diminuição da velocidade de soldagem e com o aumento da velocidade de alimentação do arame.

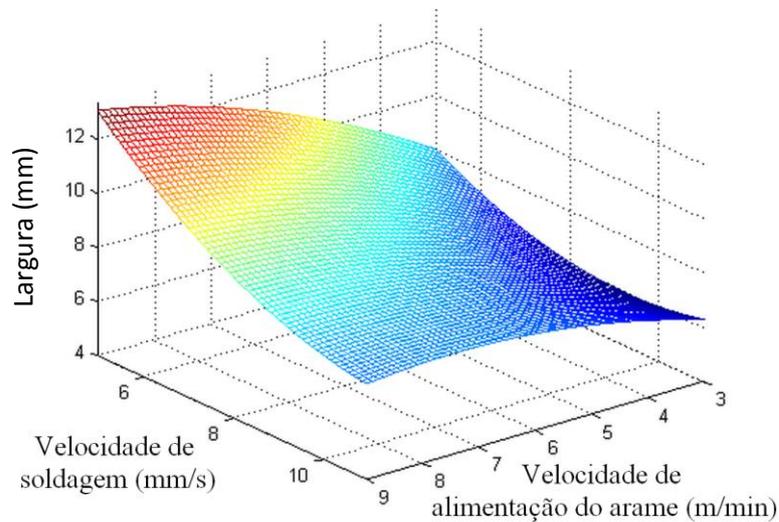


Figura 5.9. Superfície de resposta do modelo de três variáveis da largura, em função da velocidade de alimentação do arame e da velocidade de soldagem, com tensão constante de 22V

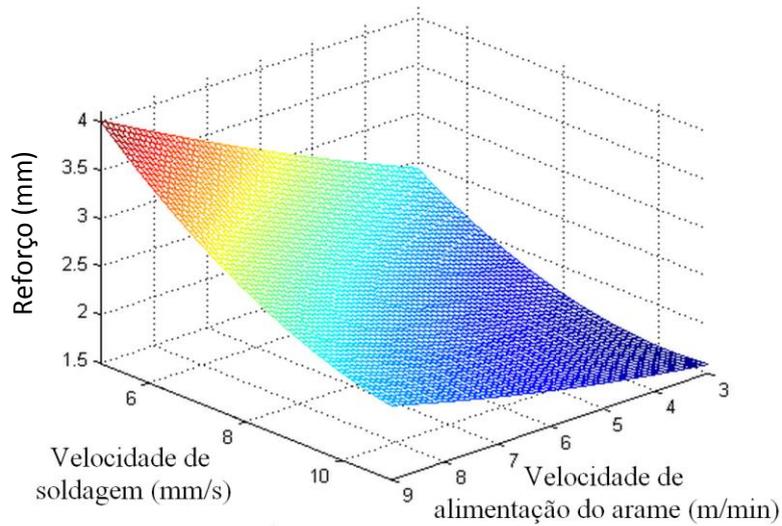


Figura 5.10. Superfície de resposta do modelo de três variáveis de reforço, em função da velocidade de alimentação do arame e da velocidade de soldagem, com tensão constante de 22V

Neste caso, a linearização dos modelos de segunda ordem de três variáveis utilizando a serie de Taylor tem a forma:

$$\begin{aligned}
 f(x_1, x_2, x_3)/(x_1 \approx u, x_2 \approx v, x_3 \approx z) = & b_0 + b_1u + b_2v + b_3z + b_4u^2 + b_5v^2 + b_6z^2 \\
 & + b_7uv + b_8uz + b_9vz \\
 & + (b_1 + 2b_4u + b_7v + b_8z)(x_1 - u) \quad (5.22) \\
 & + (b_2 + 2b_5v + b_7u + b_9z)(x_2 - v) \\
 & + (b_3 + 2b_6z + b_8u + b_9v)(x_3 - z)
 \end{aligned}$$

O valor que relaciona as variáveis de controle, velocidade de alimentação o arame e velocidade de soldagem (x_2 e x_3) com o valor atual dos parâmetros monitorados (y_M) é dado pelas relações:

$$x_2 = \frac{y_M - M' - B'x_1 - D'x_3}{C'} \quad (5.23)$$

$$x_3 = \frac{y_M - M - B'x_1 - C'x_2}{D'} \quad (5.24)$$

Onde:

$$B' = b_1 + 2b_4u + b_7v + b_8z \quad (5.25)$$

$$C' = b_2 + 2b_5v + b_7u + b_9z \quad (5.26)$$

$$D' = b_3 + 2b_6z + b_8u + b_9v \quad (5.27)$$

$$M' = A' - B'u - C'v - D'z \quad (5.28)$$

Com:

$$A' = b_0 + b_1u + b_2v + b_3z + b_4u^2 + b_5v^2 + b_6z^2 + b_7uv + b_8uz + b_9vz \quad (5.29)$$

Neste caso, y_M pode ser qualquer um dos parâmetros monitorados, largura ou reforço, o que muda são os coeficientes de regressão de cada modelo. Deste modo, a saída do controlador, a fim de atingir o valor de entrada de referência correspondente, é dada por:

$$x_2^* = x_{1_atual} + \alpha \left(\frac{R_R - R_M}{C'} \right) \quad (5.30)$$

$$x_3^* = x_{3_atual} - \alpha \left(\frac{L_R - L_M}{D'} \right) \quad (5.31)$$

Novamente com: x_2^* e x_3^* como as saídas do controlador; x_{1_atual} e x_{2_atual} os valores atuais das variáveis de controle; L_R como valor da largura de referência e L_M como valor da largura monitorada; R_R e R_M como os valores de reforço de referência e o reforço monitorado, respectivamente; e α como constante de proporcionalidade com valor 0.30.

Por outro lado, a tensão se utiliza no processo de controle para evitar as regiões de instabilidade empregando, neste caso, mudanças predeterminadas de 0.5 V cada vez. No caso deste controlador em particular, as instabilidades a corrigir são causadas por falhas na reignição do arco, principalmente por um valor de velocidade de alimentação de arame muito alto com respeito da tensão de trabalho utilizada.

Para determinar se o processo encontra-se numa região de instabilidade emprega-se o Índice de Vilarinho com um valor de limiar "1.0". Ultrapassar este limiar indica que no mínimo em um dos tempos, de curto-circuito ou de arco aberto, o coeficiente de variação é maior do que 50% o que gera instabilidades que afetam diretamente a regularidade nos

parâmetros geométricos do cordão de solda e que podem levar até à extinção total do arco elétrico. Assim, se o IV_{cc} ultrapassar o valor 1.0, 0.5 V são somados ao valor de tensão atual.

Para calcular o IV_{cc} emprega-se mais um computador, sincronizado com a aquisição das imagens no computador principal. O IV_{cc} é calculado em tempo real a partir dos oscilogramas de tensão do arco. A aquisição do sinal de tensão é realizada com uma placa da *National Instrument* de referência USB 6353 a um taxa de aquisição de 2,5 KHz. Neste caso, o IV_{cc} é calculado para cada dado adquirido a partir de uma janela de tempo de 200 ms. No computador principal o controlador utiliza o IV_{cc} calculado depois da etapa de controle do reforço, utilizando mais uma janela, desta vez de 100 ms, esperando a reação da máquina e do processo, para saber se tem que mudar o valor de tensão. Assim, cada etapa de controle completa emprega um tempo de 500 ms (duas janelas de 200 ms para cada parâmetro geométrico e uma de 100 ms para a estabilidade).

As Figuras 5.11, 5.12 e 5.13 apresentam exemplos de sinais adquiridos com este tipo de controle. Os gráficos apresentam os sinais de largura, reforço e IV_{cc} monitorados; assim como da tensão, da velocidade de alimentação do arame e da velocidade de soldagem calculados e utilizados pelo controlador. O controle em cada caso inicia depois de 4 segundos. A linha vermelha nos gráficos de largura e reforço indica o valor de referência de cada parâmetro geométrico. O monitoramento do IV_{cc} inicia depois de 1,5 s de aquisição, isto para dar um tempo de estabilização inicial ao processo. A Figura 5.14 apresenta, como exemplo, os sinais utilizados para medir o IV_{cc} no processo de controle da Figura 5.13, entre os segundos 6 e 10: tempo de arco aberto, desvio padrão do tempo de arco aberto, tempo de curto-circuito, desvio padrão do tempo de curto-circuito. A corrente, a tensão e o IV_{cc} são apresentados na Figura 5.14 como referência do processo.

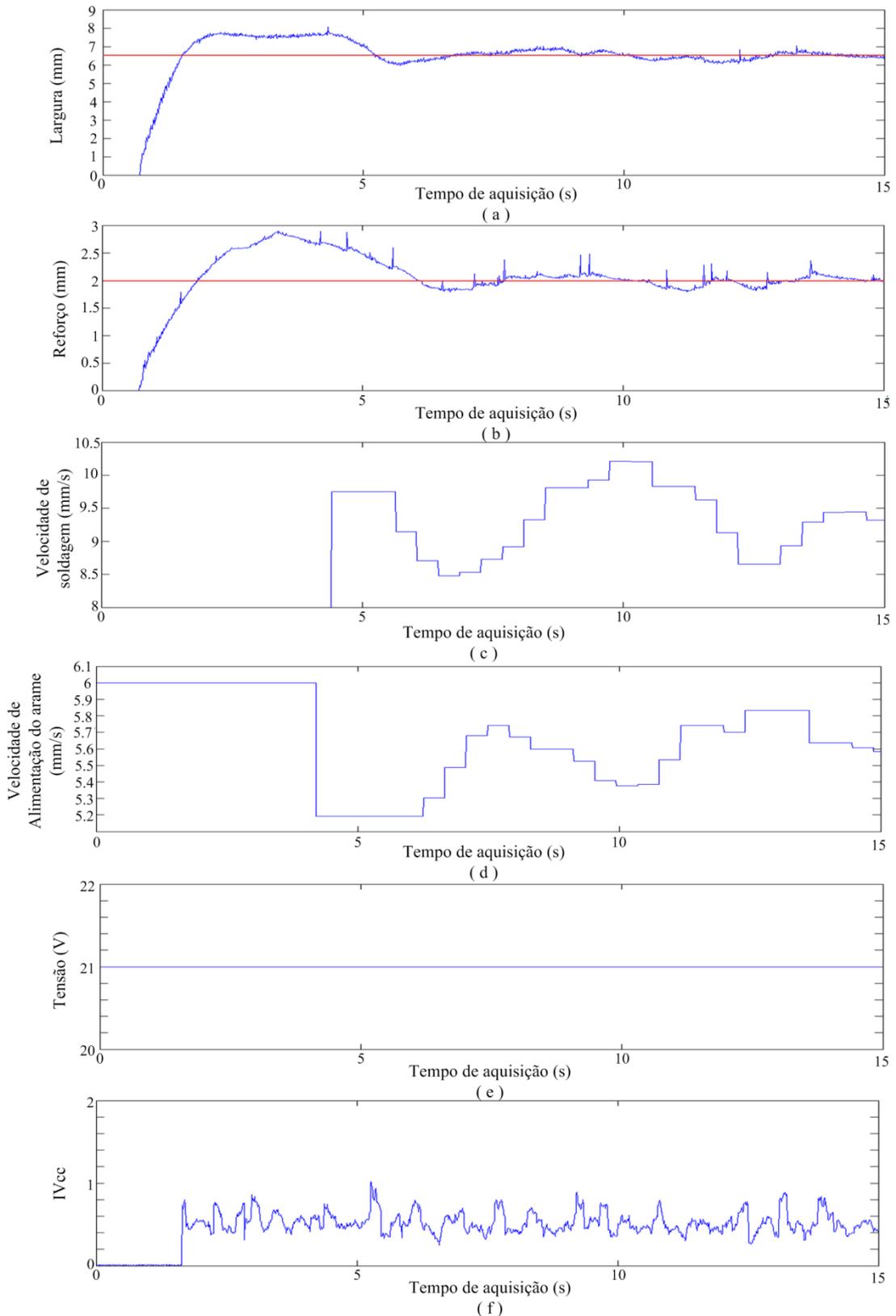


Figura 5.11. Processo de controle de largura e reforço. Tensão inicial: 21 V; velocidade de alimentação do arame inicial: 6 m/min; velocidade de soldagem inicial: 8 mm/s; Largura de referência: 6,5 mm; reforço de referência: 2 mm. Sinais adquiridos: (a) Largura; (b) Reforço; (c) Velocidade de soldagem; (d) Velocidade de alimentação do arame; (e) Tensão; (f) IVcc

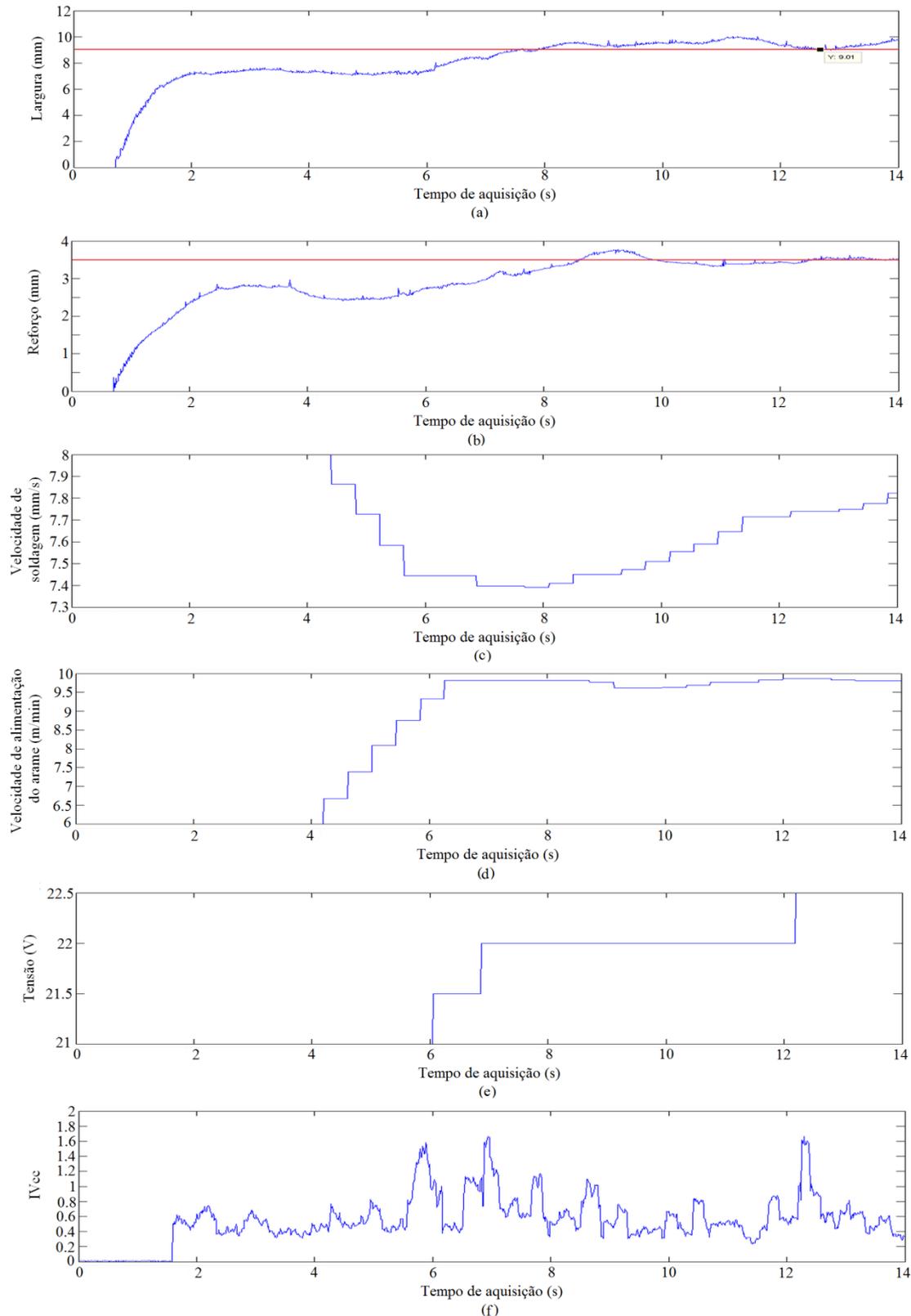


Figura 5.12. Processo de controle de largura e reforço. Tensão inicial: 21 V; velocidade de alimentação do arame inicial: 6 m/min ; velocidade de soldagem inicial: 8 mm/s ; Largura de referência: 9 mm ; reforço de referência: 3.5 mm . Sinais adquiridos: (a) Largura; (b) Reforço; (c) Velocidade de soldagem; (d) Velocidade de alimentação do arame; (e) Tensão; (f) IV_{cc}

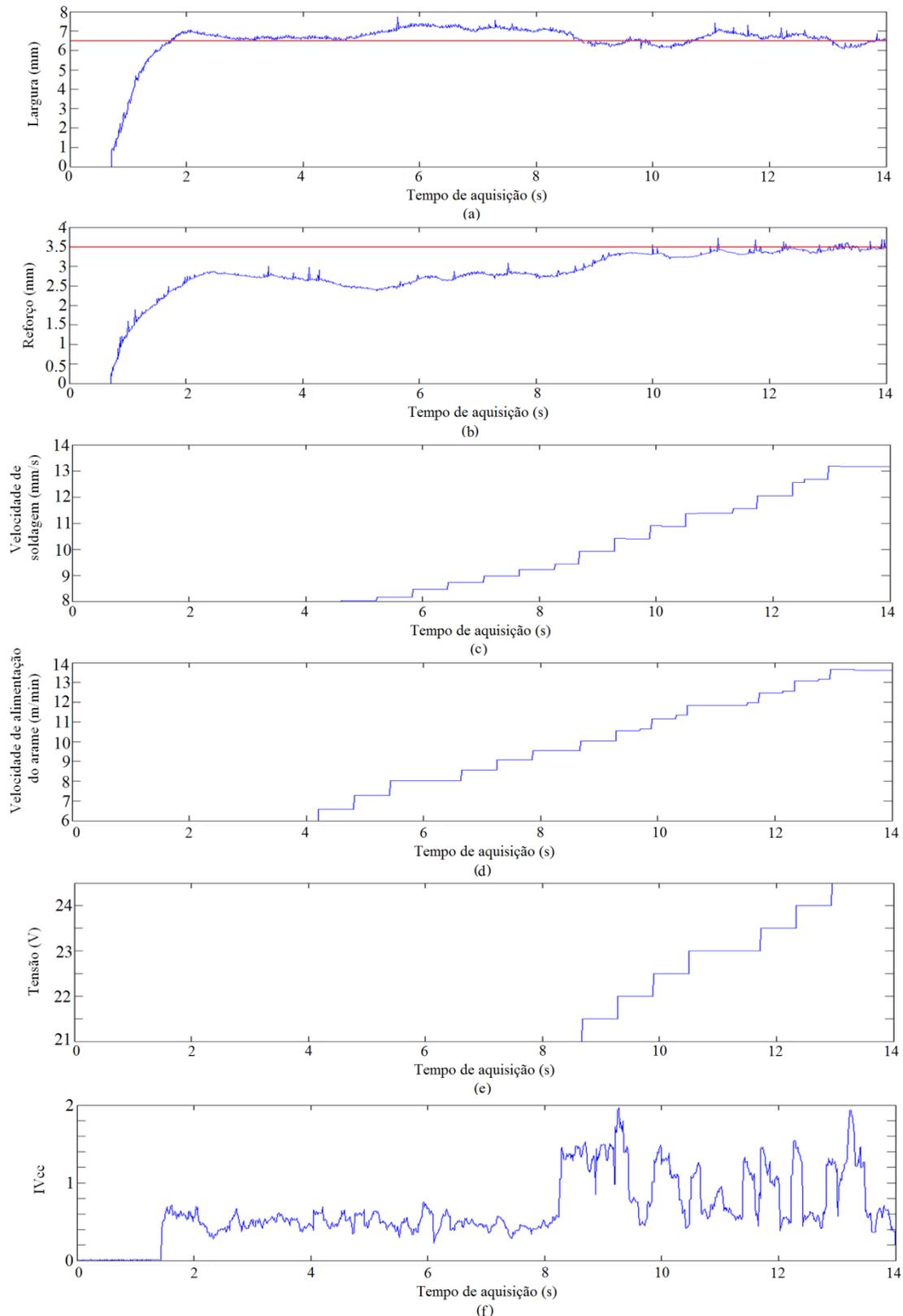


Figura 5.13. Processo de controle de largura e reforço. Tensão inicial: 21 V; velocidade de alimentação do arame inicial: 6 m/min; velocidade de soldagem inicial: 8 mm/s; Largura de referência: 6,5 mm; reforço de referência: 3.5 mm. Sinais adquiridos: (a) Largura; (b) Reforço; (c) Velocidade de soldagem; (d) Velocidade de alimentação do arame; (e) Tensão; (f) IVcc

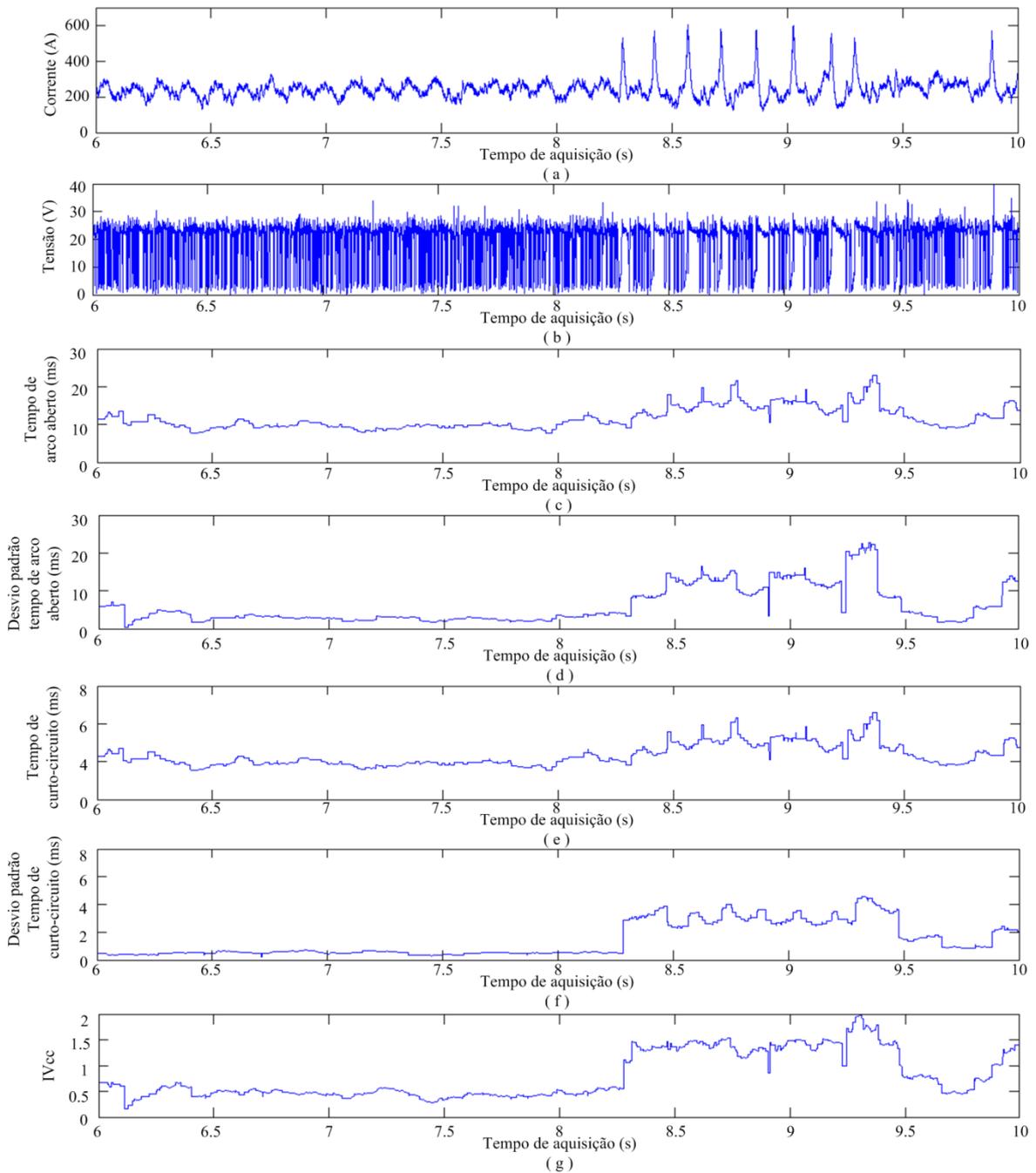


Figura 5.14. Parâmetros para medir o Índice de Vilarinho no experimento da Figura 5.13, entre os segundos 6 e 10. (a) Corrente; (b) Tensão; (c) Tempo de arco aberto; (d) Desvio padrão do tempo de arco aberto; (e) Tempo de curto-circuito; (f) Desvio padrão do tempo de curto-circuito; (g) IVcc

6 – CONTROLE DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS SEM MODELO PREDEFINIDO

Neste capítulo apresenta-se uma proposta para controlar simultaneamente a largura e o reforço dos cordões de solda sem precisar de um modelo do processo de soldagem predefinido. No capítulo cinco, dois controladores baseados em modelos foram apresentados. Estes agentes utilizam o comportamento dos sinais de largura e reforço (medição do ângulo do sinal) para tomar decisões ao respeito de se devem atuar ou não, e no caso particular do controlador que utiliza a velocidade de soldagem para controlar a largura, emprega-se o sinal do IVcc para tomar decisões ao respeito da estabilidade e do aumento da tensão durante o processo.

O controlador proposto neste capítulo incorpora estas características, acrescentando o uso do IVcc para definir se o modo de transferência metálica está passando de curto-circuito para globular. Neste caso, por definição o IVcc calcula os tempos de arco aberto e de curto circuito, como também o desvio padrão em cada caso. Assim, se não se tem curtos-circuitos na janela de medição, o desvio padrão de cada tempo é zero e o IVcc também é zero. A região de transição entre os modos de transferência curto-circuito e globular é um caso especial, porque eventualmente em algumas janelas de trabalho aparecem os curtos-circuitos, mas em outras não, assim que, é possível identificar a região de transição quando o índice cai para zero numa janela de trabalho.

O controlador sem modelo predefinido visa conseguir uma autonomia que permita obter resultados similares aos atingidos pelos anteriores controladores. Neste caso trata-se de um controlador baseado num sistema especialista com *regras de produção* (condição, "se", e ação, "então"), com dois agentes inteligentes orientados a objetivos (para controlar a largura e o reforço) e um agente reflexivo (para monitorar o IVcc e realizar as correções necessárias). O sistema pode utilizar funções tipo exponencial ou sinusoidal baseadas no erro de medição como máquina de inferência, para desta forma calcular os valores na saída de cada controlador. Este sistema de controle baseia-se no modo de agir de um soldador-humano e consegue medir simultaneamente a largura e o reforço dos cordões de solda

durante o processo de soldagem, assim como, corrigir as variáveis de entrada do processo para obter no final os parâmetros geométricos de referência.

6.1 – REGRAS DE PRODUÇÃO

Utilizando os rótulos:

- L_R : Largura de referência;
- L_M : Largura monitorada;
- R_R : Reforço de referência;
- R_M : Reforço monitorado;
- T : Tensão;
- V_{Sold} : Velocidade de soldagem;
- V_{Almt} : Velocidade de alimentação do arame

As regras fundamentais do controlador, baseadas na base de conhecimento do sistema especialista são:

- *Se $L_M > L_R$, então, aumentar V_{Sold}*
- *Se $L_M < L_R$, então, diminuir V_{Sold}*
- *Se $R_M > R_R$, então, diminuir V_{Almt}*
- *Se $R_M < R_R$, então, aumentar V_{Almt}*

As Figuras 6.1 e 6.2 apresentam os fluxogramas dos algoritmos fundamentais que comandam estas regras. A Figura 6.3 apresenta o fluxograma do algoritmo que comanda o controlador. Aqui as regras fundamentais atuam de forma independente e interagem com as regras complementares para tomar decisões que afetam o processo de controle e diretamente a forma dos cordões de solda. As regras complementares utilizam o IVcc para corrigir instabilidades no processo e mudanças no modo de transferência metálica. Também empregam o comportamento dos sinais de largura e reforço adquiridos (medida do ângulo na janela de tempo correspondente) para decidir se o controlador deve atuar ou não. Deste modo as regras complementares são:

- Se $\text{Angulo do sinal} > 30^\circ$, então, não mudar a avariável de controle;
- Se $\text{Angulo do sinal} < -30^\circ$, então, não mudar a avariável de controle;
- Se $IV_{cc} > 1$, então, aumentar T ;
- Se $IV_{cc} = 0$, então, $V_{Sold} = V_{Sold} \text{ inicial}$; $V_{Almt} = V_{Almt} \text{ inicial}$.

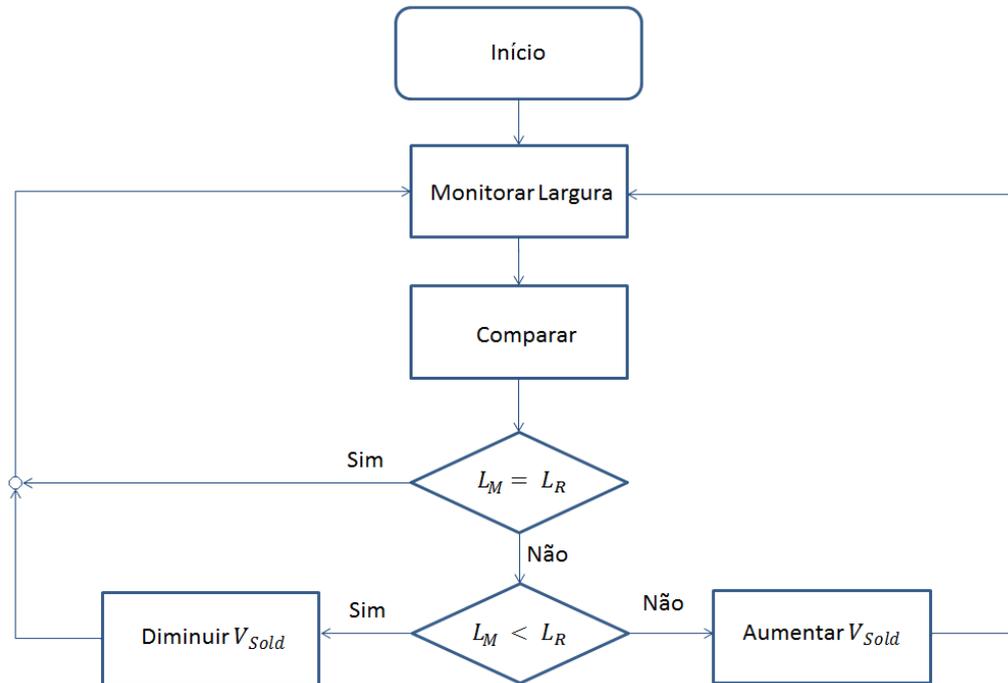


Figura 6.1. Fluxograma do algoritmo que comanda o controle da largura

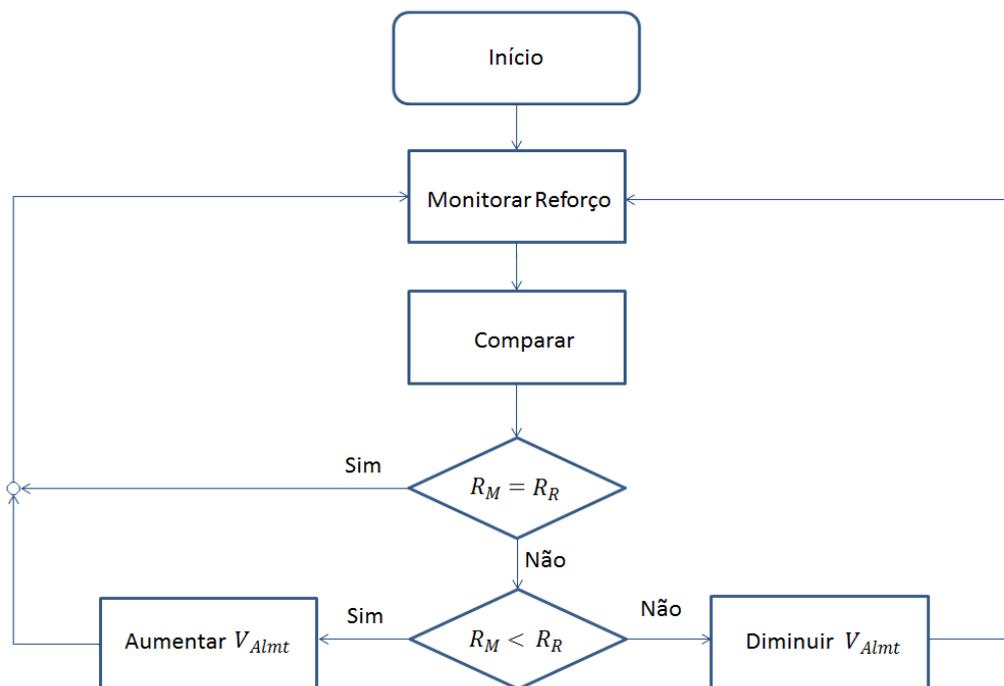


Figura 6.2. Fluxograma do algoritmo que comanda o controle do reforço

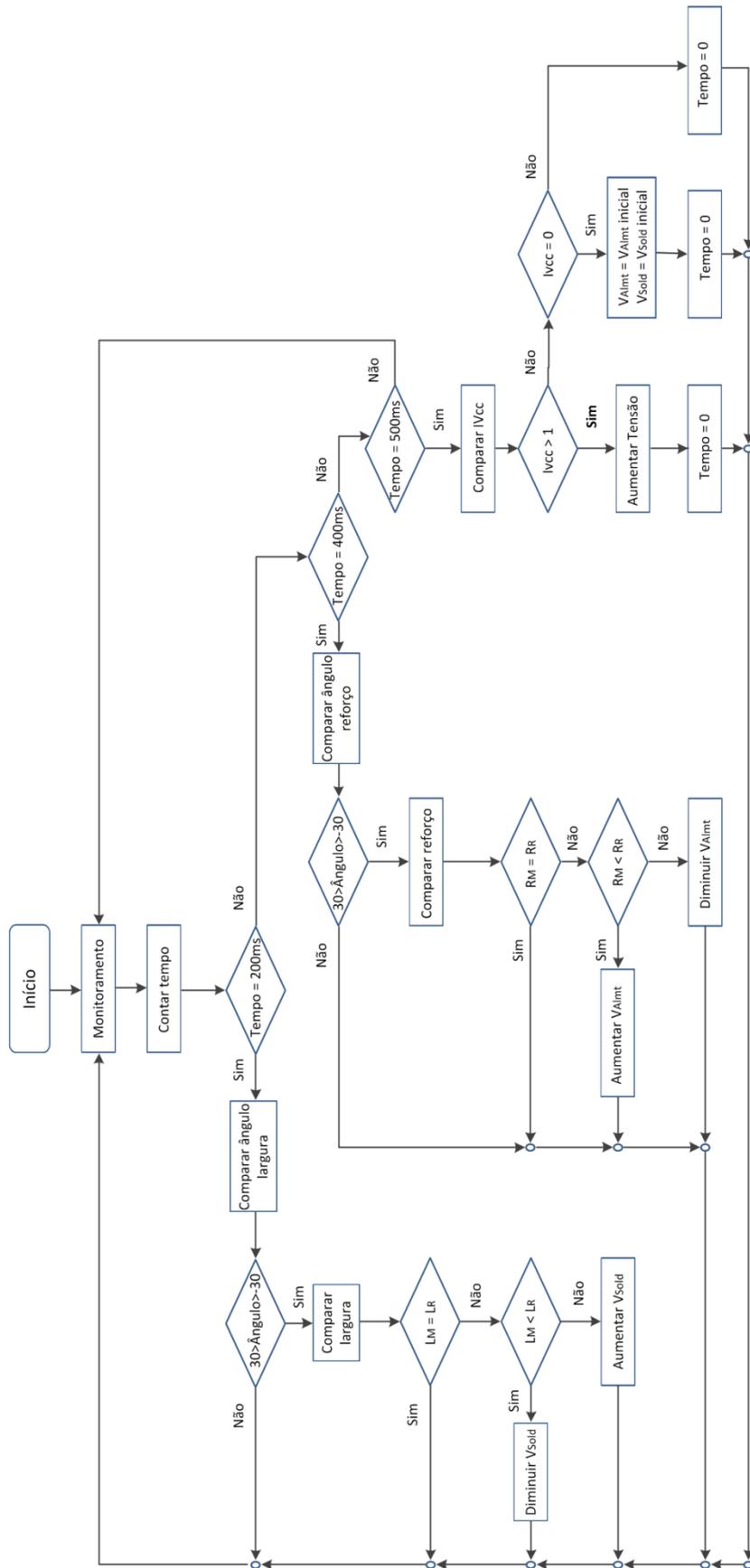


Figura 6.3. Fluxograma do algoritmo de controle

6.2 – MÁQUINA DE INFERÊNCIA

Por outro lado, além de saber se a variável de controle deve aumentar ou diminuir, o sistema deve saber em que proporção deve mudar, ou seja, qual deve ser o novo valor da variável de controle. Neste caso, por não ter um modelo que indique um possível valor na variável de controle, na base de conhecimento foi decidido que:

- As mudanças de velocidade de alimentação do arame não devem superar o valor de 1 *m/min* cada ciclo de controle;
- As mudanças de velocidade de soldagem não devem superar o valor de 1 *mm/s* cada ciclo de controle;
- Se o $IV_{cc} > 1$, a tensão aumenta de acordo com a quantidade em que ultrapasse o valor 1, e de acordo com uma função de inferência sinusoidal. O valor em que aumenta a tensão não deve superar 1 V cada ciclo de controle;
- Se $IV_{cc} = 0$, a tensão, em caso de ter sido modificada, continua igual, mas a velocidade de alimentação do arame e a velocidade de soldagem regressam aos valores iniciais.

Inicialmente foi testada como máquina de inferência uma função exponencial com a forma:

$$x_v = 1 - e^{-\omega(\text{erro})^2} \quad (6.1)$$

onde, o *erro* é a diferença entre a variável monitorada e o seu correspondente valor de referência, e ω permite variar o valor limite do *erro permitido*. Diferentes valores de erro acima deste limite mudam a variável de controle unicamente em uma unidade. A Figura 6.4 apresenta dois exemplos da função para $\omega = 1$ e $\omega = 3$. Nestes exemplos pode-se observar como ω limita os valores para os quais pode mudar a função. Neste caso, os valores no eixo horizontal representam o erro no parâmetro monitorado e os valores no eixo vertical deveriam ser somados ou restados à variável de controle correspondente segundo seja o caso das regras de produção. Ressalta-se que as unidades no eixo horizontal que representa o erro de medição variam de acordo com a grandeza correspondente.

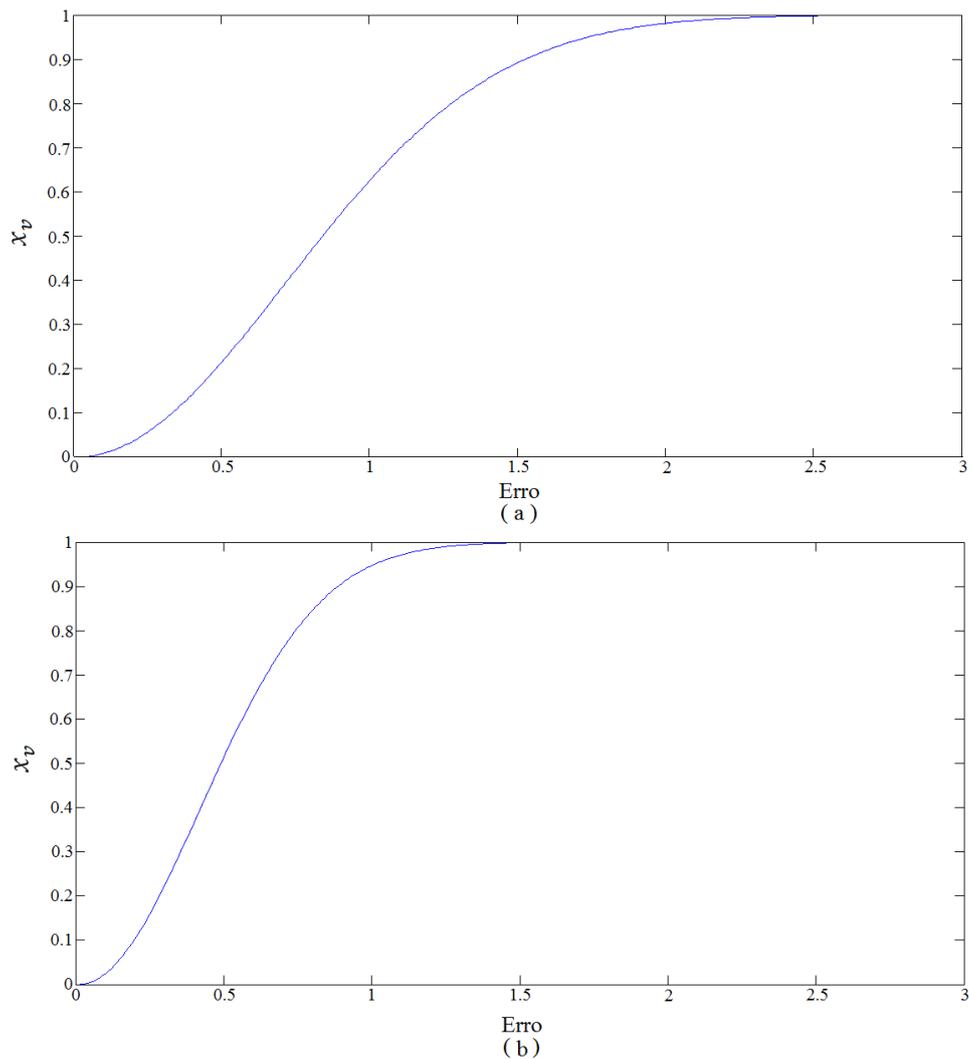


Figura 6.4. Função exponencial baseado no erro e utilizada na maquina de inferência.
 (a) $\omega = 1$; (b) $\omega = 3$

Esta função foi adotada por não apresentar grandes mudanças quando o valor monitorado do parâmetro está perto do valor de entrada de referência, nem mudanças bruscas para valores máximos de tolerância de erro, o que ajuda a não desestabilizar o parâmetro durante o processo. O problema é que, em alguns casos, antes de atingir o valor de referência, a mudança é muito pequena, assim que, não é significativa e não consegue atingir o valor de referência, como se exemplificam os gráficos da Figura 6.5, neste caso utilizando $\omega = 3$ para a largura e $\omega = 1.5$ para o reforço. Ressaltando novamente que, além da variável de controle respectiva em cada caso, por exemplo, para o reforço a velocidade de alimentação do arame, as outras variáveis que intervêm no processo, tensão e velocidade de soldagem, também influenciam a resposta do parâmetro.

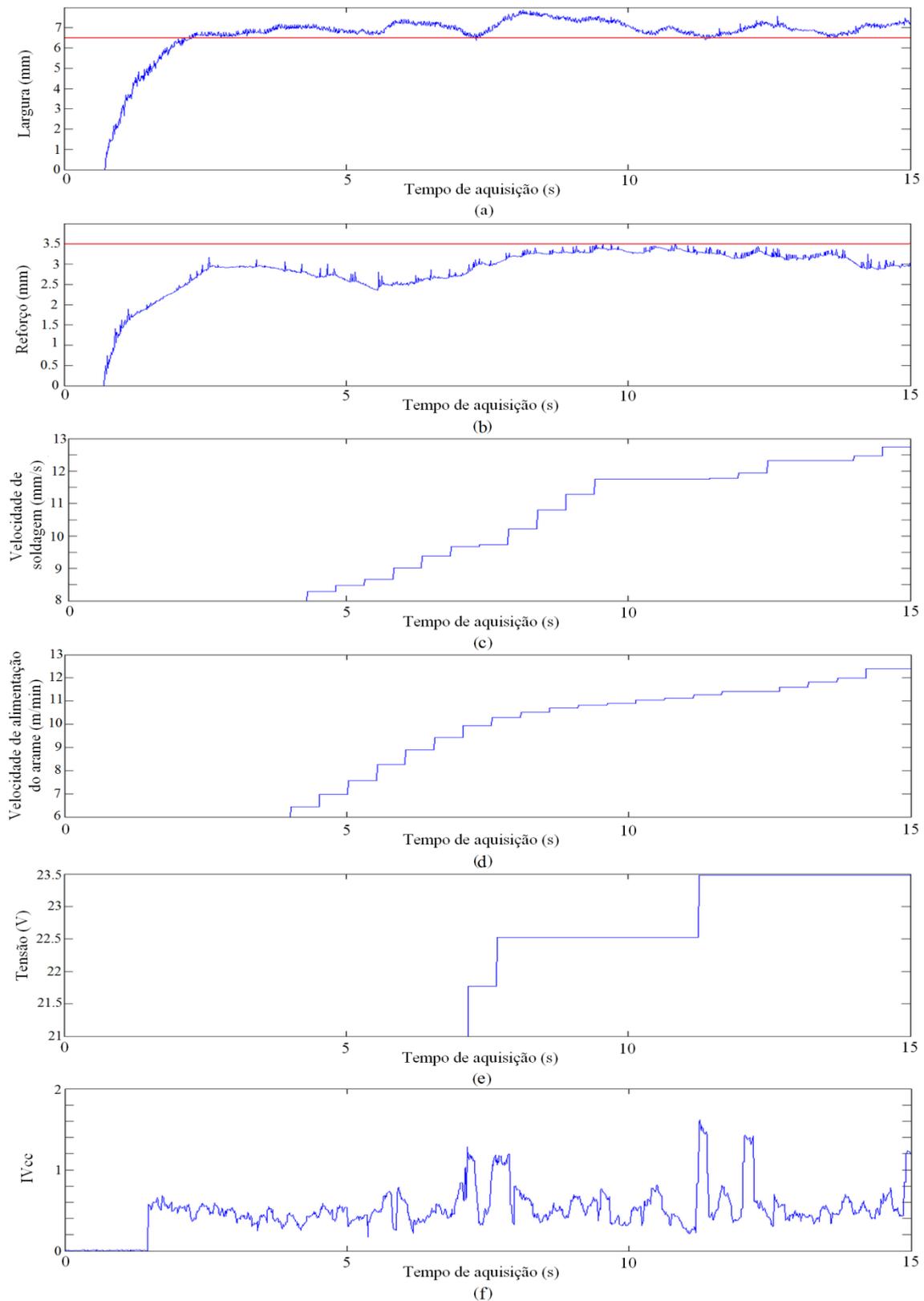


Figura 6.5. Processo de controle de largura e reforço sem modelo predefinido. Tensão inicial: 21 V; velocidade de alimentação do arame inicial: 6 m/min; velocidade de soldagem inicial: 8 mm/s; Largura de referência: 6,5 mm; reforço de referência: 3.5 mm. Sinais adquiridos: (a) Largura; (b) Reforço; (c) Velocidade de soldagem; (d) Velocidade de alimentação do arame; (e) Tensão; (f) IVcc

Visando utilizar uma função de inferência que promovesse mudanças maiores perto do valor de entrada de referência de cada variável, e que apresente um comportamento similar à função exponencial utilizada (Equação 6.1) nos limites de tolerância do erro, emprega-se uma função sinusoidal na forma:

$$x_s = \sin\left(\frac{\text{erro}}{\omega}\right) \quad (6.2)$$

Como no caso anterior, ω varia de acordo com o erro de tolerância. Neste caso especial também, se tem a seguinte condição: depois de atingir o valor “1” na Equação (6.2), todos os valores de x_s têm valor “1” para evitar a continuidade da função sinusoidal. Esta condição pode-se evitar utilizando uma função tangente hiperbólica. A Figura 6.6 apresenta a forma da Equação (6.2) para valores $\omega = 3$ e $\omega = 1.5$.

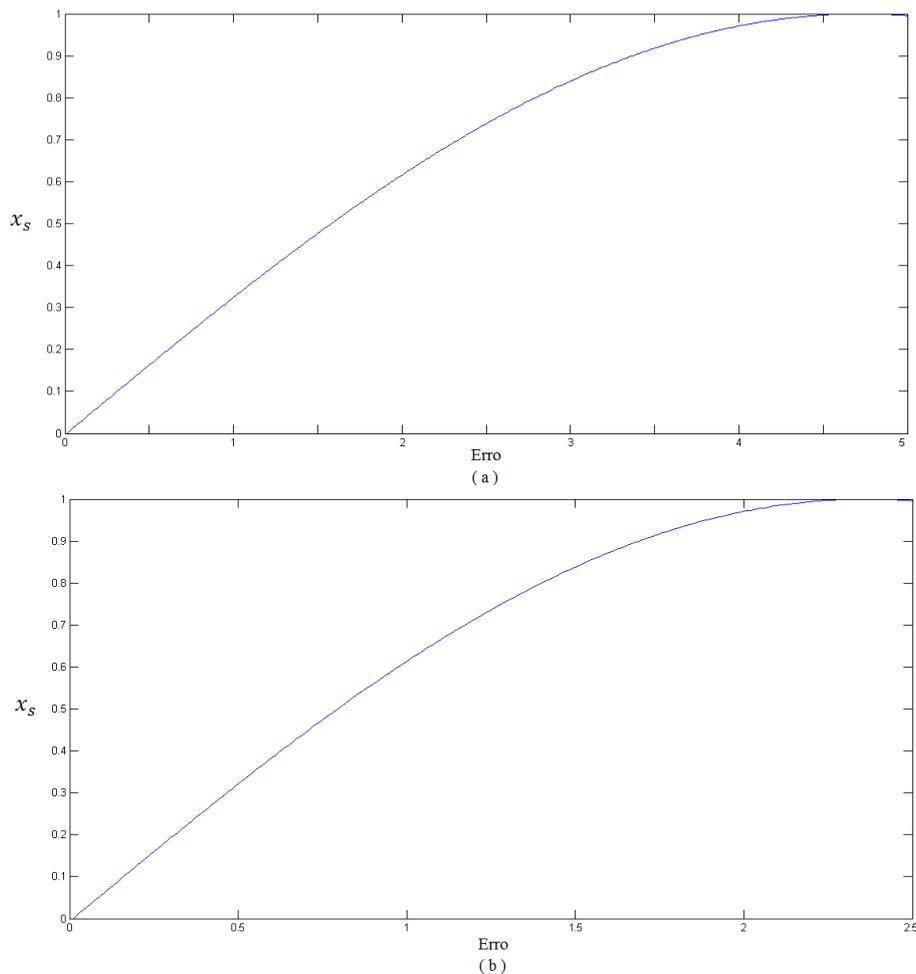


Figura 6.6. Função sinusoidal baseado no erro e utilizada na maquina de inferência.
(a) $\omega = 3$; (b) $\omega = 1.5$

As Figuras 6.7, 6.8 e 6.9 apresentam exemplos de sinais adquiridos com este tipo de controle, utilizando $\omega = 3$ e $\omega = 1.5$, para controlar a largura e o reforço respectivamente.

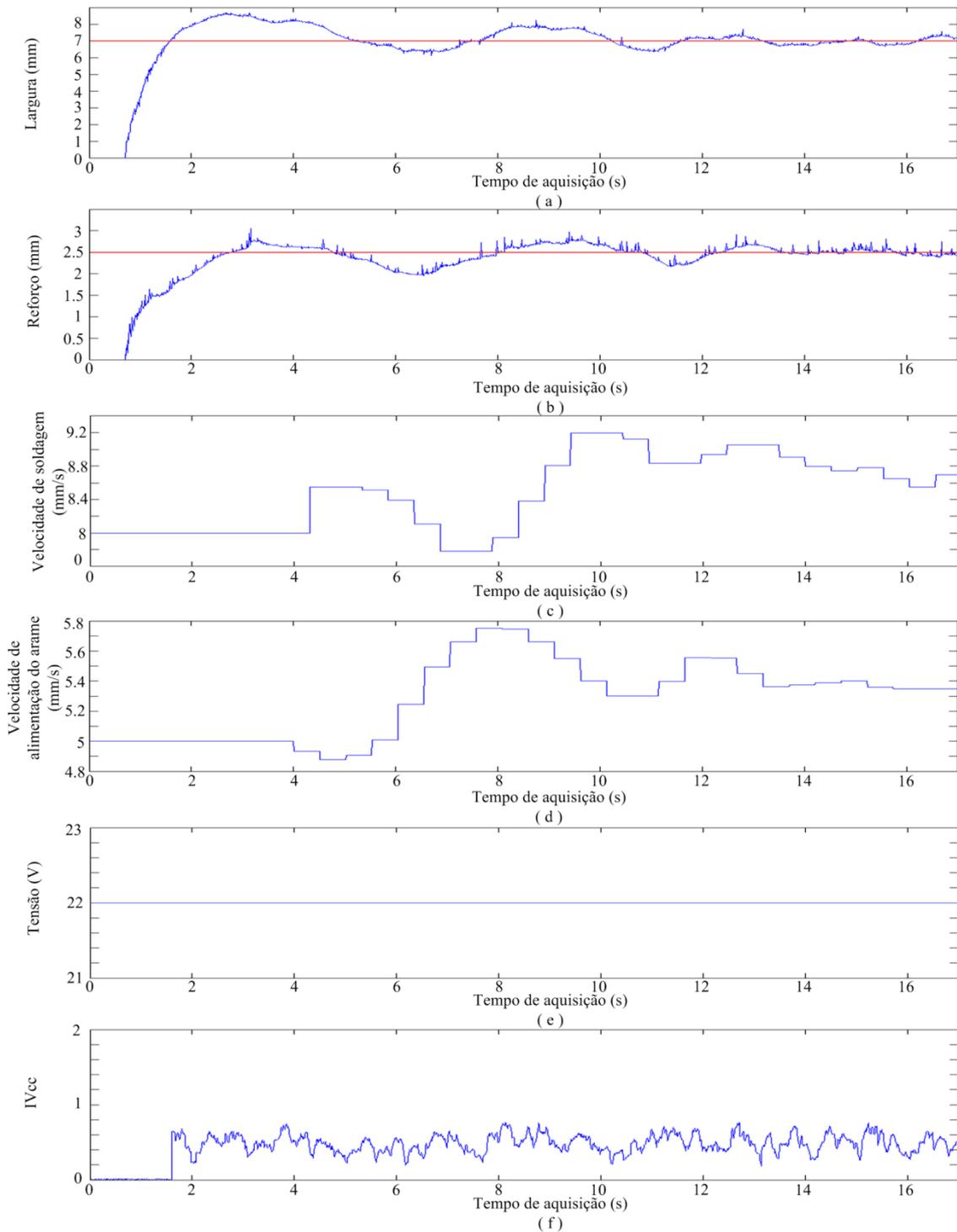


Figura 6.7. Controle de largura e reforço sem modelo predefinido. Tensão inicial: 22 V; velocidade de alimentação do arame inicial: 5 m/min; velocidade de soldagem inicial: 8 mm/s; Largura de referência: 7 mm; reforço de referência: 2.5 mm. Sinais adquiridos: (a) Largura; (b) Reforço; (c) Velocidade de soldagem; (d) Velocidade de alimentação do arame; (e) Tensão; (f) IVcc

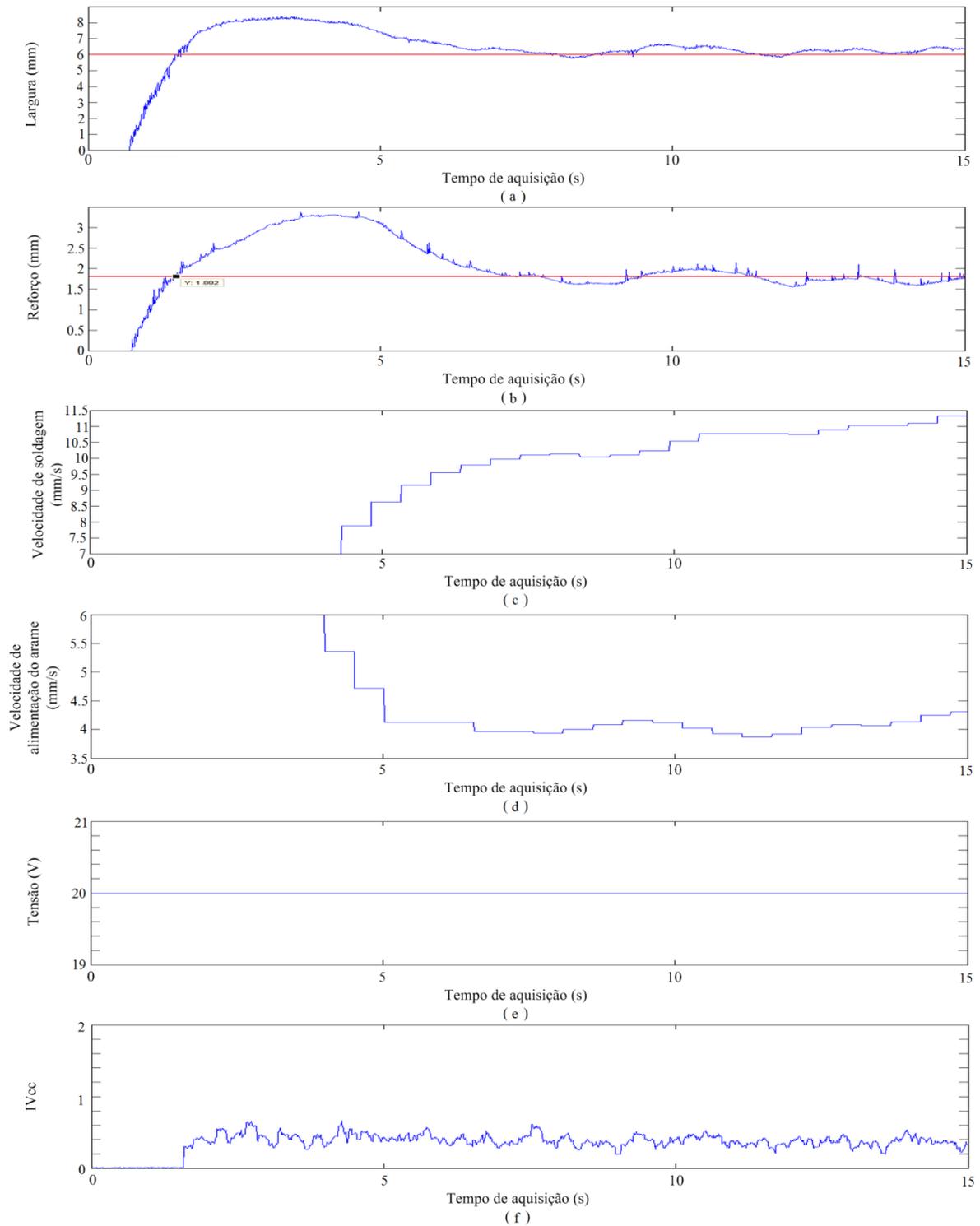


Figura 6.8. Controle de largura e reforço sem modelo predefinido. Tensão inicial: 20 V; velocidade de alimentação do arame inicial: 6 m/min; velocidade de soldagem inicial: 7 mm/s; Largura de referência: 6 mm; reforço de referência: 1.8 mm. Sinais adquiridos: (a) Largura; (b) Reforço; (c) Velocidade de soldagem; (d) Velocidade de alimentação do arame; (e) Tensão; (f) IVcc

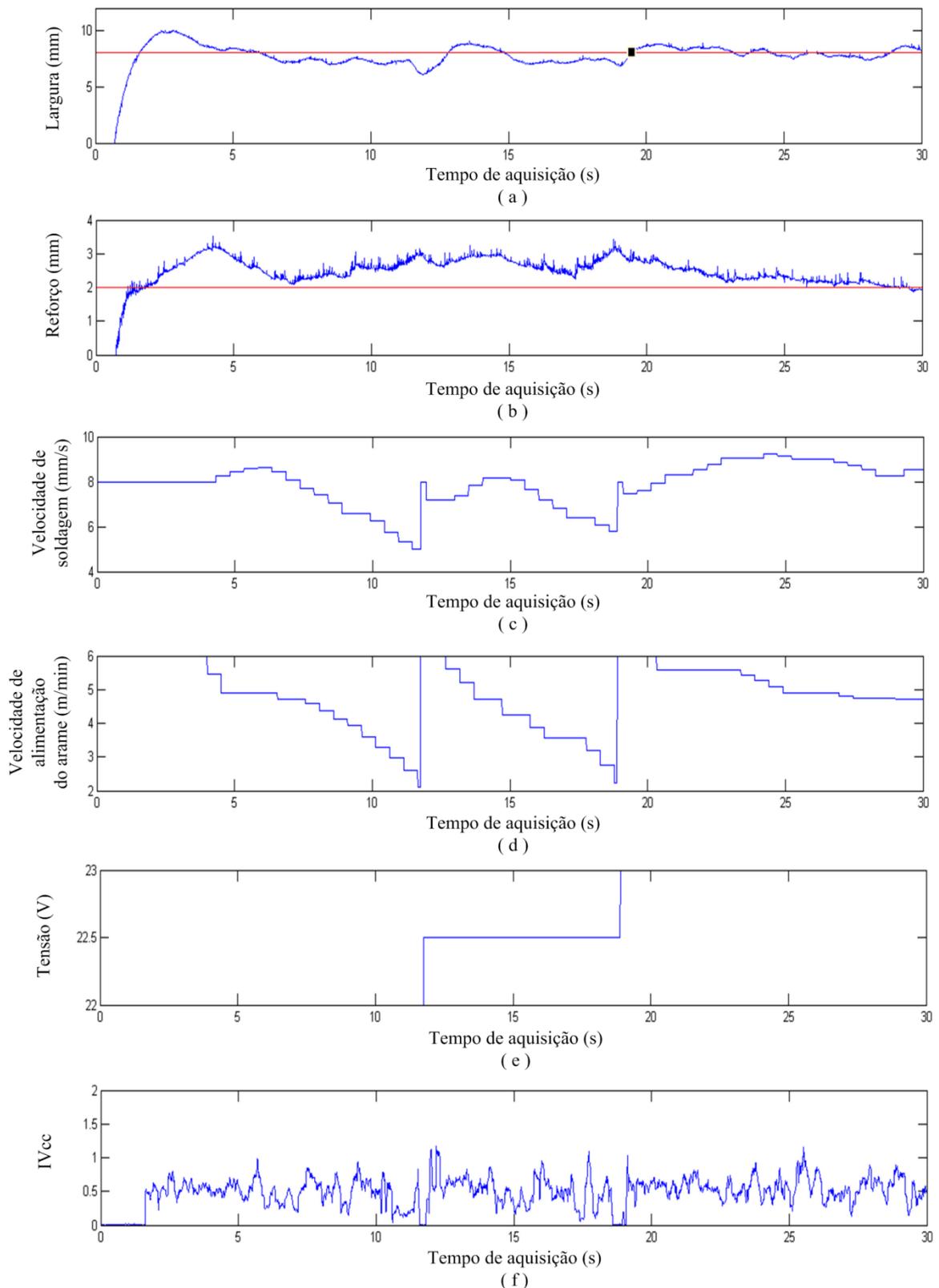


Figura 6.9. Controle de largura e reforço sem modelo predefinido. Tensão inicial: 22 V; velocidade de alimentação do arame inicial: 6 m/min; velocidade de soldagem inicial: 8 mm/s; Largura de referência: 8 mm; reforço de referência: 2 mm. Sinais adquiridos: (a) Largura; (b) Reforço; (c) Velocidade de soldagem; (d) Velocidade de alimentação do arame; (e) Tensão; (f) IVcc

7 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

De forma geral, as pesquisas referidas ao respeito do controle da largura e o reforço dos cordões de solda utilizam modelos, total ou parcialmente, empíricos. Estes modelos são derivados de análises estatísticas ou de metodologias baseadas em sistemas de inteligência artificial. Pode-se dizer que, embora trabalhos como Zhang *et al.* (2006) e Xiong e Zhang (2013) conseguem monitorar simultaneamente a largura e o reforço dos cordões de solda em processos de soldagem GMAW, esses trabalhos não são focados no controle simultâneo de ambos os parâmetros geométricos. Por outro lado, as metodologias de monitoramento apresentadas por Zhang *et al.* (2006) e Xiong e Zhang (2013) apresentam grandes dificuldades técnicas no caso de futuras aplicações industriais, devido, em ambos os casos, à necessidade de recursos técnicos e de metodologias específicas focadas unicamente no correto alinhamento do sistema. Entretanto, os métodos de medição baseados em triangulação laser são de grande utilidade em processos de medição *off-line*, mas seu uso em sistemas de controle representa um atraso espacial e temporal considerável com referência à formação do cordão devido ao posicionamento do feixe laser em relação à poça de fusão.

O trabalho apresentado nesta tese, focado em processos de soldagem GMAW no modo de transferência por curto-circuito na posição plana, apresenta uma metodologia de monitoramento que permite medir de forma prática e simultânea a largura e o reforço dos cordões de solda. A metodologia de calibração utilizada neste trabalho, baseada no reconhecimento de pontos de referência em padrões de altura e em superfícies planas, não representa um desafio considerável às atuais aplicações encontradas em processamento de imagens digitais, acrescentando a funcionalidade e praticidade do sistema em futuras aplicações industriais. Os gráficos dos resíduos utilizados na avaliação da metodologia de calibração (Figuras 4.12 e 4.13) apresentam uma distribuição adequada em torno do valor zero e desvios padrões de 0.01 *mm* em ambos os casos, pelo qual se determinou como apropriada para ser utilizada no sistema de monitoramento.

Os resultados apresentados pelo teste t de Welch (Tabela 4.3.) na avaliação da metodologia de monitoramento validam a técnica como apropriada para medir a largura e o reforço dos

cordões de solda e permitem a sua utilização nos respectivos sistemas de controle. A técnica básica de limiarização no processamento das imagens permite segmentar de forma rápida e correta a poça de fusão, permitindo tempos de processamento muito curtos no sistema de monitoramento. Os tempos de processamento em cada caso não superam os quatro milissegundos e permitem obter uma quantidade de amostras estatisticamente significativa nas janelas de medição no processo de controle, fato importante visando o uso do comportamento dos parâmetros geométricos nas etapas de controle. Os resultados no monitoramento do reforço dos cordões de solda validam a metodologia apresentada para encontrar o ponto de menor temperatura na poça de fusão. Em ambos os casos de monitoramento, de largura e de reforço, é preciso o uso dos filtros nos respectivos sinais adquiridos devido às mudanças bruscas na iluminação da poça de fusão, frequentes nos processos de soldagem no modo de transferência por curto-circuito.

No caso do primeiro controlador, baseado na tensão e na velocidade de alimentação do arame, os gráficos das Figuras 5.5, 5.6 e 5.7 permitem observar resultados satisfatórios, nos quais o controlador consegue atingir os valores de referência para o caso da largura e do reforço. No entanto, este controlador, além de se limitar à região de trabalho na qual foram coletados os dados na etapa de modelagem, é limitado ao ajuste das variáveis de entrada que garantam a estabilidade do processo de soldagem. Desta forma, para o correto funcionamento do controlador referido, uma primeira etapa de seleção de parâmetros deve ser feita a fim de garantir a estabilidade do processo.

As Figuras 7.1 e 7.2 apresentam, respectivamente, as superfícies de respostas para os desvios padrões da largura e do reforço encontrados na etapa experimental correspondente. Pode-se observar nas superfícies de respostas das Figuras 7.1 e 7.2 que os maiores desvios padrões de ambos os parâmetros encontra-se nos ajustes de variáveis de entrada com “relativa” tensão baixa e velocidade de alimentação do arame alta, pelo qual estes ajustes devem ser evitados de forma premeditada no processo de controle.

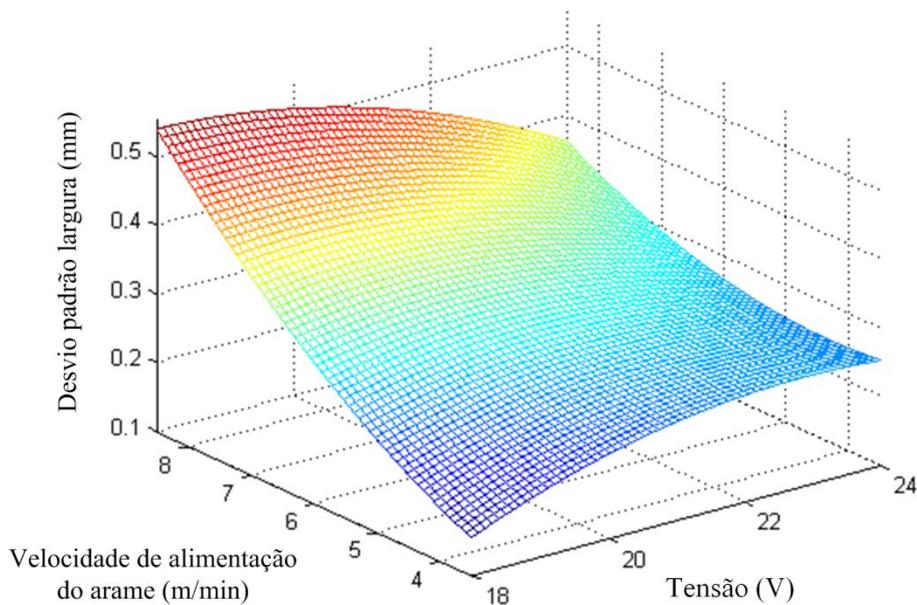


Figura 7.1. Superfície de resposta do desvio padrão da largura encontrado na etapa experimental de modelagem para o controlador baseado na tensão e na velocidade de alimentação do arame

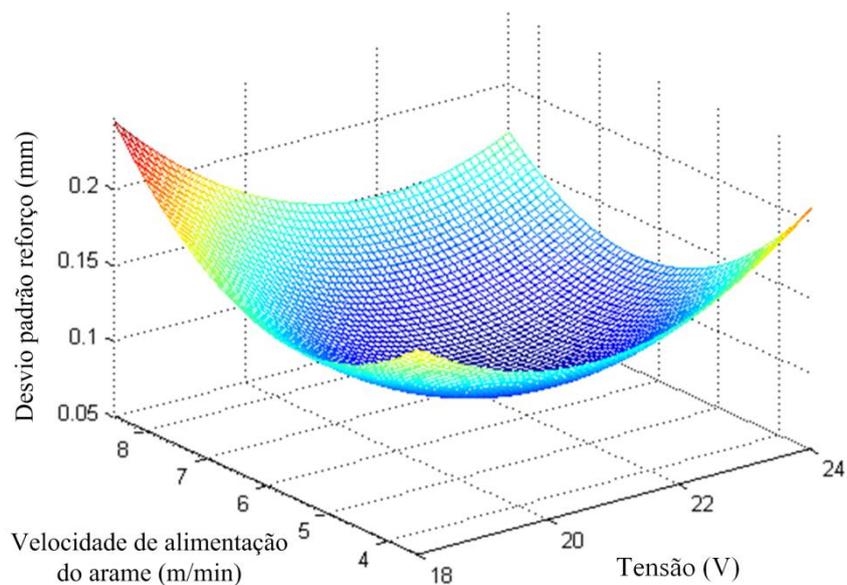


Figura 7.2. Superfície de resposta do desvio padrão do reforço encontrado na etapa experimental de modelagem para o controlador baseado na tensão e na velocidade de alimentação do arame

O segundo controlador com modelo predefinido utiliza a velocidade de soldagem para controlar a largura do cordão. Este controlador visa empregar a tensão do processo para retificar as instabilidades originadas no processo de soldagem por um excessivo aumento

da velocidade de alimentação do arame com respeito à tensão utilizada. Neste caso não se precisa conhecer com antecipação os ajustes das variáveis de entrada que garantam a estabilidade do processo de soldagem. As Figuras 5.11, 5.12 e 5.13 mostram o correto funcionamento do controlador, atingindo os valores de largura e reforço de referência. No caso do processo de controle da Figura 5.11, o limiar permitido de IV_{cc} não é ultrapassado, pelo que não é feita nenhuma correção de tensão. No caso dos processos referidos nas Figuras 5.12 e 5.13, o limiar de IV_{cc} é ultrapassado e os respectivos gráficos mostram as correções de tensão realizadas na etapa de controle para manter a estabilidade durante o processo de soldagem. Ao mesmo tempo, o controlador tem a capacidade de compensar as mudanças de tensão durante o processo e os valores de largura e reforço de referência são atingidos corretamente nas faixas de tolerância.

As variáveis de controle nos dois primeiros controladores são determinadas a partir das Equações 5.15 e 5.16, no primeiro caso, e das Equações 5.30 e 5.31, no segundo. O uso do comportamento do sinal (medido como exemplifica a Figura 5.4) para determinar se o controlador deve atuar, ou não, e do Índice de Vilarinho (medido como exemplifica a Figura 5.14) para corrigir as instabilidades durante o processo de soldagem, se justifica nesta etapa visando às próximas aplicações no controlador sem modelo predefinido. Desta forma, antes de empregar os parâmetros “comportamento do sinal” e IV_{cc} no controlador sem modelo predefinido, a sua aplicabilidade devia ser testada em processos de controle convencional (com modelo).

No caso do terceiro e último controlador (sem modelo predefinido) as variáveis de controle são determinadas finalmente pela expressão sinusoidal da Equação 6.2. Esta equação não representa um modelo matemático do processo, mas tem a faculdade de agir na forma de um operário soldador, aumentando ou diminuindo o valor das variáveis de controle na porcentagem apropriada, conforme o erro apresentado entre o sinal monitorado e os valores de referência de cada parâmetro geométrico. Este controlador é um sistema especialista composto por três agentes inteligentes baseados em regras de produção, o primeiro encarrega-se de monitorar e controlar a largura, o segundo monitora e controla o reforço, e o terceiro monitora o IV_{cc} e corrige a tensão do processo. Neste caso, o controlador de largura e reforço baseia-se em dois agentes inteligentes orientados a objetivos e um agente reflexivo.

Neste trabalho, cada ciclo de controle pode empregar uma mudança máxima de 1 *mm/s* para a velocidade de soldagem e de 1 *m/min* para a velocidade de alimentação do arame. Um tempo de 200 *ms* é empregado em cada etapa de controle. O uso dos valores $\omega = 3$ e $\omega = 1.5$ nas relações utilizadas na máquina de inferência (Equação 6.2) de cada parâmetro geométrico correspondem aos valores de largura e reforço, respectivamente, considerados como mínimos durante os processos de soldagem. Por outro lado, as taxas de variação dos parâmetros geométricos dependem principalmente dos materiais e consumíveis utilizados nos experimentos, pelo qual uma generalização com mudanças máximas das variáveis de controle de uma unidade e tempos de reação correspondentes com o tempo de reação humano permitem taxas de variação apropriadas nos parâmetros geométricos dos cordões de solda, favorecendo a estabilidade dos parâmetros no processo de controle.

A Figura 6.9 indica que se a largura do cordão de solda monitorada é menor que o valor de largura de referência, a velocidade de soldagem continua diminuindo para atingir este valor, o que produz um aumento no reforço do cordão de solda. Mas, se o reforço do cordão já é maior que o reforço de referência, a velocidade de alimentação do arame pode continuar diminuindo de forma considerável a fim de atingir o valor de referência, o que pode aumentar significativamente o tempo de arco aberto, em tal grau que pode até passar do modo de transferência metálica por curto-circuito ao modo de transferência globular. Neste caso, o processo é revertido utilizando os parâmetros de trabalho iniciais, mas aumentando em meia unidade (0.5 V) a tensão de trabalho, o que ajuda no aumento da largura do cordão sem aumento no reforço, evitando assim uma diminuição considerável nas velocidades de soldagem e de alimentação do arame. No caso particular da Figura 6.9, este processo de correção é realizado duas vezes durante o mesmo teste de soldagem, conseguindo atingir ao final os parâmetros geométricos de referência.

8 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

8.1 – CONCLUSÕES

No caso da geometria dos cordões de solda, as referências bibliográficas apresentam diferentes modelos empíricos ou de inteligência artificial utilizados para controlar um parâmetro geométrico de cada vez. Estes controladores não escapam das limitações próprias dos modelos e das complicações e atrasos impostos no caso de monitorar mais de um parâmetro geométrico ao mesmo tempo.

Neste trabalho foi apresentado um sistema que utiliza agentes inteligentes, baseados em regras de produção, que permite controlar simultaneamente a largura e o reforço dos cordões de solda no processo GMAW-S sem precisar de um modelo predefinido do processo de soldagem.

Conclui-se que, mesmo que nem sempre seja possível encontrar parâmetros do processo que garantam qualquer combinação de largura e reforço (por exemplo, cordões com reforços muito grandes com larguras muito pequenas), isto devido à natureza do processo e à complexa correlação que existe entre as variáveis de controle e os parâmetros a controlar, este problema não escapa de qualquer modelo do processo que possa ser proposto, pelo qual a estratégia de controle apresentada é considerada como adequada para o caso em consideração.

Conclui-se que a máquina de inferência utilizada no controlador não representa um modelo matemático do processo, mas tem a faculdade de aumentar ou diminuir o valor das variáveis de controle na porcentagem adequada, de acordo com o erro entre o sinal monitorado e os valores de referência de cada parâmetro geométrico. Conclui-se também que o monitoramento do Índice de Vilarinho permite corrigir as instabilidades presentes no processo de soldagem devidas ao uso de uma “relativa” alta velocidade de alimentação do arame com respeito à tensão utilizada no processo, assim como, permite também identificar se o processo está mudando de modo de transferência.

No processo de calibração do sistema de visão computacional, os gráficos dos resíduos apresentam uma distribuição adequada em torno do valor zero e desvios padrões de 0.01 *mm*, o que permite concluir que a metodologia é adequada para ser utilizada no sistema de monitoramento. No caso da metodologia de monitoramento, esta permite medir de forma prática e simultânea a largura e o reforço dos cordões de solda. Os resultados apresentados pelo teste t de Welch na avaliação desta metodologia validam a técnica como apropriada para medir a largura e o reforço dos cordões de solda e permitem a sua utilização nos respectivos sistemas de controle. Neste sentido, se conclui que o ponto localizado no centro e no final da poça de fusão pode ser utilizado para medir o reforço do cordão de solda.

Com respeito ao processamento digital das imagens, se conclui que as técnicas de limiarização e rotulação implementadas permitem segmentar a poça de fusão e extrair a informação requerida de forma rápida e correta, não superando os três milissegundos no tempo de processamento. Apesar de em ambos os casos de monitoramento, precisar-se do uso de filtros nos respectivos sinais adquiridos devido às mudanças bruscas na iluminação da poça de fusão, frequentes nos processos GMAW-S. Conclui-se que, os métodos automatizados para encontrar um limiar adequado para segmentar a poça de fusão que dependem unicamente da informação de intensidade dos pixels não são recomendados, pois a poça apresenta uma grande diferença entre os seus níveis de intensidade e os níveis de intensidade do arco elétrico, sobreposto sob a poça de fusão nas imagens adquiridas.

8.2 – TRABALHOS FUTUROS

- Estudar mecanismos para implementar a técnica de monitoramento nos modos de transferência metálica globular e goticular.
- Estudar as limitações da técnica para medir o reforço fora da posição plana e as novas metodologias que podem ser implementadas nestes casos para realizar a medição.
- Implementar novos mecanismos de calibração fora da posição plana, utilizando como base a matriz de homografia.
- Estudar novas metodologias para realizar a calibração do sistema sem empregar papel milimétrico como base.

- Estudar a influência no teor de Ar no gás de proteção para estabelecer a relação direta com a iluminação da poça de fusão e com a função utilizada para determinar o valor do limiar empregado na binarização das imagens.
- Determinar os mecanismos para integrar o sistema de monitoramento e controle proposto num sistema de prototipagem.
- Analisar novas funções de inferência no controlador e definir as constantes utilizadas nas funções de inferência a partir de uma metodologia generalizada.

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 Modelling 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, Apr. 2012,.
- ABTA, 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.
- ADOLFSSON, S.; BAHRAMI, G.; BOLMSJO G.; CLAESSION, I. Results show it is possible to detect changes in weld quality automatically and on-line. **Welding Research Supplement, Welding Journal**, p. 59-73, Feb. 1999.
- AENDENROOMER, A.J.R., OUDEN, G. Weld Pool Oscillation as a Tool for Penetration Sensing during Pulsed GTA Welding. **Welding Journal**, v. 77, p. 181–187, May 1998.
- AIRES, K.R.T. **Segmentação de Planos Baseada em Homografia Afim, Fluxo Óptico e Reconstrução Métrica**. Natal-RN, 2009. Tese (Doutorado em Ciências, Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, área de concentração: Engenharia de Computação), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2009.
- ALBUS, J.S. Outline for a Theory of Intelligence. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, vol 21, no. 3, p. 473-509, May/June 1991.

- ALFARO, S. Sensors for Quality Control in Welding. **Soldag. Insp. São Paulo**, v. 17, n. 3, p.192-200, Jul/Set 2012.
- BÁLSAMO, P.S.; VILARINHO, L.O.; VILELA, M.; SCOTTI, A. Development of an Experimental Technique for Studying Metal Transfer in Welding: Synchronized Shadowgraphy. **International Journal for the Joining of Materials**, v. 12, n. 1, p. 1-12. 2000.
- BANERJEE, P.; GOVARDHAN, S.; WIKLE, H.C., LIU, J.Y., CHIN, B.A. Infrared Sensing for On-Line Weld Geometry Monitoring and Control. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 117, n. 03, p. 323-330, Aug. 1995.
- BASKORO, A.S.; ERWANTO, E.; WINARTO, W. Monitoring of Molten Pool Image during Pipe Welding in Gas Metal Arc Welding (GMAW) Using Machine Vision. INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED COMPUTER SCIENCE AND INFORMATION SYSTEM, 2011, Jakarta, Indonesia. **ICAC SIS 2011**: IEEE, Dec. 17-18, p. 381-384, 2011.
- BENTLEY, A.E., MARBURGER, S.J. Arc welding penetration control using quantitative feedback theory. **Welding Journal**, v. 71, p. 397–405, Nov. 1992.
- BHADARIA, N; OJHA, R.S. Optimisation of Process Parameters for Weld Bead Penetration of IS2062 Mild Steel for GMAW Process Using Response Surface Methodology. **International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering**, v. 02, n. 10, Oct. 2012
- BLUG, A.; CARL, D.; HÖFLER, H.; ABT, F.; HEIDERB, A.; WEBER, R.; NICOLSI, L.; TETZLAFF, R. Closed-loop Control of Laser Power using the Full Penetration Hole Image Feature in Aluminum Welding Processes. **Physics Procedia**, v. 12, p. 720–729, 2011.
- CAMPBELL, S.W.; GALLOWAY, A.M.; McPHERSON, N.A. Artificial Neural Network Prediction of Weld Geometry Performed Using GMAW with Alternating Shielding Gases, **Welding Journal**, v. 91, p. 174-181, June 2012.

- CARVALHO G.C. **An adaptive control system for off-line programming in robotic gas metal arc welding**. PhD Tesis, School of Industrial and Manufacturing Science, Cranfield University, 1997.
- CASTLEMAN, K.R. **Digital Image Processing**. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA, 1996, 667p.
- CAYO, Eber Huanca. **Modelagem e Controle da Soldagem Orbital Através do Processo GMAW-S**. Brasília, 2013. Tese (Doutorado em Sistemas Mecatrônicos) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, 2013.
- CHEN, S.B.; WU, L.; WANG, Q.L.; LIU, Y.C. Self-Learning Fuzzy Neural Networks and Computer Vision for Control of Pulsed GTAW. **Welding Journal - Welding Research Supplement**, p. 201-209, May 1997.
- CHEN, S.B.; LOU, Y.J.; WU, L.; ZHAO, D.B. Intelligent Methodology for Sensing, Modelin and Control of Pulsed GTAW: Part 1 Bead-on-Plate Welding. **Welding Journal**, p. 151-163, June 2000a.
- CHEN, S.B.; ZHAO, D.B.; WU, L.; LOU, Y.J. Intelligent Methodology for Sensing, Modeling and Control of Pulsed GTAW Part 2 - Butt Joint Welding. **Welding Journal**, p. 164-174, June 2000b.
- 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, S.B.; WU, J. Visual Sensing Systems for Arc Welding Process. In: CHEN, S.B.; WU, J. **Intelligentized Methodology for Arc Welding Dynamical Process**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, cap. 2, p. 35-55, 2009.
- CHINA WELDING EQUIPMENT INDUSTRY. (2014). *China Welding Equipment Industry Report 2014-2017*. China.
- CHO, J.H.; NA, S.J. Three-Dimensional Analysis of Molten Pool in GMA-Laser Hybrid Welding. **Welding Journal**, p. 271-283,v. 88, Feb. 2009.

- CHO, M.H.; LIM, Y.C.; FARSON, D.F. Simulation of Weld Pool Dynamics in the Stationary Pulsed Gas Metal Arc Welding Process and Final Weld Shape. **Welding Journal**, p. 271-283, Dec. 2006.
- COOK, G.E.; ANDERSEN, K.; BARRETT, R.J. Keynote Address Feedback and Adaptive Control in Welding. In: International Trends in Welding Science and Technology, ASM International, p. 891-903, 1999.
- CRUZ, Jorge Andres Giron. **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.G.; TORRES, E.M.; ALFARO, S. 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. 1-12, 2015.
- CUI, H., XIAO, Z., DONG, J., CHEN, Y., HOU, G., ZHAO, Z. Analysis on Arc-Welding Robot Visual Control Tracking System. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON QUALITY, RELIABILITY, RISK, MAINTENANCE, AND SAFETY ENGINEERING, 2013, Chengdu, China. **QR2MSE 2013**: IEEE, July. 15-18, p. 2091-2094, 2013.
- CUIURI, D.; NORRISH, J.; COOK, CD. Droplet Size Regulation in the Short Circuit GMAW Process using a Controlled Current Waveform. **Proceedings Gas Metal Arc Welding for the 21st Century, 2000**, p 173-185, 2000
- DATTA, S., BANDYOPADHYAY, A., PAL, P.K. Grey-Based Taguchi Method for Optimization of Bead Geometry in Submerged Arc Bead-on-Plate Welding. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 39, p. 1136-1143, Jan. 2008.
- 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.

- DUTRA, J.C.; BAIXO, C.E.; OLLÉ, L.F. Instrumentação para Estudo da Transferência Metálica em Soldagem MIG/MAG por Curto-Circuito. XXI ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM- ENTS, p. 867–902, 1995.
- ESME, U., BAYRAMOGLU, M., KAZANCOGLU, Y., SUEDA, O. Optimization of Weld Bead Geometry in TIG Welding Process Using Grey Relation Analysis and Taguchi Method. **Materials and Technology**, v. 43, n. 03, p. 143-149, 2009
- FANG, Z., XU, D., TAN, M. A Vision-Based Self-Tuning Fuzzy Controller for Fillet Weld Seam Tracking. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, v. 16, n. 03, p. 540-550, June. 2011.
- FARSON, D., RICHARDSON, R., LI, X. Infrared Measurement of Base Temperature in Gas Tungsten Arc Metal Welding. **Welding Journal**, v. 77, n. 09, p. 396-401, Sept. 1998.
- FERNÁNDEZ, A., GARCÍA, R., ALVAREZ, E., CAMPOS, A., GARCÍA, D., USAMENTIAGA, R., JIMENEZ, M., GARCÍA, J. Low-Cost System for Weld Tracking Based on Artificial Vision. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 47, n. 03, May/June. 2011.
- FRANKLIN, S.; GRAESSER, A. Is it an Agent, or just a Program?: A Taxonomy for Autonomous Agents. **Proceedings of the Third International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages**, Springer-Verlag, 1996.
- GAO J.Q.; QIN G.L.; YANG, J.L.; HE, J.G.; ZHANG T.; WU, C.S. Image processing of weld pool and keyhole in Nd:YAG laser welding of stainless steel based on visual sensing. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, V. 21, N. 02, p. 423-428, Feb. 2011.
- GAO, J.; WU, C. Experimental determination of weld pool geometry in gas tungsten arc welding. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 06 n. 05, p. 288-292, Oct. 2001.
- GOMES, J.H.F., COSTA, S.C., PAIVA, A.P., BALESTRASSI, P.P. Mathematical Modeling of Weld Bead Geometry, Quality, and Productivity for Stainless Steel

- Claddings Deposited by FCAW. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 21, n. 09, p. 1862-1872, Sept. 2012.
- GONZALES, R.; WOODS, R. **Digital Image Processing**. 2nd ed. Upper Saddle River, New Jersey, USA, Prentice Hall, 2002, 793 p.
- GONZALES, R.; WOODS, R. **Processamento de Imagens Digitais**. São Paulo, SP, Brasil, Editora Blucher, 2007, 509p.
- GRAHAM, G.M., UME, I.C. Automated system for laser ultrasonic sensing of weld penetration. **Mechatronics**, v. 07, n. 08, p. 711-721, 1997.
- GUO, H.; HU, J.; TSAI, H. L. Three-Dimensional Modeling of Gas Metal Arc Welding of Aluminum Alloys. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 132, n. 02, Apr. 2010.
- GUU, A.C., ROKHLIN, S.I. Technique for simultaneous real-time measurements of weld pool surface geometry and arc force. **Welding Journal**, v. 71, p. 473–482, Dec. 1992.
- HARTLEY, R.; ZISSERMAN, A. **Multiple View Geometry in computer vision**, 2nd ed. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2004, 655p.
- HERMANS, M.J.; OUDEN G.D. Process behavior and stability in short circuit gas metal arc welding. **Welding Journal**, v. 78, p. 137-141, 1999.
- HOFFMEISTER, M., DIETRICH, S., HUISMANN, G. Front face controlled root penetration by arc tracer diagnostics in TIG welding of duplex stainless steel pipes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRENDS IN WELDING RESEARCH, 3, 1992, Gatlingurg, Tennessee, USA. **International Trends in Welding Science and Technology, Proceedings of the 3rd International Conference on Trends in Welding Research**, ASM International, June. 1-5, p. 927–930, 1992.
- HU, J.; TSAI, H.L. Modelling of transport phenomena in 3D GMAW of thick metals with V groove. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 41, n. 06, 10p, Feb. 2008

- 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, n. 9–10, p. 2537–2552, May 2008.
- HUANG, W., KOVACEVIC, R. A Laser-Based Vision System for Weld Quality Inspection. **Sensors**, v. 11, n. 01, p. 506-521, Jan. 2011.
- HUANG, W., KOVACEVIC, R. Development of a real-time laser-based machine vision system to monitor and control welding processes. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 63, n. 1-4, p. 235-248, Nov. 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, 2007, Seoul, Coreia. **ICCAS 2007**: IEEE, Oct. 17-20, p. 1046-1051, 2007.
- KANNAN, T.; YOGANANDH, J. Effect of process parameters on clad bead geometry and its shape relationships of stainless steel claddings deposited by GMAW. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 47, n. 9-12, p. 1083-1095, Apr. 2009.
- KANTI, K.M., RAO, P.S. Prediction of bead geometry in pulsed GMA welding using back propagation neural network. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 200, n. 1-3, p. 300-305, May 2008.
- KANTI, K.M.; RAO, P.S.; JANARDHANA, G.R. Optimization of Weld Bead Penetration in Pulsed Gas Metal Arc Welding using Genetic Algorithm. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 03, n. 03, p.368-371, Mar. 2013.
- KARADENIZ, K., OZSARAC, U., YILDIZ, C. The effect of process parameters on penetration in gas metal arc welding processes. **Materials and Design**, v. 28, n. 02, p. 649-656, 2007.
- KEJIE, D.; WENTAN, J.; JINCHENG, W.; FUJU, Z. The research of adaptive PID for the thin-walled cylinder TIG welding penetration control. In: INTERNATIONAL

CONFERENCE ON COMPUTING, CONTROL AND INDUSTRIAL ENGINEERING, 2010, Wuhan, china. **CCIE 2010**: IEEE, June 5-6, p. 30-33, 2010.

KIM, C.H.; ZHANG, W.; DEB-ROY, T. Modeling of temperature field and solidified surface profile during gas-metal arc fillet welding. **Journal of Applied Physics**, v. 94, n. 04, Aug. 2003.

KIM, C.H., CHOI T-Y., LEE, J-J., SUH, J., PARK, K-T., KANG, H-S. Development of Welding Profile Sensor and Its Application. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART MANUFACTURING APPLICATION, 2008, Gyeonggi-do, Coreia. **ICSMA 2008**: IEEE, Apr. 9-11, p. 24-29, 2008.

KIM, H.H.; KIM, I.S.; KIM, I.J.; KANG, B.Y. Control of welding process for BV-AH 32 steel. **Archives of Materials Science and Engineering**. v. 33, n. 01, p. 45-48, Sept. 2008.

KIM, J.K., HONG, J.I., KIM, J.W., CHOI, D.J., RHEE, S.Y. Geometrical measurement about welding shape using dual laser vision system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL, AUTOMATION AND SYSTEMS, 12, 2012, JeJu Island, Coreia. **ICCAS 2012**: IEEE, Oct. 17-21, p. 195-198, 2012.

KITA A., UME, I.C. Measuring On-Line and Off-Line Noncontact Ultrasound Time of Flight Weld Penetration Depth. **Welding Journal**, v. 86, p. 9-17, Jan. 2007

KOLAHAN, F., HEIDARI, M. A New Approach for Predicting and Optimizing Weld Bead Geometry in GMAW. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, v. 35, p. 134-137, Nov. 2009.

KOLAHAN, F.; HEIDARI, M. Modeling and Optimization of MAG Welding for Gas Pipelines Using Regression Analysis and Simulated Annealing Algorithm. **Journal of Scientific & Industrial Research**, v. 69, p. 259-265, Apr. 2010.

KOVACEVIC, R.; ZHANG, Y.M.; Model-Based Adaptive Vision Control of Weld Pool Area. AMERICAN CONTROL CONFERENCE, 1994: IEEE, **Proceedings of the American Control Conference, 1994**, Bltimore, Maryland, USA. June 29-July 01, p. 313-317, 1994.

- KOVACEVIC, R., CAO, Z.N., ZHANG, Y.M. Role of Welding Parameters in Determining the Geometrical Appearance of Weld Pool. **Journal of Engineering Materials and Technology**, v. 118, n. 04, p. 589-596, Oct. 1996.
- KOVACEVIC, R.; ZHANG, Y.M. Sensing free surface of arc weld pool using specular reflection: principle and analysis. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 210, P. 553-564, Dez. 1996.
- KOVACEVIC, R.; ZHANG, Y.M. Real-Time Image Processing for Monitoring of Free Weld Pool Surface. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 119, p. 161-169, may 1997.
- KUMAR, V. Modeling of Weld Bead Geometry and Shape Relationships in Submerged Arc Welding Using Developed Fluxes. **Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering**, v. 05, n. 05, p. 461-470, Oct. 2011.
- LI, X.R.; SHAO, Z.; ZHANG, Y.M.; KVIDAHL, L. Monitoring and Control of Penetration in GTAW and Pipe Welding. **Welding Journal**, v. 92, p. 190-196, June 2013.
- LI, Y., LI, Y.F., WANG Q.L., XU, D., TAN, M. Measurement and Defect Detection of the Weld Bead Based on Online Vision Inspection. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 59, n. 07, p. 1841-1849, July 2010.
- LIU S., ZHANG, H., JIA J., LI B. Feature Recognition for Underwater Weld Images. In: CONTROL CONFERENCE, 29, 2010, Beijing, China. **CCC 2010: IEEE**, July 29-31, p. 2729-2734, 2010.
- LIU, X., WANG, G., SHI, Y. Image Processing of Welding Seam Based on Single-stripe Laser Vision System. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT SYSTEMS DESIGN AND APPLICATIONS, 6, 2006, Jinan, China. **ISDA 2006: IEEE**, Oct. 16-18, p. 463-470, 2006.
- LIU, X. Image Processing in Weld Seam Tracking with Laser Vision Based on Radon Transform and FCM Clustering Segmentation. In: INTERNATIONAL

CONFERENCE ON INTELLIGENT COMPUTATION TECHNOLOGY AND AUTOMATION, 2010, Changsha, China. **ICICTA 2010**: IEEE, May 11-12, p. 470-473, 2010.

LIU, Y.K.; ZHANG, Y.M. Adaptive modeling of the weld pool geometry in gas tungsten arc welding. 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. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 22, n. 03, p. 955 - 966, May 2014.

LIU, Z.; WU, C.S.; GAO, J. Vision-based observation of keyhole geometry in plasma arc welding. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 63, p. 38–45, Jan. 2013

LOPERA, J. E. P. **Modelagem Empírica da Transferência Goticular Projetada em Processos de Soldagem GMAW Baseada em Técnicas de Processamento de Imagens Digitais e Superfícies de Resposta**. Dissertação (Mestrado em Sistemas Mecatrônicos) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010.

LOPES, F.M. **Um Modelo Perceptivo de Limiarização de Imagens Digitais**. Dissertação (Mestrado em Informática) – Departamento de Informática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2003

MA, X.; ZHANG, Y. Gas Metal Arc Weld Pool Surface Imaging: Modeling and Processing. **Welding Research, Welding Journal**, p. 85-90, May 2011.

MA, X.; ZHANG, Y.; GRAY, A.; MALE, A. Image processing for measurement of three-dimensional gas metal arc weld pool surface: Algorithms are explored for processing the image of a grid laser pattern reflected from the dynamic GMA weld pool surface. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER SCIENCE AND AUTOMATION ENGINEERING, 2012, Zhangjiajie, China. **CSAE 2012**: IEEE, May 25-27, p. 243-249, 2013.

- MELO, João Ricardo Castro. **Contribuições ao Desenvolvimento de um Perfilômetro Óptico a Laser para Medição e Visualização da Geometria Interna de Dutos.** Florianópolis, 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Automação e Sistemas) - Departamento de Automação e Sistemas, Universidade Federal De Santa Catarina, 2012.
- MENESES, L. Y. H. **Modelagem e simulação da transferência metálica no processo GMAW-S em soldagem orbital.** Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, 2013.
- 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.J. **Introdução à física do arco elétrico, Soldagem I.** Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Belo Horizonte, 2001, 53p.
- MOORE, K.L.; ABDELRAHMAN, M.A.; NAIDU, D.S. Gas metal arc welding control - II. Control strategy. **Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications**, v. 35 n. 01, p. 85-93, Jan. 1999.
- 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.
- MURPHY, A.B. A self-consistent three-dimensional model of the arc, electrode and weld pool in gas-metal arc welding. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 44, n. 19, 11 p. Apr. 2011.

- NA, H.H.; KIM, I.S.; KANG, B.Y.; SHIM, J.Y. A experiment study for welding optimization of fillet welded structure. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, v. 45, n. 02, Apr. 2011.
- NAGESH, D.S., DATTA, G.L. Prediction of weld bead geometry and penetration in shielded metal-arc welding using artificial neural networks. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 123, n. 02, p. 303-312, Apr. 2002.
- OBBERG, A.E., HAMMERSBERG, P., SVENSSON, L.E. The Right Evaluation Method - an Enabler for Process Improvement. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON JOINING MATERIALS, Helsingor, Denmark, May 5-8, 2013.
- OGUNBIYI, T.E.B. **Process Monitoring and Adaptive Quality Control for Robotic Gas Metal Arc Welding**. PhD Thesis, Cranfield University, 1995.
- OTSU, N. A threshold selection method from gray-level histograms. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v. 9, n. 1, p. 62-66, 1979.
- PALANI, P.K.; MURUGANB, N. Optimization of weld bead geometry for stainless steel claddings deposited by FCAW. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 190, n. 1-3, p. 291–299, July 2007.
- PASSINO, K.M. **Intelligent Control: An Overview of Techniques**. Chapter in: T. Samad, Ed., “Perspectives in Control: New Concepts and Applications,” IEEE Press, NJ, 2001.
- PONOMAREV, V.; SCOTTI, A.; NORRISH, J.; LUCAS, W. Metal Transfer Modes in MIG/MAG (GMAW) Welding: Contributions to a New IIW Classification. In: 62nd ANNUAL ASSEMBLY AND INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING, 2009, Singapore. p. 1-15, 2009.
- PUROHIT, G.K., DIGAMBER. Optimization of Bead Geometry Parameters of Bead-on-Plate Weldments Prepared by Submerged Arc Welding Using Taguchi Technique. **International Journal of Engineering Research and Development**, v. 1, n. 10, p. 9-15, June. 2012

- REZENDE G.M.; LISKÉVYCH, O.; VILARINHO, L.O.; SCOTTI, A. Avaliação de uma Metodologia para Seleção de Parâmetros em Soldagem MIG/MAG por Curto-Circuito. In: VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, CONEM 2010. Ag. 18-21 de 2010, Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2010.
- REZENDE G.M.; LISKÉVYCH, O.; VILARINHO, L.O.; SCOTTI, A. Um Critério para Determinar a Regulagem da Tensão em Soldagem MIG/MAG por Curto-Circuito. **Soldagem e inspeção**. v.16, n 2, p. 98-103, Abr/Jun 2011.
- RODRIGUES, M.; KORMANN, M.; SCHUHLER, C.; TOMEK, P. An intelligent real time 3D vision system for robotic welding tasks. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MECHATRONICS AND ITS APPLICATIONS, 9, 2013, Amman, Jordan. **ISMA 2013**: IEEE, Apr. 9-11, p. 1-6, 2013.
- ROKHLIN, S.I., GUU, A.C. Computerized Radiographic Sensing and Control of an Arc Welding Process. **Welding Journal**, v. 89, p. 83-97, Mar. 1990.
- RUSELL, S.; NORVIG, P. **Artificial Intelligence: A Modern Approach**. 2nd ed. Upper Saddle River, New Jersey, USA, Prentice Hall, 2003, 1081 p.
- SATHIYA, P.; ARAVINDAN, S.; AJITH, P.M.; ARIVAZHAGAN, B.; HAQ, A.N. Microstructural characteristics on bead on plate welding of AISI 904 L super austenitic stainless steel using Gas metal arc welding process. **International Journal of Engineering, Science and Technology**. v. 02, n. 06, p. 189-199, 2010.
- SCOTTI, A., PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG melhor entendimento, melhor desempenho**. São Paulo, Brasil: Artliber Editora, 2008. 284 p.
- SCOTTI, A.; PONOMAREV, V.; LUCASB, W. A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 212 p. 1406– 1413, 2012.
- SAHOO, P.K., SOLTAINI, S., WONG, A.K. A Survey of Thresholding Techniques. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**, v. 41, n. 02, p. 233-260, Feb. 1988.

- SHEN, H-Y.; WU, J.; LIN, T.; CHEN, S-B. Arc welding robot system with seam tracking and weld pool control based on passive vision. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 39, n. 7-8, p. 669-678, Nov. 2008.
- 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.
- SMARTT, H.B.; EINERSON, C.J. A Model for Heat and Mass Input Control in GMAW. **Welding Journal**, p. 217-229, May 1993.
- SMARTT, H.B.; KENNEY, K.L.; TOLLE, C.R. Intelligent Control of Modular Robotic Welding Cell. In: 6th INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRENDS IN WELDING RESEARCH. Ap 15-19, Pine Mountain, GA USA, 2002.
- SON, J.S.; KIM, I.S.; Lee, J.H.; PARK, M.H.; JEON, G.S. Development of the intelligent algorithm to control on-line bead height for robotic welding process. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, v 58, n. 02, June 2013.
- SONG, H.S.; ZHANG, Y.M. Image Processing for Measurement of Three-Dimensional GTA Weld Pool Surface. **Welding Journal**, v. 86, p. 323-330, Oct. 2007a.
- SONG, H.S.; ZHANG, Y.M. Three-dimensional reconstruction of specular surface for a gas tungsten arc weld pool. **Measurement Science and Technology**, v. 18, n. 12, p. 3751-3767, Dec. 2007b.
- SONG, H.S.; ZHANG, Y.M. Measurement and Analysis of Three-Dimensional Specular Gas Tungsten Arc Weld Pool Surface. **Welding Journal**, v. 87, p. 85-95, Apr. 2008.
- SONG, H.S.; ZHANG, Y.M. Error Analysis of a Three-Dimensional GTA Weld Pool Surface Measurement System. **Welding Journal**, v. 88, p. 141-148, July 2009.
- SONG, J.B., HARDT, D.E. Closed-loop control of weld pool depth using a thermally based depth estimator. **Welding Journal**, v. 72, p. 471-478, Oct. 1993.

- SOUZA, D. **Levantamento de Mapas Operacionais de Transferência Metálica para Soldagem MIG/MAG de Aço ao Carbono na Posição Plana**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, 2010.
- SOUZA, D.; ROSSI, M.L.; KEOCHEGUERIAN, F.; NASCIMENTO, V.C.; VILARINHO, L.O.; SCOTTI, A. Influência da Tensão de Soldagem e do Gás de Proteção sobre a Correlação entre Indutância e Regularidade da Transferência Metálica na Soldagem MIG/MAG por Curto-Circuito. **Soldagem e Inspeção**, v.16, n. 2, p.114-122, Abr/Jun 2011.
- SREERAJ, P., KANNAN, T. Modelling and Prediction of Stainless Steel Clad Bead Geometry Deposited by GMAW Using Regression and Artificial Neural Network Models, **Advances in Mechanical Engineering**, 12 p. Jan. 2012.
- SREERAJ, P., KANNAN, T., MAJI, S. Optimization of weld bead geometry for stainless steel cladding deposited by GMAW. **American Journal of Engineering Research (AJER)**, v. 02, n. 05, p. 178-187, 2013a.
- SREERAJ, P.; KANNAN, T.; MAJI, S. Genetic Algorithm for Optimization of Welding Variables for Percentage of Dilution and Application of Ann for Prediction of Weld Bead Geometry In GMAW Process. **Mechanica Confab**, v. 02, n. 01, 16 p. Jan. 2013b.
- SREERAJ, P.; KANNAN, T.; MAJI, S. Prediction and Control of Weld bead Geometry in Gas Metal Arc Welding Process Using Genetic Algorithm. **International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development**, v. 03, n. 01, p. 143-154, Mar. 2013c.
- STEELE, J.P.H.; MNICH, C.; DEBRUNNER, C.; VINCENT, T.; LIU, S. Development of closed-loop control of robotic welding processes. **Industrial Robot: An International Journal**, v. 32, n. 04, p. 350-355, 2005.
- SUBAN, M.; TUŠEK, J. Methods for the determination of arc stability. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 143–144, p. 430-437, Dec. 2003.

- 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. In: INTERNATIONAL OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE, 11, 2001, Stavanger, Norway. **Proceedings of the Eleventh (2001) International Offshore and Polar Engineering Conference:** The International Society of Offshore and Polar Engineers, June 17-22, p. 286-291, 2001.
- TAY, K.M., BUTLER C. Modeling Optimizing of a MIG Welding Process – A Case Study Using Experimental Designs and Neural Networks. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 13, p. 61-70, 1997.
- TIAN Y., DU, D., HOU, R., WANG, L., CAI G. A Model of Automatic Detection System for Weld Defects Based on Machine Vision. **Robotic Welding, Intelligence and Automation, LNCIS**, v 362, p 341-348, 2007.
- TORRES, Edna Margarita Moncayo. **Uma Metodologia para Modelagem e Controle da Largura do Cordão De Solda No Processo GMAW**. Brasília, DF, 2013. Dissertação (Mestrado em Sistemas Mecatrônicos) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, 2013.
- TORRES, E.M.M., CRUZ, J.A.G., LOPERA, J.E.P., ALFARO, S.C.A. Parameter Optimization in GMAW Process with Solid and Metal Cored Wires. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 22, 2013, Ribeirão Preto, SP, Brazil. **COBEM 2013:** ABCM, Nov. 3-7, p. 5256-5266, 2013.
- TRUCCO E., VERRI, A. **Introductory Techniques for 3-D Computer Vision**. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 1998, 343 p.
- VILARINHO, L.O.; LUCAS, B.; RAGHUNATHAN, S.; HOUGHTON, M.; LUCAS, J.J. Dedicated Near-Infrared Vision System for Monitoring Welding Processes. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 20, 2009, Gramado, RS, Brazil. **COBEM 2009:** ABCM, Nov. 15-29, 2009.
- VILARINHO, L.O.; LUCAS, B.; HOUGHTON, M.; LUCAS, J.; RAGHUNATHAN, S. Sistema de visão por infravermelho dedicado ao monitoramento de processos de

- soldagem. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 06, 2010, Campina Grande, Paraíba, Brasil. **CONEM 2010**: ABCM, ago. 28-21, 2010.
- 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, 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.; MA, X.; ZHANG Y. Simultaneous Imaging and Measurement of Pool Surface and Metal Transfer. **Welding Journal**, v. 90, p. 121-128, June 2011*a*.
- WANG, Z.; MA, X.; ZHANG Y. Simultaneous Imaging and Measurement of Weld Pool Surface and Metal Transfer from Weld Pool Reflected Laser Lines. WORLD CONGRESS ON INTELLIGENT CONTROL AND AUTOMATION, Taipei, Taiwan. **WCICA 2011**: IEEE, June 21-25, p. 1-6, 2011*b*.
- WANG, Z.; ZHANGA, Y.; WUA, 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.
- WESKA, J.S. A Survey of Thresholding Selection Techniques. **Computer Graphics and Image Processing**, v. 07, n. 02, p. 259-265, Apr. 1978.
- WHITE, R.A. SMITH, J.S., LUCAS, J. Vision-based gauge for online weld profile metrology. **IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology**, v. 141, n. 06, p. 521-526, Nov. 1994.
- WU, C.S.; POLTE, T.E.; REHFELDT, D. A Fuzzy Logic System for Process Monitoring and Quality Evaluation in GMAW, **Welding Research Supplement, Welding Journal**, p. 33-38, Feb. 2001.
- WU, C.S.; GAO, J.Q.; LIU, X.F.; ZHAO, Y.H. Vision-based measurement of weld pool geometry in constant-current gas tungsten arc welding. **Proceedings of the**

Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, v. 217, p. 879-882 June 2003.

WU, C.S.; GAO, J.Q. Vision-based neuro-fuzzy control of weld penetration in gas tungsten arc welding of thin sheets. **International Journal of Modelling, Identification and Control**, v. 1, n. 2, p. 126-132, 2006

WU, J., SMITH, J.S., LUCAS, J. Weld bead placement system for multipass welding. **IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology**, v. 143, n. 02, p. 85-90, Mar. 1996.

XIAO, Y.H.; OUDEN, G. A study of GTA weld pool oscillation. **Welding Journal**, v. 69, pp. 289–293, 1990.

XIAO, Y.H.; OUDEN, G. Weld Pool Oscillation during GTA Welding of Mild Steel. **Welding Journal**, v. 72, pp. 428–434, 1993.

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, M., ZHAO, M., ZOU, Y. On-Line Visual Inspection System for Backside Weld of Tailored Blanks Laser Welding. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED COMPUTER CONTROL, Shenyang, China, mar. 27-29. **ICACC 2010: IEEE**, v. 5, p. 525-529, 2010.

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.

ZHANG, G.J.; CHEN, S.B.; WU, L. Intelligent Control of Pulsed GTAW with Filler Metal. **Welding Journal**, p. 9-16, Jan. 2005.

ZHANG, G.; YAN, Z.; WU, L. Reconstructing a three-dimensional P-GMAW weld pool shape from a two-dimensional visual image. **Measurement Science and Technology**, v. 17 n. 07, p. 1877-1882, July 2006.

ZHANG, L.; JIAO, J.; YE, Q.; HAN, Z.; YANG, W. Robust Weld Line Detection with Cross Structured Light and Hidden Markov Model. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHATRONICS AND AUTOMATION, Chengdu, China. **ICMA 2012**: IEEE, Aug. 5-8, p. 1411-1416, 2012.

ZHANG, L.; KE, W.; HAN, Z.; JIAO, J. A Cross Structured Light Sensor for Weld Line Detection on Wall-climbing Robot. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHATRONICS AND AUTOMATION, 2013, Takamatsu, Japan. **ICMA 2013**: IEEE, Aug. 4-7, p. 1179-1184.

ZHANG, W.J.; LIU, Y.; WANG, X.; ZHANG, Y.M. Characterization of Three-Dimensional Weld Pool Surface in GTAW. **Welding Journal**, v. 91, p. 195-203, July 2012a.

ZHANG, W.J.; LIU, Y.K.; ZHANG, Y.M. Real-Time Measurement of Three Dimensional Weld Pool Surface in GTAW. In: KOVACEVIC, R. **Welding Processes**. Rijeka, Croatia: InTech, Nov. 2012b, cap. 14, p. 333-366.

ZHANG, W.J.; LIU, Y.; ZHANG, Y.M. Real-time measurement of the weld pool surface in GTAW process. In: IEEE INTERNATIONAL INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, Minneapolis, MN, May 6-9. **I2MTC 2013**: IEEE, p. 1640-1645, 2013.

ZHANG, W., WANG, G., SHI, Y. e ZHONG, B. On-line Predication of Underwater Welding Penetration Depth Based on Multi-sensor Data Fusion. In: WORLD

CONGRESS ON INTELLIGENT CONTROL AND AUTOMATION, 7, Chongqing, China. **WCICA 2008**: IEEE, June. 25-27, p. 1108-1113, 2008.

ZHANG, Y.M.; KOVACEVIC, R.; WU, L. Closed-Loop Control of Weld Penetration Using Front-Face Vision Sensing. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering**, v. 207, p.27-34, Feb. 1993.

ZHANG, Y.M., KOVACEVIC, R. e LI, L. Adaptive Control of Full Penetration Gas Tungsten Arc Welding. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 4, n. 4, p. 394-403, July 1996.

ZHANG, Y.M., KOVACEVIC, R. Real-Time Sensing of Sag Geometry During GTA Welding. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 119, p. 151-160, maio 1997.

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, 2011. 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 - Welding Research Supplement**, p. 253-260, Nov. 2001.

ZOU, Y.; YUNHUA, Li, Y.; JIANG, L.; XUE, L. Weld Pool Image Processing Algorithm for Seam Tracking of Welding Robot. IEEE CONFERENCE ON INDUSTRIAL ELECTRONICS AND APPLICATIONS, 6, Beijing, China, June 21-23. **6th ICIEA 2011**: IEEE, p. 161-165, 2011.