

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

**MODELAGEM EMPÍRICA DA TRANSFERÊNCIA  
GOTICULAR PROJETADA EM PROCESSOS DE  
SOLDAGEM GMAW BASEADA EM TÉCNICAS DE  
PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS E  
SUPERFÍCIES DE RESPOSTA**

**JESÚS EMILIO PINTO LOPERA**

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

**PUBLICAÇÃO: ENM.DM-39A/10**

**BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO - 2010**

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

**MODELAGEM EMPÍRICA DA TRANSFERÊNCIA GOTICULAR  
PROJETADA EM PROCESSOS DE SOLDAGEM GMAW BASEADA  
EM TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS E  
SUPERFÍCIES DE RESPOSTA**

**JESÚS EMILIO PINTO LOPERA**

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

**APROVADA POR:**

---

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

---

**Prof. José Mauricio Santos Torres da Motta, PhD. (ENM-UnB)  
(Examinador Interno)**

---

**Prof. Louriel Oliveira Vilarinho, Dr. (FEM-UFU)  
(Examinador Externo)**

**BRASÍLIA/DF, 14 DE DEZEMBRO DE 2010**

## FICHA CATALOGRÁFICA

LOPERA, JESÚS EMILIO PINTO

Modelagem empírica da transferência goticular projetada em processos de soldagem GMAW baseada em técnicas de processamento de imagens digitais e superfícies de resposta [Distrito Federal] 2010.

xvii, 136p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Sistemas Mecatrônicos, 2010).  
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

- |  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| 1. Soldagem GMAW                         | 2. Transferência goticular projetada |
| 3. Metodologia de superfície de resposta | 4. Processamento de imagens digitais |

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LOPERA, J. E. P. (2010). Modelagem Empírica da Transferência Goticular Projetada em Processos de Soldagem GMAW Baseada em Técnicas de Processamento de Imagens Digitais e Superfícies de Resposta. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.DM-39A/10, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 135p.

## CESSÃO DE DEREITOS

AUTOR: Jesús Emilio Pinto Lopera

TÍTULO: Modelagem Empírica da Transferência Goticular Projetada em Processos de Soldagem GMAW Baseada em Técnicas de Processamento de Imagens Digitais e Superfícies de Resposta

GRAU: Mestre

ANO: 2010

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

---

Jesús Emilio Pinto Lopera  
SCLN 407 Bloco A, Sala 111  
70.855-510 – Brasília – DF – Brasil.

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

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, pela proteção e as bênçãos recebidas.

Aos meus pais, pelo seu infinito apoio e incentivo em todos os aspectos de minha vida.

À minha noiva Gloria Liliana, pela paciência, apoio e atenção durante todo o curso.

Ao meu orientador, o professor Sadek, pela amizade, orientação, apoio e confiança na realização deste trabalho.

Ao Brasil e à Universidade de Brasília, pela oportunidade de realizar o curso.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro.

Aos meus amigos Diego Mauricio Sandoval e Yesid Castro, pelo seu apoio e estímulo para viajar ao Brasil e durante meus primeiros meses em Brasília.

Aos meus colegas e amigos, Eber, Ana Maria, Ronald e especialmente ao Marrocos, pela ajuda e as dicas no laboratório de Solda.

Ao professor Carlos Llanos, pela sua atenção na chegada ao curso de mestrado.

## **RESUMO**

### **MODELAGEM EMPÍRICA DA TRANSFERÊNCIA GÓTICULAR PROJETADA EM PROCESSOS DE SOLDAGEM GMAW BASEADA EM TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS E SUPERFÍCIES DE RESPOSTA**

**Autor: Jesús Emilio Pinto Lopera.**

**Orientador: Sadek Crisóstomo Absi Alfaro.**

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

**Brasília, Dezembro de 2010.**

Nos processos de soldagem GMAW, o balanço entre os fatores que governam a formação das gotas na transferência metálica determinam a forma, o volume e a frequência de destacamento das mesmas que são formadas na ponta do arame-eletrodo, que por sua vez caracterizam os modos de transferência metálica e influenciam a geometria, microestrutura e propriedades mecânicas da junta soldada. Este trabalho apresenta uma metodologia para modelar empiricamente o modo de transferência góticula projetada em processos de soldagem GMAW utilizando algoritmos de processamento de imagens digitais e a Metodologia de Superfície de Resposta. Foram adquiridas imagens de transferência metálica em soldagem GMAW com uma câmera de alta velocidade visando identificar o modo de transferência góticula. Nestas imagens, são calculados os parâmetros que caracterizam o modo de transferência, identificados como frequência de destacamento e tamanho das gotas. Modelos correspondentes à frequência de destacamento e ao tamanho das gotas são obtidos em resposta a entradas de tensão e de velocidade de alimentação do arame. Os modelos são utilizados no desenvolvimento de um simulador de transferência metálica góticula que constitui a primeira etapa de um equipamento de soldagem virtual.

## **ABSTRACT**

### **EMPIRICAL MODELING OF PROJECTED SPRAY TRANSFERENCE GMAW WELDING PROCESS BASED ON DIGITAL IMAGE PROCESSING TECHNIQUES AND RESPONSE SURFACE METHODOLOGY**

**Author: Jesús Emilio Pinto Lopera.**

**Supervisor: Sadek Crisóstomo Absi Alfaro.**

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

**Brasília, Dezembro de 2010.**

The balance among the features that rule the drop formation in metal transfer GMAW welding processes define the shape, volume and rate transfer of the droplets, molded at the tip of the wire-electrode, which at the same time both characterize the metal transference modes and influence the geometry, microstructure and mechanical properties of the welded joint. This work presents a methodology to empirically model the projected spray transfer mode from GMAW welding processes by using digital image processing algorithms and response surface methodology. Metal transfer GMAW images are acquired with a high speed camera aiming to identify the spray transfer. The characteristic parameters of the transfer mode, which are the droplet transfer rate and the droplet size, are calculated in these images. Finally, models of these parameters were obtained related to voltage and wire-speed inputs. These models are used to develop a spray metal transfer simulator for performing the first step on a virtual welding equipment project.

## SUMÁRIO

<b>1 – INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 – JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 – OBJETIVOS.....</b>	<b>4</b>
1.1.1 – Objetivo geral.....	4
1.1.2 – Objetivos específicos.....	4
<b>1.3 – ESTRUTURA DO DOCUMENTO.....</b>	<b>5</b>
<b>2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1 – SOLDAGEM GMAW.....</b>	<b>6</b>
2.1.1 – Modos de transferência metálica no processo GMAW.....	7
2.1.2 – Transferência Goticular Projetada.....	9
2.1.3 – Formação da gota e modelos teóricos.....	11
2.1.4 – Modelos empíricos.....	13
<b>2.2 – METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA.....</b>	<b>14</b>
2.2.1 – Planejamento experimental.....	15
2.2.2 – Regressão múltipla.....	17
2.2.3 – Princípio dos mínimos quadrados.....	18
2.2.4 – Considerações finais dos modelos de regressão múltipla.....	21
<b>2.3 – PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS.....</b>	<b>24</b>
2.3.1 – Imagem digital.....	25
2.3.2 – Aquisição da imagem e Perfilografia.....	27
2.3.2.1– Sistema óptico .....	28
2.3.3 – Pré-processamento da imagem.....	31
2.3.4 – Segmentação.....	33
2.3.4.1 – Limiarização.....	33
2.3.4.2 – Método de <i>Otsu</i> .....	34
2.3.4.3 –Morfologia Matemática.....	36
2.3.4.4 – Rotulação.....	37
2.3.5 – Considerações finais.....	38

<b>3 – METODOLOGIA E MONTAGEM EXPERIMENTAL.....</b>	<b>39</b>
<b>3.1 – EQUIPAMENTO E BANCADA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>39</b>
<b>3.1.1 - Sistema de aquisição de imagens.....</b>	<b>40</b>
<b>3.1.2 – Sistema de soldagem.....</b>	<b>43</b>
3.1.2.1 – Fonte de soldagem.....	43
3.1.2.2 – Computador industrial.....	44
3.1.2.3 – Mesa de deslocamento linear.....	44
3.1.2.4 – Materiais e consumíveis.....	45
<b>3.2 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>45</b>
<b>3.2.1 – Sincronização das imagens.....</b>	<b>46</b>
<b>3.2.2 – Delimitação da região de trabalho.....</b>	<b>48</b>
<b>3.2.3 – Aquisição das imagens.....</b>	<b>50</b>
<b>3.3 – PROCESSAMENTO DE IMAGENS E MEDIÇÃO DE RESPOSTAS.....</b>	<b>51</b>
<b>3.3.1 – Pré-processamento da imagem digital.....</b>	<b>51</b>
<b>3.3.2 – Limiarização das imagens.....</b>	<b>53</b>
<b>3.3.3 – Rotulação de objetos.....</b>	<b>55</b>
<b>3.3.4 – Medição do tamanho da gota.....</b>	<b>57</b>
<b>3.3.5 – Medição da frequência de destacamento.....</b>	<b>58</b>
<b>4 – RESULTADOS.....</b>	<b>62</b>
<b>4.1 – MEDIÇÃO DE CARACTERÍSTICAS.....</b>	<b>62</b>
4.1.1 – Tamanho das gotas.....	62
4.1.2 – Medição da frequência de destacamento.....	82
<b>4.2 – MODELAGEM DA TRANSFERÊNCIA.....</b>	<b>96</b>
4.2.1 – Modelos do tamanho da gota.....	96
4.2.2 – Modelo da frequência de destacamento.....	109
<b>4.3 – SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE TRANSFERÊNCIA.....</b>	<b>117</b>
<b>5 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>122</b>
<b>6 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>129</b>

<b>6.1 – CONCLUSÕES.....</b>	<b>129</b>
<b>6.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>130</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>132</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Classes e respectivos modos naturais de transferência metálica no processo GMAW (adaptado de Scotti e Ponomarev, 2008 e Ponomarev <i>et al.</i> , 2009).....	8
Tabela 2.2. Planejamento experimental.....	18
Tabela 4.1. Média amostral e desvio padrão para do tamanho da gota medidas em diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 5.8 m/min, 28 V.....	64
Tabela 4.2. Média amostral e desvio padrão do tamanho da gota medidas em diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 6 m/min, 27 V.....	66
Tabela 4.3. Média amostral e desvio padrão do tamanho da gota medidas em diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 6 m/min, 29 V.....	68
Tabela 4.4. Média amostral e desvio padrão do tamanho da gota medidas em diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 6.5 m/min, 26.6 V.....	70
Tabela 4.5. Média amostral e desvio padrão do tamanho da gota medidas em diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 6.5 m/min, 28 V.....	72
Tabela 4.6. Média amostral e desvio padrão do tamanho da gota medidas em diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 6.5 m/min, 29.4 V.....	74
Tabela 4.7. Média amostral e desvio padrão do tamanho da gota medidas em diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 7 m/min, 27 V.....	76
Tabela 4.8. Média amostral e desvio padrão do tamanho da gota medidas em diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 7 m/min, 29 V.....	78
Tabela 4.9. Média amostral e desvio padrão do tamanho da gota medidas em diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 7.2 m/min, 28 V.....	80
Tabela 4.10. Média amostral e desvio padrão da frequência de destacamento medida para diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 5.8 m/min, 28 V....	83
Tabela 4.11. Média amostral e desvio padrão da frequência de destacamento medida para diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 6 m/min, 27 V.....	85
Tabela 4.12. Média amostral e desvio padrão da frequência de destacamento medida para diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 6 m/min, 29 V.....	86
Tabela 4.13. Média amostral e desvio padrão da frequência de destacamento medida para diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 6.5 m/min, 26.6 V.....	88

Tabela 4.14. Média amostral e desvio padrão da frequência de destacamento medida para diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 6.5 m/min, 28 V....	89
Tabela 4.15. Média amostral e desvio padrão da frequência de destacamento medida para diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 6.5 m/min, 29.4 V.....	91
Tabela 4.16. Média amostral e desvio padrão da frequência de destacamento medida para diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 7 m/min, 27 V.....	92
Tabela 4.17. Média amostral e desvio padrão da frequência de destacamento medida para diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 7 m/min, 29 V.....	94
Tabela 4.18. Média amostral e desvio padrão da frequência de destacamento medida para diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 7.2 m/min, 28 V....	95
Tabela 4.19. Planejamento experimental do tamanho da gota.....	97
Tabela 4.20. Resíduos para o modelo da área da gota.....	100
Tabela 4.21. Desvio padrão e intervalo de confiança para as respostas do modelo da área das gotas.....	103
Tabela 4.22. Resíduos para o modelo do diâmetro das gotas.....	105
Tabela 4.23. Desvio padrão e intervalo de confiança para as respostas do modelo do diâmetro das gotas.....	107
Tabela 4.24. Planejamento experimental da frequência de destacamento da gota.....	110
Tabela 4.25. Resíduos para o modelo de frequência de destacamento das gotas.....	113
Tabela 4.26. Desvio padrão e intervalo de confiança para as respostas do modelo de frequência de destacamento das gotas.....	114
Tabela 5.1. Coeficiente de variação das medições de diâmetro e frequência de destacamento das gotas.....	123
Tabela 5.2. Medições de corrente nos pontos de trabalho.....	125

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Mapas esquemáticos dos modos principais de transferência metálica da corrente e da tensão (adaptado de Scotti e Ponomarev, 2008 e Ponomarev <i>et al.</i> , 2009).....	9
Figura 2.2. Ilustração esquemática do comportamento do tamanho e da frequência de destacamento das gotas ao redor da corrente de transição.....	11
Figura 2.3. Ilustração do efeito da Força 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).....	13
Figura 2.4. Representação da superfície de resposta em função de duas variáveis de entrada, $x_1$ e $x_2$ (adaptado de Myers 2003).....	15
Figura 2.5. <i>Planejamento Composto Central</i> (PCC). Níveis codificados para duas variáveis de entrada ( $x_1, x_2$ ).....	16
Figura 2.6. Passos fundamentais em processamento de imagens digitais (adaptado de Gonzales e Wood, 2007).....	25
Figura 2.7. Representação de: (a) amostragem da imagem, (b) quantização em níveis de cinza (adaptado de Castleman, 1996).....	26
Figura 2.8. Digitalização de uma imagem (adaptado de Gonzales e Wood, 2008).....	27
Figura 2.9. Princípio da perfilografia aplicado a soldagem. (Bálsamo <i>et al.</i> , 2000).....	29
Figura 2.10. Formação de ondas planas a partir de ondas esféricas mediante o uso de uma lente convergente. A letra $F$ representa o foco imagem da lente. A luz incidente se propaga na direção das setas.....	29
Figura 2.11. Sistema expensor de feixe <i>laser</i> de Galileu. A luz incidente se propaga na direção das setas.....	30
Figura 2.12. Expensor de feixe <i>laser</i> de <i>Kepler</i> . As linhas verticais e curvas representam as frentes de onda. $F$ representa o foco de cada lente. $DL$ é a distância entre as duas lentes. A luz incidente se propaga na direção das setas.....	31
Figura 2.13. Aplicação da limiar. (a) Imagem de transferência goticular; (b) com valor limiar de 100; (c) com valor limiar de 150; (d) com valor limiar de 200.....	34

Figura 3.1. Disposição “z” da lente e os espelhos no expensor de feixe <i>laser</i> . Vista de cima. A luz incidente se propaga na direção das setas.....	40
Figura 3.2. Bancada experimental.....	40
Figura 3.3. Bancada experimental.....	41
Figura 3.4. Diâmetro do feixe laser no arame-eletrodo.....	42
Figura 3.5. Iluminação do arame-eletrodo com o feixe <i>laser</i> expandido. Pode-se observar como a sombra dos alvos é projetada na câmera fixa na parte posterior.....	42
Figura 3.6. Diagrama da mesa linear (Franco, 2007).....	44
Figura 3.7. Sincronização dos sinais adquiridos com as imagens durante a transferência em curto circuito a uma taxa de 1000 fps ( <i>frames</i> por segundo).....	47
Figura 3.8. Modo combinado goticular projetado e globular. Ponto de trabalho: 28 V e 5.5 m/min.....	49
Figura 3.9. Modo combinado goticular projetado e goticular com alongamento. Ponto de trabalho: 29.5 V e 7.5 m/min.....	49
Figura 3.10. <i>Planejamento Composto Central</i> da metodologia experimental.....	50
Figura 3.11. Sequência de 6 imagens obtidas do modo de transferência goticular em 6 ms de soldagem.....	51
Figura 3.12. Ruído nas imagens adquiridas.....	52
Figura 3.13. Aplicação dos filtros; (a) imagem original; (b) com o filtro gaussiano; (c) com o filtro de mediana.....	53
Figura 3.14. Limiarização da imagem com o método de Otsu; (a) e (c) imagens originais; (b) e (d) imagens limiarizadas correspondentes.....	54
Figura 3.15. Processo de erosão da imagem; (a) imagem original; (b) imagem limiarizada; (c) imagem erodida.....	54
Figura 3.16. Elemento estruturante. O quadro cinza representa o pixel em estudo, ele toma o valor de zero (preto). Os quadros rotulados com ‘1’ representam o valor do fundo (branco) e ‘q’ representa qualquer valor (preto ou branco).....	55
Figura 3.17. Processo de rotulação; (a) imagem original; (b) imagem limiarizada e erodida; (c) primeiro processo de rotulação; (d) rotulação final, depois da igualação.....	56

Figura 3.18. Processamento sequencial de uma imagem; (a) imagem original; (b) imagem limiarizada e erodida; (c) remoção de ruído por tamanho a partir da segmentação.....	55
Figura 3.19. Processo para medir o tamanho da gota; (a) e (e) Imagens de transferência; (b) e (f) zona de influencia do arco onde se localiza a gota em vôo para suas respectivas imagens à esquerda; (c) e (g) resultados da nova segmentação com eliminação de ruído; (d) e (h) gota limpa para efeitos de comparação visual.	57
Figura 3.20. Região de análise para medir a frequência de destacamento.....	59
Figura 3.21. Faixas $\frac{1}{4}$ e $\frac{3}{4}$ que permitem calcular se uma gota está-se formando ou já se despreendeu do arame.....	60
Figura 4.1. Densidade de probabilidade VS Área da gota; ponto 5.8 m/min, 28 V.....	63
Figura 4.2. Densidade de probabilidade VS Diâmetro da gota; ponto 5.8 m/min, 28 V....	63
Figura 4.3. Probabilidade VS Resíduos do diâmetro das gotas; ponto 5.8 m/min, 28 V....	64
Figura 4.4. Densidade de probabilidade VS Área da gota; ponto 6 m/min, 27 V.....	65
Figura 4.5. Densidade de probabilidade VS Diâmetro da gota; ponto 6 m/min, 27 V.....	65
Figura 4.6. Probabilidade VS Resíduos do diâmetro das gotas; ponto 6 m/min, 27 V.....	66
Figura 4.7. Densidade de probabilidade VS Área da gota; ponto 6 m/min, 29 V.....	67
Figura 4.8. Densidade de probabilidade VS Diâmetro da gota; ponto 6 m/min, 29 V.....	67
Figura 4.9. Probabilidade VS Resíduos do diâmetro das gotas; ponto 6 m/min, 29 V.....	68
Figura 4.10. Densidade de probabilidade VS Área da gota; ponto 6.5 m/min, 26 V.....	69
Figura 4.11. Densidade de probabilidade VS Diâmetro da gota; ponto 6.5 m/min, 26.6V...	69
Figura 4.12. Probabilidade VS Resíduos do diâmetro das gotas; ponto 6.5 m/min, 26.6V.	70
Figura 4.13. Densidade de probabilidade VS Área da gota; ponto 6.5 m/min, 28 V.....	71
Figura 4.14. Densidade de probabilidade VS Diâmetro da gota; ponto 6.5 m/min, 28 V...	71
Figura 4.15. Probabilidade VS Resíduos do diâmetro das gotas; ponto 6.5 m/min, 28 V...	72
Figura 4.16. Densidade de probabilidade VS Área da gota; ponto 6.5 m/min, 29.4V.....	73
Figura 4.17. Densidade de probabilidade VS Diâmetro da gota; ponto 6.5 m/min, 29.4V.	73
Figura 4.18. Probabilidade VS Resíduos do diâmetro das gotas; ponto 6.5 m/min, 29.4V.	74
Figura 4.19. Densidade de probabilidade VS Área da gota; ponto 7 m/min, 27 V.....	75
Figura 4.20. Densidade de probabilidade VS Diâmetro da gota; ponto 7 m/min, 27 V.....	75
Figura 4.21. Probabilidade VS Resíduos do diâmetro das gotas; ponto 7 m/min, 27 V.....	76
Figura 4.22. Densidade de probabilidade VS Área da gota; ponto 7 m/min, 29 V.....	77

Figura 4.23. Densidade de probabilidade VS Diâmetro da gota; ponto 7 m/min, 29 V.....	77
Figura 4.24. Probabilidade VS Resíduos do diâmetro das gotas; ponto 7 m/min, 29 V.....	78
Figura 4.25. Densidade de probabilidade VS Tamanho da gota; ponto 7.2 m/min, 28 V...	79
Figura 4.26. Densidade de probabilidade VS Diâmetro da gota; ponto 7.2 m/min, 28 V...	79
Figura 4.27. Probabilidade VS Resíduos do diâmetro das gotas; ponto 7.2 m/min, 28V....	80
Figura 4.28. Valores de tamanho da gota (área) com respeito ao <i>Planejamento Composto Central</i> .....	81
Figura 4.29. Densidade de probabilidade VS frequência de destacamento; ponto 5.8m/min, 28 V.....	82
Figura 4.30. Probabilidade VS Resíduos da frequência de destacamento;ponto 5.8 m/min, 28 V.....	83
Figura 4.31. Densidade de probabilidade VS frequência de destacamento; ponto 6 m/min, 27 V.....	84
Figura 4.32. Probabilidade VS Resíduos da frequência de destacamento; ponto 6 m/min, 27 V.....	84
Figura 4.33. Densidade de probabilidade VS frequência de destacamento; ponto 6 m/min, 29 V.....	85
Figura 4.34. Probabilidade VS Resíduos da frequência de destacamento; ponto 6 m/min, 29 V.....	86
Figura 4.35. Densidade de probabilidade VS frequência de destacamento; ponto 6.5 m/min, 26.6 V.....	87
Figura 4.36. Probabilidade VS Resíduos da frequência de destacamento; ponto 6.5 m/min, 26.6 V.....	87
Figura 4.37. Densidade de probabilidade VS frequência de destacamento; ponto 6.5 m/min, 28 V.....	88
Figura 4.38. Probabilidade VS Resíduos da frequência de destacamento; ponto 6.5 m/min, 28 V.....	89
Figura 4.39. Densidade de probabilidade VS frequência de destacamento; ponto 6.5 m/min, 29.4 V.....	90
Figura 4.40. Probabilidade VS Resíduos da frequência de destacamento; ponto 6.5 m/min, 29.4 V.....	90

Figura 4.41. Densidade de probabilidade VS frequência de destacamento; ponto 7 m/min, 27 V.....	91
Figura 4.42. Probabilidade VS Resíduos da frequência de destacamento; ponto 7 m/min, 27 V.....	92
Figura 4.43. Densidade de probabilidade VS frequência de destacamento; ponto 7 m/min, 29 V.....	93
Figura 4.44. Probabilidade VS Resíduos da frequência de destacamento; ponto 7 m/min, 29 V.....	93
Figura 4.45. Densidade de probabilidade VS frequência de destacamento; ponto 7.2m/min, 28 V.....	94
Figura 4.46. Probabilidade VS Resíduos da frequência de destacamento; ponto 7.2 m/min, 28 V.....	95
Figura 4.47. Valores de frequência de destacamento com respeito ao PCC.....	96
Figura 4.48. Valores medidos nos experimentos ( $y_i$ ) VS Valores calculados pelo modelo $\hat{y}_i$ para a área da gota.....	100
Figura 4.49. Resíduos ( $e_i$ ) VS Valores calculados pelo modelo $\hat{y}_i$ para a área da gota..	101
Figura 4.50. Probabilidade normal VS Resíduos ( $e_i$ ) para a área da gota .....	101
Figura 4.51. Superfície de resposta do modelo da área das gotas.....	102
Figura 4.52. Superfície de resposta do modelo da área das gotas em função da velocidade de alimentação do arame.....	103
Figura 4.53. Superfície de resposta do modelo da área das gotas em função da tensão...	104
Figura 4.54. Contornos da superfície de resposta do modelo da área da gota com respeito a os fatores de entrada.....	104
Figura 4.55. Probabilidade normal VS Resíduos ( $e_i$ ) para o diâmetro da gota.....	106
Figura 4.56. Superfície de resposta do modelo do diâmetro das gotas.....	107
Figura 4.57. Superfície de resposta do modelo do diâmetro das gotas em função da velocidade de arame.....	108
Figura 4.58. Superfície de resposta do modelo do diâmetro das gotas em função da tensão.....	108
Figura 4.59. Contornos da superfície de resposta do modelo do diâmetro com respeito a os fatores de entrada.....	109

Figura 4.60. Valores medidos nos experimentos ( $y_i$ ) VS Valores calculados pelo modelo $\hat{y}_i$ para frequência de destacamento das gotas.....	111
Figura 4.61. Resíduos ( $e_i$ ) VS Valores calculados pelo modelo $\hat{y}_i$ para a frequência de destacamento das gota.....	112
Figura 4.62. Probabilidade normal VS Resíduos ( $e_i$ ) para a frequência de destacamento das gotas.....	112
Figura 4.63. Superfície de resposta do modelo da frequência de destacamento das gotas.....	115
Figura 4.64. Superfície de resposta do modelo da frequência de destacamento das gotas em função da velocidade de arame.....	115
Figura 4.65. Superfície de resposta do modelo da frequência de destacamento das gotas em função da tensão.....	116
Figura 4.66. Contornos da superfície de resposta do modelo da frequência de destacamento das gotas com respeito a os fatores de entrada.....	116
Figura 4.67. Bloco que cumpre a função do modelo no Simulink e representa a equação de segunda ordem que acompanha a figura.....	118
Figura 4.68. Blocos multiplicadores.....	118
Figura 4.69. Protótipo virtual.....	119
Figura 4.70. Simulação do processo de transferência metálica em diferentes vista e tempos. Fatores de entrada 7m/s e 27 V.....	120
Figura 4.71. Simulação da transferência goticular para três velocidades de arame e uma tensão constante de 28 V; (a) 5.8 m/min; (b) 6.5 m/min; (c) 7.2 m/min.....	121
Figura 5.1. Superfície de resposta para o modelo de corrente.....	126
Figura 5.2. Superfície de resposta do modelo de corrente em função da velocidade de arame.....	126
Figura 5.3. Superfície de resposta do modelo de corrente em função da tensão.....	126
Figura 5.4. Contornos da superfície de resposta do modelo da corrente com respeito a os fatores de entrada.....	127

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

$D_o$	- Diâmetro do feixe <i>laser</i> expandido
$DFC$	- Comprimento focal da lente convergente;
$DFD$	- Comprimento focal da lente divergente
$D_i$	-Diâmetro do feixe <i>laser</i> inicial
$DL$	- Distância entre as duas lentes ou espelhos
$e_i$	- Medida do Erro
$F$	- Foco
$f_c$	- Comprimento focal da lente convergente
$f_d$	- Comprimento focal da lente divergente
$F_L$	- Forças de Lorentz
fps	- frames por segundo (quadros por segundo)
GMAW	- Gas Metal Arc Welding (Soldagem a arco elétrico com gás de proteção)
IIW	- International Institute of Welding
MAG	- Metal Active Gas (Solda a eletrodo consumível com gás ativo)
MIG	- Metal inert Gas (Solda a eletrodo consumível com gás inerte)
MSR	- Metodologia de Superfície de Resposta
$MP$	- Magnifying Power
PCC	- Planejamento Composto Central (Central Composite Design)
$R^2$ ajustado	- Coeficiente de determinação múltipla ajustado
RAM	- Random Access Memory (Memória de acesso aleatório)
$s$	- Desvio padrão
$SQT$	- Soma total dos quadrados
$SQE$	- Soma dos resíduos quadrados, identificada como
TBEF	-Teoria do Balanço Estático de Forças
TIP	- Teoria da Instabilidade Pinch
$y_i$	- Resposta medida $i$
$\hat{y}_i$	- Resposta calculada $i$ (do modelo)
$\hat{\sigma}^2$	- Variância
$\beta_i$	- Coeficiente de regressão $i$

# 1 – INTRODUÇÃO

O processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) é referenciado como um dos mais utilizados na produção industrial e seu funcionamento, baseado num arame-eletrodo consumível alimentado continuamente, facilitam sua automação e confere ao processo maior produtividade. O processo foi concebido na década de 1920 e introduzido no mercado no final da década de 1940. Sua evolução foi gradual, mas tem sido acrescentada nas últimas décadas em conjunto com o avanço da eletrônica e da informática, as quais possibilitaram melhoras significativas das fontes de soldagem e a implementação de novas aplicações.

O processo GMAW pode ser utilizado com todos os metais comerciais e ligas como, por exemplo, 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. Esta escolha é importante também porque de ela depende o modo de transferência metálica que se apresente no processo, o qual determina fatores tão importantes como a geometria, a microestrutura e as propriedades mecânicas da solda.

Os modos de transferência metálica naturais num processo de soldagem GMAW se apresentam em duas classes: a de curto circuito e a que agrupa os modos de transferência por voo livre (Ponomarev *et al.*, 2009). Nesta última classe se encontra o modo de transferência goticular projetado, este tipo de transferência é caracterizado por sua alta densidade de corrente, por uma alta penetração, por uma alta estabilidade do arco e por apresentar soldas quase livres de respingos.

As altas densidades de corrente presente no modo goticular também produzem algumas de suas desvantagens como sua limitação para trabalhar com chapas finas e para soldar fora da posição plana. Estas limitações podem-se superar com o uso de processos controlados de soldagem como o GMA-P (GMAW pulsado), mas estes processos necessitam fontes de energia sofisticadas e custosas, onde a corrente oscila entre um nível alto (corrente de pulso), onde se produz o modo de transferência goticular e um nível baixo (corrente de base) no qual não se apresenta este tipo de transferência.

Seja para trabalhar no modo de transferência goticular natural ou controlado, os parâmetros do processo têm que ser estabelecidos de maneira adequada, procurando obter ao final, um cordão de solda com boa aparência e qualidade. Para se encontrar os melhores parâmetros podem-se utilizar modelos do processo que permitam encontrar respostas determinadas a partir de diferentes variáveis de entrada. A concepção dos modelos é realizada utilizando uma abordagem teórica como no caso da Teoria do Balanço Estático de Forças ou podem ser modelos empíricos determinados a partir de análises estáticas de diferentes experimentos.

No presente trabalho, diferentes modelos empíricos foram estabelecidos a partir de um planejamento experimental baseado na Metodologia de Superfície de Resposta. Os modelos apontam a estudar dois parâmetros fundamentais no modo goticular projetado que são o tamanho e a frequência de destacamento das gotas em transferência. Para desenvolver os modelos foi necessária uma medição destes parâmetros em diferentes processos de soldagem. A medição é feita utilizando um programa computacional desenvolvido neste trabalho que se baseia no processamento de imagens digitais.

Para realizar as medições correspondentes, que foram base dos modelos encontrados, utilizou-se filmagem da transferência metálica nos diferentes experimentos de soldagem. Esta filmagem é feita com uma câmera de alta velocidade e a técnica de iluminação conhecida como Perfilografia. Assim pode-se estudar o processo de formação e destacamento das gotas e quantificar o tamanho de estas quando se encontram em voo entre o arame e a peça.

A partir dos modelos encontrados de tamanho e frequência de destacamento foi desenvolvido um protótipo de solda virtual, o qual proporciona informação visual das respostas dos modelos na transferência goticular projetada. Esta ferramenta permite estudar de maneira prática e direta a influência dos parâmetros de solda nas respostas dos modelos. No caso deste trabalho, o protótipo funciona na região de estudo e com as condições estabelecidas pelo planejamento experimental e se constitui em uma base de futuros trabalhos que apontem à concepção de um equipamento completo de soldagem virtual.

## **1.2 – JUSTIFICATIVA DO TRABALHO**

Devido à grande correlação dos parâmetros envolvidos num processo de soldagem e a importância que estes têm na qualidade e no aspecto final da solda, é importante o estudo e a análise de modelos de soldagem que permitam ter uma noção das respostas que podem se apresentar no processo em referência a determinados parâmetros de entrada.

A concepção de modelos de soldagem GMAW tem um amplo caminho percorrido, pelo que se pode encontrar desde modelos teóricos simples baseados no estudo das forças que atuam idealmente sobre a gota em formação, até modelos de elevada complexidade que incluem simulações computacionais de alto nível. Estes modelos em geral funcionam com base na restrição de parâmetros devido à impossibilidade de conhecer com exatidão o comportamento de todos os parâmetros envolvidos durante o processo.

Neste trabalho decidiu-se desenvolver uma modelagem empírica que trabalhara diretamente com as respostas dos processos, o que minimiza a restrição que impõe o conhecimento dos parâmetros utilizados e permite ter uma boa aproximação do comportamento das respostas. O modo de transferência goticular foi escolhido por sua importância nos processos industriais, especialmente em sua forma controlada, a qual cada dia apresenta novas e melhoradas aplicações, mas precisa uma definição muito clara de seus parâmetros.

Em relação a outros modos de transferência, o modo goticular projetado também apresenta uma facilidade na hora de fazer uma análise estatística de suas variáveis, o que permite sua boa adequação em métodos de estudo como a metodologia de superfície de resposta.

## **1.3 – OBJETIVOS**

### **1.3.1 – Objetivo geral**

Desenvolver a modelagem empírica do tamanho e a frequência de destacamento das gotas em transferência goticular projetada, utilizando metodologia de superfície de respostas a partir de dados obtidos do processamento de imagens digitais adquiridas por meio de uma câmera de alta velocidade.

### **1.3.2 – Objetivos específicos**

- Estabelecer os parâmetros adequados da câmera de alta velocidade e do sistema de iluminação para capturar imagens de transferência metálica sem perda de informação.
- Determinar por meio dos parâmetros básicos de uma fonte de energia de tipo tensão constante, velocidade de alimentação de arame e tensão, uma região de trabalho na qual só se apresente o modo de transferência goticular projetado
- Estabelecer, a partir do planejamento experimental baseado na metodologia de superfície de resposta e na região de análise, os pontos de trabalho correspondentes à velocidade de alimentação de arame e tensão que permitam encontrar os modelos requeridos.
- Desenvolver programas computacionais que permitam medir o tamanho e a frequência de destacamento das gotas em transferência a partir das imagens obtidas na filmagem dos processos de soldagem nos pontos de trabalho.
- Determinar os modelos e as superfícies de resposta correspondentes ao tamanho e a frequência de destacamento das gotas na transferência goticular projetada nas condições de trabalho especificadas.
- Utilizar os modelos encontrados para desenvolver uma simulação visual que permita observar a variação do tamanho e da frequência de destacamento das gotas com relação à velocidade de alimentação de arame e à tensão utilizadas na região de trabalho.

## **1.4 – ESTRUTURA DO DOCUMENTO**

Esta dissertação está dividida em seis capítulos. O Capítulo Dois apresenta uma revisão bibliográfica dos principais tópicos relacionados com o trabalho, a soldagem GMAW, o modo de transferência gótica, a metodologia de superfície de resposta e o processamento de imagens digitais.

O Capítulo Três descreve os equipamentos e a metodologia utilizados para adquirir as imagens e desenvolver os programas que permitem medir as respostas empregadas na concepção dos modelos.

No Capítulo Quatro são mostrados os resultados obtidos nas medições feitas, o processo de modelagem e as superfícies de resposta encontradas para cada modelo. No final do capítulo se apresenta a simulação virtual desenvolvida para o modo de transferência gótica projetada.

Para finalizar, nos Capítulos Cinco e Seis é feita a discussão dos resultados obtidos e se apresentam propostas de trabalhos futuros e as conclusões finais.

## 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, o modo de transferência goticular e os modelos teóricos e empíricos. Em seguida é realizada uma revisão de conceitos que envolvem a modelagem de processos pela Metodologia de Superfície de Resposta. Finalmente são tratadas noções básicas de processamento de imagens digitais e da técnica de aquisição de imagens de transferência metálica utilizada.

### 2.1 – SOLDAGEM GMAW

GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) é um processo de soldagem que baseia seu funcionamento numa fonte de calor produzida por um arco elétrico mantido entre a extremidade de um arame-eletrodo nu consumível, alimentado continuamente, e a peça a soldar. A região de solda é protegida por uma atmosfera de *gás inerte* (comercialmente Ar e He) ou *ativo* (CO<sub>2</sub>) ou misturas (onde pode incluir N<sub>2</sub> ou O<sub>2</sub>), 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 CO<sub>2</sub> puro). A sigla GMAW abrange o uso de qualquer tipo de gás de proteção (Scotti e Ponomarev, 2008).

O processo GMAW é caracterizado pela transferência de metal através do arco. De acordo com Haidar *et al.* (1996), o calor gerado pelo arco funde a ponta do arame formando gotas que se transferem para a poça de fusão. A formação das gotas de metal é governada por vários fatores como: o equilíbrio de forças que atuam sobre a gota, fenômenos térmicos no arame, calor transferido da coluna de plasma e a distribuição da densidade de corrente na gota de metal. O balanço entre os fatores determina a forma, o volume e a frequência de destacamento das gotas que são formadas na ponta do arame, que por sua vez caracterizam os modos de transferência metálica no processo de soldagem. O balanço entre as velocidades de alimentação e fusão do arame é estabelecido automaticamente. Davies *et al.*, (2000) aponta a importância de estudar os modos de transferência num processo de soldagem dado que as suas características vão influenciar a geometria, a microestrutura e

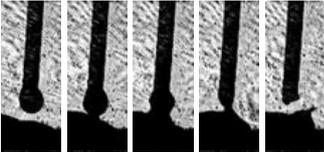
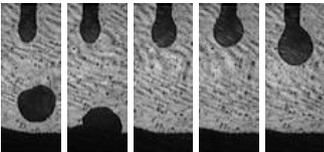
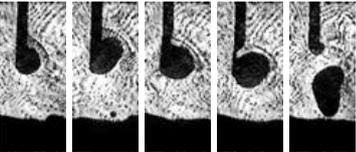
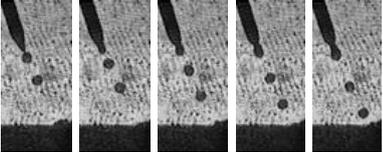
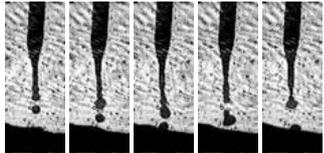
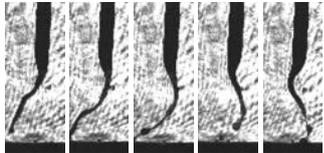
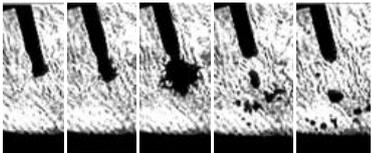
as propriedades mecânicas da solda, além de afetar a estabilidade do processo, a geração de respingos e a capacidade de realizar soldas fora da posição plana.

Os modos de transferência metálica e seu comportamento são influenciados pelos parâmetros do processo. Os parâmetros são entendidos como toda variável que possa alterar as características do cordão de solda. Os parâmetros podem ser identificados como *fatores de entrada* ou como *respostas*. Os primeiros são usados para preparar o processo de soldagem e regular os equipamentos para a operação como, por exemplo, tipo de gás de proteção, diâmetro do arame, tensão de regulagem. Os segundos são os parâmetros governados pelos fatores de entrada, no caso da corrente em fontes de energia de tipo tensão constante, que é obtida pela regulagem de velocidade de alimentação. Scotti e Ponomarev, (2008) referem que existe uma correlação e dependência muito grande entre todos os parâmetros a serem regulados no processo GMAW e dificilmente se consegue regular só um parâmetro sem alterar as respostas. O número de parâmetros a serem regulados no processo é muito grande e todos eles, em maior ou menor grau, governam a saída do processo, 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. A seleção dos parâmetros, então, deve ser feita de forma tal que o metal seja transferido de maneira adequada e o processo ocorra de forma estável (Resende *et al.*, 2009).

### **2.1.1 – Modos de transferência metálica no processo GMAW**

Ponomarev *et al.*, (2009) explica que os modos de transferência metálica natural classificam-se em duas *classes*. A primeira é denominada *transferência por curto-circuito*, na qual há contato da gota com a poça antes do destacamento. A segunda é conhecida como *transferência por vôo livre*, em que a gota destaca-se antes do contato com a poça. A Tabela 2.1 apresenta as duas classes e os principais modos naturais de transferência no processo GMAW. A Figura 2.1 mostra esquematicamente os campos operacionais das formas principais de transferência metálica na soldagem GMAW em função da corrente e da tensão.

Tabela 2.1. Classes e respectivos modos naturais de transferência metálica no processo GMAW (adaptado de Scotti e Ponomarev, 2008 e Ponomarev *et al.*, 2009).

<b>Classe de transferência</b>	<b>Modo de transferência</b>	<b>Imagem</b>	<b>Força (efeito) governante principal</b>
Por curto-circuito	Por curto-circuito		Tensão superficial e eletromagnética
Por vôo livre	Globular		Tensão superficial e gravitacional
	Globular repulsiva		Tensão superficial, gravitacional e de reação
	Goticular Projetada		Eletromagnética
	Goticular com alongamento		
	Goticular rotacional		
	Explosiva		Evaporação súbita de material com menor ponto de ebulição

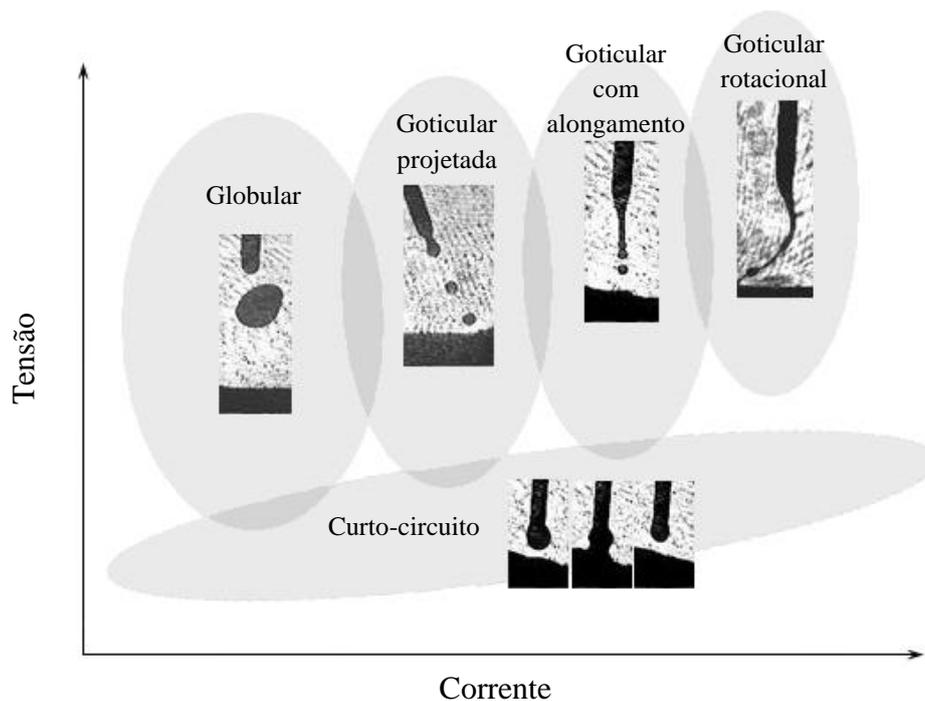


Figura 2.1. Mapas esquemáticos dos modos principais de transferência metálica da corrente e da tensão (adaptado de Scotti e Ponomarev, 2008 e Ponomarev *et al.*, 2009).

Além dos modos de transferência natural, existem no 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 e por curto-circuito controlado. O segundo grupo agrupa modos de transferência que se caracterizam por apresentar dois ou até mesmo três dos modos naturais, de forma intercalada, seqüencial, repetitiva e sem intervenção do operador ou controle do equipamento (Ponomarev *et al.*, 2009).

### 2.1.2 – Transferência Goticular Projetada

A transferência *goticular projetada* (ou simplesmente goticular), conhecida em inglês pelo termo *spray* ou *projected spray*, pertence à segunda classe dos modos naturais de transferência metálica. A transferência ocorre basicamente com gases de proteção a base de argônio e com eletrodo positivo. Como pode-se ver na Tabela 2.1 e na Figura 2.1, o modo é caracterizado pela transferência de pequenas gotas uniformes (com o diâmetro próximo ao do eletrodo) de forma sequencial, em alta frequência (na ordem de centenas

por segundo). O IIW (*International Institute of Welding*) definiu que no modo de transferência goticular o diâmetro das gotas é menor que 1.25 vezes o diâmetro do eletrodo (Iordachescu *et al.*, 2006). Durante o processo a transferência apresenta uma elevada estabilidade do arco, de maneira que a corrente e a tensão não apresentam variações significativas. Com o aumento da corrente o tamanho das gotas em transferência se reduz e a frequência de destacamento aumenta (Scotti e Ponomarev, 2008).

Devido às densidades de corrente manifestadas durante o modo goticular, o efeito das forças eletromagnéticas domina a transferência metálica, pelo que as gotas são direcionadas para a poça eliminando do processo quase todos os respingos (Hu e Tsai, 2006). A transferência goticular está relacionada com altas correntes e altas temperaturas, o que dificulta ou inviabiliza a soldagem fora da posição plana, pela formação de uma poça de fusão grande e difícil de controlar; a soldagem de chapas finas também se dificulta, pela facilidade de furar o metal de base (Modenesi, 2001). Em geral seu uso se limita a chapas maiores que 3 mm, onde é efetivo por produzir uma alta penetração, pelo que é muito utilizada em caldeiras pesadas e construção naval.

Para que a transferência goticular possa ocorrer, a corrente de soldagem tem que ultrapassar um nível crítico, uma faixa de corrente, denominada de *corrente de transição*. Esta corrente depende de vários fatores de entrada, entre os principais encontram-se, o material, o diâmetro e o comprimento energizado do eletrodo e o tipo de gás de proteção. Como regra prática, quanto maior a resistividade elétrica, menor ponto de fusão, menor o diâmetro e maior o comprimento energizado, menor é a corrente de transição (Scotti e Ponomarev, 2008). O gás é o meio ionizante no processo, assim, além de proteger o arame, a poça e o metal em transferência da contaminação proveniente da atmosfera, confere as propriedades de estabilidade do arco; características como o potencial de ionização e a condutividade térmica do gás de proteção são de extrema importância na determinação da corrente de transição e, em geral, no comportamento dos modos de transferência. Scotti (2000), por exemplo, demonstrou que a mudança de Ar ultrapuro para Ar com pureza comercial, como gás de proteção, altera a corrente de transição globular/goticular e a frequência de destacamento no modo de transferência goticular. Resende *et al.*, (2009) apresentam uma metodologia que permite mapear os valores de

corrente de transição utilizando a técnica de Perfilografia com filmagem digital a alta velocidade sincronizada com sinais elétricos de corrente e tensão. A medida em que a corrente aumenta o tamanho da gota se reduz e a frequência de destacamento aumenta o tamanho da gota se reduz e a frequência de destacamento aumenta (Figura 2.2).

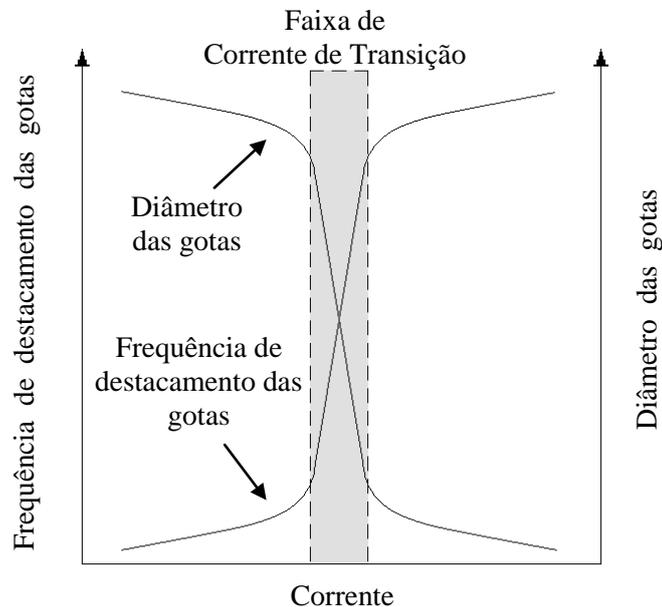


Figura 2.2. Ilustração esquemática do comportamento do tamanho e da frequência de destacamento das gotas ao redor da corrente de transição.

### 2.1.3 – Formação da gota e modelos teóricos

No estudo da soldagem GMAW diferentes modelos teóricos foram propostos com o fim de descrever o processo de formação das gotas nos modos de transferência metálica para assim prever parâmetros (respostas) como: diâmetros e tamanhos de gotas em transferência, correntes de transição, frequências de destacamento, entre outros. Os modelos mais conhecidos na literatura são a *Teoria do Balanço Estático de Forças* (TBEF) e a *Teoria da Instabilidade Pinch* (TIP).

A TBEF considera o balanço entre as forças que atuam na ponta do eletrodo; entre as principais podem-se encontrar as forças gravitacional, eletromagnética, de tensão superficial do metal fundido e arraste dos gases (Waszink e Graat, 1983). A TIP considera perturbações devidas à força magnética radial que atua numa coluna cilíndrica de metal líquido, neste caso, a coluna de metal fundido na ponta do eletrodo (Lancaster, 1984;

Allum, 1985). Kim e Eagar (1988, 1993) apontam a que a TBEF apresenta boa semelhança com a formação das gotas nos experimentos do modo de transferência globular, mas tem uma grande diferença com respeito aos modos goticular projetado e goticular com alongamento; a TIP consegue prever os tamanhos das gotas no modo de transferência goticular com alongamento, mas apresenta problemas com os modos de transferência goticular projetado e globular.

Nemchinsky (1994) opina que os modelos TBEF e TIP apresentam falha porque não consideram a forma da gota na ponta do eletrodo e desta dependem as duas forças mais importantes no processo de transferência, as forças eletromagnéticas e de tensão superficial. Com estas considerações, ele apresenta um modelo combinado (TBEF e TIP) e consegue melhores resultados. Simpson e Zhu (1995) desenvolveram um modelo unidimensional considerando as forças que atuam sobre a gota; o modelo considerou por primeira vez a forma da gota em função do tempo. Haidar e Lowke (1996) apresentam um modelo bidimensional em função do tempo; eles consideram algumas interações do arco com a gota e usam a técnica de *Volume of Fluid* (VOF) para calcular e simular a mudança da forma da gota. Fan e Kovacevic (1998, 1999), Wang e Tsai (2001), Wang *et al.* (2003) incluíram a interação da gota com a poça; estas interações estão fortemente relacionadas com a frequência de destacamento e o tamanho das gotas transferidas do eletrodo para a poça de fusão. Deste modo, os modelos continuam evoluindo, incorporando mais variáveis (como o momento e a massa das gotas) nos processos e concentrando sua atenção em fenômenos particulares, como Hu e Tsai (2008), que estuda a interação das gotas e a poça em chanfros ou Xu *et al.* (2008, 2009), que estuda os fenômenos de transporte na coluna de plasma.

Os modelos coincidem em afirmar que quando a corrente supera a corrente de transição as forças eletromagnéticas dominam a formação das gotas. Lowke (2009) concluiu que a transição da transferência globular para transferência goticular acontece quando as forças de pressão exercidas pela ação do campo magnético na gota superam as forças de tensão superficial para gotas com diâmetro igual ao diâmetro do eletrodo. As *Forças de Lorentz* ( $F_L$ ) são as forças mais importantes produzidas pela ação do campo magnético e da corrente que passa pelo eletrodo, estas são explicadas pelo *efeito Pinch*.

Em termos gerais, 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 podem ser desprezadas, 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 destacando a gota. Apresenta-se na Figura 2.3 uma representação do processo do empescoçamento produzido pelas forças de Lorentz.

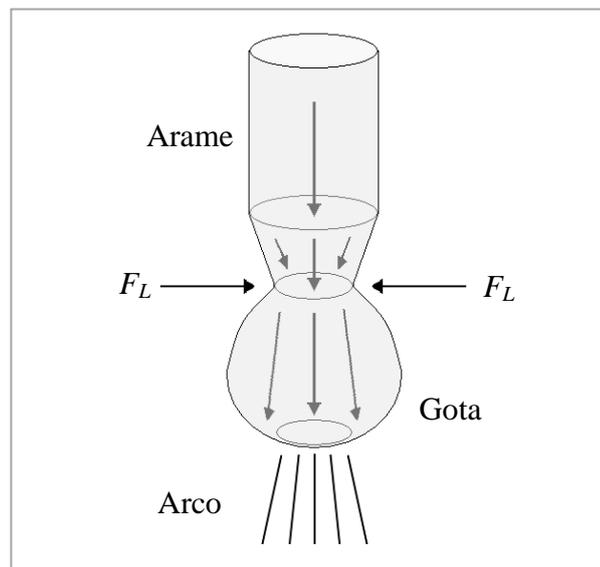


Figura 2.3. Ilustração do efeito da Força de Lorentz ( $F_L$ ) no processo de empescoçamento. As setas dentro do arame indicam o fluxo da corrente através do arame-eletrodo (sentido convencional com eletrodo ‘+’) (adaptado de Scotti e Ponomarev, 2008).

#### 2.1.4 – Modelos empíricos

As complexas correlações que existem entre os fatores que governam a transferência metálica e sua influência nas respostas fazem que os modelos teóricos sejam limitados no uso de parâmetros, fator pelo qual o estudo experimental continua mantendo sua importância. Baseados nestes estudos, outro tipo de modelos encontrados são os

conhecidos como *empíricos*. Os modelos empíricos são funções matemáticas obtidas através do estudo experimental dos parâmetros utilizados e seus efeitos em determinados processos. Estes modelos são utilizados frequentemente para encontrar as combinações de parâmetros que gerem as melhores respostas ou para descrever os fenômenos físicos que acontecem no processo.

Entre as técnicas de estudo mais utilizadas para estabelecer modelos empíricos encontram-se os *experimentos fatoriais* (usados, por exemplo, por Subramaniam *et al.*, 1999, e Praveen *et al.*, 2006, para identificar parâmetros de trabalho em GMAW-P), a *regressão linear* (usada por Murray, 2002, para encontrar correlação entre fatores de entrada e respostas em processos GMAW) e a *metodologia de superfície de resposta* (MSR) (usada por Correia *et al.*, 2005, para otimizar fatores de entrada com relação a características do cordão de solda). Benyounis e Olabi (2008) fazem um estudo bibliográfico e comparam estas e outras técnicas de estudo, como *redes neurais*, em diferentes processos de soldagem e destacam o interesse na adaptação de modelos baseados em MSR e o potencial que estes têm na otimização de parâmetros que consigam gerar processos de soldagem seguros, econômicos, de boa aparência e boa qualidade.

## **2.2 – METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA (MSR)**

A metodologia de superfície de resposta é um conjunto de técnicas estatísticas e matemáticas usadas para modelar processos nos quais as respostas sejam influenciadas por diferentes variáveis independentes (fatores de entrada). O modelo gerado é uma equação matemática que permite estimar o valor da resposta do processo em função das variáveis de estudo dentro da região de trabalho (Richetti, 2003).

O gráfico obtido a partir do modelo em função das variáveis de entrada é a superfície de resposta (Figura 2.4); permite inspecionar visualmente a resposta para certa região (valores) das variáveis de entrada e, assim, avaliar diretamente a sensibilidade do processo com respeito aos fatores de tratamento. Apresentada por Box e Wilson em 1951, a técnica tem sido utilizada frequentemente para responder questões de diferentes tipos, dentre as quais:

- Como uma resposta em particular é afetada por um dado conjunto de variáveis de entrada sobre uma determinada região de interesse?
- Qual ajuste das variáveis de entrada, se houver, fornecerá o resultado que satisfaça as especificações exigidas?
- Quais os valores das variáveis de entrada produzirão os melhores resultados para uma determinada resposta e qual a superfície de resposta na região próxima a este máximo ou mínimo? (Box *et al.*, 1978).

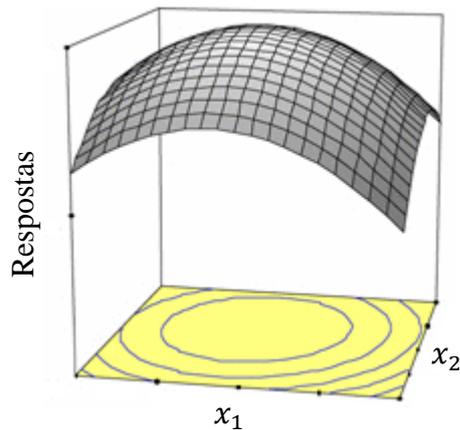


Figura 2.4. Representação da superfície de resposta em função de duas variáveis de entrada,  $x_1$  e  $x_2$  (adaptado de Myers 2003).

### 2.2.1 – Planejamento experimental

O planejamento experimental na MSR está baseado em um planejamento fatorial completo mais um planejamento estrela com réplicas do ponto central. Entre os mais conhecidos encontra-se o *Planejamento Composto Central (PCC)*, conhecido em inglês como “*Central Composite Design*”, o qual é usado em modelos de segunda ordem. Neste caso, os testes do planejamento fatorial são utilizados para a obtenção dos termos lineares e de interação, os testes do planejamento estrela fornecem os termos de segunda ordem e os testes replicados (no ponto central) fornecem uma estimativa do erro experimental. A Figura 2.5 apresenta uma representação do planejamento experimental baseado no PCC para duas variáveis de entrada.

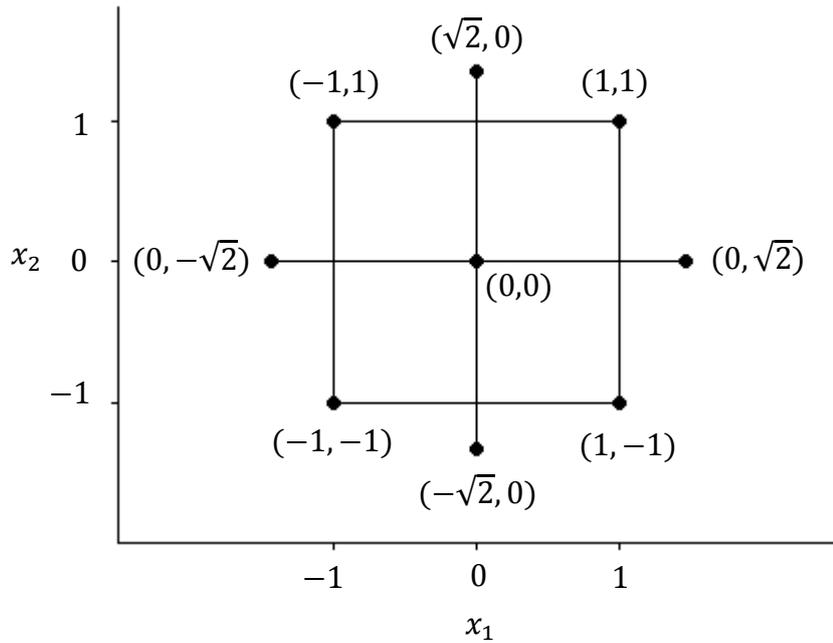


Figura 2.5. Planejamento Composto Central (PCC). Níveis codificados para duas variáveis de entrada ( $x_1, x_2$ ).

As unidades na Figura 2.5 representam os níveis codificados das variáveis de entrada, os quais são as distâncias (diferença de valores) das variáveis com respeito ao centro da região de análise. É necessário que estes níveis estejam codificados, senão as diferenças entre as unidades de medida das variáveis influenciam nas respostas do modelo. As variáveis de entrada são codificadas a partir da seguinte expressão:

$$x_j = \frac{\xi_j - [\max(\xi_j) + \min(\xi_j)]/2}{[\max(\xi_j) - \min(\xi_j)]/2} \quad (2.1)$$

, onde  $x_j$  indica o nível codificado e  $\xi$  o valor real da variável de entrada,  $j$  representa a variável de entrada;  $\max(\xi_j)$  e  $\min(\xi_j)$  são os valores reais do planejamento fatorial. Depois de ter a região de estudo os valores dos níveis codificados e das variáveis de entrada são estabelecidos pelo PCC, mas as respostas do modelo inicial estão dadas em função dos níveis codificados, assim que a Equação (2.1) é utilizada para traduzir as respostas do modelo aos valores reais (modelo final).

Myers *et al.* (2009) refere que os modelos de segundo ordem são frequentemente utilizados em MSR; algumas das razões são:

- Os modelos são flexíveis; a superfície gerada se adapta facilmente a muitos comportamentos encontrados nos experimentos.
- Os parâmetros que determinam os modelos são fáceis de encontrar, por exemplo, com estimativas de mínimos quadrados.
- Há uma considerável experiência prática que indica que os modelos de segunda ordem trabalham bem na resolução de problemas reais.

Em alguns casos podem-se usar modelos de primeira ordem que indiquem tendências na superfície de resposta; estas são usadas para determinar regiões de estudo propícias para estabelecer os modelos de segunda ordem.

### 2.2.2 – Regressão múltipla

Segundo Myers *et al.* (2009), para estabelecer o modelo, a metodologia de superfície de resposta faz uso da técnica de regressão múltipla. De forma geral um modelo de regressão linear simples tem a forma:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \varepsilon \quad (2.2)$$

Onde  $y$  representa a resposta,  $x$  a variável de entrada e  $\varepsilon$  o desvio aleatório do modelo e assume-se que este tem uma distribuição normal com média zero e variância  $\sigma^2$ . Os termos  $\beta_0$  e  $\beta_1$  representam os parâmetros que determinam o modelo e são chamados de *coeficientes de regressão*. Neste caso a resposta depende de uma única variável de entrada; No caso que a resposta dependa de  $k$  variáveis de entrada, o modelo será um modelo de regressão múltipla e terá a forma:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2.3)$$

Estes modelos de regressão múltipla são lineares porque são de primeira ordem e podem ser usados para determinar modelos mais complexos, por exemplo, modelos com interações entre duas variáveis como o seguinte:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon \quad (2.4)$$

, fazendo  $\beta_{12} = \beta_3$  e  $x_1x_2 = x_3$  se tem,

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \varepsilon \quad (2.5)$$

Para o caso de um modelo de segunda ordem:

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{11}x_1^2 + \beta_{22}x_2^2 + \beta_{12}x_1x_2 + \varepsilon \quad (2.6)$$

, fazendo  $x_3 = x_1^2$ ,  $x_4 = x_2^2$ ,  $x_5 = x_1x_2$ ,  $\beta_3 = \beta_{11}$ ,  $\beta_4 = \beta_{22}$  e  $\beta_5 = \beta_{12}$ , se tem:

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_4x_4 + \beta_5x_5 + \varepsilon \quad (2.7)$$

Em geral, qualquer modelo de regressão que seja linear nos coeficientes de regressão (os valores  $\beta_k$ ) é um modelo linear (em função dos coeficientes  $\beta_k$ ) sem importar a forma da superfície de resposta gerada (Myeres, 2009). Os coeficientes de regressão do modelo podem ser estimados utilizando o princípio dos mínimos quadrados.

### 2.2.3 – Princípio dos mínimos quadrados

Em geral, o planejamento experimental em um modelo de regressão múltipla pode ser desenvolvido como indicada na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Planejamento experimental ( $n \geq k$ ).

Observação	$x_1$	$x_2$	...	$x_j$	...	$x_k$	$y$
1	$x_{11}$	$x_{12}$	...	$x_{1j}$	...	$x_{1k}$	$y_1$
2	$x_{21}$	$x_{22}$	...	$x_{2j}$	...	$x_{2k}$	$y_2$
⋮	⋮	⋮		⋮		⋮	⋮
$i$	$x_{i1}$	$x_{i2}$	...	$x_{ij}$	...	$x_{ik}$	$y_i$
⋮	⋮	⋮		⋮		⋮	⋮
$n$	$x_{n1}$	$x_{n2}$	...	$x_{nj}$	...	$x_{nk}$	$y_n$

, onde:

$n$  é o número de observações;

$k$  é o número de variáveis de entrada;

$y_1, y_2, \dots, y_n$  são as respostas dos experimentos, com  $y_i$  como a  $i$ -ésima resposta;

$x_{ij}$ , é o valor do nível  $x_j$  na  $i$ -ésima observação da variável  $j$ .

O modelo da Equação (2.3) pode ser escrito em termos da Tabela 2.2 na forma

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i \quad (2.8)$$

, ou na forma

$$y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.9)$$

Para determinar os valores dos coeficientes de regressão ( $\beta$ 's) o princípio dos mínimos quadrados calcula os desvios ( $\varepsilon_i$ ) quadrados das respostas dos experimentos ( $y_i$ ) com base no modelo (Equação (2.6)), da seguinte forma:

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \quad (2.10)$$

, onde

$$L = \sum_{i=1}^n \left( y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} \right)^2 \quad (2.11)$$

$L$  é conhecida como a *função dos mínimos quadrados*; os valores dos  $\beta$ 's são determinados quando  $L$  seja mínima. As estimativas dos mínimos quadrados são conhecidas como os *estimadores* e são identificados como  $b_0, b_1, \dots, b_k$ , para que  $L$  seja mínima os estimadores devem satisfazer que:

$$\left. \frac{\partial L}{\partial \beta_0} \right|_{b_0, b_1, \dots, b_k} = -2 \sum_{i=1}^n \left( y_i - b_0 - \sum_{j=1}^k b_j x_{ij} \right) = 0 \quad (2.12)$$

, e

$$\left. \frac{\partial L}{\partial \beta_j} \right|_{b_0, b_1, \dots, b_k} = -2 \sum_{i=1}^n \left( y_i - b_0 - \sum_{j=1}^k b_j x_{ij} \right) x_{ij} = 0 \quad (2.13)$$

, onde  $j = 1, 2, \dots, k$ . O sistema de equações gerado a partir das Equações (2.12) e (2.13) pode-se escrever em forma matricial como:

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{i2} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{ik} \\ \sum_{i=1}^n x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{i1}^2 & \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{i2} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{ik} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_{ik} & \sum_{i=1}^n x_{ik}x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{ik}x_{i2} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{ik}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_{i1}y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_{ik}y_i \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Por outro lado, partindo das seguintes expressões:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Os termos da Equação (2.14) podem-se reescrever da seguinte forma:

$$\mathbf{X}^T \mathbf{y} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_{i1}y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_{ik}y_i \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

, onde  $\mathbf{X}^T$  é matriz transposta de  $\mathbf{X}$ , e

$$\mathbf{X}^T \mathbf{X} = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{i2} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{ik} \\ \sum_{i=1}^n x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{i1}^2 & \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{i2} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{ik} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_{ik} & \sum_{i=1}^n x_{ik}x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{ik}x_{i2} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{ik}^2 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

, assim, a Equação (2.14) pode-se escrever da seguinte forma:

$$\mathbf{X}^T \mathbf{X} \mathbf{b} = \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (2.18)$$

Deste modo, a forma de encontrar os estimadores é fazendo

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (2.19)$$

, onde  $\mathbf{b}$  é o vetor coluna com  $(k + 1)$  posições que contém os estimadores dos coeficientes de regressão ( $\beta$ 's). Assim, um modelo ajustado de segunda ordem, este pode ser escrito como:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{12} x_1 x_2 \quad (2.20)$$

As diferenças entre as respostas dos experimentos ( $y_i$ ) e as respostas do modelo ( $\hat{y}_i$ ) são conhecidas como os *resíduos* e são dados por:

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (2.21)$$

## 2.2.4 – Considerações finais dos modelos de regressão múltipla

Uma abordagem eficaz de avaliar a adequação do modelo é calcular os valores ( $\hat{y}_i$ ) ajustados e os resíduos ( $e_i$ ), e dispor graficamente algumas das quantidades calculadas. Examinam-se os gráficos para confirmar a opção do modelo ou para obter indicações de que o modelo não é o apropriado. Os gráficos a utilizar podem ser  $y_i$  versus  $\hat{y}_i$  e  $e_i$  versus

$\hat{y}_i$ , o gráfico de probabilidade dos resíduos, entre outros (Devore, 2006; Myers *et al.*, 2009).

A estimativa da variância do erro ( $\sigma^2$ ) do modelo de regressão múltipla baseia-se na soma dos resíduos quadrados, identificada como *SQE* (soma dos quadrados dos erros):

$$SQE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2.22)$$

Pelo fato de  $k + 1$  parâmetros ( $b_0, b_1, \dots, b_k$ ) terem sido estimados,  $k + 1$  graus de liberdade (*gl*) são perdidos, de modo que  $n - (k + 1)$  *gl* está associado a *SQE*, e

$$\hat{\sigma}^2 = s^2 = \frac{SQE}{n - (k + 1)} \quad (2.23)$$

A variação total explicada pelo modelo de regressão múltipla é o *coeficiente de determinação múltipla* ( $R^2$ ), dado por:

$$R^2 = 1 - \frac{SQE}{SQT} \quad (2.24)$$

, onde *SQT* é a soma total dos quadrados, a qual é uma medida quantitativa da quantidade total de variação nos valores observados e está dada por:

$$SQT = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.25)$$

, onde  $\bar{y}$  é a média amostral dada por:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (2.26)$$

Por depender  $R^2$  do número de estimadores, pode-se usar o *coeficiente de determinação múltipla ajustado*, dado por:

$$R^2 \text{ ajustado} = 1 - \frac{n - 1}{n - (k + 1)} \cdot \frac{SQE}{SQT} \quad (2.27)$$

Pelo fato dos  $y_i$  aparecerem nos sistemas matriciais das equações (2.14) e (2.19), os estimadores calculados pelo modelo ( $b_0, b_1, \dots, b_k$ ) são funções lineares dos  $y_i$ , assim, cada estimador tem sua própria distribuição normal. A variância para cada estimador é dada por:

$$\sigma_{b_j}^2 = \hat{\sigma}^2 C_{jj} \quad (2.28)$$

, onde  $C_{jj}$  é o  $(j, j)$ -ésimo elemento da matriz  $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}$ . O intervalo de confiança (CI) de  $100(1 - \alpha)\%$  (com respeito a uma distribuição  $t$ ) para cada estimador é dado por:

$$b_j - t_{\alpha/2, n-(k+1)} \cdot \sqrt{\hat{\sigma}^2 C_{jj}} \leq \beta_j \leq b_j + t_{\alpha/2, n-(k+1)} \cdot \sqrt{\hat{\sigma}^2 C_{jj}} \quad (2.29)$$

, o termo  $\sqrt{\hat{\sigma}^2 C_{jj}}$  é o chamado de desvio padrão do estimador ( $s_b$ ).

Para finalizar, a resposta do modelo e o desvio padrão da resposta calculada são as estimativas mais importantes; para um modelo de segunda ordem, a primeira é calculada com a Equação (2.20), em termos gerais a resposta pode-se expressar da forma:

$$\hat{y}(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^{(m)T} \mathbf{b} \quad (2.30)$$

, onde  $\mathbf{b} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y}$ , dado pela Equação (2.19). O vetor  $\mathbf{x}^{(m)}$  tem em suas posições o valor das variáveis que acompanham aos estimadores, a  $m$  indica a ordem do modelo, por exemplo, para o modelo de segunda ordem o vetor  $\mathbf{x}^{(m)}$  é:

$$\mathbf{x}^{(2)T} = [1, x_1, x_2, x_1^2, x_2^2, x_1 x_2] \quad (2.31)$$

Assumindo uma variância do erro ( $\sigma^2$ ) constante para o modelo, a variância das respostas calculadas por este é dada por:

$$Var[\hat{y}(\mathbf{x})] = \mathbf{x}^{(m)T} (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{x}^{(m)} \sigma^2 \quad (2.32)$$

, assim, o desvio padrão para uma resposta do modelo ( $\hat{y}(\mathbf{x})$ ) é dada por:

$$s_{\hat{y}(\mathbf{x})} = s \cdot \sqrt{\mathbf{x}^{(m)T} (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{x}^{(m)}} \quad (2.33)$$

O intervalo de confiança de  $100(1 - \alpha)\%$  é dado por:

$$\hat{y}(\mathbf{x}) \pm t_{\alpha/2, n-(k+1)} \cdot s \cdot \sqrt{\mathbf{x}^{(m)T} (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{x}^{(m)}} \quad (2.34)$$

### 2.3 – PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS

As técnicas de processamento de imagens digitais visam extrair informação específica das imagens. As técnicas utilizadas e as decisões geradas a partir da informação coletada são particulares de cada estudo. Atualmente as técnicas de processamento de imagens digitais 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 contêm princípios básicos, mas evoluem continuamente devido ao desenvolvimento constante de tecnologias de hardware e software que permitem maior eficiência nos algoritmos utilizados. No campo da soldagem são muitas as aplicações e inúmeros os trabalhos desenvolvidos que apresentam como base o processamento de imagens digitais em áreas como transferência metálica, medições geométricas de peças, estudos da poça de fusão, otimização de parâmetros, entre outras, o que contribui com o aperfeiçoamento dos processos de soldagem em geral.

A idéia de processar uma imagem está relacionada com a transformação da sua forma original para outra onde as características desejadas pelo observador estejam evidenciadas. A Figura 2.6 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 por meio de processamento de imagens.

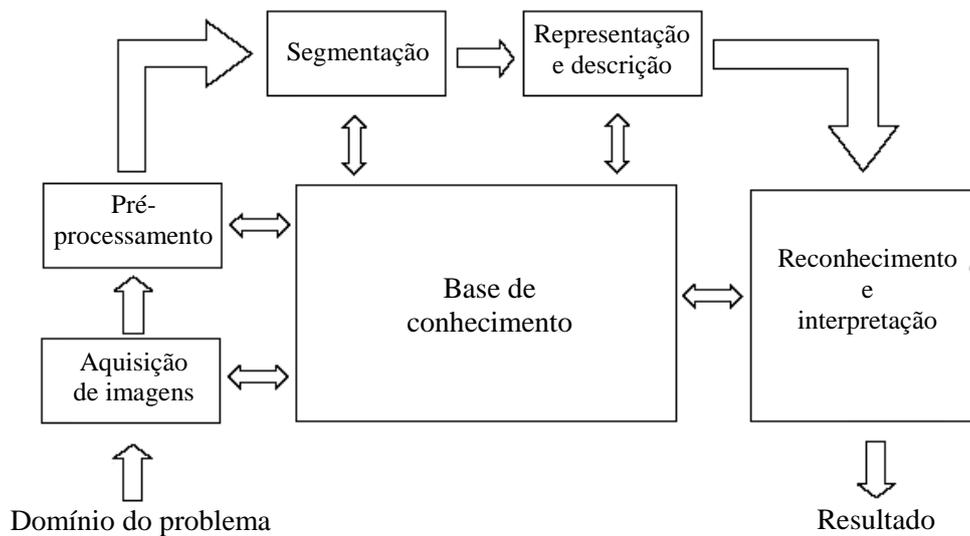


Figura 2.6. Passos fundamentais em processamento de imagens digitais (adaptado de Gonzales e Woods, 2007).

Como indica a Figura 2.6, o processamento de imagens abrange uma ampla escala de hardware, software e fundamentos teóricos que se iniciam nos sistemas e as metodologias para adquirir as imagens até os algoritmos encarregados de interpretar a informação e decidir como deve se proceder. 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* refere-se a uma função de intensidade luminosa bidimensional, denotada por  $f(x,y)$ , em que o valor ou amplitude 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  $N \times M$  como mostrado na Equação (2.31) em que cada elemento é uma quantidade discreta:

$$f(x, y) \approx \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \cdots & f(0, M-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \cdots & f(1, M-1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f(N-1,0) & f(N-1,1) & \cdots & f(N-1, M-1) \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

O lado direito da Equação (2.31) 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 2.7 (a) representa a amostragem da imagem e a Figura 2.7 (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  $L = 2^m$ .

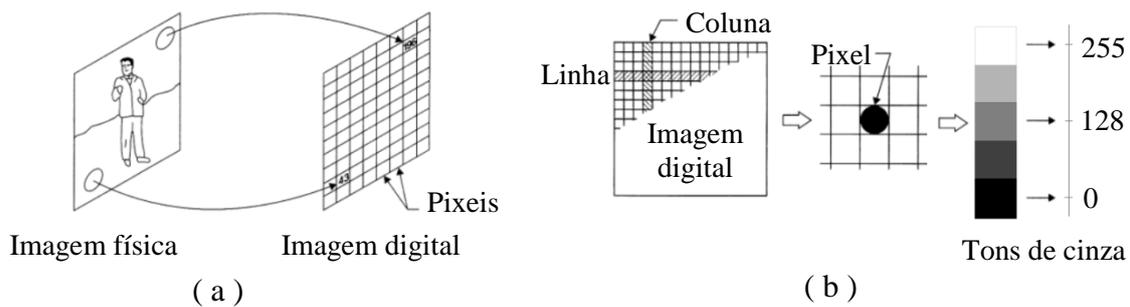


Figura 2.7. Representação de: (a) amostragem da imagem, (b) quantização em níveis de cinza (adaptado de Castleman, 1996).

Assim, o grau de detalhe de uma imagem é dado pela resolução espacial ( $N \times M$ ) e pelo número de níveis de cinza (ou de *bits*) que a representam, os quais estão diretamente ligados às características do sensor (a câmera) utilizado para capturá-la. Quanto maior for 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 Figura 2.8 representa a digitalização de uma imagem, neste caso com uma baixa resolução espacial.

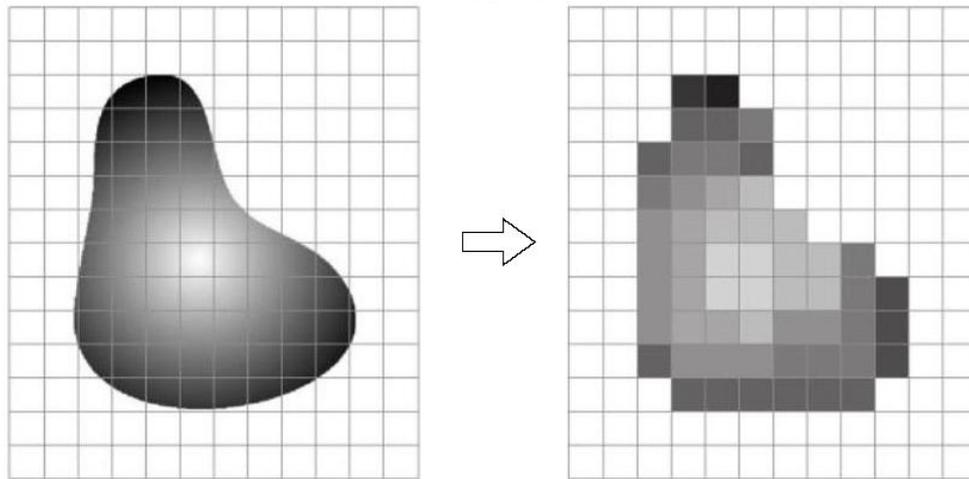


Figura 2.8. Digitalização de uma imagem (adaptado de Gonzales e Woods, 2002).

### 2.3.2 – Aquisição da Imagem e Perfilografia

Para processar imagens digitais, como é referido na Figura 2.6, o primeiro passo é a aquisição das imagens. A aquisição da imagem não só trata das características do sensor que se utiliza ou da digitalização destas, mas também é responsável pelo sistema de iluminação usado para capturá-las. Nos estudos de transferência metálica as imagens digitais utilizadas são geradas da filmagem dos processos com câmeras de alta velocidade, geralmente com taxas de aquisição entre 1000 e 2000 quadros (*frames*) por segundo; dentre os diferentes sistemas de iluminação usados para capturar estas imagens, um dos mais conhecidos é fornecido pela técnica de Perfilografia.

A Perfilografia, conhecida também como *Shadowgrafia*, faz uso da iluminação direcional a contraluz com um feixe *laser* como fonte de luz. Antes do trabalho de Allemand *et al.* (1985), a filmagem era feita iluminando a cena diretamente com lâmpadas de alta intensidade luminosa superior à produzida pelo arco. Esta luz era então fotografada através de filtros de densidade neutra com alto poder de atenuação, o que implicava custos relativamente elevados e perdas de informação nas imagens. A evolução dos sistemas de aquisição e armazenamento de imagens de alta velocidade facilitou razoavelmente a obtenção de imagens relevantes no estudo de transferência metálica, generalizando assim o uso da técnica.

Um fator importante a destacar em relação ao uso da perfilografia é o menor custo computacional que se requer para analisar as imagens. É comum encontrar outras técnicas para adquirir imagens dos modos de transferência metálica (Houghton *et al.*, 2007; Wang e Zhang, 2007 e Weglowski *et al.*, 2008), mas as imagens de perfilografia têm a vantagem de ter um maior contraste entre o fundo e os elementos envolvidos na transferência metálica (arame, metal transferido, peça a soldar) pelo que é possível extrair informação com o uso de filtros espaciais, morfologia matemática e limiarização de baixo custo, como no caso de Maia (2001), o que torna o trabalho mais eficiente.

Também pode-se encontrar melhorias nas imagens obtidas a partir da perfilografia com o uso de lâmpadas de alta potência como fonte de luz, o que gera um fundo mais uniforme e facilita em maior grau a extração de características como é apresentado nos trabalhos de Praveen *et al.* (2006) e de Reis (2009). A desvantagem da perfilografia é que, por enquanto, utiliza-se a tocha de soldagem fixa, devido ao arranjo óptico que utiliza, de modo que sua implementação depende da aplicação.

Uma ferramenta que vem a complementar os estudos experimentais de transferência metálica por meio de perfilografia é a sincronização das imagens obtidas na filmagem com sinais de corrente, tensão ou de outro tipo de sensor que sejam adquiridas durante a soldagem (Bálsamo *et al.*, 2000). Este fato permite aprofundar em detalhe os processos de pesquisa de transferência metálica o que possibilita importantes acréscimos nos conhecimentos da soldagem GMAW.

#### 2.3.2.1– Sistema óptico

O clássico sistema óptico proposto para trabalhar com perfilografia é apresentado na Figura 2.9. Uma definição dada por Groetelaars (2005) descreve o princípio da Perfilografia como a passagem de um feixe colimado de *laser* pela região do arco, de modo que a imagem resultante represente a sombra desses elementos (arame, metal em transferência, cordão de solda). Um filtro óptico de interferência passa-banda (na região do *laser*) é colocado entre o arco e a câmera, de modo que, somente o feixe de *laser* e as

sombras respectivas vão aparecer na imagem, suprimindo a luz produzida pelo arco que não esteja na região do filtro.

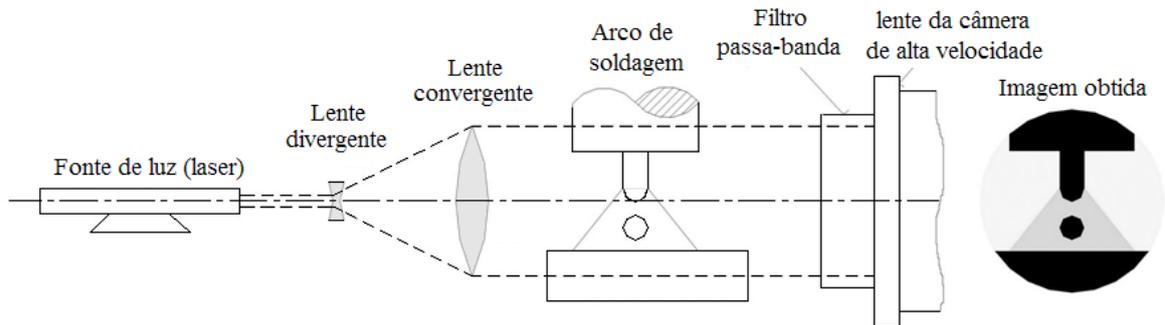


Figura 2.9. Princípio da perfilografia aplicado a soldagem. (Bálsamo *et al.*, 2000).

Este arranjo utiliza um expansor de feixe *laser* de tipo *Galileu*. Como apresenta Weichel (1990) e Steen (2003), o expansor utiliza uma lente divergente como entrada do feixe e uma convergente como saída, que de acordo com Hecht (2002), produz idealmente uma frente de onda plana na saída do expansor, não tendo assim distorção nem ampliação nas geometrias dos elementos (Figura 2.10).

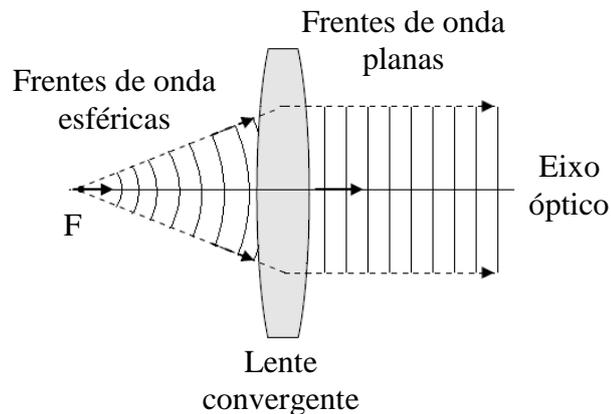


Figura 2.10. Formação de ondas planas a partir de ondas esféricas mediante o uso de uma lente convergente. A letra *F* representa o foco imagem da lente. A luz incidente se propaga na direção das setas.

A distância entre as lentes no expansor de Galileu é a diferença dos valores positivos dos comprimentos focais das mesmas (por convenção a comprimento focal da lente divergente é tomada como negativa), assim, o ponto focal objeto da lente convergente coincide com o ponto focal objeto da lente divergente, como é sugerido na Figura 2.11.

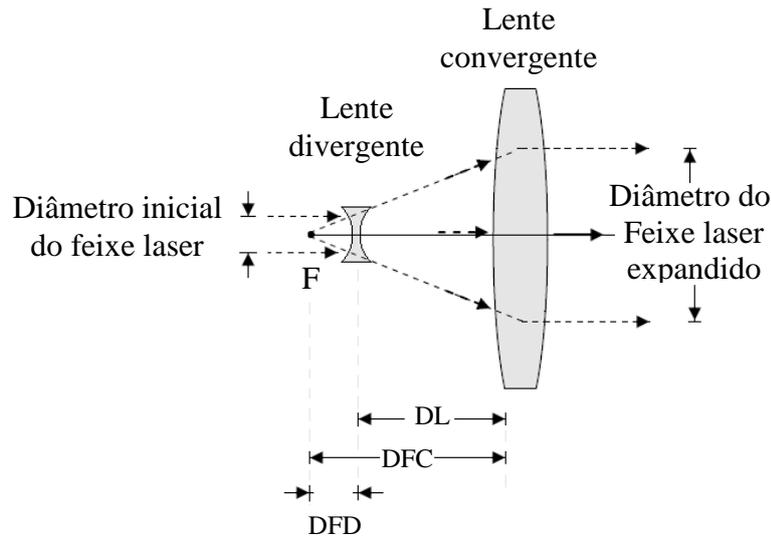


Figura 2.11. Sistema expensor de feixe *laser* de Galileu. A luz incidente se propaga na direção das setas.

, onde:

$F$  representa o foco objeto da lente convergente e da lente divergente;

$DFC$  é a comprimento focal da lente convergente;

$DFD$  é a comprimento focal da lente divergente;

$DL$  é a distância entre as duas lentes dado por:

$$DL = DFC - DFD \quad (2.36)$$

O diâmetro do feixe *laser* expandido é encontrado com a seguinte relação:

$$D_o = (MP)D_i \quad (2.37)$$

, onde:

$D_o$  é o diâmetro do feixe *laser* expandido;

$D_i$  é o diâmetro do feixe *laser* inicial;

$MP$  é conhecido como *Magnifying Power* e é igual à relação entre os comprimentos focais das lentes, dada por:

$$MP = \frac{f_c}{f_d} \quad (2.38)$$

Onde:

$f_c$  é a comprimento focal da lente convergente;

$f_d$  é a comprimento focal da lente divergente.

Outro tipo de expansor de feixe *laser* é conhecido como *Expansor de Kepler* que utiliza duas lentes convergentes e faz coincidir o foco imagem da primeira com o foco objeto da segunda, como se vê na Figura 2.12. Neste caso, a distância entre as duas lentes vai ser a soma dos comprimentos focais das lentes (Weichel, 1990 e Steen, 2003). O diâmetro do feixe *laser* expandido obedece à mesma relação do expansor de Galileu, mas neste caso  $f_c$  é a comprimento focal da lente convergente 2 e  $f_d$  é a comprimento focal da lente convergente 1.

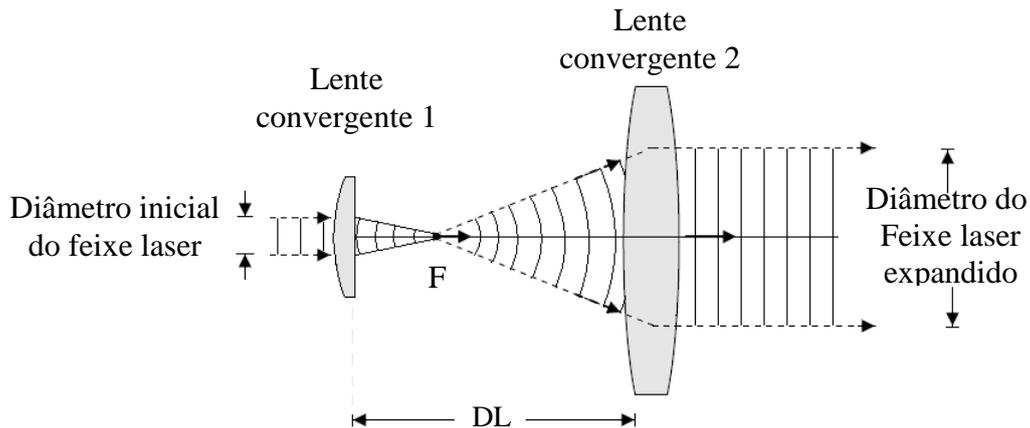


Figura 2.12. Expansor de feixe *laser* de *Kepler*. As linhas verticais e curvas representam as frentes de onda.  $F$  representa o foco de cada lente.  $DL$  é a distância entre as duas lentes. A luz incidente se propaga na direção das setas.

Para o caso dos espelhos, as propriedades ópticas encontram semelhança entre um espelho côncavo e uma lente convexa (convergente), por um lado, e de um espelho convexo e uma lente côncava, por outro. Esta semelhança percebe-se na utilização do telescópio Newtoniano, que utiliza uma lente divergente e um espelho côncavo, o qual faz referência ao telescópio de Galileu. As relações entre os diâmetros do feixe de entrada e de saída serão mantidas considerando as convenções utilizadas para os focos dos espelhos esféricos. Desta forma pode-se fazer configurações para o expansor apenas com lentes, apenas com espelhos ou com suas combinações como a apresentada por Shafer (1978), Hariharan (1987) ou Hello e Man (1996).

### 2.3.3 – Pré-processamento da imagem

Após a obtenção de uma imagem digital, o próximo passo trata-se do pré-processamento da imagem. A função chave no pré-processamento é melhorar a imagem de forma a

umentar as chances para o sucesso dos processos seguintes. Tipicamente envolve técnicas para o realce de contrastes, remoção de ruído e isolamento de regiões (Gonzales e Wood, 2007). Por exemplo, Maia (2001) mostra em seu trabalho que após avaliar os resultados das filtragens espacial e no domínio da frequência em imagens de transferência metálica em processos de soldagem GMAW, optou pela utilização dos filtros espaciais de suavização.

Os filtros no domínio espacial são aqueles que fazem 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 Mediana. Trucco (1998) apresenta algoritmos para construir cada um dos filtros. Os filtros podem ser filtros lineares ou não, nos primeiros o valor do pixel é dado pela convolução da imagem com uma *máscara* (*kernel*) da seguinte forma:

$$I_A(i, j) = I * A = \sum_{h=-\frac{n}{2}}^{\frac{n}{2}} \sum_{k=-\frac{n}{2}}^{\frac{n}{2}} A(h, k) I(i - h, j - k) \quad (2.39)$$

, 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 (por exemplo, se  $n = 3$ ,  $n/2 = 1$ ).

Utilizada como um filtro de suavização, a máscara de filtro de gaussiana é um filtro linear e é dado pela relação

$$A(h, k) = \sum_{h=-\frac{n}{2}}^{\frac{n}{2}} \sum_{k=-\frac{n}{2}}^{\frac{n}{2}} e^{-\frac{h^2+k^2}{2\sigma^2}} \quad (2.40)$$

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

$$I_A(i, j) = I * A = \sum_{h=-\frac{n}{2}}^{\frac{n}{2}} \sum_{k=-\frac{n}{2}}^{\frac{n}{2}} e^{-\frac{h^2+k^2}{2\sigma^2}} I(i-h, j-k) \quad (2.41)$$

Nas equações (2.40) e (2.41) o símbolo  $\sigma$  indica o desvio padrão da gaussiana gerada pela equação. Este desvio depende do tamanho da máscara e segundo Trucco (1998) a relação usada em geral é  $\sigma_n = n/5$  ( $n$ , largura da máscara).

O filtro de mediana é um filtro não linear, o valor do nível de cinza de cada pixel é substituído pela mediana dos níveis de cinza da imagem que estão na região da máscara daquele pixel. Para calcular a mediana na vizinhança da máscara, primeiramente é selecionado o tamanho da máscara, em seguida são ordenados num vetor em ordem crescente os valores dos níveis de cinza dos pixels da vizinhança, depois é determinado o valor da mediana (valor da posição central do vetor) desses níveis e finalmente é atribuído ao pixel. Este método é bastante efetivo na remoção de pixels isolados.

### 2.3.4 – Segmentação

O próximo passo no processamento de imagens digitais está relacionado a segmentação. Em termos gerais, a segmentação divide uma imagem de entrada em partes ou objetos constituintes e permite diferenciar estes objetos do fundo da imagem e entre eles. Escalera (2001) refere que a segmentação se baseia em três características:

- Similaridade, cada um dos pixels tem valores parecidos para alguma propriedade;
- Descontinuidade, os objetos destacam-se do entorno apresentando mudanças bruscas nos níveis de cinza;
- Conectividade, os pixels que pertencem a um objeto têm que estar contíguos, ou seja, agrupados.

#### 2.3.4.1 – Limiarização

A limiarização, ou binarização, é o processo de segmentação de regiões homogêneas em tons de cinza baseado em características de similaridade. A segmentação por limiarização

objetiva separar os objetos de interesse do fundo, consistindo em aplicar uma limiar de tom cinza ( $T$ ) à imagem ( $f(x, y)$ ), transformando uma imagem representada em tom cinza em uma imagem binária, em preto e branco ( $g(x, y)$ ). Considerando ‘0’ os pixels correspondentes ao objeto e ‘1’ aqueles do fundo ou vice-versa, como mostrado na Figura 2.13, aplica-se:

$$g(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{se } f(x, y) < T \\ 1 & \text{se } f(x, y) \geq T \end{cases} \quad (2.42)$$

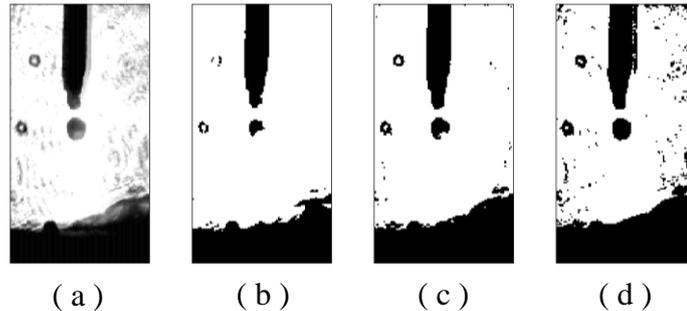


Figura 2.13. Aplicação do limiar. (a) Imagem de transferência goticular; (b) com valor limiar  $T = 100$ ; (c) com valor limiar  $T = 150$ ; (d) com valor limiar  $T = 200$ .

Weska (1978) classifica os métodos de limiarização em três grupos: global, local e dinâmico. O critério usado nesta definição é a dependência do operador do limiar. Se for determinado usando apenas as intensidades é classificado como global. Se usar as intensidades e alguma informação espacial da imagem é classificado como local. Se usar ambas as 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 dividem toda a imagem usando apenas um limiar. Os locais dividem a imagem em subimagens e para cada uma é atribuído uma limiar (Lopes, 2003).

#### 2.3.4.2 – Método de *Otsu*

A limiarização é uma das abordagens mais importantes utilizadas para segmentação de imagens. Como pode-se ver na Figura 2.13, o ponto mais sensível da técnica é a escolha do limiar de corte ( $T$ ). Normalmente, esta escolha é feita através da observação do histograma da imagem, a partir do qual pode se escolher facilmente o tom de cinza que determina a fronteira entre as fases. Na prática, determinar o limiar exato não é uma tarefa simples e a

escolha manual não é reprodutível para todas as imagens, o que sugere uma busca por um método automático (Gomes, 2001).

Um método automático de limiarização é conhecido como de *Otsu* (Otsu, 1979). Este método define a existência de duas classes dentro da imagem, onde os objetos são representados pela classe  $C_1$  com níveis de cinza no intervalo  $[1, T]$  e o fundo pela classe  $C_2$  com níveis de cinza no intervalo  $[T + 1, L]$  ( $L$  é o maior nível de cinza na imagem,  $T$  é o limiar). Assim, a distribuição de probabilidade para cada classe é:

$$C_1 = \frac{p_1}{\omega_1(T)}, \dots, \frac{p_T}{\omega_1(T)} \quad (2.43)$$

$$C_2 = \frac{p_{T+1}}{\omega_2(T)}, \frac{p_{T+2}}{\omega_2(T)}, \dots, \frac{p_L}{\omega_2(T)} \quad (2.44)$$

, onde  $\omega_1$  e  $\omega_2$  representam a somatória das distribuições de probabilidade dos níveis de cinza em cada classe, dadas por:

$$\omega_1(T) = \sum_{i=1}^T p_i \quad \omega_2(T) = \sum_{i=T+1}^L p_i \quad (2.45)$$

$p_i$ , a probabilidade de ocorrência de um nível de cinza  $i$  na imagem é dada por:

$$p_i = \frac{f_i}{N} \quad (2.46)$$

, onde  $f_i$  é o número de pixels com nível de cinza  $i$  e  $N$  é o número de pixels total na imagem. A média de cada classe pode-se medir como:

$$\mu_1 = \sum_{i=1}^T \frac{i \cdot p_i}{\omega_1(T)} \quad \mu_2 = \sum_{i=T+1}^L \frac{i \cdot p_i}{\omega_2(T)} \quad (2.47)$$

, com elas a intensidade média de toda a imagem  $\mu_T$  se define como:

$$\mu_T = \omega_1 \mu_1 + \omega_2 \mu_2 \quad (2.48)$$

Usando uma análise discriminante (que mede a diferença entre dois grupos) Otsu definiu a variância,  $\sigma_B^2$ , entre as duas classes da imagem limiarizada como:

$$\sigma_B^2 = \omega_1 \cdot (\mu_1 - \mu_T)^2 + \omega_2 \cdot (\mu_2 - \mu_T)^2 \quad (2.49)$$

Otsu verificou que o limiar ótimo  $T^*$ , com o qual pode-se separar e diferenciar melhor os objetos, é determinado como aquele cuja variância entre as classes  $\sigma_B^2$  é máxima, isto é:

$$T^* = \text{Max}\{\sigma_B^2(T)\} \quad (2.50)$$

#### 2.3.4.3 – Morfologia Matemática

A morfologia matemática analisa a estrutura geométrica das imagens a partir de um conjunto perfeitamente definido e conhecido (o *elemento estruturante*). Este interage com cada entidade contida na imagem em estudo, modificando a sua aparência, a sua forma, o seu tamanho permitindo assim obter algumas conclusões necessárias. As técnicas morfológicas como filtragem e poda (“pruning”) são muito utilizadas no pré e pós-processamento das imagens.

De forma geral, existem dois tipos de morfologia matemática: a *morfologia binária*, que se aplica sobre imagens binárias e a *morfologia cinzenta* que se aplica sobre imagens em níveis de cinza. Na morfologia binária, na vizinhança de cada pixel da imagem original, é procurada uma configuração de pontos pretos e brancos. Quando a configuração é encontrada, ao pixel correspondente da imagem resultante é dado o rótulo “verdadeiro”; senão, o pixel resultante recebe o rótulo “falso”. Uma operação morfológica binária é portanto completamente determinada a partir da vizinhança examinada ao redor do ponto central, da configuração de pontos pretos e brancos nessa vizinhança e do algoritmo (Facon, 1996). Na morfologia cinzenta a determinação do valor do pixel resultante intervêm outros aspectos como o valor máximo e mínimo dos níveis de cinza da vizinhança. Neste trabalho a morfologia matemática é aplicada a imagens binárias.

As bases da morfologia matemática são as duas operações básicas, a *erosão* e a *dilatação*, a partir das quais é possível realizar muitos outros operadores. A erosão de um conjunto  $A$

pelo elemento estruturante  $B$ , chamada de *erosão de A por B*, denotada por  $A \ominus B$ , é definida como:

$$A \ominus B = \{x | (B)_x \subseteq A\} \quad (2.51)$$

, o que significa que a erosão de A por B é o conjunto de todos os pontos  $x$  tais que  $B$ , quando transladado por  $x$ , fica contido em  $A$ . A erosão é utilizada para eliminar pixels isolados no fundo e erodir o contorno de objetos segundo a figuração do elemento estruturante  $B$ . A dilatação de A por B, denotada por  $A \oplus B$  é definida como:

$$A \oplus B = \{x | \hat{B}_x \cap A \neq \emptyset\} \quad (2.52)$$

, a dilatação é o conjunto de todos os deslocamentos  $x$  tais  $\hat{B}$  e  $A$  sobreponham-se pelo menos em um elemento não nulo. O termo  $\hat{B}$  refere-se à *reflexão k de B* definida como:

$$\hat{B} = \{x | x = -b, \text{ para } b \in B\} \quad (2.53)$$

, onde  $b$  denota a posição de cada elemento de B. A dilatação elimina pequenos furos isolados no objeto e expande seu contorno segundo a configuração do elemento estruturante  $B$ .

#### 2.3.4.4 – Rotulação

Uma vez que os objetos da imagem são separados do fundo, é necessário diferenciá-los entre si. Para isso, todos os pixels que pertencem ao mesmo objeto 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 um certo critério de similaridade. Em geral encontram-se dois tipos conectividade, a conectividade-4, onde o pixel possui vizinhos

horizontais ou verticais e a conectividade-8, onde o pixel possui vizinhos horizontais, verticais ou 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.

### **2.3.5 – Considerações finais**

Nos passos finais para o processamento de imagens digitais (Figura 2.6), a etapa de *representação e descrição*, também é chamada de *seleção de características*, procura extrair características (descritores) que resultem em alguma informação quantitativa de interesse ou que sejam básicas para discriminação entre classes de objetos. No último estágio, *reconhecimento* é o processo de atribuir um rótulo a um objeto, baseado na informação oferecida pelo seu descritor. A *interpretação* envolve a atribuição de significado a um conjunto de objetos reconhecidos (Gonzales e Wood, 2007).

Estas duas etapas são específicas para cada problema tratado por serem diretamente dependentes da base do conhecimento. Para o caso desta pesquisa, o comportamento da transferência goticular projetada e especialmente o *efeito pinch*, comentado neste capítulo, é usado como base de conhecimento para determinar a frequência de destacamento e o tamanho das gotas em transferência, que serão posteriormente utilizadas na concepção do modelo.

### **3 – METODOLOGIA E MONTAGEM EXPERIMENTAL**

Neste trabalho a modelagem empírica da transferência metálica goticular projetada é baseada no *Planejamento Composto Central* (PCC) da metodologia de superfície de resposta. Para isso foram selecionados nove pontos de trabalho dentro da região de transferência goticular visando obter o PCC. A modelagem foi concebida usando regressão múltipla e se compõe de dois modelos de segunda ordem, correspondentes ao tamanho e à frequência de destacamento das gotas.

De acordo com o PCC e com os pontos de trabalho selecionados foram necessários 12 experimentos para encontrar os modelos. As respostas medidas e os fatores de entrada dos experimentos coincidiram com as respostas e as variáveis de entrada dos modelos. Por serem as respostas medidas dependentes de parâmetros como o tipo de gás de proteção ou composição e diâmetro do arame-eletrodo, nesta pesquisa os experimentos foram estabelecidos exclusivamente para mudanças de tensão e velocidade de arame (fatores de controle tradicionais de uma fonte de energia do tipo *tensão constante*); os fatores de entrada restantes foram mantidos constantes durante os experimentos.

As respostas dos experimentos foram medidas usando técnicas de processamento de imagens digitais em sequências de fotografias da transferência metálica, adquiridas por meio de uma câmera de alta velocidade e a técnica de Perfilografia. Este capítulo apresenta a bancada experimental, o equipamento, os consumíveis, os parâmetros de entrada e os métodos propostos para obter as respostas utilizadas na concepção do modelo.

#### **3.1 – EQUIPAMENTO E BANCADA EXPERIMENTAL**

A bancada experimental está composta por dois sistemas principais, um de aquisição de imagens e o outro de soldagem.

### 3.1.1 - Sistema de aquisição de imagens

A técnica de Perfilografia realizada nesta pesquisa utilizou um expensor óptico, composto por uma lente divergente e dois espelhos côncavos em uma disposição chamada de “z” como apresenta a Figura 3.1. O sistema utiliza um *laser* de He-Ne (*Hélio - Néon*) com comprimento de onda de 632,8 nm e um filtro de interferência óptico na banda do laser. A bancada experimental com a disposição das lentes é apresentada nas figuras 3.2 e 3.3.

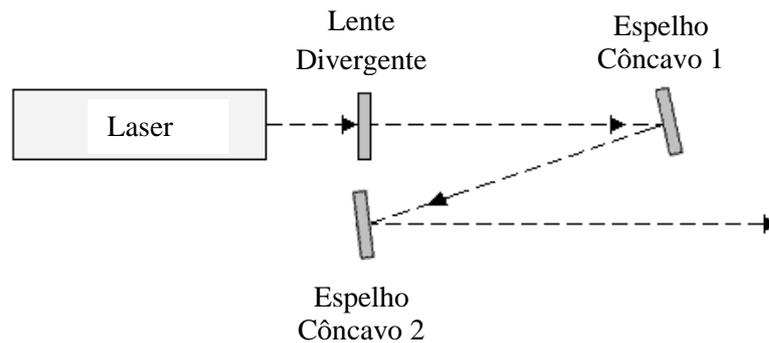


Figura 3.1. Disposição “z” da lente e os espelhos no expensor de feixe *laser*. Vista de cima. A luz incidente se propaga na direção das setas.

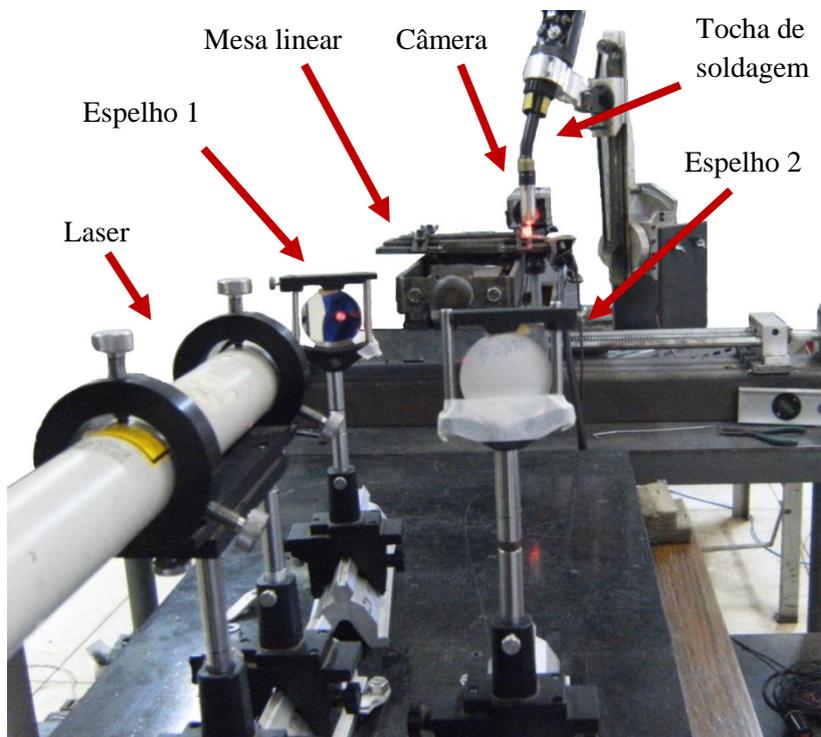


Figura 3.2. Bancada experimental.

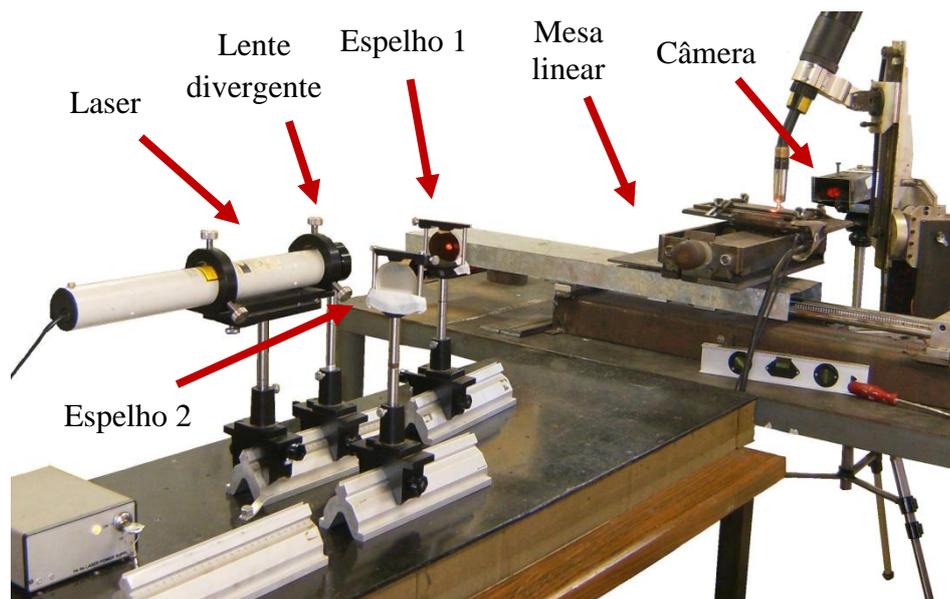


Figura 3.3. Bancada experimental.

A lente divergente possui o comprimento focal ( $f_d$ ) de 40 mm e os espelhos côncavos com o comprimento focal ( $f_c$ ) de 300 mm cada um. Em referência à Figura 3.1 pode-se observar que até o primeiro espelho encontra-se um expensor de feixe *laser* de Galileu; depois deste espelho existe um feixe de luz colimado com frentes de onda planas. De acordo com a Equação (2.38), para a lente divergente e o espelho 1, o valor do *Magnifying Power* é 7.5 e, ao ter um feixe laser de entrada com 1.2 mm de diâmetro e segundo a Equação (2.37) o diâmetro do feixe expandido até o primeiro espelho é de 9 mm. Usando este expensor convencional se tem um problema porque o valor do diâmetro do feixe expandido é pequeno e ainda mais se vai se filmar o modo de transferência goticular, por isso se decidiu utilizar o espelho 2 e a configuração “z” para expandir de novo o feixe final.

Quando a onda plana, proveniente do espelho 1, reflete no espelho 2 se transforma numa onda esférica que converge no foco do espelho e depois se expande em forma de cone. O diâmetro final do feixe depende do diâmetro do feixe incidente, do comprimento focal do espelho e da distancia até o alvo. Assim, de acordo com a Figura 3.4 numa distância de 1m, onde está disposto o arame-eletrodo (alvo), o feixe laser possui o diâmetro de 30 mm, suficiente para iluminar os objetos de interesse, como exposto na Figura 3.5.

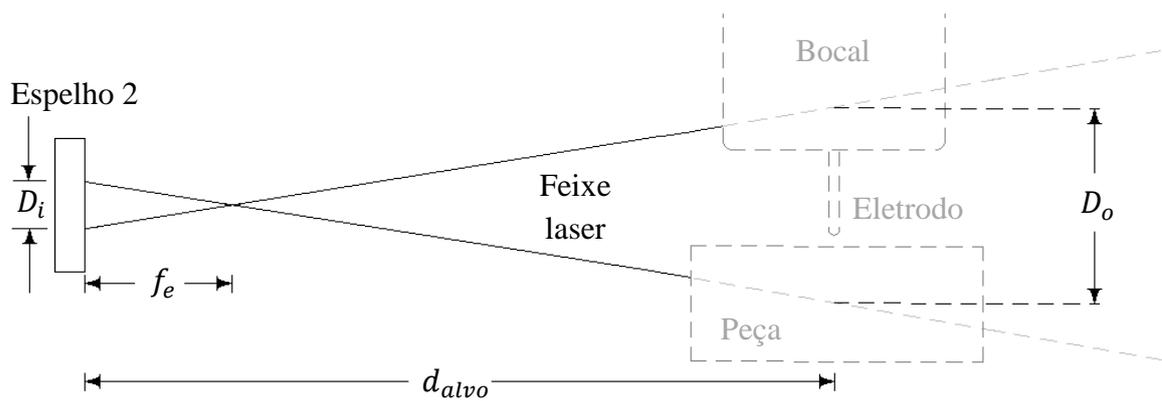


Figura 3.4. Diâmetro do feixe laser no arame-eletrodo.

Onde:

$D_i$  é o diâmetro do feixe no espelho 2 igual a 9 mm;

$f_e$  é o foco do espelho igual a 300 mm;

$d_{alvo}$  é a distância entre o espelho e o arame-eletrodo igual a 1 m;

$D_o$  é o diâmetro do feixe laser a 1 m do espelho igual a 30 mm.

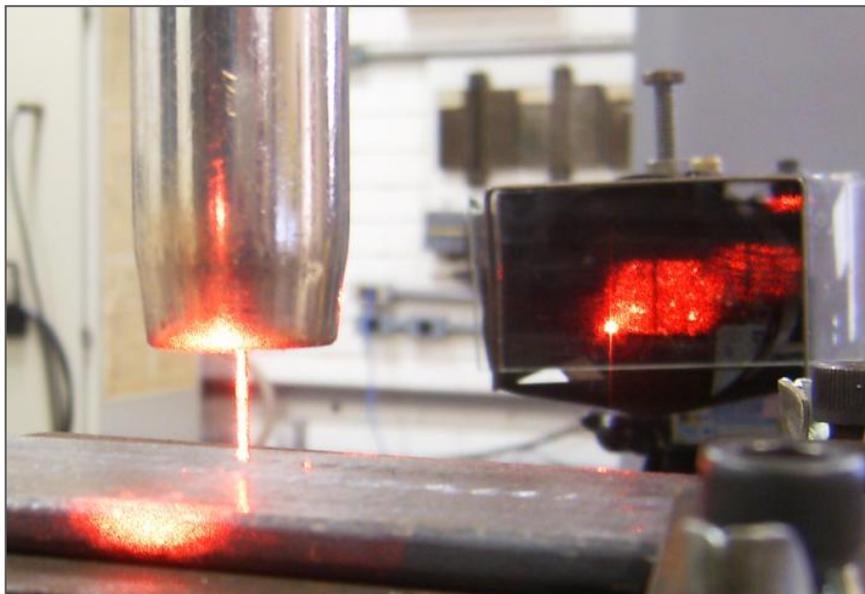


Figura 3.5. Iluminação do arame-eletrodo com o feixe *laser* expandido. Pode-se observar como a sombra dos alvos é projetada na câmera fixa na parte posterior.

Para a captura das imagens foi utilizada uma câmera *DALSA* modelo *DS-21-001M150* de tecnologia CMOS, monocromática com 256 níveis de cinza, que é de baixo custo em relação a outras utilizadas em monitoramento de processos de soldagem. A câmera possui um capacete metálico e um vidro de proteção contra os respingos. Os experimentos foram realizados utilizando uma lente zoom.

Para adquirir as imagens, a câmera faz uso de um programa desenvolvido por Franco (2007), implementado em linguagem *C* na plataforma *Microsoft Visual Studio 2005*; o qual, a partir de um arquivo de configuração da câmera, executa uma captura (imagens/filmagem) durante um período determinado e cria um conjunto de arquivos contendo em cada um, o quadro capturado pela câmera e um arquivo com o vídeo gerado pelas imagens capturadas.

O arquivo de configuração é gerado a partir de um programa fornecido pelo fabricante chamado *CamExpert*, a partir do qual são testadas e definidas todas as características do processo de captura, exceto pelo tempo de exposição e a taxa de captura da câmera que é realizado por outro programa chamado *PFRemote*, o qual comunica-se diretamente com a câmera.

### **3.1.2 – Sistema de soldagem**

O sistema de soldagem é composto por:

#### **3.1.2.1 – Fonte de soldagem**

A fonte de soldagem é uma fonte *Fronius TransPuls Synergic 5000*, digital e multiprocesso (SMAW, GTAW e GMAW). No processo GMAW a fonte trabalha no modo tensão constante. A manipulação da fonte é feita com um computador industrial por meio de uma interface para robôs ROB 5000.

### 3.1.2.2 – Computador industrial

O computador industrial de marca *ADVANTECH* de referencia *ICP-622* contém uma placa de aquisição de dados *PCI Eagle 703s* encarregada de adquirir os sinais elétricos do processo (como corrente e tensão entre outras), além de ser responsável por realizar a comunicação entre o computador e a interface *ROB 5000*, que por vez comunica o computador com a fonte de soldagem. A manipulação da fonte e a aquisição dos sinais são feitas por meio de um programa desenvolvido no software de instrumentação virtual *LabVIEW*. O programa por meio da placa também é encarregado de manipular a mesa de deslocamento linear.

### 3.1.2.3 – Mesa de deslocamento linear

A mesa linear, desenvolvida em trabalhos anteriores (Franco, 2007; Franco, 2008), é uma plataforma na qual a peça a soldar é colocada e assegurada e que pode deslocar-se linearmente numa direção. O deslocamento da peça 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 do programa em *LabVIEW* (via RS-232), o que permite ter controle do início e fim dos cordões de solda. A mesa linear é chave na aquisição das imagens porque com bancada experimental utilizada a técnica de Perfilografia só pode ser usada com a tocha de soldagem fixa. A Figura 3.6 apresenta um diagrama da mesa linear.

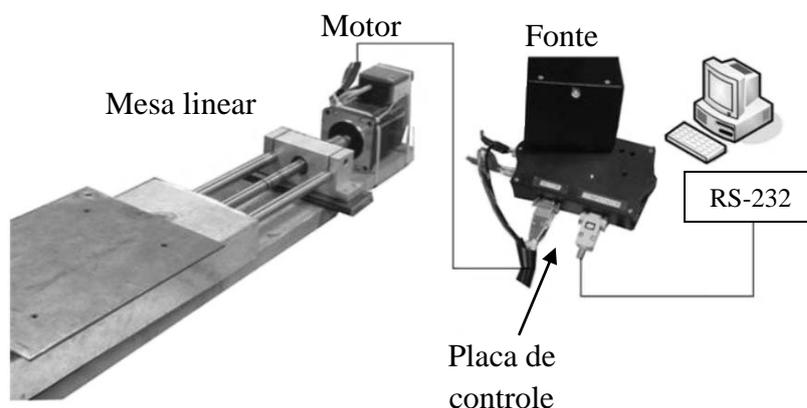


Figura 3.6. Diagrama da mesa linear (Franco, 2007; Franco, 2008).

### 3.1.2.4 – Materiais e consumíveis

De acordo com as disponibilidades do laboratório, os materiais utilizados neste trabalho foram:

- *Eletrodo*: arame tubular 410NiMo MC, com diâmetro de 1.2 mm;
- *Material de base*: aço 1020 em formato de chapa plana, com dimensões 6,35 mm de espessura, e 200 mm x 50 mm de comprimento e largura respectivamente, previamente limpados e esmerilados;
- *Gás de proteção*: *Stargold Plus*, mistura comercial especializada para soldagem MAG a base de Ar e CO<sub>2</sub> (25% CO<sub>2</sub>).

O arame utilizado é de tipo “*metal cored*” com fluxo interno metálico, contém 13% de Cr, 4% de Ni, e 0.4% de Mo (Gonçalves, 2007). Este arame é utilizado principalmente em revestimentos no modo de transferência por curto circuito com gases de proteção a base de argônio, geralmente com misturas de 98%Ar-2%O<sub>2</sub> ou 96%Ar-4%O<sub>2</sub>, as quais, neste caso não favorecem a transferência goticular porque ao interatuar os desoxidantes presentes no arame com o gás de proteção e a poça de fusão se dificulta a criação de óxidos no metal de base e com eles a emissão de elétrons da chapa para o arame. Este problema é solucionado com o uso do gás de proteção com 25% de CO<sub>2</sub>, o qual contra-arresta os desoxidantes do arame e facilita o fluxo de corrente e com ela a formação das gotas e o modo de transferência goticular. No caso de arames com menor teor de desoxidantes, a mistura de gás com 25% de CO<sub>2</sub> facilita a formação de óxidos na ponta do arame, o que aumenta a tensão superficial na gota e favorece o modo de transferência por curto circuito, mas dificulta o modo de transferência goticular.

## 3.2 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O trabalho de Franco (2007) relata que o programa de aquisição captura os quadros na memória RAM (*Random Access Memory*) e só até o fim do processo estes são armazenados no disco rígido do computador, o que, dependendo da resolução das imagens e da taxa de captura, pode levar ao estouro da memória sendo assim a perda de informações e do sincronismo na captura das imagens. O primeiro passo no procedimento

experimental foi encontrar os parâmetros adequados de resolução e de taxa de aquisição das imagens que permitiram observar o modo de transferência goticular e que conservaram uma taxa de captura constante. Para isso foram utilizadas filmagens de soldas sincronizadas com sinais elétricos de tensão e corrente.

### **3.2.1 – Sincronização das imagens**

Para fazer a sincronização das imagens com os sinais elétricos capturados nos experimentos, foi utilizado um sinal fornecido pela placa de controle da câmera. Este sinal exibe um pulso elétrico cada vez que uma foto está sendo adquirida. A duração do pulso foi de  $50\mu\text{s}$  e foi programado de modo que seu pico (na metade do pulso) coincida com a metade do tempo de exposição da câmera. O valor do pulso varia em torno de 3 V. O sinal do pulso foi capturado junto com os sinais elétricos de corrente e de tensão do processo a uma taxa de 20 kHz. Os sinais são visualizados e armazenados por meio da interface do programa em *LabVIEW*.

Para saber se as imagens são capturadas à taxa constante, diferentes experimentos foram realizados para comparar os sinais capturados com as imagens adquiridas. O que se pretendia descobrir era se alguma ou algumas das imagens não coincidiriam com os sinais elétricos. Isto indicaria que durante o processo de armazenamento na memória RAM algumas destas imagens foram perdidas para liberar espaço.

O modo de transferência metálica filmada neste processo foi o curto-circuito, e graças a que apresenta marcadas diferenças nos oscilogramas de tensão e corrente é fácil compará-las com os sinais de controle da câmera e com as imagens, que a sua vez apresentam grandes diferenças entre arco aberto e curto-circuito. Pode-se ver na Figura 3.7 um exemplo desta sincronização.

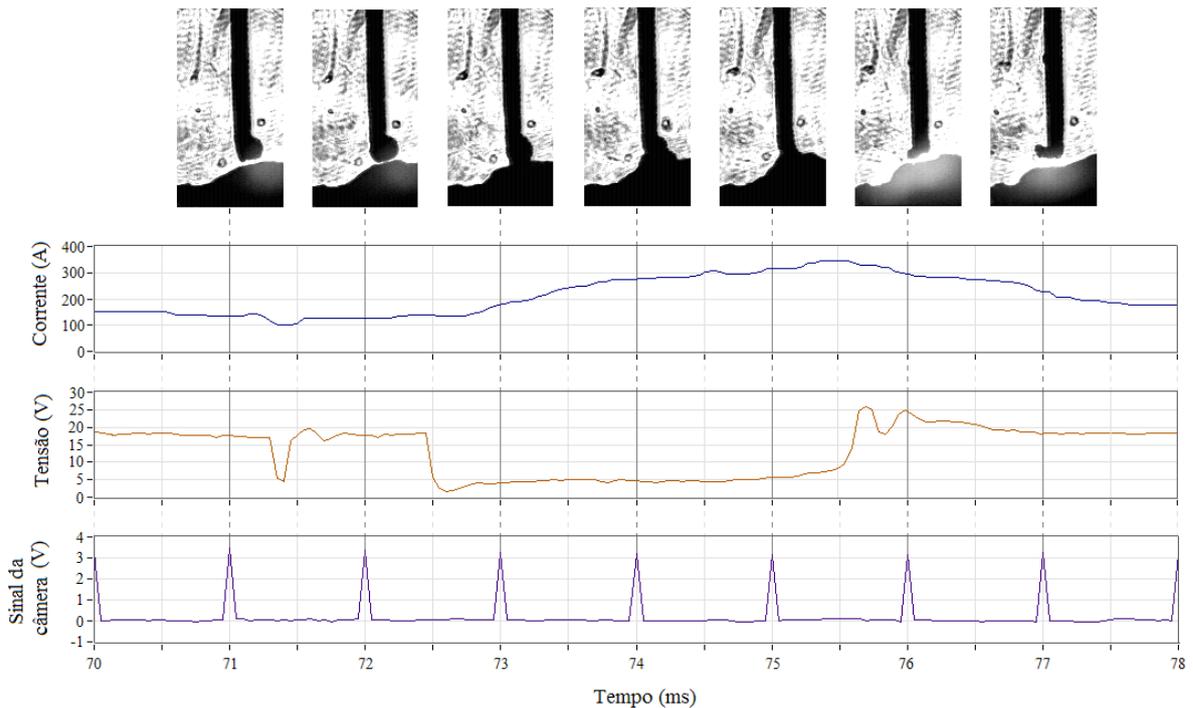


Figura 3.7. Sincronização dos sinais adquiridos com as imagens durante a transferência em curto circuito a uma taxa de 1000 fps (*frames* por segundo). Diâmetro do eletrodo de 1.2 mm

Os sinais de tensão, corrente e da câmera podem-se comparar diretamente nos oscilogramas, as imagens de transferência adquiridas nas filmagens (como as apresentadas na Figura 3.7) são comparadas manualmente, uma a uma. Depois de experimentar diferentes configurações de resolução espacial e taxas de aquisição, e depois de observar e comparar os oscilogramas obtidos em cada experimento com as imagens adquiridas na respectiva filmagem se concluiu que a melhor configuração que garante uma taxa de aquisição constante e que permite visualizar o modo de transferência goticular é:

- Taxa de captura: 1000 quadros (*frames*) por segundo;
- Resolução espacial: 180x96.

Aumentar algum destes dois valores pode levar ao estouro da memória RAM do computador utilizado, ocasionando perda de informação no processo de aquisição das

imagens, o que se manifesta em uma incorreta sincronização. O tempo de exposição para as imagens do modo de transferência goticular foi estabelecido em 40  $\mu$ s.

### **3.2.2 – Delimitação da região de trabalho**

O primeiro passo para delimitar a região de trabalho foi estabelecer os fatores de entrada manipuláveis que permaneceriam constantes durante os experimentos. De acordo com a literatura, com a conveniência do trabalho e com as características do equipamento definiu-se que:

- Polaridade positiva (com o eletrodo no ânodo);
- Distância bico de contato-peça igual a 18 mm;
- Vazão de gás de proteção igual a 14 litros/min (medida na saída do cilindro);
- Velocidade de soldagem igual a 10 mm/s;
- Ângulo de ataque reto (eletrodo perpendicular à chapa).

Observando as filmagens de transferência metálica obtidas em diferentes experimentos com diferentes parâmetros de entrada na fonte de soldagem, os limites da região de trabalho foram estabelecidos como:

- Intervalo de tensão entre 26.5 e 29.5 V;
- Intervalo de velocidade de alimentação de arame entre 5.7 e 7.3 m/min.

Pontos que estão próximos, mas fora destes limites, apresentam a combinação da transferência metálica goticular projetada com globular (com valores menores) e com goticular com alongamento (com valores maiores) como expostas nas sequências de imagens das figuras 3.8 e 3.9. As combinações se apresentam porque os pontos trabalhados estão em zonas de transferência de um modo para outro (não confundir com o grupo de modos combinados de transferência, que se apresentam em condições especiais de soldagem).



Figura 3.8. Modo combinado goticular projetado e globular. Ponto de trabalho: 28 V e 5.5 m/min.

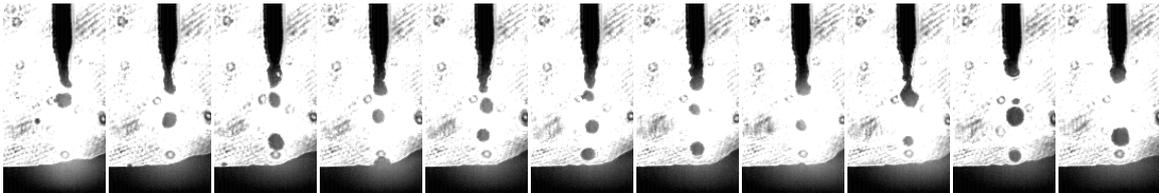


Figura 3.9. Modo combinado goticular projetado e goticular com alongamento. Ponto de trabalho: 29.5 V e 7.5 m/min.

No caso da transferência globular, nas imagens da figura 3.8 pode-se ver como o diâmetro da gota supera o valor de 1.25 vezes o diâmetro do arame estabelecido pelo IIW como o limite na transferência goticular projetada. Na figura 3.9 pode-se ver que em algumas imagens o comprimento do afunilamento na ponta do arame supera o dobro do diâmetro do arame e as gotas se destacam em alta frequência, o que indica o modo de transferência goticular com alongamento.

Sendo assim, o ponto central do PCC encontra-se na metade da região do trabalho, em 28 Volts e 6.5 m/min de tensão e velocidade de arame respectivamente. A Figura 3.10 apresenta a distribuição dos nove pontos de trabalho na região de acordo como a Figura 2.5 e com a Equação (2.1) onde:

- $x_1 = \text{Velocidade de arame};$
- $x_2 = \text{Tensão}$
- $\max(\text{Velocidade de arame}) = 7 \text{ m/min}$  (nível codificado  $x_1=1$ );
- $\min(\text{Velocidade de arame}) = 6 \text{ m/min}$  (nível codificado  $x_1=-1$ );
- $\max(\text{Tensão}) = 29 \text{ V}$  (nível codificado  $x_2=1$ );
- $\min(\text{Tensão}) = 27 \text{ V}$  (nível codificado  $x_2=-1$ ).

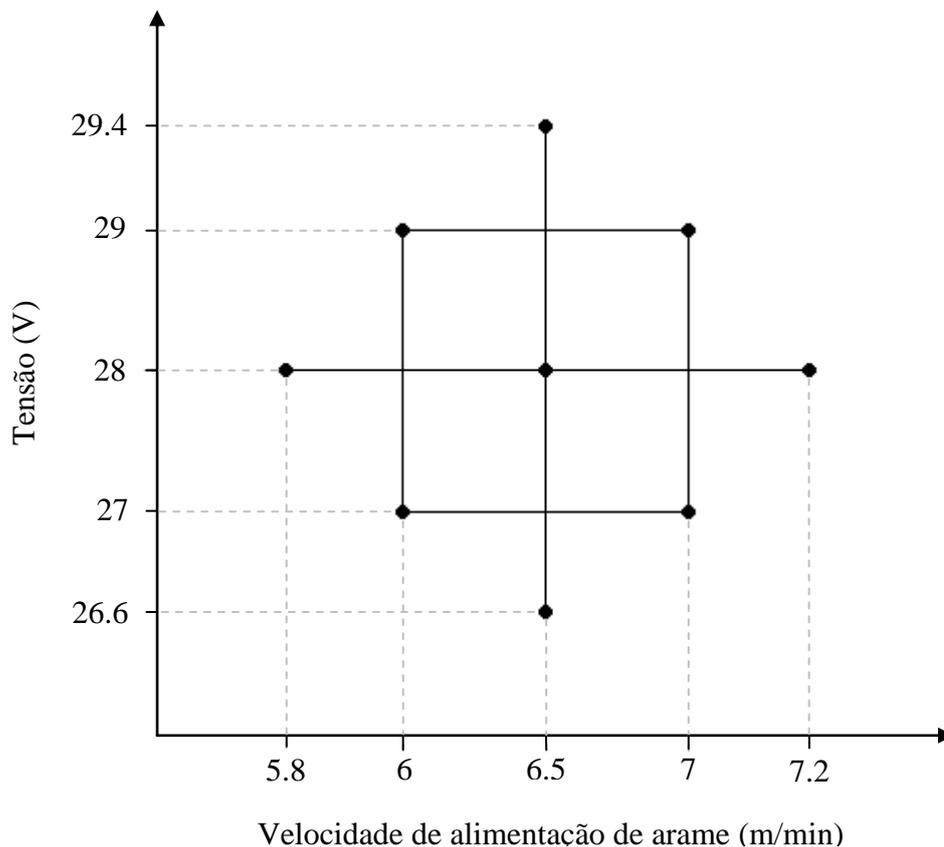


Figura 3.10. *Planejamento Composto Central* da metodologia experimental.

Os valores correspondentes aos níveis codificados  $\pm\sqrt{2}$  foram arredondados para poder usá-los na fonte de soldagem.

### 3.2.3 – Aquisição das imagens

O início da sequência de filmagem dos processos é feito manualmente por meio do programa de aquisição procurando dar ao processo de solda 2 segundos de vantagem para estabilizar o arco. Desta forma cada experimento foi repetido 3 vezes, com tempo de soldagem de 9 segundos e tempo de filmagem de 6 segundos. Deixa-se um segundo de tempo a mais ao final do processo para que não coincida o fim da solda com o final da filmagem. As repetições foram feitas para comparar os resultados. A Figura 3.11 apresenta como exemplo uma sequência de imagens adquiridas durante os experimentos. Assim, cada experimento é composto de uma pasta com 6000 imagens, onde cada imagem é identificada por um número que corresponde a sua ordem de chegada (numerados de zero até 5999).

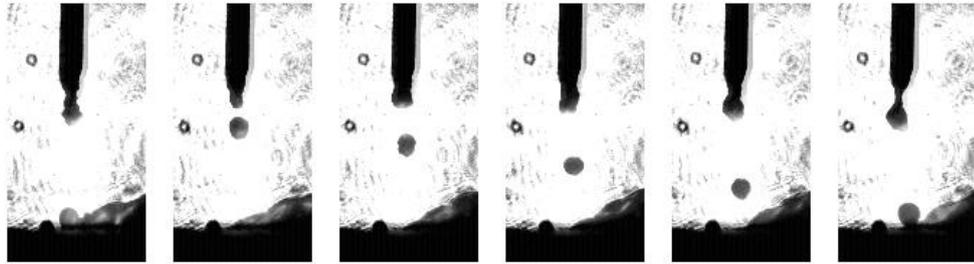


Figura 3.11. Sequência de 6 imagens obtidas do modo de transferência goticular em 6 ms de soldagem.

### 3.3 – PROCESSAMENTO DE IMAGENS E MEDIÇÃO DE RESPOSTAS

O modo de transferência goticular é caracterizado por dois parâmetros: o tamanho e a frequência de destacamento das gotas em transferência. A medição destas duas características é feita por meio de algoritmos de processamento de imagens digitais aplicados a sequências de imagens do processo. Para desenvolver a metodologia e obter as características de uma transferência goticular específica, são analisadas sequências de 100 imagens, em um tempo de 100 ms. A frequência de destacamento é calculada pela contagem das gotas que são transferidas para a poça durante esse tempo. O tamanho das gotas é medido a partir das gotas que são transferidas para a poça neste mesmo período. Com o objetivo de caracterizar o modo de transferência, depois de capturar as imagens, a metodologia empregada faz uso dos seguintes passos:

- Pré-processamento da imagem digital
- Limiarização das imagens
- Rotulação de objetos
- Medição do tamanho da gota
- Medição da frequência de destacamento

#### 3.3.1 – Pré-processamento da imagem digital

Apesar de apresentar uma diferença favorável entre os objetos e o fundo, as imagens de perfilografia são caracterizadas pela presença constante de ruído gaussiano, causado principalmente pela distribuição da energia do laser e sua interação com partículas muito

pequenas no ar ou nas lentes e vidros de proteção. Um ruído de outra natureza e mais evidente aparece devido à sujeira nos vidros de proteção causada principalmente por respingos.

Os ruídos nas imagens dificultam a segmentação dos objetos por, em alguns casos, os níveis de cinza do ruído estarem próximos aos objetos de interesse. No caso do ruído gaussiano, a proximidade dos tons de cinza fica mais evidente na ponta do arame, quando as gotas estão sendo formadas e nas gotas em vôo por estarem envolvidas pelo arco, em ambos os casos, onde a luz impõe níveis de cinza maiores (mais claros) do que os apresentados na chapa e no resto do arame. No caso do ruído por sujeira, os pixels podem ter tons de cinza muito baixos, próximos aos do arame e da chapa. Os dois tipos de ruído estão apresentados na Figura 3.12.

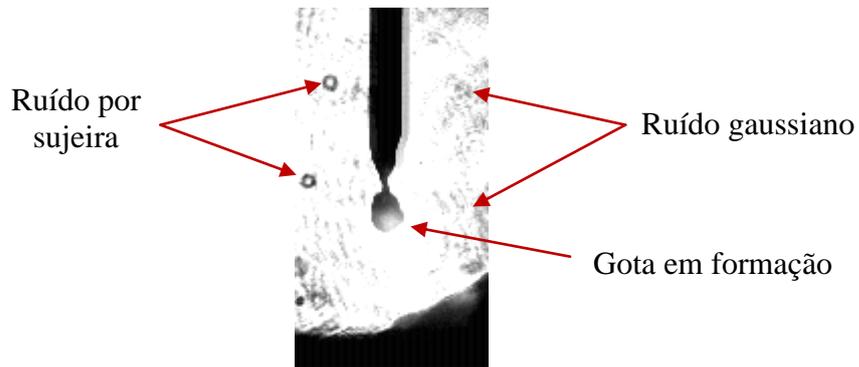


Figura 3.12. Ruído nas imagens adquiridas.

Assim, para obter informações das imagens o primeiro passo é realizar um pré-processamento de cada, para isso foi utilizado um filtro gaussiano e um de mediana, cada um construído com uma máscara (*kernel*) de tamanho 3x3. O filtro gaussiano se propõe a suavizar a imagem e reorganizar o valor dos pixels de acordo com os seus vizinhos, com o uso de uma função espacial gaussiana. Assim, como a maior parte do ruído é rodeada de zonas muito claras, após a aplicação do filtro os pontos de ruído são suavizados e tornam-se mais claros. O filtro de mediana é utilizado para eliminar pixels isolados, e deste modo, separar grandes áreas com ruído devido a que muitas destas regiões são compostas por cadeias de pixels isolados. A aplicação sequencial dos filtros sobre uma imagem pode ser vista na Figura 3.13.

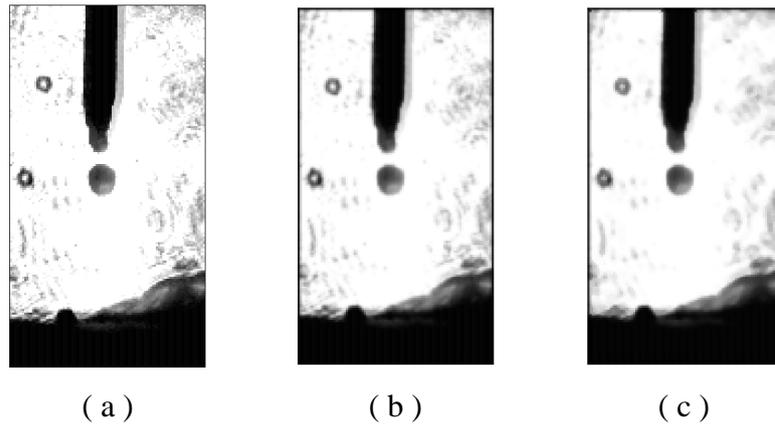


Figura 3.13. Aplicação dos filtros; (a) imagem original; (b) com o filtro gaussiano; (c) com o filtro de mediana.

### 3.3.2 – Limiarização das imagens

A limiarização das imagens é o primeiro passo da segmentação dos objetos. Neste trabalho a limiarização é feita usando o método de Otsu em duas etapas: uma global e outra de caráter dinâmico (de acordo com a classificação de Weska, 1978). Além de reduzir a interação do usuário com o processo, uma limiarização automática é importante porque mudanças na corrente, no comprimento do arco, entre outros fatores, fazem com que a intensidade luminosa do arco mude. Deste modo, os tons de cinza dos objetos envolvidos pelo arco (gotas e ponta do arame) mudam também, assim como o ruído presente no fundo e por isso há necessidade de um limiar para cada imagem que garanta sua correta segmentação.

Na primeira etapa, o interesse está centrado em eliminar o ruído e identificar o principal elemento na imagem, o arame. Para tanto, a limiarização global é utilizada. As regiões de ruído que não são removidas diretamente pela limiarização são eliminadas ou separadas com uso de morfologia matemática simples (erosão). Os resultados da limiarização global para duas imagens diferentes podem ser vistos na Figura 3.14. Pode-se ver também na Figura 3.14 (b) que depois da limiarização global algumas imagens podem apresentar perda de informação (de pixels), isto porque as gotas são envolvidas pelo arco e algumas regiões da mesma podem ficar comprometidas ao ter tons de cinza com maior valor que o limiar.

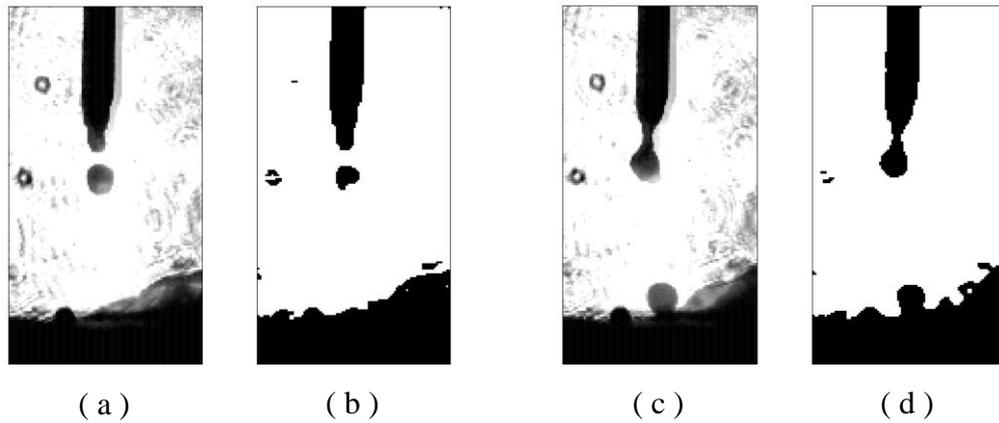


Figura 3.14. Limiarização da imagem com o método de Otsu; (a) e (c) imagens originais; (b) e (d) imagens limiarizadas correspondentes.

Devido o filtro de interferência óptico utilizado no processo de perfilografia apresentar sujeira (como na Figura 3.12) que não pode ser removida fisicamente e devido esta sujeira possuir níveis de cinza muito baixos nas imagens, o filtro gaussiano e de mediana não conseguiram suavizá-las ou separá-las, então o processo de erosão foi usado para remover diretamente cadeias de pixels delgadas, o que elimina ou separa a sujeira. A Figura 3.15 apresenta o uso da erosão. Neste caso se fala que os níveis de cinza dos objetos (pretos) são erodidos (apagados); também se poderia falar que se dilata o fundo branco. A Figura 3.16 apresenta o elemento estruturante utilizado, se a translação deste elemento pela imagem coincidir com os pixels da imagem, o pixel em estudo é removido (toma o valor do fundo).

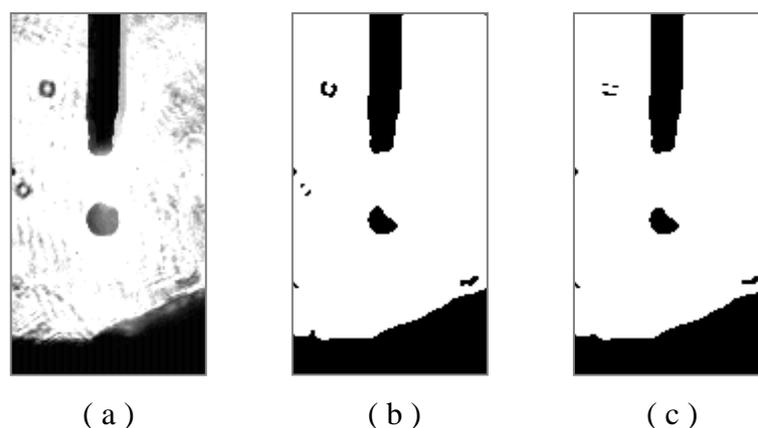


Figura 3.15. Processo de erosão da imagem; (a) imagem original; (b) imagem limiarizada; (c) imagem erodida.

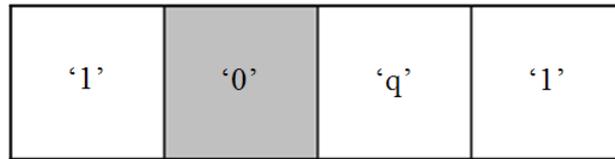


Figura 3.16. Elemento estruturante. O quadro cinza representa o pixel em estudo, ele toma o valor de zero (preto). Os quadros rotulados com '1' representam o valor do fundo (branco) e 'q' representa qualquer valor (preto ou branco).

A limiarização dinâmica faz parte da segunda etapa de segmentação e aponta a segmentar a gota, mas para isto, primeiro é necessário localizar espacialmente (coordenadas de tela, em pixels) o arame e a chapa dentro da imagem. Para isso, é utilizada a rotulação dos objetos segmentados.

### 3.3.3 – Rotulação de objetos

A rotulação é feita percorrendo a imagem pixel por pixel, da esquerda para a direita e de cima para baixo. A avaliação de conectividade é feita com os 8 pixels mais próximos (conectividade-8). Em alguns casos, depois de fazer o primeiro processo de rotulação, alguns objetos podem apresentar dois ou mais rótulos diferentes, o que torna necessário um processo de igualação de rótulos nos objetos; o qual é feito percorrendo novamente a imagem e verificando que todos os vizinhos conexos ao pixel (em estudo) tenham o mesmo rótulo, se não, aplica-se o rótulo correspondente ao vizinho que tenha um valor diferente. A Figura 3.17 apresenta o processo de rotulação em uma imagem, as cores na figura representam os rótulos. A Figura 3.17 (c) mostra que antes da igualação um objeto pode apresentar diferentes rótulos; a Figura 3.17 (d) mostra como esse problema é solucionado.

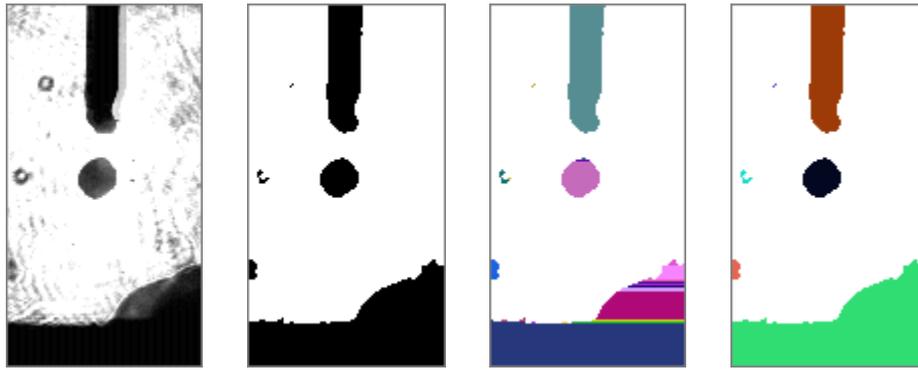


Figura 3.17. Processo de rotulação; (a) imagem original; (b) imagem limiarizada e erodida; (c) primeiro processo de rotulação; (d) rotulação final, depois da igualação.

Deste modo, os objetos são completamente identificados, um a um, tornando possível contar e registrar as coordenadas de cada um de seus pixels, permitindo definir o tamanho e a localização espacial de cada um. Nesta etapa, os ruídos que não foram totalmente eliminados no processo de limiarização são removidos da imagem comparando seu tamanho com o tamanho da chapa. Um estudo detalhado realizado em centenas de imagens indicou que a quantidade de ruído restante não supera 3% da área da chapa. Pode-se verificar na Figura 3.18, o uso da segmentação na eliminação de ruído.

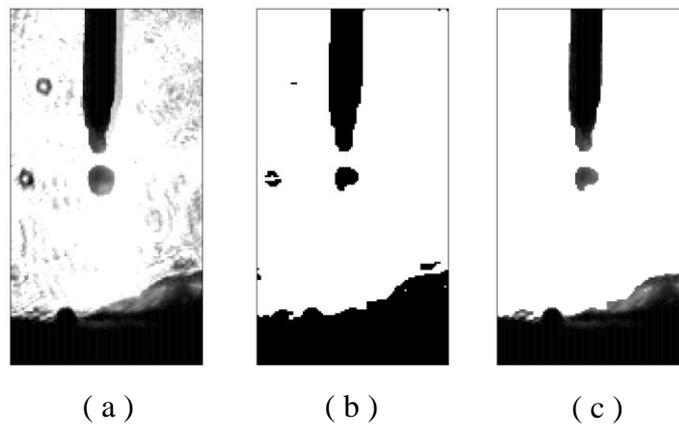


Figura 3.18. Processamento sequencial de uma imagem; (a) imagem original; (b) imagem limiarizada e erodida; (c) remoção de ruído por tamanho a partir da segmentação.

### 3.3.4 – Medição do tamanho da gota

Para medir o tamanho da gota é necessário fazer uma limiarização de caráter dinâmico, é preciso delimitar a zona de influência do arco. Para isso, são tomadas as coordenadas de linha e coluna  $(x,y)$  do último pixel (de cima para baixo) da ponta do arame e as coordenadas do primeiro pixel da chapa. O primeiro pixel da chapa é tomado como o primeiro de cima para baixo e da esquerda para a direita (local que não é influenciado pelo cordão). Com as coordenadas mencionadas anteriormente, delimita-se a área de ação do arco compreendida entre a ponta do arame e a chapa (como apresenta a Figura 3.19 (b) e (f)). Nesta área, novamente é usado o método de Otsu, finalizando assim a segunda etapa de limiarização (Figura 3.19 (c) e (g)).

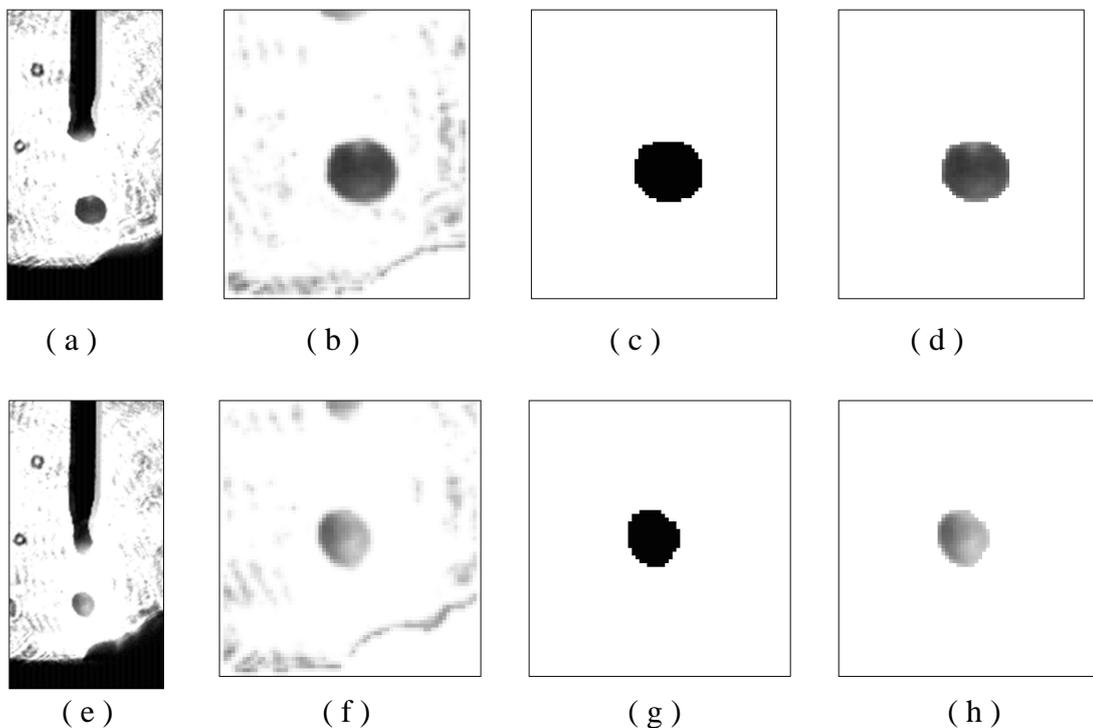


Figura 3.19. Processo para medir o tamanho da gota; (a) e (e) Imagens de transferência; (b) e (f) zona de influência do arco onde se localiza a gota em vôo para suas respectivas imagens à esquerda; (c) e (g) resultados da nova segmentação com eliminação de ruído; (d) e (h) gota limpa para efeitos de comparação visual.

Esta etapa é importante porque devido aos dois grandes grupos de tons de cinza que formam as imagens, escuros e claros (que formam a chapa e que formam o fundo), as gotas que estão envolvidas pelo arco possuem níveis intermediários de intensidade e, na

limiarização global, perdem pixels ou são eliminadas. Procurando um novo limiar só na zona do arco, os dois grupos de pixels serão aqueles do fundo e os que conformam a gota, assim, uma adequada segmentação da gota pode ser realizada (Figura 3.19 (d) e (h)). O ruído que venha a aparecer é eliminado novamente com processos de erosão. Um processo de rotulação é feito de novo para obter informação dos pixels (número e posições). Geralmente a ponta da gota também aparece neste passo, mas ela não é considerada.

Nesta pesquisa, o tamanho da gota é calculado como a soma dos pixels que a conformam, a qual será chamada de área da gota. Este estudo sugere compreender se uma gota é menor ou maior para determinados parâmetros em relação a outros (dentro da região de estudo). Para ter uma idéia do tamanho real das gotas foi calculado e comparado o diâmetro destas com respeito ao arame (medidas em pixels). Conversão de unidades (de pixels para milímetros) não foram feitas, mas podem ser realizadas a partir da adequada delimitação da gota, como reporta Maia (2001) ou Weglowski (2008). De acordo com Maia (2001), nesta pesquisa, o diâmetro de cada gota ( $D_{\text{área}}$ ) foi calculado como:

$$D_{\text{área}} = 2 \left( \sqrt{\frac{\text{área da gota}}{\pi}} \right) \quad (3.1)$$

Outros trabalhos, como Figueiredo (2000), medem o diâmetro da gota como o número de colunas que ocupa uma linha através do seu centro ou, como apresenta Weglowski (2008), o diâmetro poder-se-ia calcular como a média do número de colunas e o número de linhas encontrados no centro da gota.

### 3.3.5 – Medição da frequência de destacamento

Para medir a frequência de destacamento é necessário contar o número de gotas que são transferidas no processo durante um tempo fixo (neste caso 100 ms). Com a finalidade de atingir este objetivo, é realizada uma nova limiarização da imagem original ao redor da ponta do arame, o que permite recuperar os pontos perdidos pelo processo de limiarização global. Segue-se quadro a quadro a ponta do arame em cada imagem procurando acompanhar o processo de empescoçamento produzido pelo efeito Pinch. No processo de transferência, a gota é atraída e deslocada para a chapa, ao mesmo tempo em que o pescoço

se faz mais delgado, podendo alcançar um comprimento próximo ao diâmetro do arame. Deste modo, escolhe-se uma região de análise com comprimento igual ao dobro do diâmetro do arame, onde sua última linha coincide com a do último pixel do arame, como indica a Figura 3.20. Para saber se uma gota foi desprendida, são efetuadas medições do diâmetro do pescoço e da gota sobre esta região.

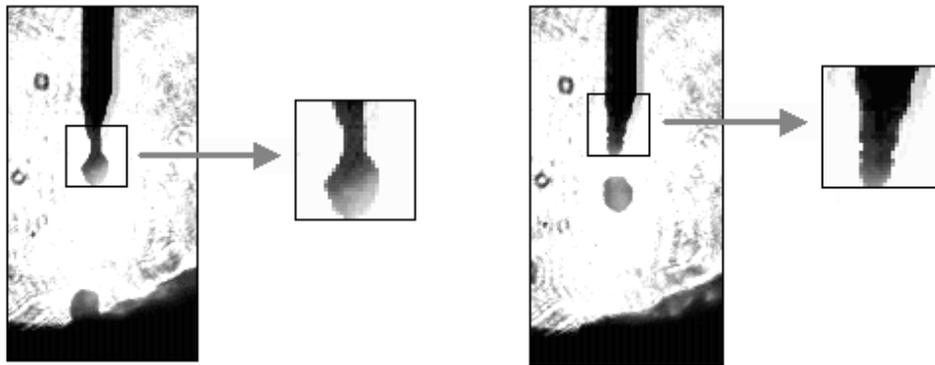


Figura 3.20. Região de análise para medir a frequência de destacamento

Uma análise sobre as imagens indicou que existem duas faixas dentro da região de análise propícias a fazer as medições sobre o pescoço e a gota. A primeira, para medir o pescoço, está localizada ao redor de um quarto do início da região (no sentido vertical), e a segunda, que mede a gota, está localizada ao redor de três quartos da mesma região, como apresenta a Figura 3.21. Neste caso, a palavra diâmetro denota a soma dos pixels contidos em 4 linhas de pixels localizadas nas faixas indicadas. Quando a gota está sendo formada e o pescoço se manifesta, o número de pixels localizados na faixa que está a um quarto, é menor que o número de pixels que estão na faixa a três quartos, Figura 3.21 (a). Depois da liberação da gota e até a manifestação do pescoço, o resultado é oposto, Figura 3.21 (b). A comparação e o seguimento das faixas indicam a frequência de destacamento das gotas no processo de soldagem.

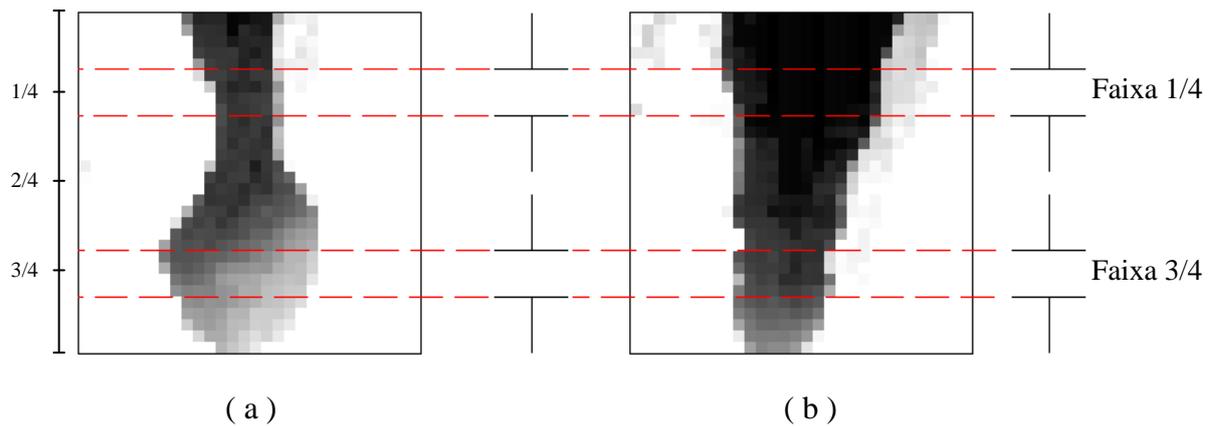


Figura 3.21. Faixas a  $\frac{1}{4}$  e  $\frac{3}{4}$  da imagem que permitem calcular se uma gota está-se formando ou já se desprende do arame. (a) Ponta do arame com a gota em formação; (b) ponta do arame depois do destacamento da gota

No trabalho de Maia (2001), apresenta-se uma metodologia para medir a frequência de destacamento que consiste em contar o número de gotas (ou objetos) que passam por uma região pequena perto da ponta do arame. A metodologia de Maia é mais rápida, mas não foi considerada porque ao trabalhar com taxa de aquisição de 1000 fps (a metade da usada por Maia), para qualquer combinação de parâmetros, não se garante uma região com tamanho fixo na qual todas as gotas passem por ela, que não tenha problemas de ruído (que não se encontre com a poça) e que não permita que uma mesma gota esteja presente na região por mais de um quadro (porque pode ser contada mais de uma vez). A uma taxa de 1000 fps, para algumas combinações de parâmetros, em um quadro uma gota pode estar na ponta do arame e no próximo a mesma gota pode estar chegando à poça.

Neste ponto foram contadas o número de gotas que saíram do arame em um tempo de 100 ms. Outro ponto é repetir este processo um número determinado de vezes para conhecer o comportamento destas medidas e poder assegurar de usá-las na concepção do modelo. Assim, procurando uma amostra grande, decidiu-se repetir 70 vezes o processo de medição para cada ponto de trabalho estabelecido.

Deste modo, para cada experimento feito, dentro da pasta com as 6000 imagens de transferência que compõem a filmagem, são selecionadas de forma aleatória 70 sequências, cada uma de 100 imagens; isto é feito utilizando um vetor aleatório de 70 posições com números entre zero e 5900. O programa que calcula o tamanho e a frequência de destacamento das gotas percorre o vetor, cada vez que toma um valor, acede ao quadro

correspondente ao número do vetor e faz o processo de medir o tamanho e contar o número de gotas destacadas nas 100 imagens que compõem o quadro selecionado e os 99 que o seguem; o processo se repete até terminar o vetor das 70 posições.

Ao final para cada experimento se tem 70 valores de frequência de destacamento e um número indeterminado de tamanhos de gotas; este número não se conhece porque o processo mede o tamanho de todas as gotas que encontra em todas as imagens, sem importar se repetem-se ou se tem mais de uma gota numa imagem. Deste modo são terminadas as etapas de descrição, reconhecimento e interpretação no processamento das imagens de transferência goticular adquiridas.

## 4 – RESULTADOS

A modelagem da transferência goticular projetada é estabelecida a partir dos resultados do tamanho e frequência de destacamento das gotas obtidos em cada experimento. É importante considerar que as sequências de 100 imagens usadas são escolhidas aleatoriamente por um vetor gerado pelo programa, assim, cada vez que o programa for executado o vetor muda o valor, as sequências também são alteradas, o que pode ocasionar respostas diferentes a cada vez. O método de estudo foi estabelecido partindo de que, embora as respostas variem um pouco, seu comportamento apresenta um padrão definido, isto é, de acordo com a revisão bibliográfica na transferência goticular projetada os valores esperados de tamanho e frequência de destacamento das gotas apresentam uma distribuição *normal* (tamanho e frequência de destacamento uniformes).

A primeira parte deste capítulo exhibe histogramas que representam as distribuições de probabilidade do tamanho e da frequência de destacamento medidas em cada processo. A segunda etapa apresenta a concepção dos modelos e a superfície de resposta para cada um.

### 4.1 – MEDIÇÃO DE CARACTERÍSTICAS

Neste passo, o programa de medição foi executado várias vezes para cada ponto de trabalho. Apresentam-se histogramas típicos encontrados em cada ponto.

#### 4.1.1 – Tamanho das gotas

A continuação se apresentam os resultados das medições de área e diâmetro encontrados em cada ponto de trabalho de acordo com o *Planejamento Composto Central*. Para todos os casos o valor do diâmetro do arame foi 16 pixels.

##### a) Ponto de trabalho **5.8 m/min, 28 V**

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam histogramas de densidade de probabilidade da área e do diâmetro da gota respectivamente. A Figura 4.3 apresenta o gráfico de probabilidade

normal dos resíduos dos diâmetros calculados, a linha vermelha representa uma estimaco de probabilidade normal para esse gráfico. A Tabela 4.1 referência em sua primeira linha os valores de média amostral e desvio padro destes histogramas, também apresenta valores encontrados em outras execues do programa no mesmo ponto de trabalho; os histogramas e o gráfico de probabilidade desses valores apresentam comportamentos similares aos das Figuras 4.1, 4.2 e 4.3. Ao final da tabela apresenta-se o valor correspondente  média amostral das médias encontradas nas execues, este valor é usado na concepo dos modelos.

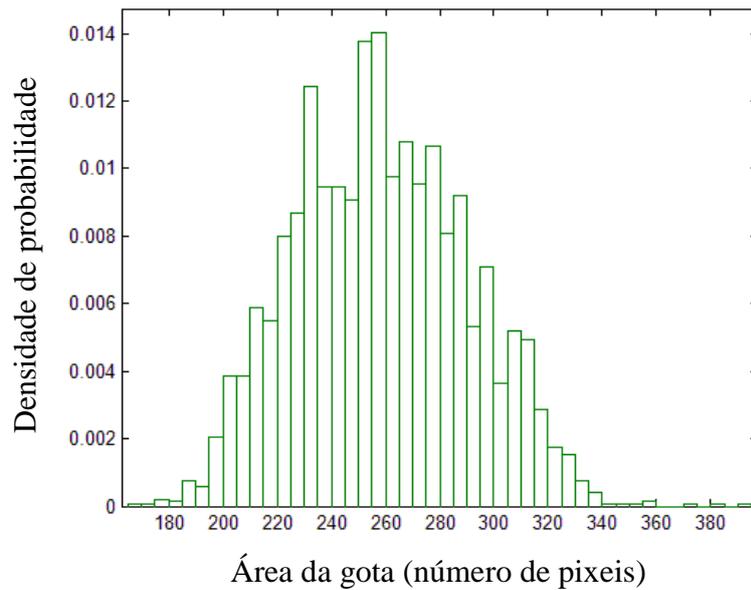


Figura 4.1. Densidade de probabilidade VS rea da gota; ponto 5.8 m/min, 28 V.

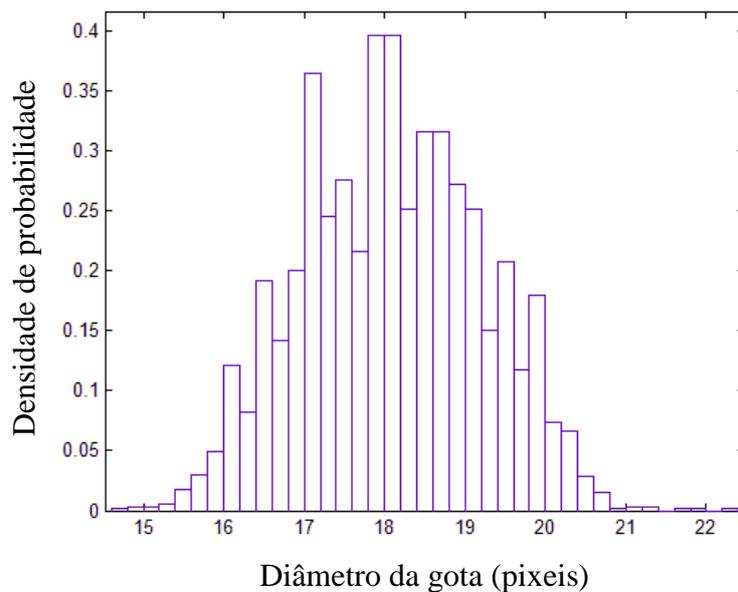


Figura 4.2. Densidade de probabilidade VS Diâmetro da gota; ponto 5.8 m/min, 28 V.

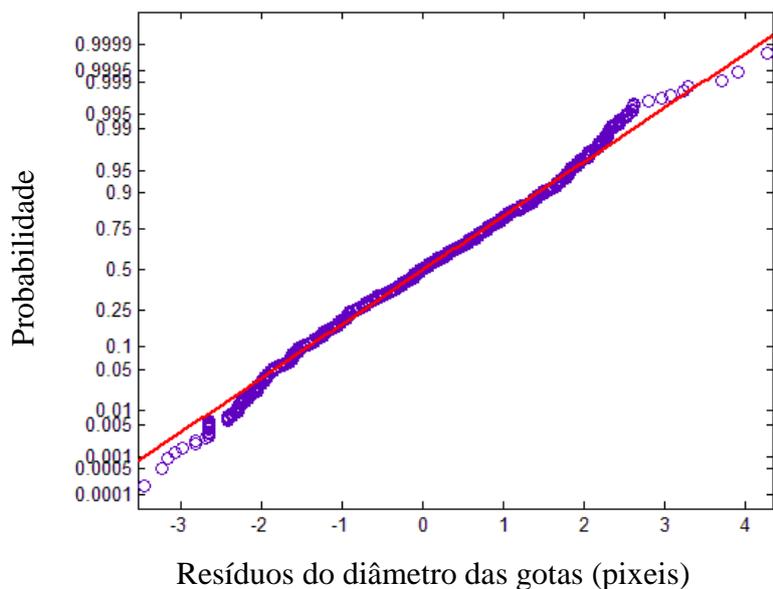


Figura 4.3. Probabilidade VS Resíduos do diâmetro das gotas; ponto 5.8 m/min, 28 V.

Tabela 4.1. Média amostral e desvio padrão para o tamanho da gota medida em diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 5.8 m/min, 28 V.

Execução	Média amostral da área das gotas (Pixels)	Desvio padrão da área das gotas (Pixels)	Média amostral do diâmetro das gotas (Pixels)	Desvio padrão do diâmetro das gotas (Pixels)
1	258.08	31.87	18.09	1.12
2	257.77	32.94	18.08	1.15
3	254.37	29.93	17.96	1.05
4	255.95	31.09	18.01	1.10
5	255.96	30.50	18.02	1.07
Média das médias amostrais	256.43	31.27	17.87	1.13

Embora efetivamente não se encontrem frações de pixel na imagem, na Tabela 4.1 os valores de média amostral do tamanho e do diâmetro das gotas apresentam decimais que são usados para reforçar os modelos. A seguir se apresentam os gráficos e a tabelas referenciadas com anterioridade para os pontos de trabalho correspondentes.

b) Ponto de trabalho **6 m/min, 27 V**

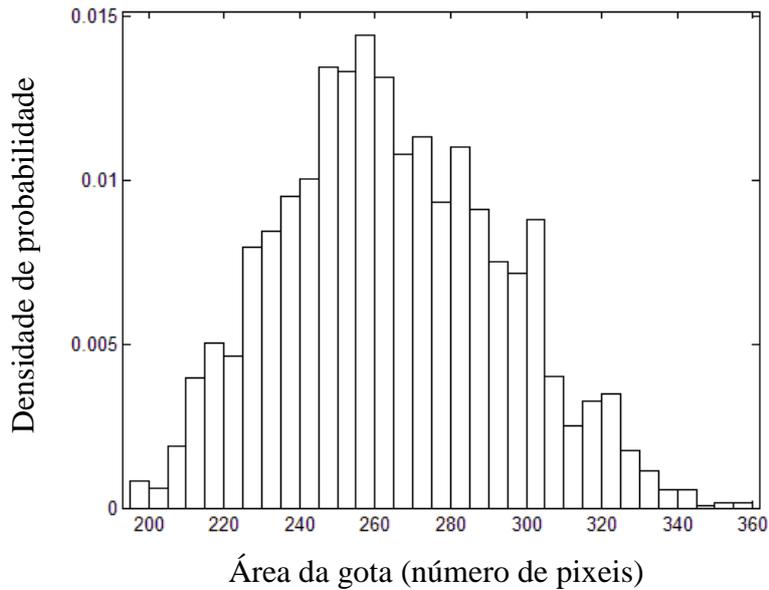


Figura 4.4. Densidade de probabilidade VS Área da gota; ponto 6 m/min, 27 V.

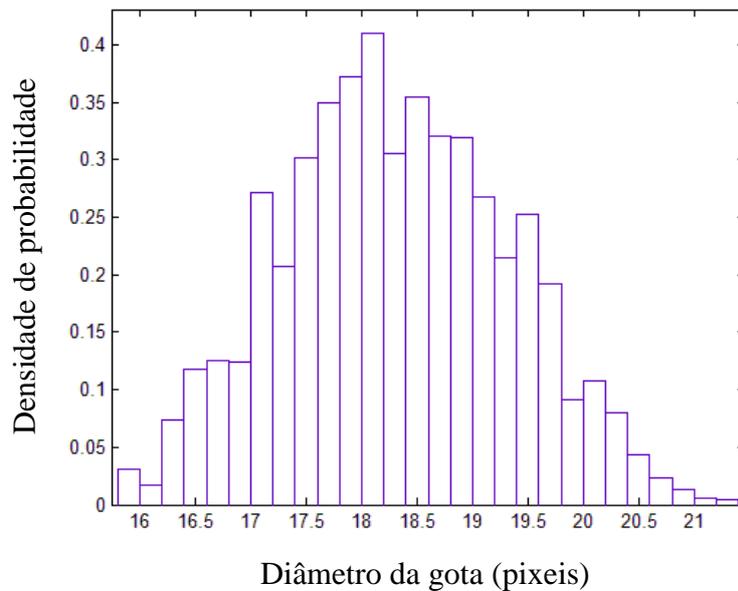


Figura 4.5. Densidade de probabilidade VS Diâmetro da gota; ponto 6 m/min, 27 V.

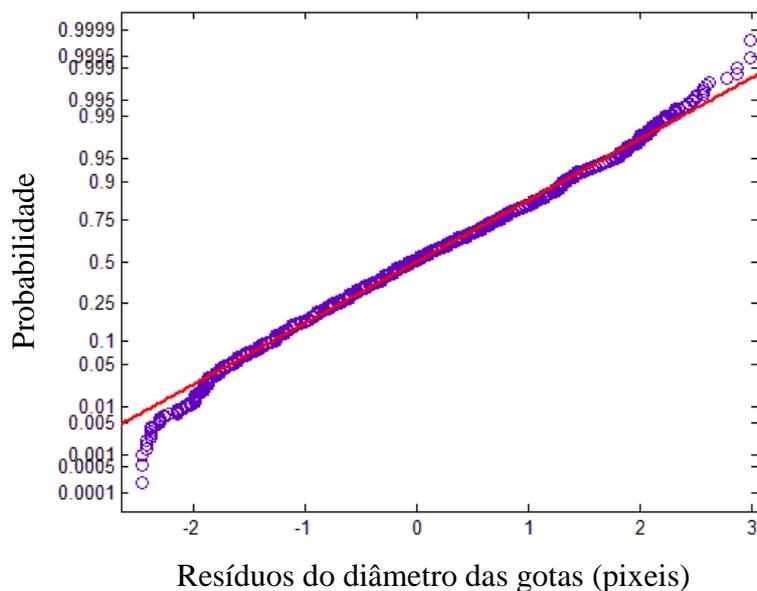


Figura 4.6. Probabilidade VS Resíduos do diâmetro das gotas; ponto 6 m/min, 27 V.

Tabela 4.2. Média amostral e desvio padrão do tamanho da gota medida em diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 6 m/min, 27 V.

Execução	Média amostral da área das gotas (Pixeis)	Desvio padrão da área das gotas (Pixeis)	Média amostral do diâmetro das gotas (Pixeis)	Desvio padrão do diâmetro das gotas (Pixeis)
1	264.06	29.36	18.30	1.01
2	262.94	32.18	18.26	1.11
3	263.86	30.10	18.29	1.04
4	263.78	31.75	18.29	1.10
5	265.21	30.63	18.34	1.06
Média das médias amostrais	263.97	30.80	18.27	1.06

c) Ponto de trabalho **6 m/min, 29 V**

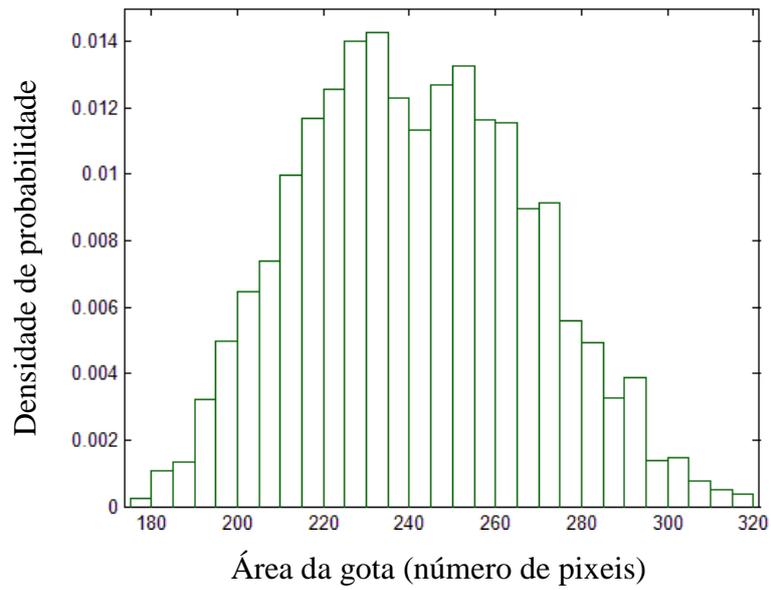


Figura 4.7. Densidade de probabilidade VS Área da gota; ponto 6 m/min, 29 V.

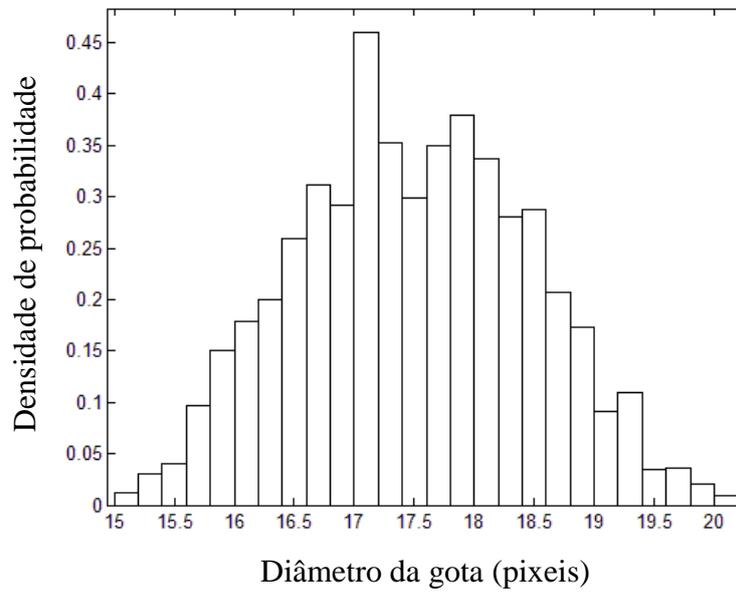


Figura 4.8. Densidade de probabilidade VS Diâmetro da gota; ponto 6 m/min, 29 V.

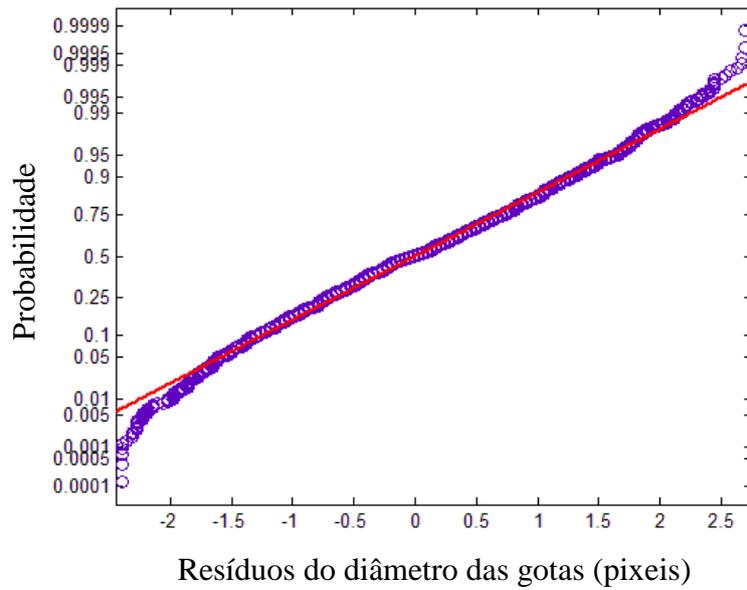


Figura 4.9. Probabilidade VS Resíduos do diâmetro das gotas; ponto 6 m/min, 29 V.

Tabela 4.3. Média amostral e desvio padrão do tamanho da gota medida em diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 6 m/min, 29 V.

Execução	Média amostral do tamanho da gota (Pixeis)	Desvio padrão do tamanho das gotas (Pixeis)	Média amostral do diâmetro das gotas (Pixeis)	Desvio padrão do diâmetro das gotas (Pixeis)
1	241.04	26.72	17.49	0.97
2	240.78	26.44	17.48	0.96
3	241.72	27.77	17.51	1.01
4	242.96	27.28	17.56	0.99
5	241.48	27.85	17.50	1.01
Média das médias amostrais	241.60	27.21	17.51	0.99

d) Ponto de trabalho **6.5 m/min, 26.6 V**

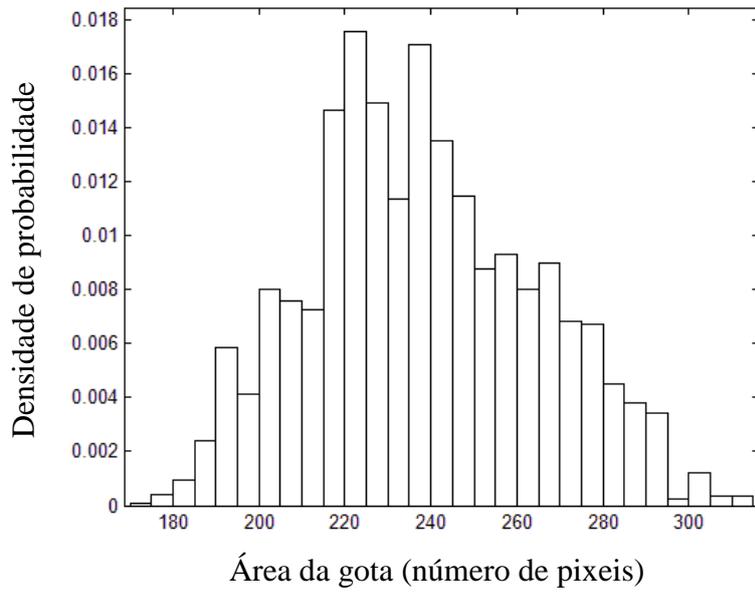


Figura 4.10. Densidade de probabilidade VS Área da gota; ponto 6.5 m/min, 26.6 V.

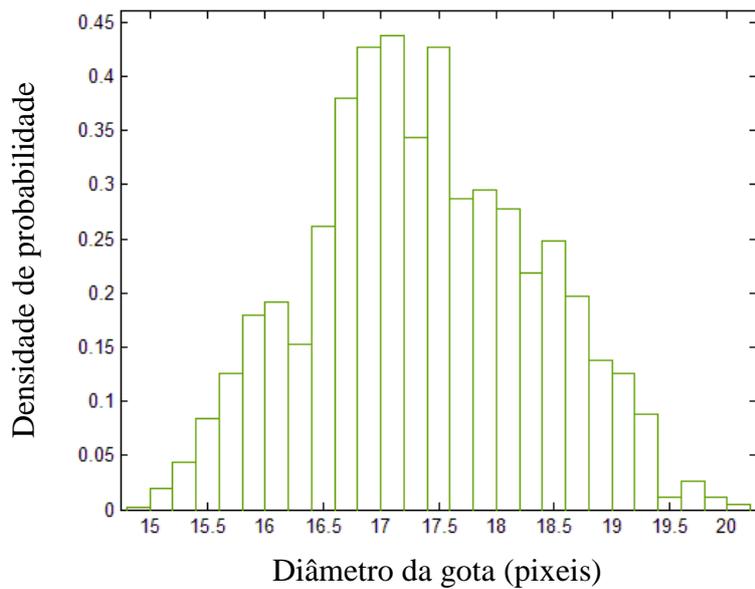


Figura 4.11. Densidade de probabilidade VS Diâmetro da gota; ponto 6.5 m/min, 26.6 V.

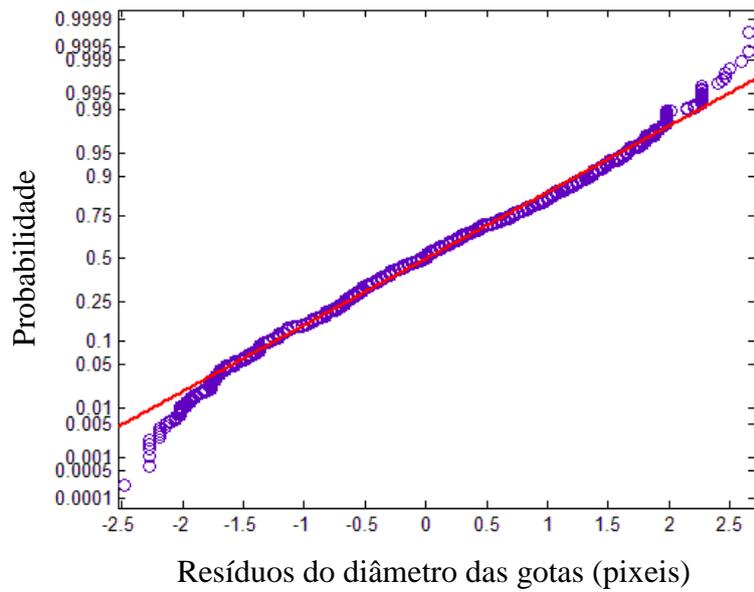


Figura 4.12. Probabilidade VS Resíduos do diâmetro das gotas; ponto 6.5 m/min, 26.6 V.

Tabela 4.4. Média amostral e desvio padrão do tamanho da gota medida em diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 6.5 m/min, 26.6 V.

Execução	Média amostral da área das gotas (Pixeis)	Desvio padrão da área das gotas (Pixeis)	Média amostral do diâmetro das gotas (Pixeis)	Desvio padrão do diâmetro das gotas (Pixeis)
1	237.62	26.53	17.37	0.97
2	238.49	26.39	17.40	0.96
3	237.68	26.32	17.36	0.96
4	236.86	26.23	17.34	0.96
5	237.54	26.70	17.36	0.98
Média das médias amostrais	237.64	26.43	17.37	0.96

e) Ponto de trabalho **6.5 m/min, 28 V**

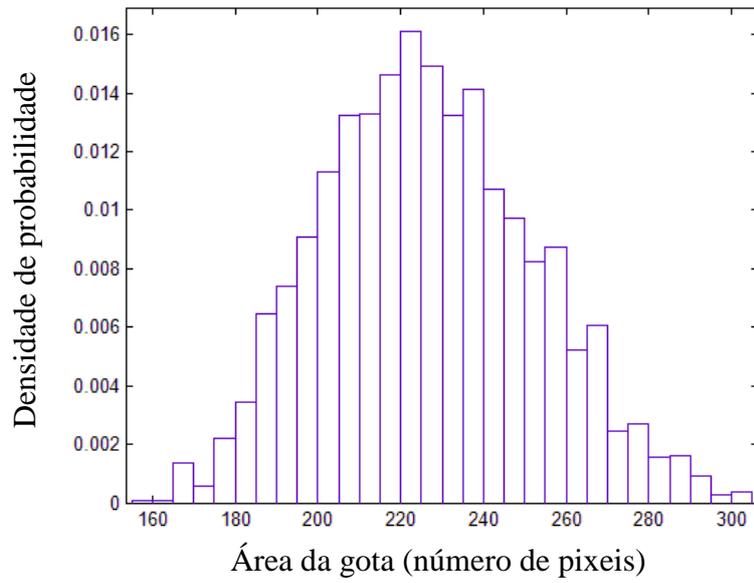


Figura 4.13. Densidade de probabilidade VS Área da gota; ponto 6.5 m/min, 28 V.

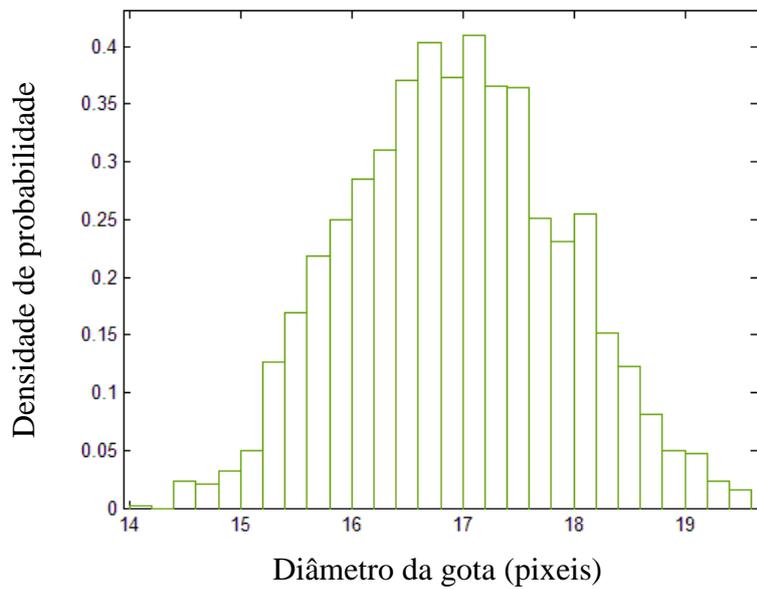


Figura 4.14. Densidade de probabilidade VS Diâmetro da gota; ponto 6.5 m/min, 28 V.

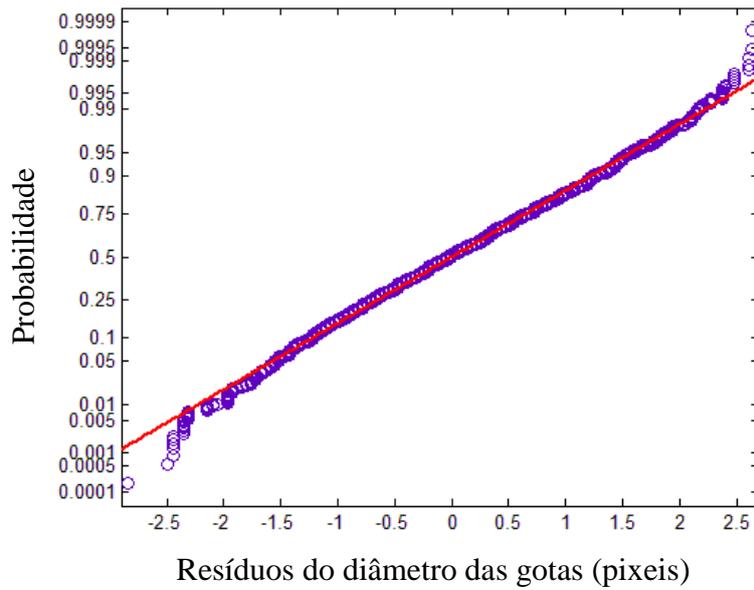


Figura 4.15. Probabilidade VS Resíduos do diâmetro das gotas; ponto 6.5 m/min, 28 V.

Tabela 4.5. Média amostral e desvio padrão do tamanho da gota medida em diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 6.5 m/min, 28 V.

Execução	Média amostral da área das gotas (Pixeis)	Desvio padrão da área das gotas (Pixeis)	Média amostral do diâmetro das gotas (Pixeis)	Desvio padrão do diâmetro das gotas (Pixeis)
1	226.11	25.49	16.94	0.95
2	228.16	25.32	17.02	0.94
3	226.59	24.58	16.96	0.92
4	225.68	24.57	16.92	0.92

Uma vez que este ponto de trabalho é o ponto central do *Planejamento Composto Central*, diferentemente dos demais, não se considerou a média das médias amostrais devido ao fato de que os 4 valores das execuções foram utilizados na concepção do modelo.

f) Ponto de trabalho **6.5 m/min, 29.4 V**

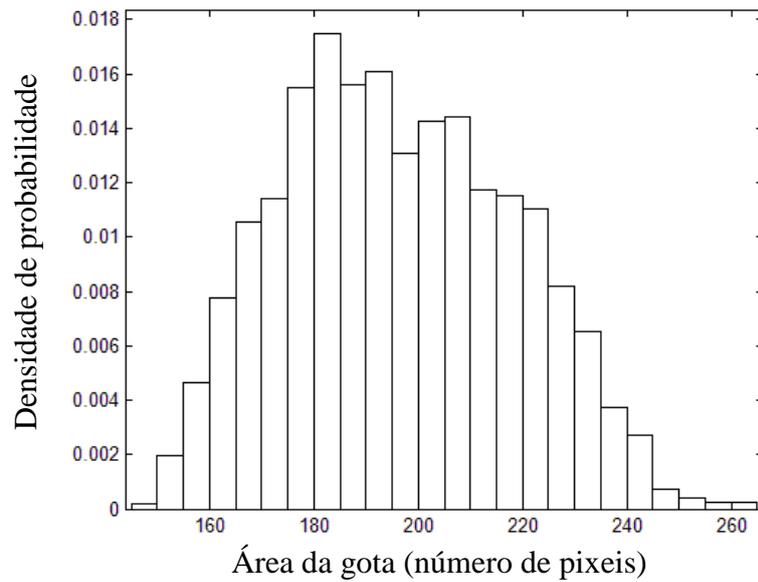


Figura 4.16. Densidade de probabilidade VS Área da gota; ponto 6.5 m/min, 29.4 V.

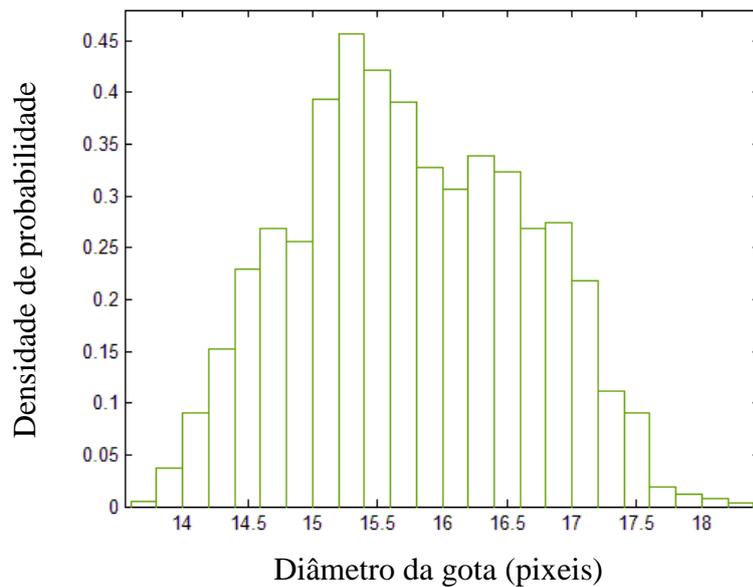


Figura 4.17. Densidade de probabilidade VS Diâmetro da gota; ponto 6.5 m/min, 29.4 V.

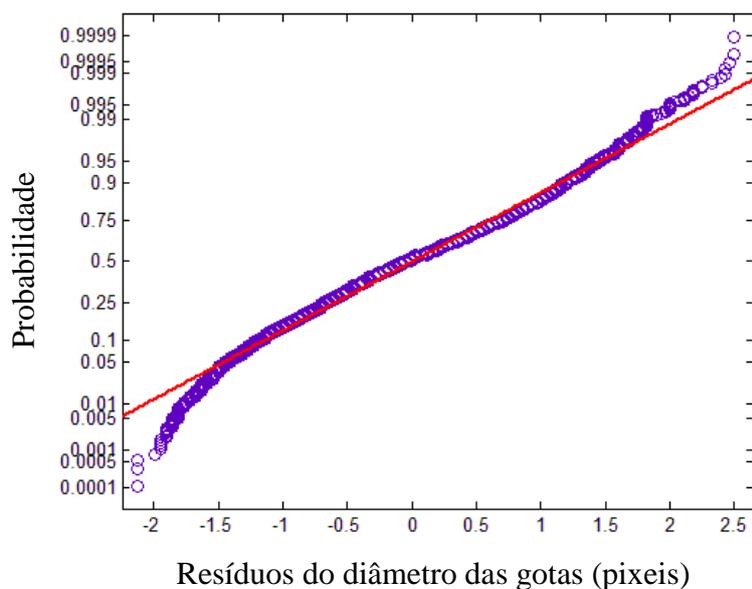


Figura 4.18. Probabilidade VS Resíduos do diâmetro das gotas; ponto 6.5 m/min, 29.4 V.

Tabela 4.6. Média amostral e desvio padrão do tamanho da gota medida em diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 6.5 m/min, 29.4 V.

Execução	Média amostral da área das gotas (Pixeis)	Desvio padrão da área das gotas (Pixeis)	Média amostral do diâmetro das gotas (Pixeis)	Desvio padrão do diâmetro das gotas (Pixeis)
1	195.86	21.99	15.77	0.88
2	194.88	21.80	15.72	0.88
3	198.10	22.63	15.85	0.91
4	196.60	22.75	15,79	0.91
5	195.86	21.99	15.76	0.88
Média das médias amostrais	196.26	22.23	15.78	0.89

g) Ponto de trabalho **7 m/min, 27 V**

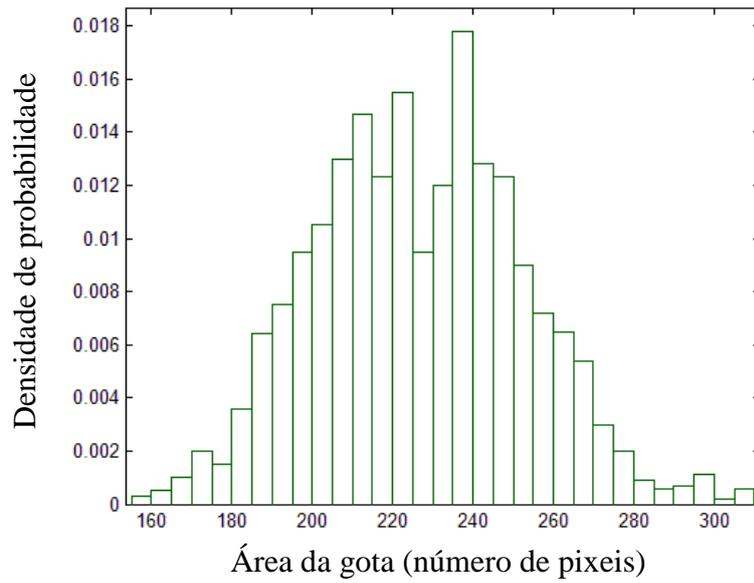


Figura 4.19. Densidade de probabilidade VS Área da gota; ponto 7 m/min, 27 V.

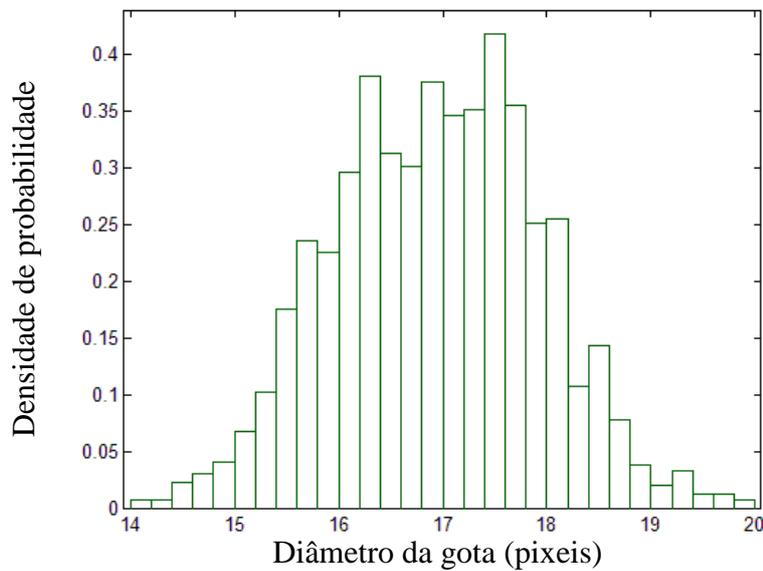


Figura 4.20. Densidade de probabilidade VS Diâmetro da gota; ponto 7 m/min, 27 V.

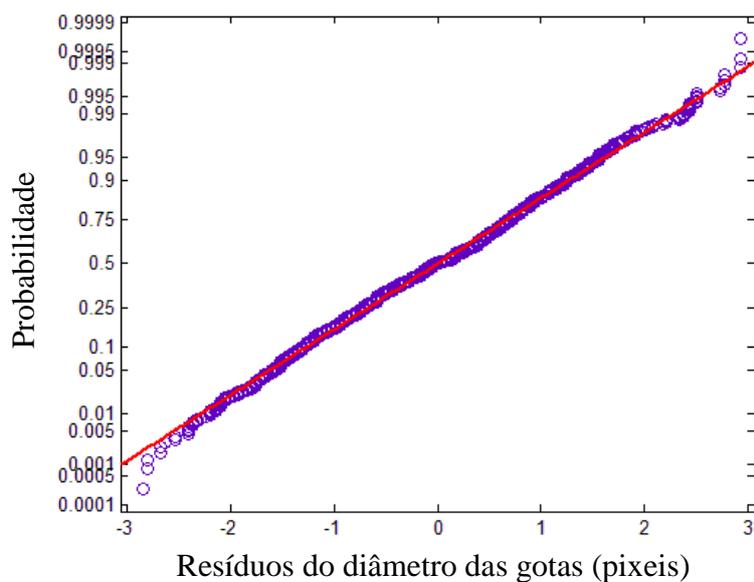


Figura 4.21. Probabilidade VS Resíduos do diâmetro das gotas; ponto 7 m/min, 27 V.

Tabela 4.7. Média amostral e desvio padrão do tamanho da gota medida em diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 7 m/min, 27 V.

Execução	Média amostral da área das gotas (Pixeis)	Desvio padrão da área das gotas (Pixeis)	Média amostral do diâmetro das gotas (Pixeis)	Desvio padrão do diâmetro das gotas (Pixeis)
1	226.18	26.19	16.94	0.98
2	225.58	26.52	16.92	1.00
3	226.60	26.58	16.96	1.00
4	226.18	26.19	16.94	0.98
5	225.10	26.99	16.90	1.02
Média das médias amostrais	225.93	26.49	16.93	1.00

h) Ponto de trabalho **7 m/min, 29 V**

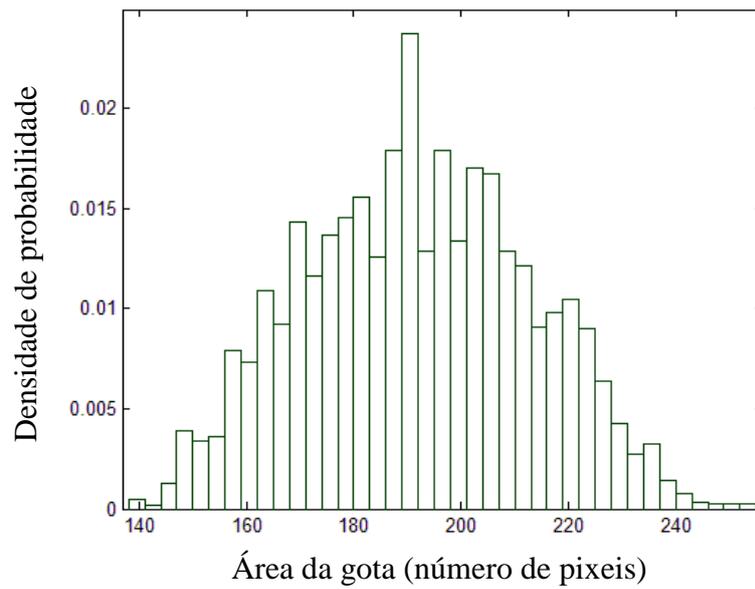


Figura 4.22. Densidade de probabilidade VS Área da gota; ponto 7 m/min, 29 V.

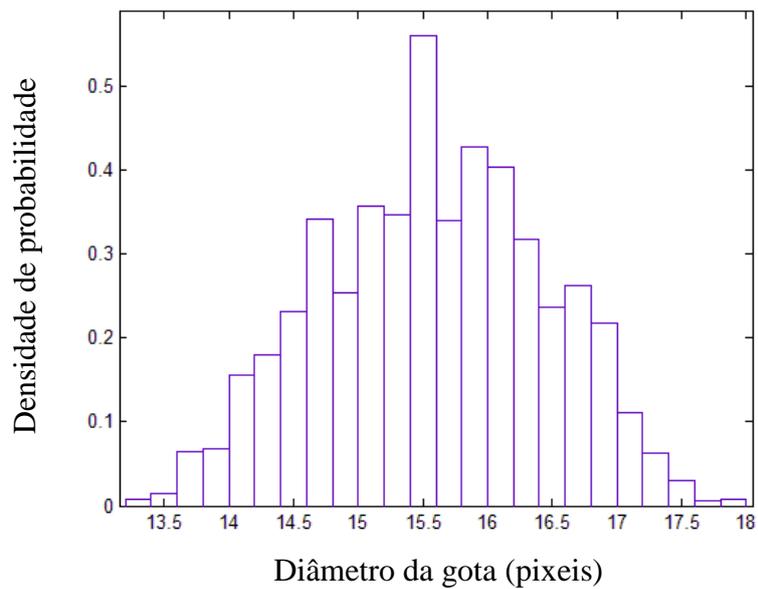


Figura 4.23. Densidade de probabilidade VS Diâmetro da gota; ponto 7 m/min, 29 V.

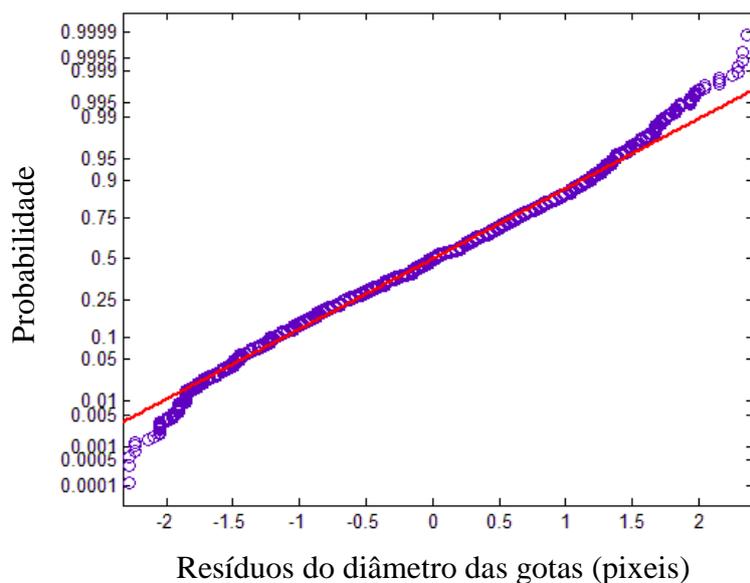


Figura 4.24. Probabilidade VS Resíduos do diâmetro das gotas; ponto 7 m/min, 29 V.

Tabela 4.8. Média amostral e desvio padrão do tamanho da gota medida em diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 7 m/min, 29 V.

Execução	Média amostral da área das gotas (Pixeis)	Desvio padrão da área das gotas (Pixeis)	Média amostral do diâmetro das gotas (Pixeis)	Desvio padrão do diâmetro das gotas (Pixeis)
1	191.37	21.22	15.58	0.87
2	190.09	20.78	15.53	0.85
3	188.03	21.07	15.45	0.86
4	189.69	21.38	15.52	0.88
5	190.04	23.66	15.52	0.97
Média das médias amostrais	189.84	21.62	15.52	0.89

i) Ponto de trabalho **7.2 m/min, 28 V**

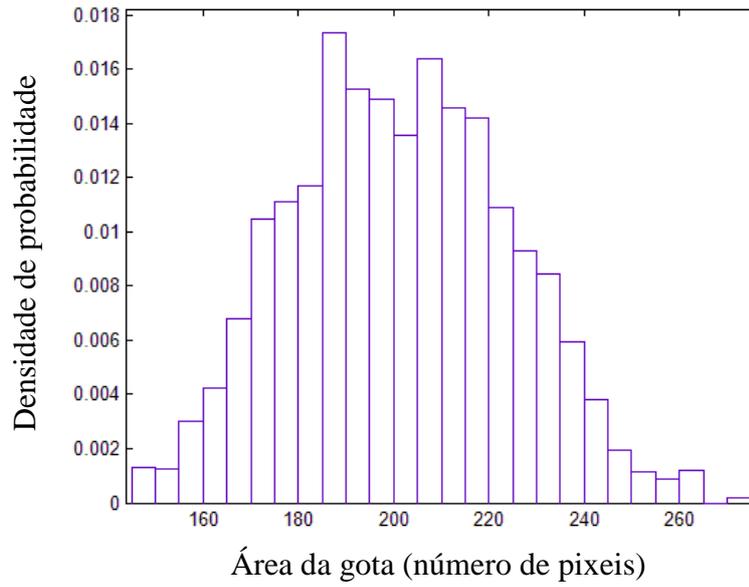


Figura 4.25. Densidade de probabilidade VS Área da gota; ponto 7.2 m/min, 28 V.

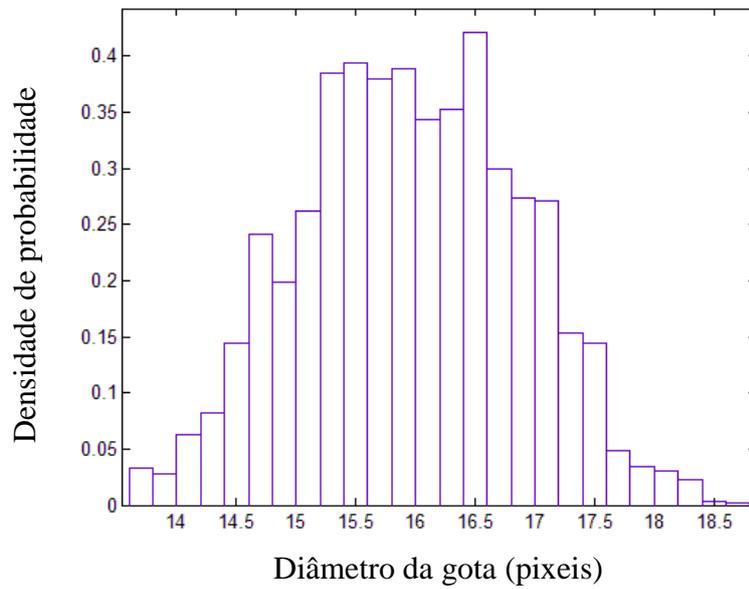


Figura 4.26. Densidade de probabilidade VS Diâmetro da gota; ponto 7.2 m/min, 28 V.

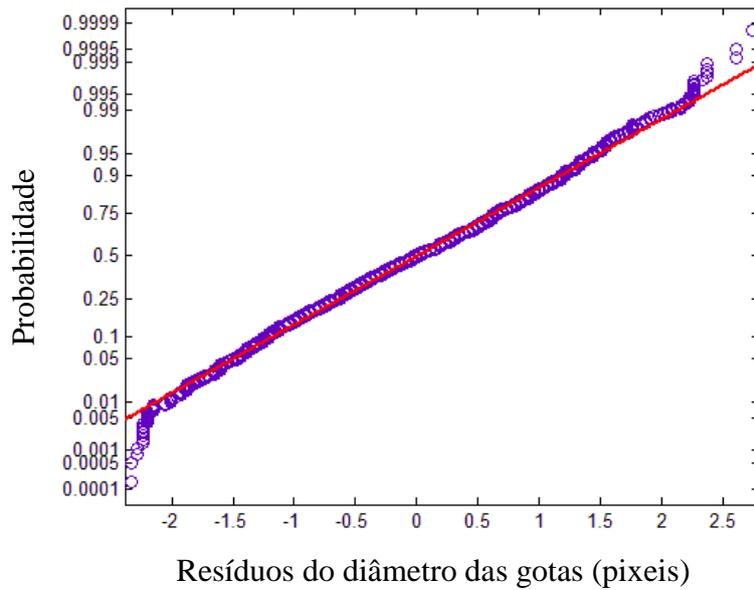


Figura 4.27. Probabilidade VS Resíduos do diâmetro das gotas; ponto 7.2 m/min, 28 V.

Tabela 4.9. Média amostral e desvio padrão do tamanho da gota medida em diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 7.2 m/min, 28 V.

Execução	Média amostral da área das gotas (Pixeis)	Desvio padrão da área das gotas (Pixeis)	Média amostral do diâmetro das gotas (Pixeis)	Desvio padrão do diâmetro das gotas (Pixeis)
1	200.90	22.96	15.97	0.91
2	200.88	23.33	15.96	0.93
3	198.85	23.14	15.88	0.92
4	196.34	22.24	15.78	0.90
5	199.96	24.14	15.92	0.96
Média das médias amostrais	199.39	23.16	15.90	0.92

A Figura 4.28 apresenta um resumo da média da área das gotas encontradas para cada ponto de trabalho do *Planejamento Composto Central*. O gráfico permite observar a tendência do comportamento do tamanho em relação aos fatores de entrada.

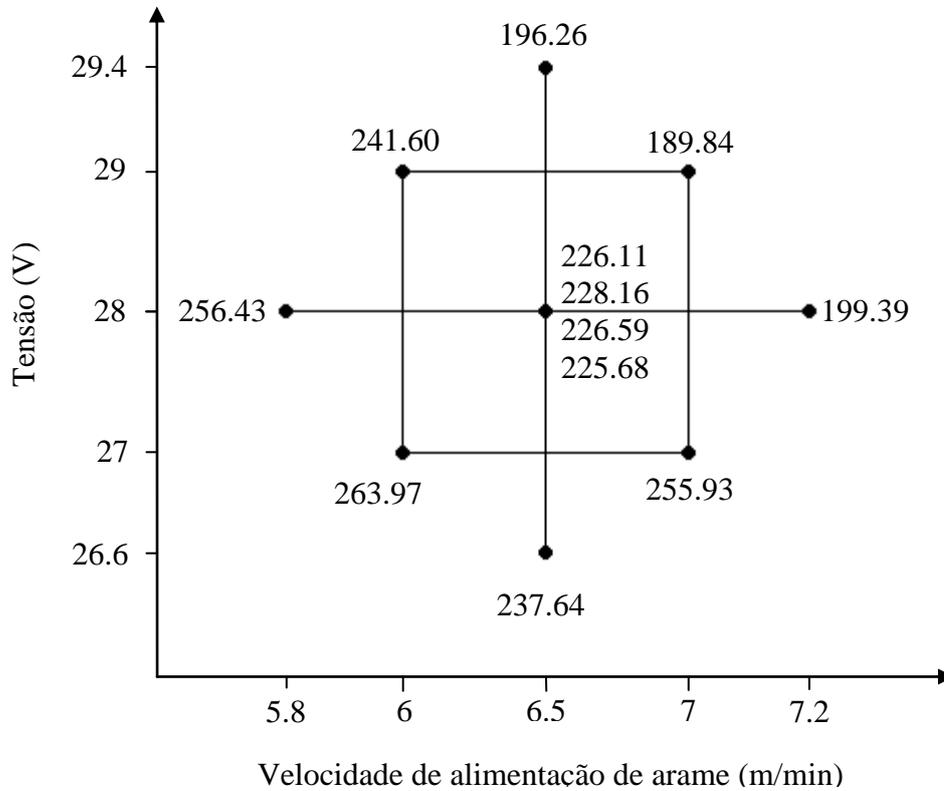


Figura 4.28. Valores de área da gota em relação ao *Planejamento Composto Central*.

De acordo com a revisão bibliográfica, ao aumentar a velocidade de alimentação de arame numa fonte de tipo tensão constante e manter os demais fatores de entrada constantes, a corrente do processo aumenta. 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. O aumento da corrente provoca um aumento na magnitude das forças de Lorentz, ocasionando que as gotas sejam formadas em menor tempo e assim sejam de menor tamanho.

#### 4.1.2 – Medição da frequência de destacamento

Apresentam-se a continuação os valores de frequência de destacamento encontrados para cada ponto de trabalho. Neste caso utilizam-se gráficos de densidade de probabilidade e de probabilidade normal dos resíduos da frequência de destacamento. Igual ao caso do tamanho das gotas, cada ponto é acompanhado por uma tabela que indica diferentes valores encontrados nas execuções do programa; a primeira linha da tabela refere-se aos gráficos apresentados.

No processo de medição da frequência de destacamento o programa conta o número de gotas destacadas em um intervalo de 100 ms, para o caso dos gráficos, as tabelas e os modelos, o valor foi multiplicado por 10 para mostrar as medidas em segundos (número de gotas por segundo).

a) Ponto de trabalho **5.8 m/min, 28 V**

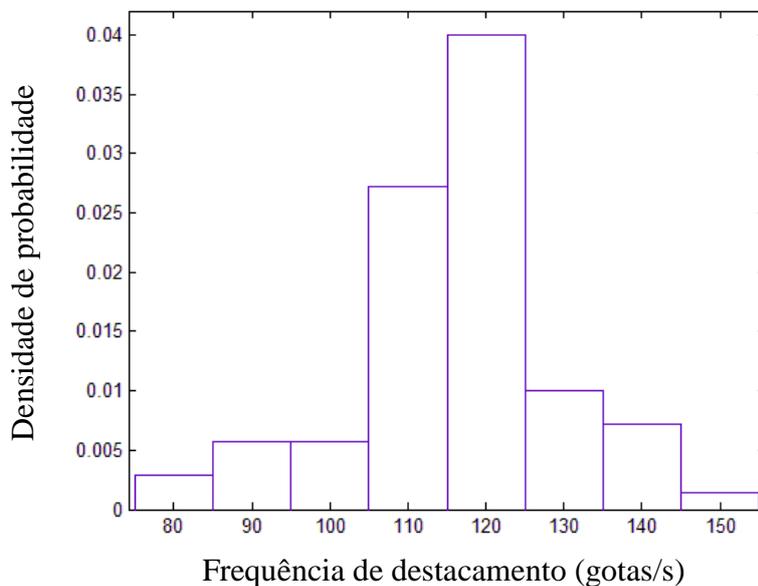


Figura 4.29. Densidade de probabilidade VS frequência de destacamento; ponto 5.8 m/min, 28 V.

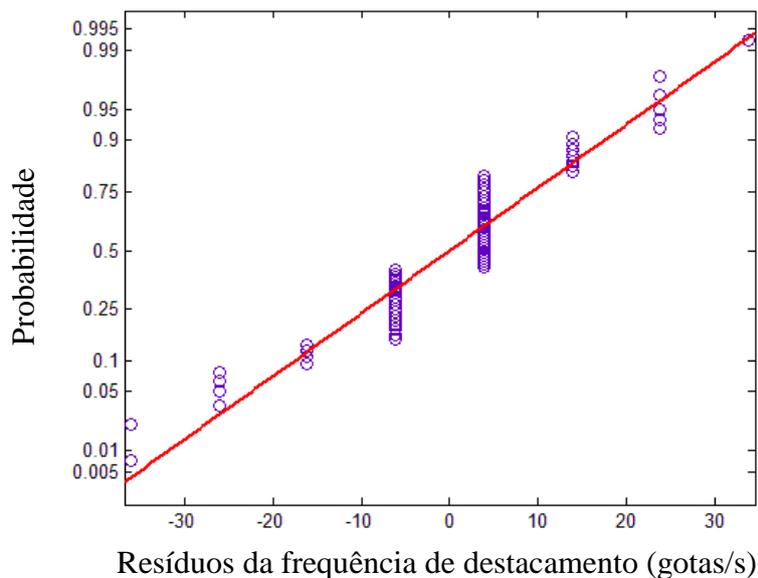


Figura 4.30. Probabilidade VS Resíduos da frequência de destacamento; ponto 5.8 m/min, 28 V.

Tabela 4.10. Média amostral e desvio padrão da frequência de destacamento medida para diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 5.8 m/min, 28 V.

Execução	Frequência de destacamento (gotas/segundo)	Desvio padrão do tamanho das gotas (gotas/segundo)
1	116.14	13.65
2	113.43	18.01
3	119.14	14.42
4	116.44	11.42
5	117.57	11.09
Média das médias amostrais	116.54	13.72

b) Ponto de trabalho **6 m/min, 27 V**

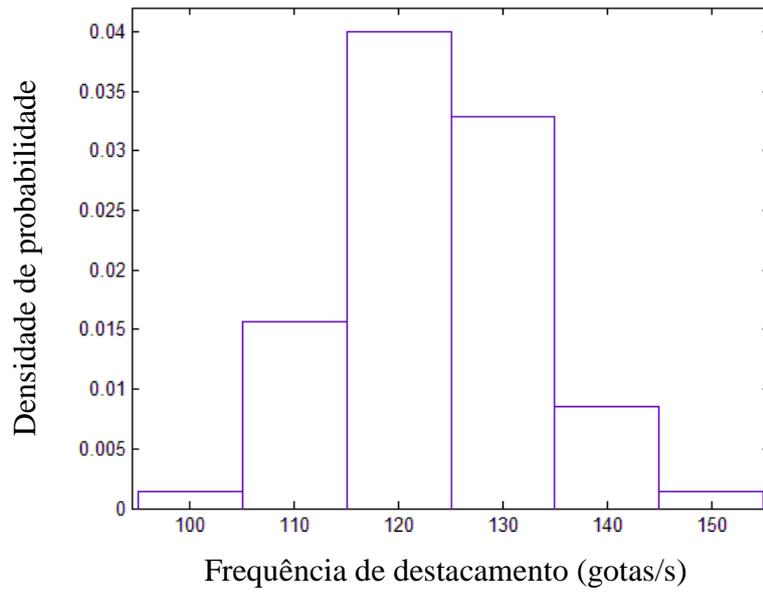


Figura 4.31. Densidade de probabilidade VS frequência de destacamento; ponto 6 m/min, 27 V.

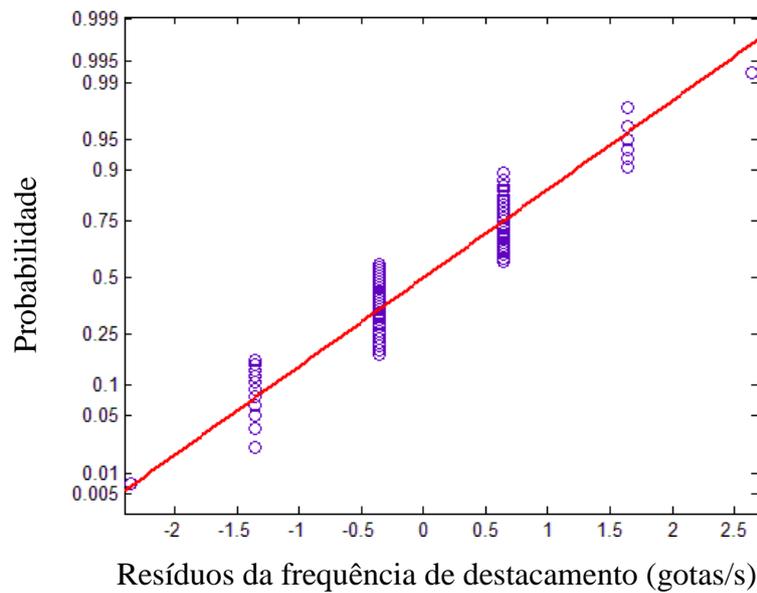


Figura 4.32. Probabilidade VS Resíduos da frequência de destacamento; ponto 6 m/min, 27 V.

Tabela 4.11. Média amostral e desvio padrão da frequência de destacamento medida para diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 6 m/min, 27 V.

Execução	Frequência de destacamento (gotas/segundo)	Desvio padrão do tamanho das gotas (gotas/segundo)
1	123.57	9.48
2	124.29	10.84
3	122.57	9.43
4	123.43	10.20
5	122.85	11.05
Média das médias amostrais	123.34	10.20

c) Ponto de trabalho **6 m/min, 29 V**

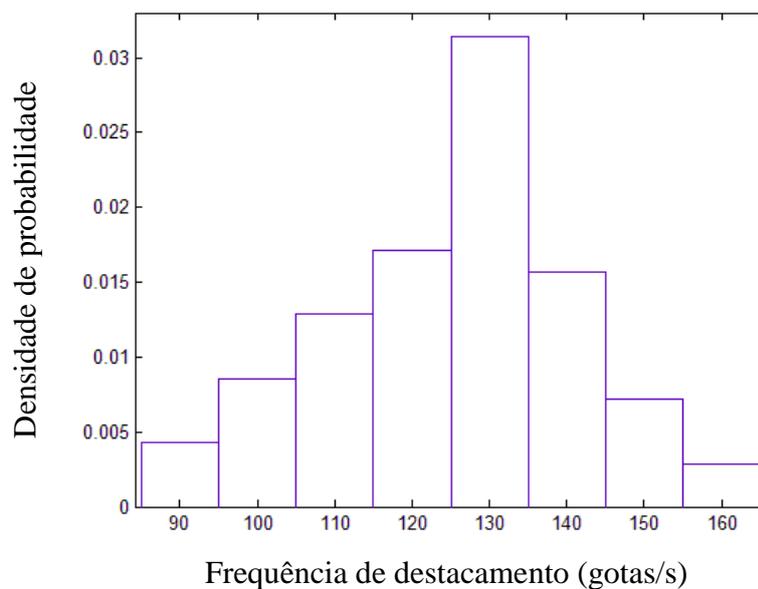


Figura 4.33. Densidade de probabilidade VS frequência de destacamento; ponto 6 m/min, 29 V.

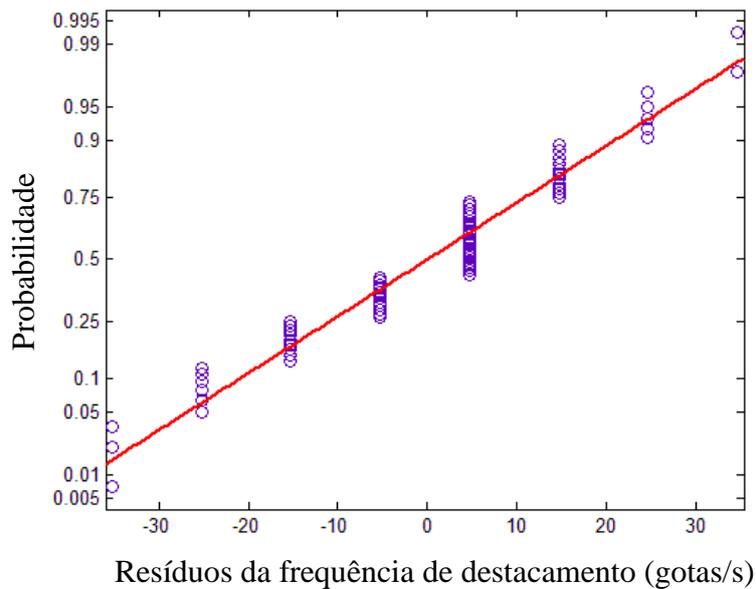


Figura 4.34. Probabilidade VS Resíduos da frequência de destacamento; ponto 6 m/min, 29 V.

Tabela 4.12. Média amostral e desvio padrão da frequência de destacamento medida para diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 6 m/min, 29 V.

Execução	Frequência de destacamento (gotas/segundo)	Desvio padrão do tamanho das gotas (gotas/segundo)
1	125.28	16.30
2	124.86	15.29
3	123.28	16.12
4	123.71	15.52
5	124.85	15.29
Média das médias amostrais	124.40	15.70

d) Ponto de trabalho **6.5 m/min, 26.6 V**

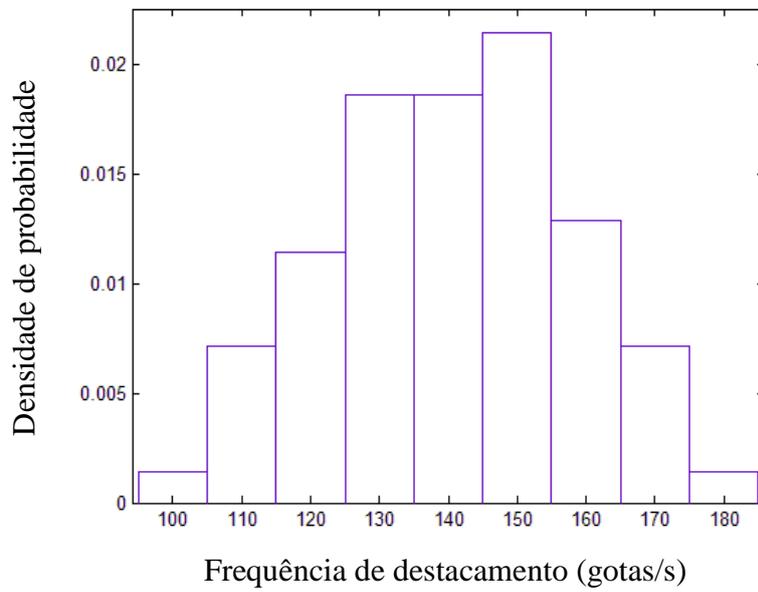


Figura 4.35. Densidade de probabilidade VS frequência de destacamento; ponto 6.5 m/min, 26.6 V.

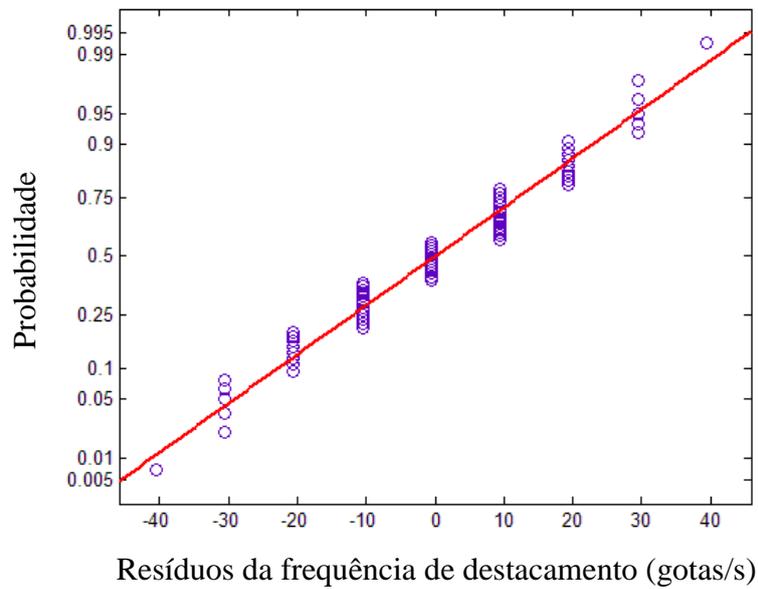


Figura 4.36. Probabilidade VS Resíduos da frequência de destacamento; ponto 6.5 m/min, 26.6 V.

Tabela 4.13. Média amostral e desvio padrão da frequência de destacamento medida para diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 6.5 m/min, 26.6 V.

Execução	Frequência de destacamento (gotas/segundo)	Desvio padrão do tamanho das gotas (gotas/segundo)
1	140.57	17.76
2	143.57	18.73
3	143.14	19.37
4	141.28	19.18
5	144.00	19.06
Média das médias amostrais	142.51	18.82

e) Ponto de trabalho **6.5 m/min, 28 V**

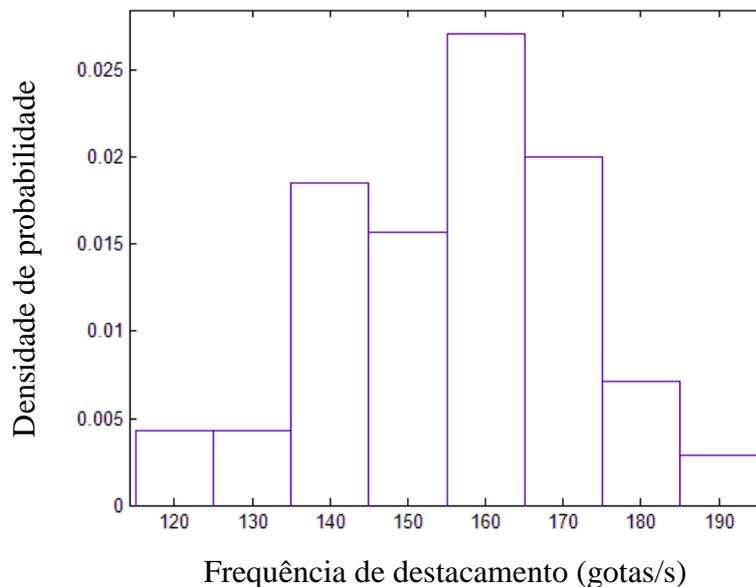


Figura 4.37. Densidade de probabilidade VS frequência de destacamento; ponto 6.5 m/min, 28 V.

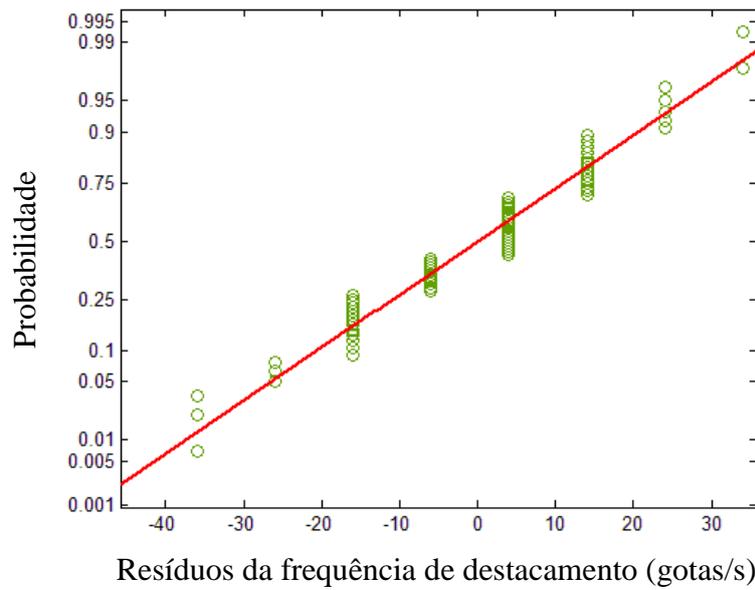


Figura 4.38. Probabilidade VS Resíduos da frequência de destacamento; ponto 6.5 m/min, 28 V.

Tabela 4.14. Média amostral e desvio padrão da frequência de destacamento medida para diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 6.5 m/min, 28 V.

Execução	Frequência de destacamento (gotas/segundo)	Desvio padrão do tamanho das gotas (gotas/segundo)
1	158.28	16.14
2	155.14	14.91
3	156.00	16.10
4	159.57	18.45

f) Ponto de trabalho **6.5 m/min, 29.4 V**

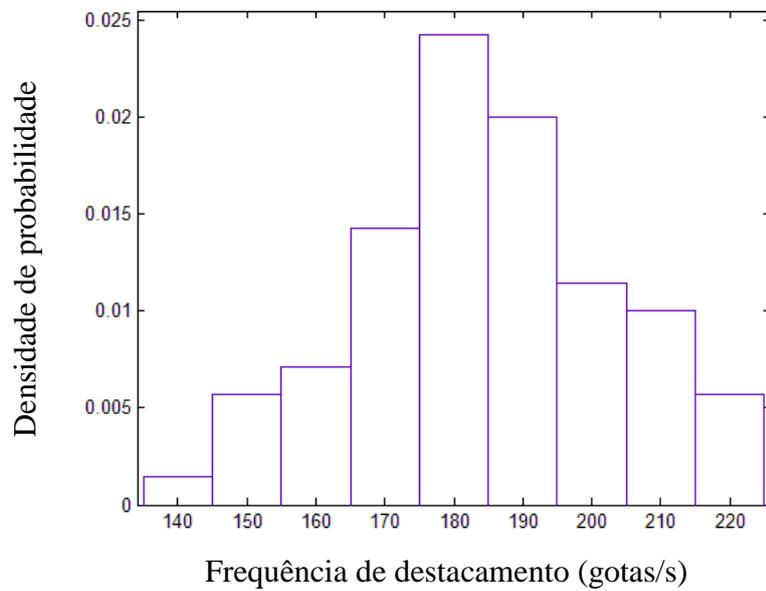


Figura 4.39. Densidade de probabilidade VS frequência de destacamento; ponto 6.5 m/min, 29.4 V.

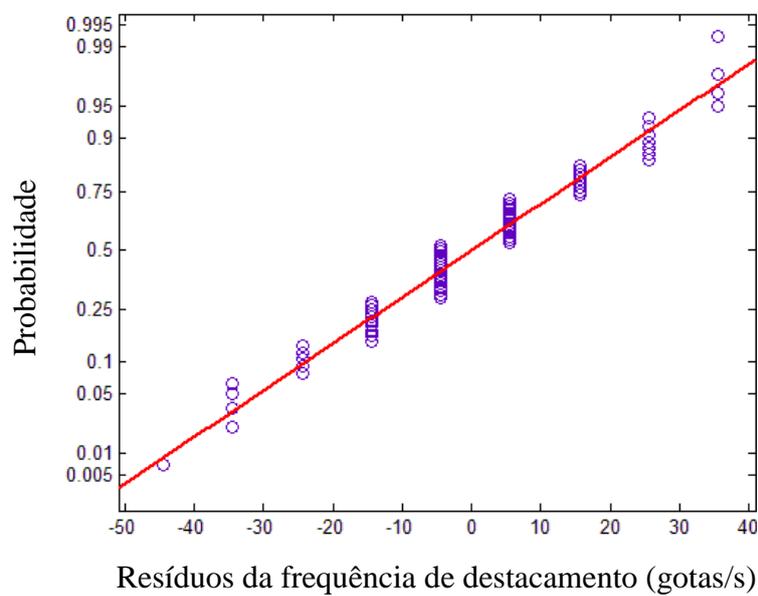


Figura 4.40. Probabilidade VS Resíduos da frequência de destacamento; ponto 6.5 m/min, 29.4 V.

Tabela 4.15. Média amostral e desvio padrão da frequência de destacamento medida para diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 6.5 m/min, 29.4 V.

Execução	Frequência de destacamento (gotas/segundo)	Desvio padrão do tamanho das gotas (gotas/segundo)
1	184.43	18.70
2	186.71	20.97
3	179.57	18.29
4	183.14	18.77
5	183.57	20.43
Média das médias amostrais	183.48	19.43

g) Ponto de trabalho **7 m/min, 27 V**

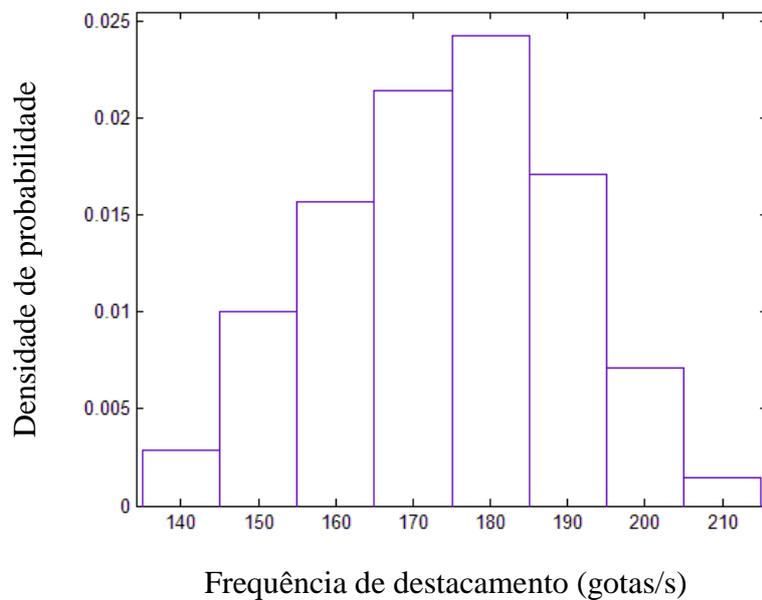


Figura 4.41. Densidade de probabilidade VS frequência de destacamento; ponto 7 m/min, 27 V.

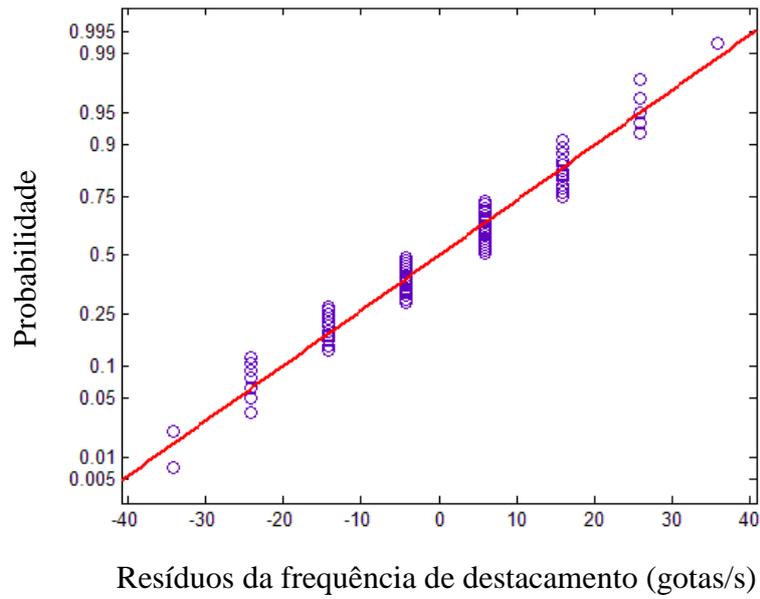


Figura 4.42. Probabilidade VS Resíduos da frequência de destacamento; ponto 7 m/min, 27 V.

Tabela 4.16. Média amostral e desvio padrão da frequência de destacamento medida para diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 7 m/min, 27 V

Execução	Frequência de destacamento (gotas/segundo)	Desvio padrão do tamanho das gotas (gotas/segundo)
1	174.14	15.74
2	177.14	13.84
3	173.14	14.30
4	174.85	16.83
5	175.43	15.10
Média das médias amostrais	174.94	15.16

h) Ponto de trabalho 7 m/min, 29 V

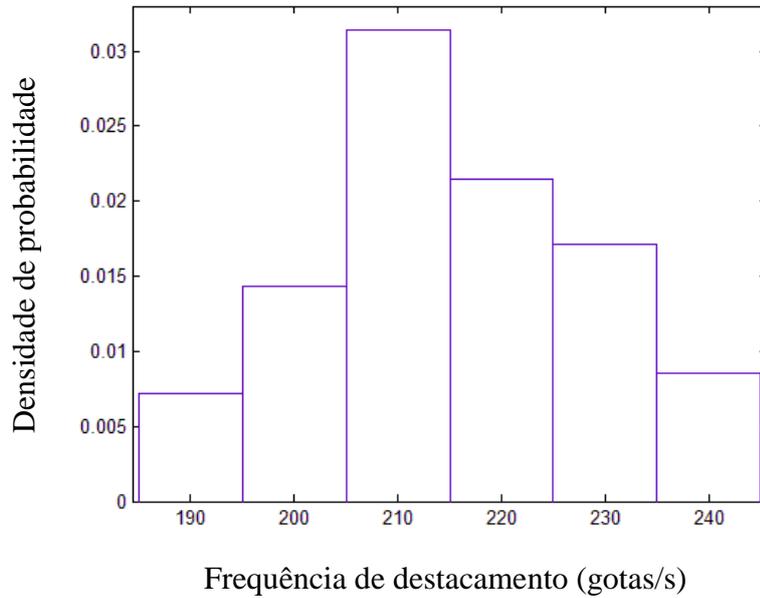


Figura 4.43. Densidade de probabilidade VS frequência de destacamento; ponto 7 m/min, 29 V.

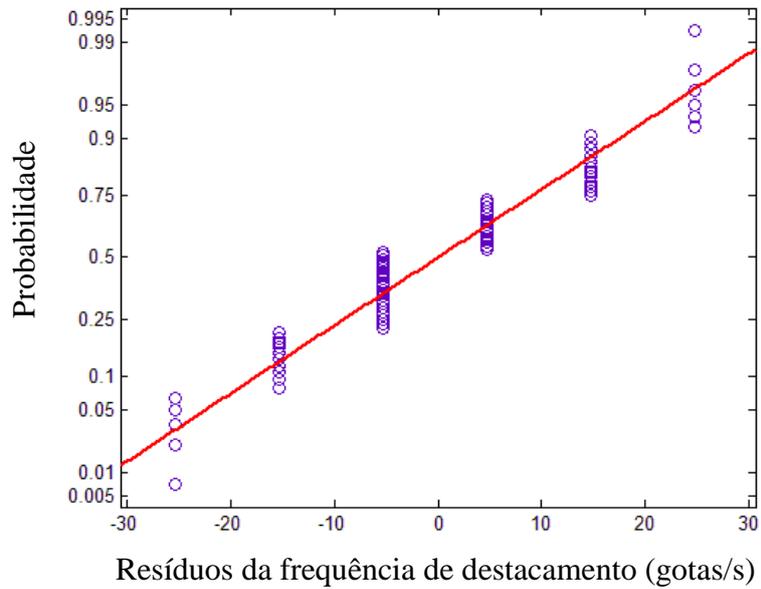


Figura 4.44. Probabilidade VS Resíduos da frequência de destacamento; ponto 7 m/min, 29 V.

Tabela 4.17. Média amostral e desvio padrão da frequência de destacamento medida para diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 7 m/min, 29 V.

Execução	Frequência de destacamento (gotas/segundo)	Desvio padrão do tamanho das gotas (gotas/segundo)
1	215.28	13.59
2	214.71	13.05
3	216.71	14.52
4	217.28	13.40
5	214.85	12.94
Média das médias amostrais	215.77	13.70

i) Ponto de trabalho **7.2 m/min, 28 V**

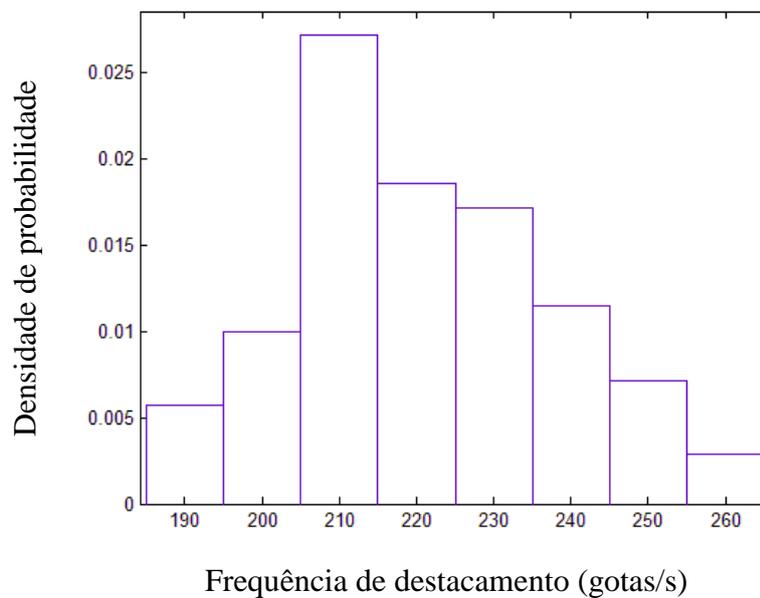


Figura 4.45. Densidade de probabilidade VS frequência de destacamento; ponto 7.2 m/min, 28 V.

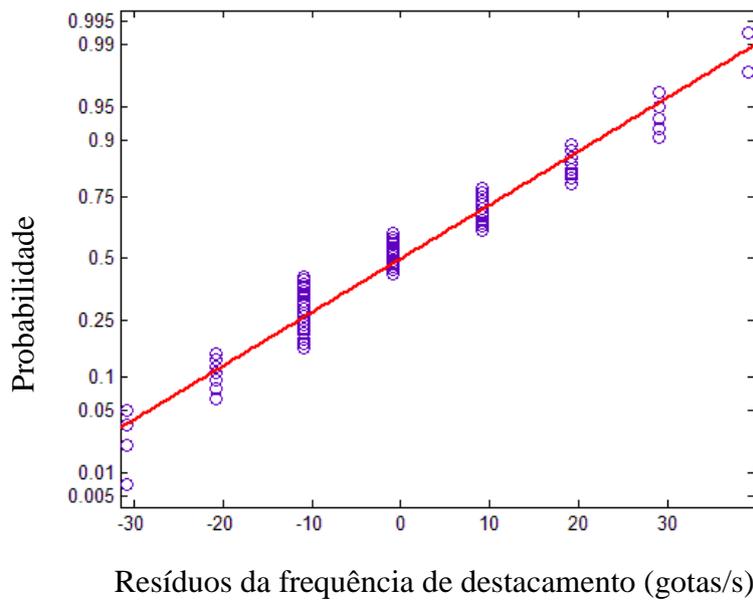


Figura 4.46. Probabilidade VS Resíduos da frequência de destacamento; ponto 7.2 m/min, 28 V.

Tabela 4.18. Média amostral e desvio padrão da frequência de destacamento medida para diferentes execuções do programa no ponto de trabalho 7.2 m/min, 28 V.

Execução	Frequência de destacamento (gotas/segundo)	Desvio padrão do tamanho das gotas (gotas/segundo)
1	220.85	17.17
2	218.00	16.11
3	216.86	14.80
4	222.71	16.84
5	214.85	12.93
Média das médias amostrais	218.65	15.57

A tendência no comportamento da frequência de destacamento pode ser vista na Figura 4.47. Pode-se ver como o menor tempo de formação das gotas pelo aumento das forças de Lorentz se traduz no aumento da frequência de destacamento das gotas.

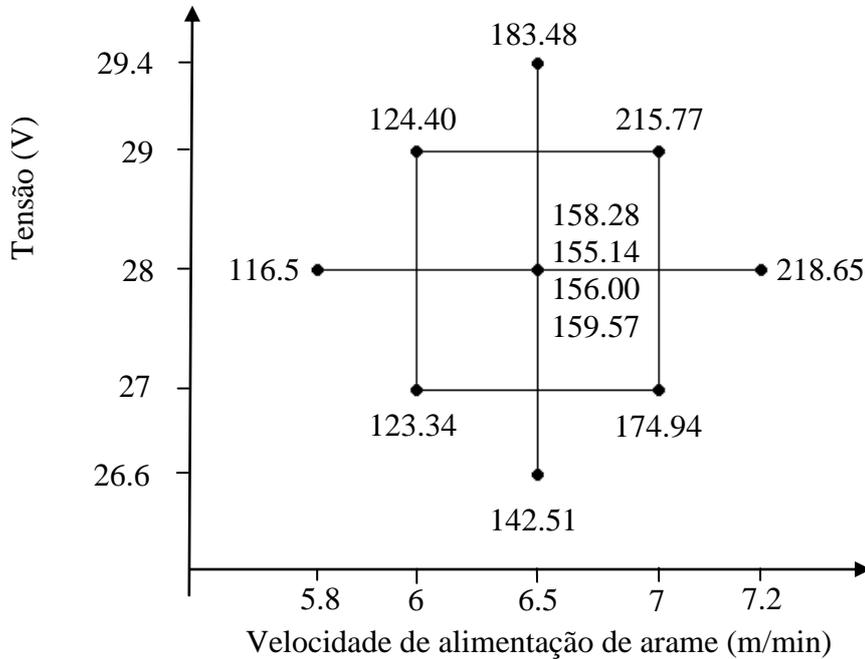


Figura 4.47. Valores de frequência de destacamento em relação ao PCC.

## 4.2 – MODELAGEM DA TRANSFERÊNCIA

Nesta etapa apresenta-se a concepção dos modelos de segunda ordem a partir das medições realizadas. As tabelas de planejamento experimental acompanham cada modelo, assim como as respectivas superfícies de resposta e os intervalos de confiança de cada um.

### 4.2.1 – Modelos do tamanho da gota

O primeiro modelo em estudo é o do tamanho da gota. A Tabela 4.19 apresenta o planejamento experimental e os resultados obtidos da área e diâmetro da gota para cada ponto de trabalho em referência aos níveis codificados e aos fatores de entrada correspondentes a cada nível.

Tabela 4.19. Planejamento experimental para o tamanho da gota.

Observação	Níveis codificados		Fatores de entrada		Respostas	
	$x_1$	$x_2$	Velocidade de arame ( $\xi_1$ ) (m/min)	Tensão ( $\xi_2$ ) (V)	Área (Pixeis)	Diâmetro (Pixeis)
1	-1	-1	6	27	263.97	18.27
2	1	-1	7	27	225.93	16.93
3	-1	1	6	29	241.60	17.51
4	1	1	7	29	189.84	15.52
5	$-\sqrt{2}$	0	5.8	28	256.43	17.87
6	$\sqrt{2}$	0	7.2	28	199.39	15.90
7	0	$-\sqrt{2}$	6.5	26.6	237.64	17.37
8	0	$\sqrt{2}$	6.5	29.4	196.26	15.78
9	0	0	6.5	28	226.11	16.94
10	0	0	6.5	28	228.16	17.02
11	0	0	6.5	28	226.59	16.96
12	0	0	6.5	28	225.68	16.92

Para o caso do modelo da área da gota, a Equação (2.4) refere ao modelo de segunda ordem como:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon$$

, assim, com referência às Equações (2.5), (2.15), (2.16), (2.17) e (2.19), e em relação aos níveis codificados e o planejamento experimental, para o modelo de segunda ordem temos que:

$$\mathbf{X} = \begin{matrix} & \begin{matrix} x_1 & x_2 & x_1^2 & x_2^2 & x_1x_2 \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ -\sqrt{2} & 0 & 2 & 0 & 0 \\ \sqrt{2} & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & -\sqrt{2} & 0 & 2 & 0 \\ 0 & \sqrt{2} & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3.1)$$

$$\mathbf{y} = (263.97, 225.93, 241.60, 189.84, 256.43, 199.39, 237.64, 196.26, 226.11, 228.16, 226.59, 225.68)^T \quad (3.2)$$

$$\mathbf{X}^T \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 12 & 0 & 0 & 8 & 8 & 0 \\ 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 \\ 8 & 0 & 0 & 12 & 4 & 0 \\ 8 & 0 & 0 & 4 & 12 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{X}^T \mathbf{y} = \begin{bmatrix} 2717.6 \\ -170.5 \\ -117.0 \\ 1833.0 \\ 1789.1 \\ -13.7 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} 226.63 \\ -21.31 \\ -14.62 \\ 2.61 \\ -2.87 \\ -3.43 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

, assim, de acordo com a equação (2.20) o modelo do tamanho da gota (área) em relação aos níveis codificados é:

$$\hat{y}_{\text{área}} = 226.63 - 21.31x_1 - 14.62x_2 + 2.61x_1^2 - 2.87x_2^2 - 3.14x_1x_2 \quad (3.6)$$

Para obter o modelo em função dos fatores de entrada se utiliza a Equação (2.1), assim:

$$\begin{aligned} \hat{y}_{\text{área}}^* = & 226.63 - 21.31 \left( \frac{\xi_1 - 6.5}{0.5} \right) - 14.62(\xi_2 - 28) + \\ & + 2.61 \left( \frac{\xi_1 - 6.5}{0.5} \right)^2 - 2.87(\xi_2 - 28)^2 - \\ & - 3.14 \left( \frac{\xi_1 - 6.5}{0.5} \right) (\xi_2 - 28) \end{aligned} \quad (3.7)$$

, onde:  $\xi_1$  é o valor da velocidade do arame e  $\xi_2$  é o valor da tensão. Simplificando, tem-se:

$$\hat{y}_{\text{área}}^* = -2032.17 - 4.58\xi_1 + 186.92\xi_2 + 10.6\xi_1^2 - 2.87\xi_2^2 - 6.28\xi_1\xi_2 \quad (3.8)$$

, assim, a Equação (3.8) é o modelo final do tamanho da gota expressado no número de pixels que compõem uma gota (área). A Tabela 4.20 registra os resíduos encontrados em cada ponto de trabalho do modelo, as Figuras 4.48 e 4.49 apresentam, respectivamente, os gráficos de resíduos e de valores medidos (nos experimentos) VS valores calculados pelo modelo, a Figura 4.50 apresenta um gráfico de distribuição de probabilidade normal dos resíduos.

Tabela 4.20. Resíduos para o modelo da área da gota.

Observação	Velocidade de alimentação do arame (m/min)	Tensão (V)	Área (Pixeis)		
			Valor medido	Resposta do modelo	Resíduo
1	6	27	263.97	259.20	4.77
2	7	27	225.93	222.86	3.07
3	6	29	241.60	236.24	5.36
4	7	29	189.84	187.34	2.50
5	5.8	28	256.43	261.66	-5.23
6	7.2	28	199.39	201.99	-2.60
7	6.5	26.6	237.64	241.47	-3.83
8	6.5	29.4	196.26	200.53	-4.27
9	6.5	28	226.11	226.63	-0.52
10	6.5	28	228.16	226.63	1.53
11	6.5	28	226.59	226.63	-0.04
12	6.5	28	225.68	226.63	-0.95

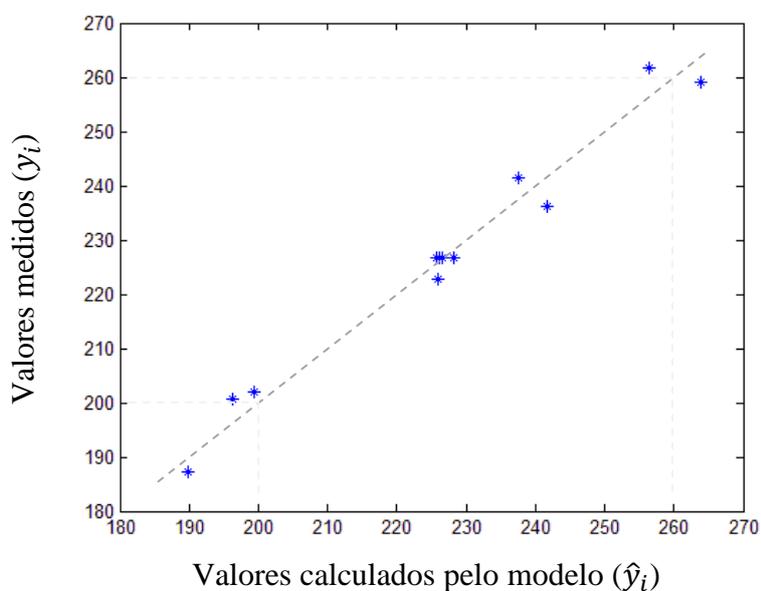


Figura 4.48. Valores medidos nos experimentos ( $y_i$ ) VS Valores calculados pelo modelo  $\hat{y}_i$  para a área das gotas.

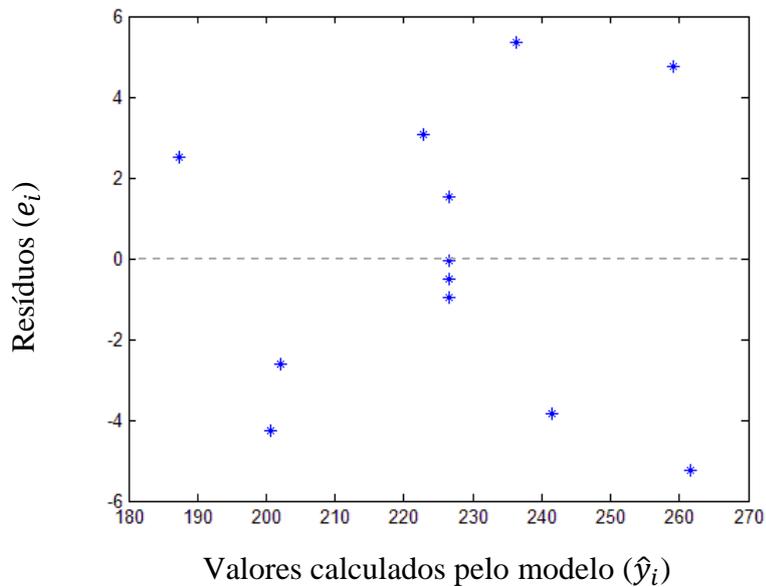


Figura 4.49. Resíduos ( $e_i$ ) VS Valores calculados pelo modelo  $\hat{y}_i$  para a área das gotas.

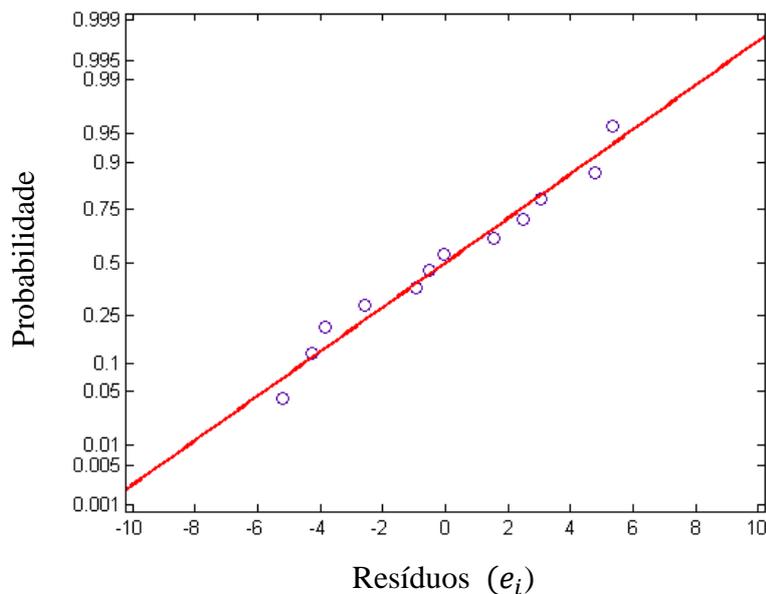


Figura 4.50. Probabilidade normal VS Resíduos ( $e_i$ ) para a área das gotas.

As Figuras 4.48 e 4.49 permitem observar que os valores calculados apresentam uma dispersão uniforme e ao redor dos valores ideais que deveriam assumir os modelos; valores que estão representados em cada gráfico por uma linha a traços. Nos gráficos é possível ver também a proximidade dos valores calculados pelo modelo em relação aos valores medidos nos experimentos. A Figura 4.50 mostra que os resíduos são distribuídos ao longo da linha reta que forma a distribuição normal. Com a finalidade de calcular o comportamento do modelo se faz uso das equações (2.22), (2.23), (2.25), (2.26) e (2.27)

que calculam a variância ( $\hat{\sigma}^2$ ) e o coeficiente de determinação múltipla ajustado ( $R^2$ ), assim:

$$\hat{\sigma}^2 = s^2 = \frac{SQE}{n - (k + 1)} = 22.96 \quad (3.10)$$

, onde  $n = 12$  e  $k = 5$ ,

$$R^2 \text{ ajustado} = 1 - \left[ \frac{n - 1}{n - (k + 1)} \cdot \frac{SQE}{SQT} \right] = 0.9553 \quad (3.9)$$

Que em porcentagem é:

$$\%R^2 \text{ ajustado} = 95.53\% \quad (3.10)$$

Isto indica que o modelo consegue explicar 95.53% da variação apresentada nos valores medidos. No caso das respostas do modelo, a variância e o desvio padrão de cada resposta é dado pelas equações (2.28) e (2.29), o intervalo de confiança de  $100(1 - \alpha)\%$  é calculado com a Equação (2.30), estes valores são referenciados na Tabela 4.21 para cada ponto de trabalho com  $\alpha = 0.05$ ,  $t_{0.025,6} = 2.447$  (um nível de confiança de 95% com 6 graus de liberdade). A Figura 4.51 apresenta uma vista da superfície de resposta do modelo em função dos fatores de entrada. A Figura 4.52 apresenta a variação da superfície em função da velocidade de alimentação do arame e a Figura 4.53 em função da tensão. A Figura 4.54 apresenta um gráfico de contornos da superfície em relação aos valores de tensão e velocidade de arame.

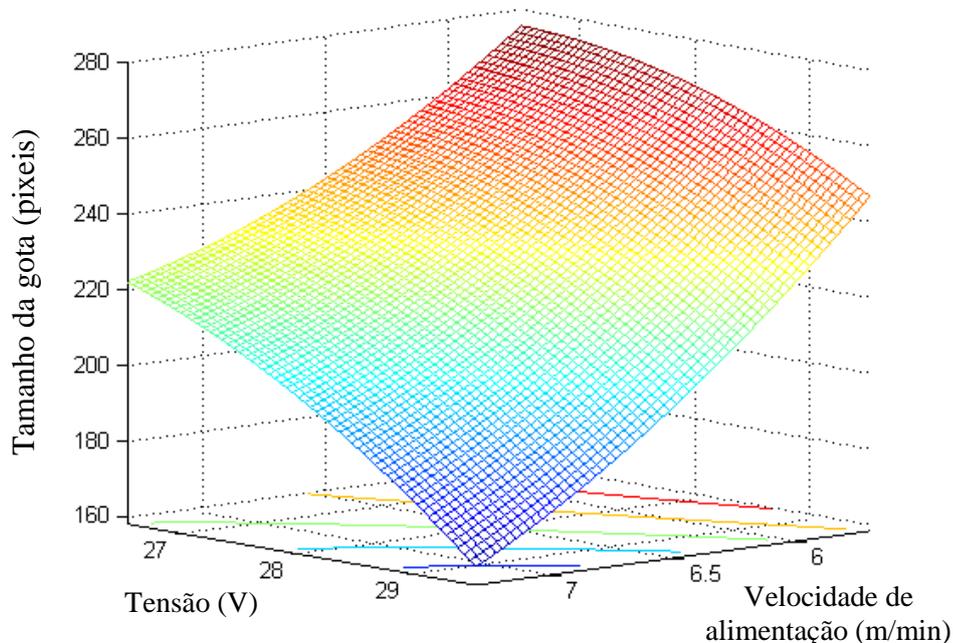


Figura 4.51. Superfície de resposta do modelo da área das gotas.

Tabela 4.21. Desvio padrão e intervalo de confiança para as respostas do modelo da área das gotas (área).

Observação	Velocidade de alimentação do arame (m/min)	Tensão (V)	Área (Pixeis)		
			Resposta do modelo	Desvio padrão	Intervalo de confiança
1	6	27	259.20	3.80	±9.31
2	7	27	222.86	3.80	±9.31
3	6	29	236.24	3.80	±9.31
4	7	29	187.34	3.80	±9.31
5	5.8	28	261.66	3.80	±9.31
6	7.2	28	201.99	3.80	±9.31
7	6.5	26.6	241.47	3.80	±9.31
8	6.5	29.4	200.53	3.80	±9.31
9	6.5	28	226.63	2.40	±5.89
10	6.5	28	226.63	2.40	±5.89
11	6.5	28	226.63	2.40	±5.89
12	6.5	28	226.63	2.40	±5.89

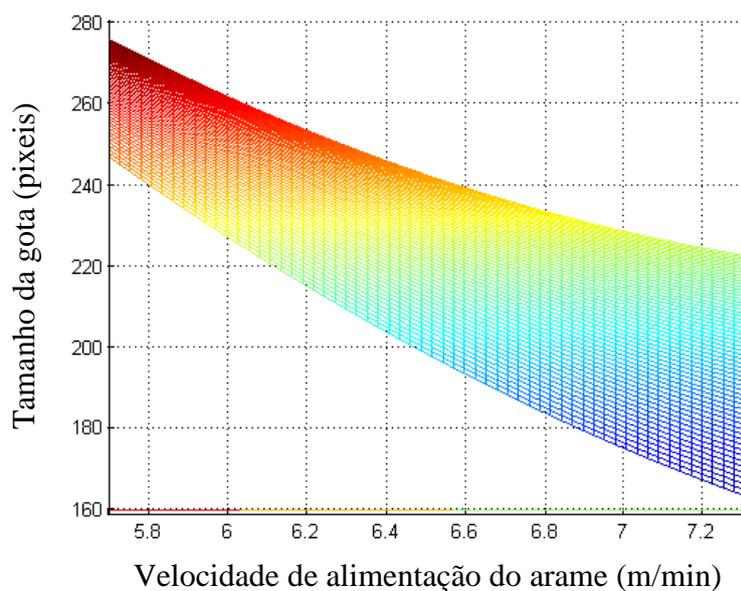


Figura 4.52. Superfície de resposta do modelo da área das gotas em função da velocidade de alimentação do arame.

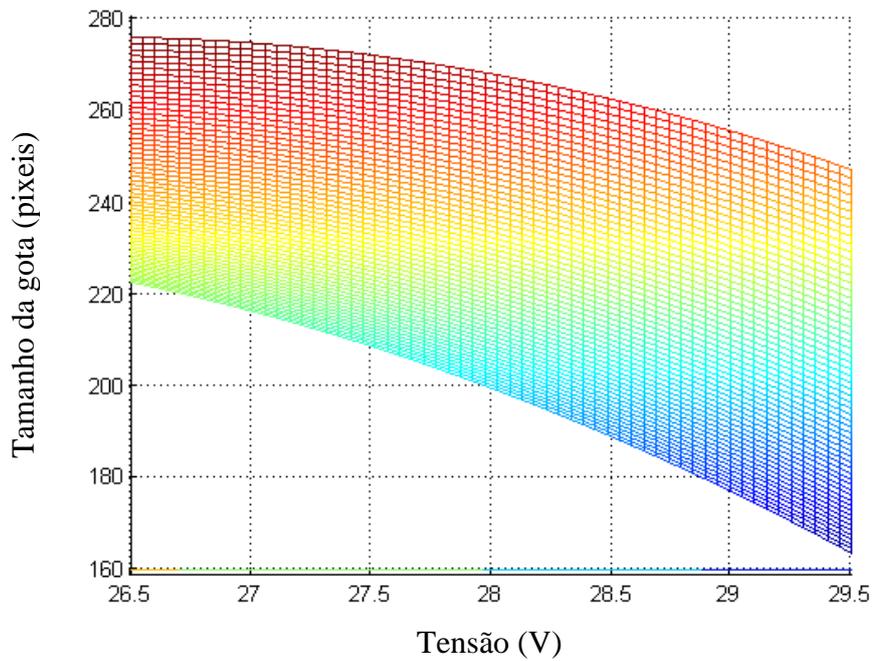


Figura 4.53. Superfície de resposta do modelo da área das gotas em função da tensão.

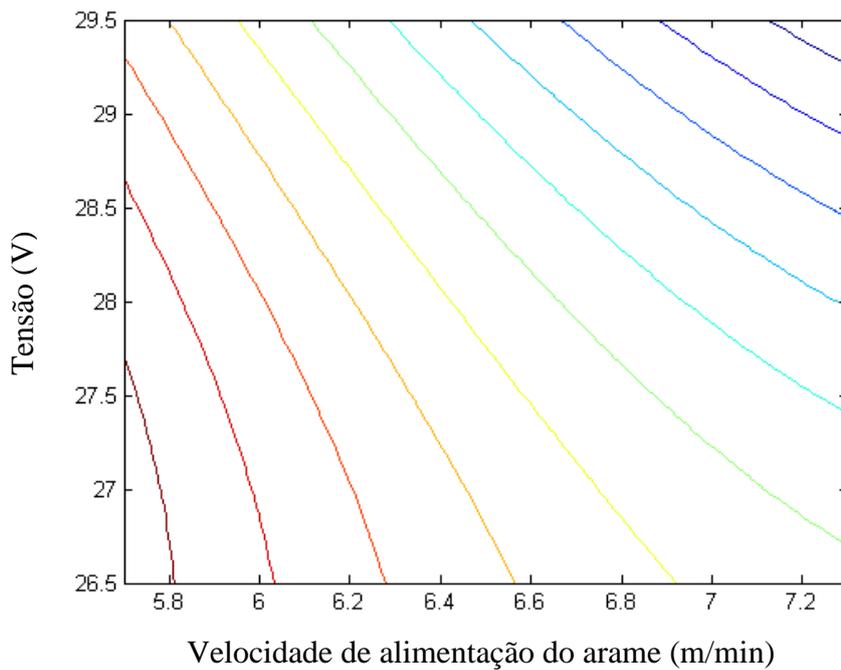


Figura 4.54. Contornos da superfície de resposta do modelo da área das gotas com respeito a os fatores de entrada.

As Figuras 4.51, 4.52, 4.53 e 4.54 evidenciam a tendência das gotas de reduzirem o seu tamanho a medida em que aumenta a velocidade de arame e a tensão. Pode-se observar

também que a diminuição do tamanho não é linear e que muda mais rápido para valores dos fatores de entrada maiores que o ponto central (6.5 m/min e 28 V).

Um modelo alternativo derivado do primeiro referencia o diâmetro das gotas, neste caso o modelo em função dos níveis codificados é dado por:

$$\hat{y}_{diâmetro} = 16.96 - 0.7645x_1 - 0.5523x_2 + 0.0444x_1^2 - 0.1106x_2^2 - 0.1625x_1x_2 \quad (3.11)$$

, em função dos fatores de entrada é dado por:

$$\hat{y}_{diâmetro}^* = -95.9874 + 5.2622\xi_1 + 7.7538\xi_2 + 0.1776\xi_1^2 - 0.1106\xi_2^2 - 0.325\xi_1\xi_2 \quad (3.12)$$

A tabela 4.22 registra os resíduos e a figura 4.55 apresenta a distribuição de probabilidade normal dos resíduos.

Tabela 4.22. Resíduos para o modelo do diâmetro das gotas.

Observação	Velocidade de alimentação do arame (m/min)	Tensão (V)	Diâmetro (Píxeis)		
			Valor medido	Resposta do modelo	Resíduo
1	6	27	18.27	18.05	0.22
2	7	27	16.93	16.84	0.09
3	6	29	17.51	17.27	0.24
4	7	29	15.52	15.41	0.11
5	5.8	28	17.87	18.13	-0.26
6	7.2	28	15.90	15.97	-0.07
7	6.5	26.6	17.37	15.52	-0.15
8	6.5	29.4	15.78	15.96	-0.18
9	6.5	28	16.94	16.96	-0.02
10	6.5	28	17.02	16.96	0.06
11	6.5	28	16.96	16.96	0.00
12	6.5	28	16.92	16.96	-0.04

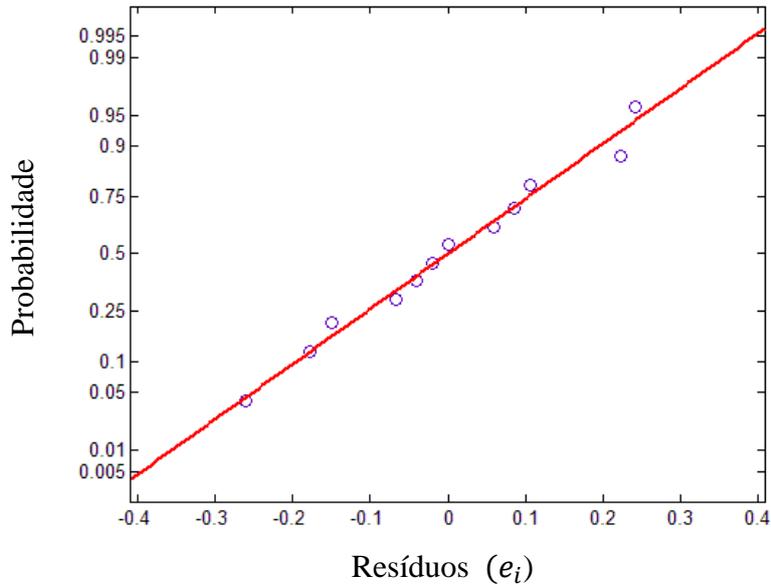


Figura 4.55. Probabilidade normal VS Resíduos ( $e_i$ ) para o diâmetro das gotas.

Novamente o gráfico de probabilidade normal possibilita observar uma boa correspondência do modelo. A partir do procedimento anterior, se calcula variância do modelo como:

$$\hat{\sigma}^2 = s^2 = 0.043 \quad (3.13)$$

, o coeficiente de determinação múltipla ajustado é:

$$R^2 \text{ ajustado} = 0.94 \quad (3.14)$$

, em porcentagem é:

$$\%R^2 \text{ ajustado} = 94\% \quad (3.15)$$

A Tabela 4.23 apresenta o desvio padrão e os intervalos de confiança  $100(1 - \alpha)\%$  (com  $t_{0.025,6}$ ) para cada valor calculado em cada ponto de trabalho. As Figuras 4.56, 4.57 e 4.58 apresentam as superfícies de resposta do modelo em função dos fatores de entrada, da velocidade de alimentação do arame e da tensão respectivamente. A Figura 4.59 apresenta o gráfico de contornos da superfície de resposta.

Tabela 4.23. Desvio padrão e intervalo de confiança para as respostas do modelo do diâmetro das gotas.

Observação	Velocidade de alimentação do arame (m/min)	Tensão (V)	Diâmetro (Pixeis)		
			Resposta do modelo	Desvio padrão	Intervalo de confiança
1	6	27	18.05	0.16	±0.40
2	7	27	16.84	0.16	±0.40
3	6	29	17.27	0.16	±0.40
4	7	29	15.41	0.16	±0.40
5	5.8	28	18.13	0.16	±0.40
6	7.2	28	15.97	0.16	±0.40
7	6.5	26.6	15.52	0.16	±0.40
8	6.5	29.4	15.96	0.16	±0.40
9	6.5	28	16.96	0.10	±0.25
10	6.5	28	16.96	0.10	±0.25
11	6.5	28	16.96	0.10	±0.25
12	6.5	28	16.96	0.10	±0.25

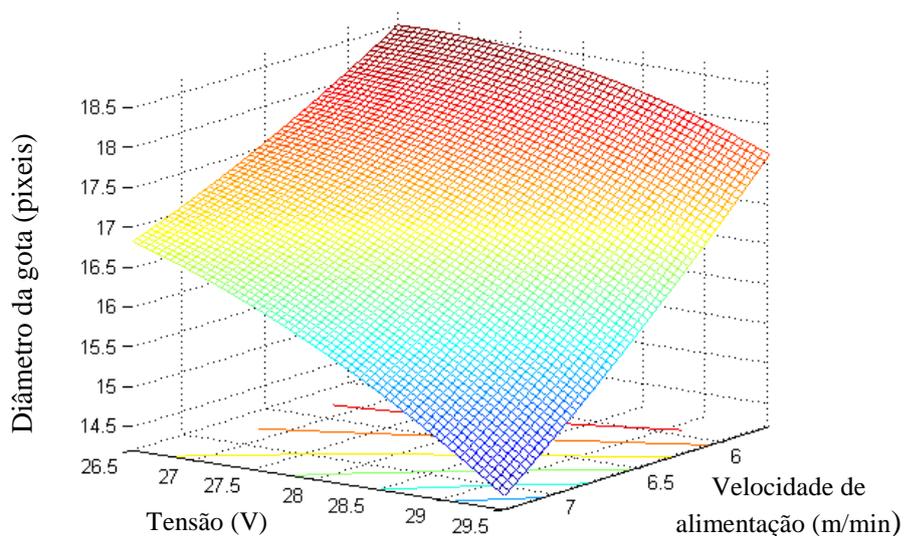


Figura 4.56. Superfície de resposta do modelo do diâmetro das gotas.

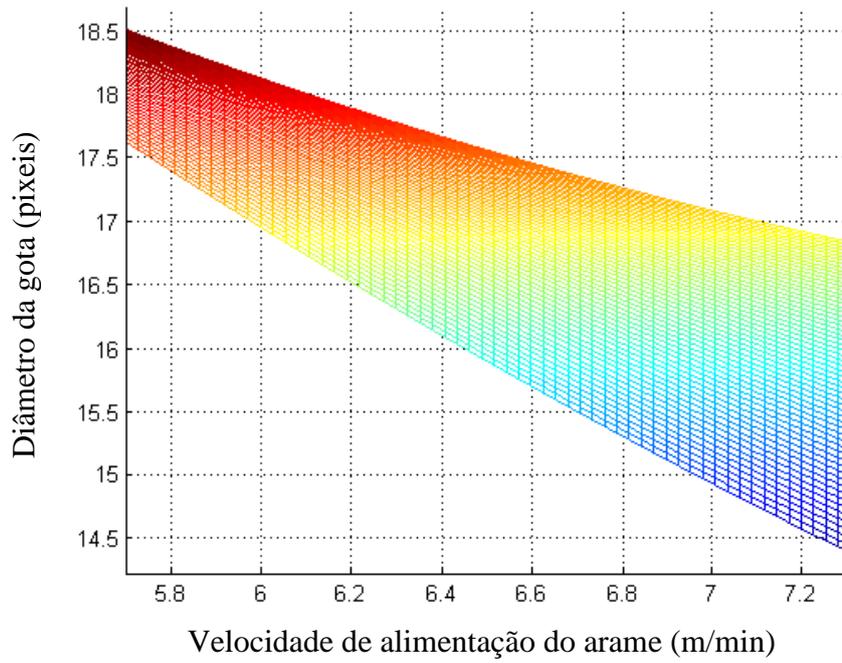


Figura 4.57. Superfície de resposta do modelo do diâmetro das gotas em função da velocidade de alimentação do arame.

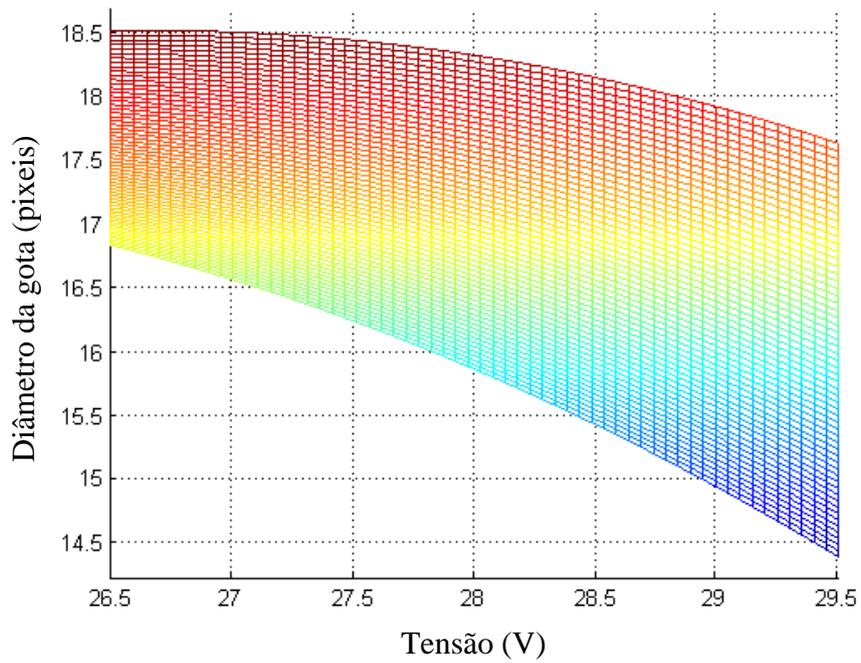


Figura 4.58. Superfície de resposta do modelo do diâmetro das gotas em função da tensão.

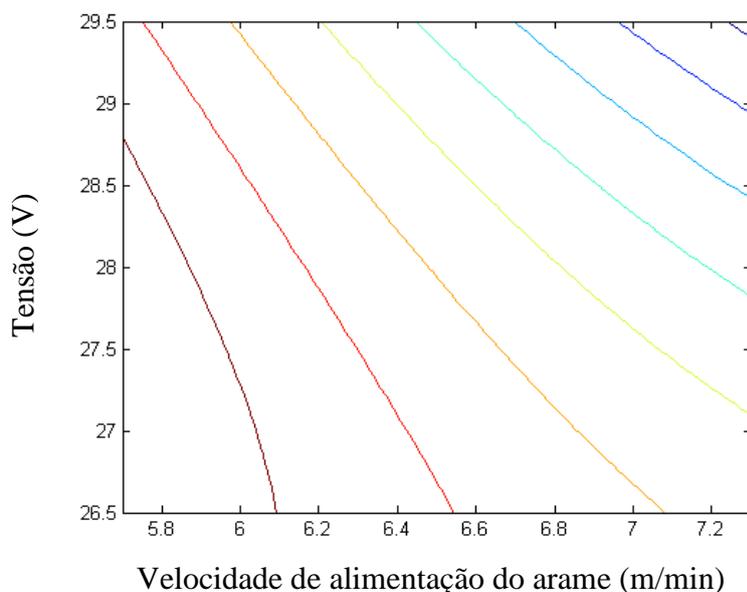


Figura 4.59. Contornos da superfície de resposta do modelo do diâmetro com respeito a os fatores de entrada.

Nos gráficos de superfície de resposta do modelo que calcula o diâmetro das gotas percebe-se que esta possui o mesmo formato da superfície de resposta da área; superfície esperada por serem os valores do diâmetro da gota derivados do valor de área.

#### 4.2.2 – Modelo da frequência de destacamento

A partir da metodologia utilizada para encontrar o modelo do tamanho da gota é possível encontrar o modelo da frequência de destacamento. Neste caso, a Tabela 4.24 apresenta o planejamento experimental com os resultados da frequência de destacamento medidos para cada ponto de trabalho em relação aos fatores de entrada e aos níveis codificados.

Tabela 4.24. Planejamento experimental da frequência de destacamento da gota.

Observação	Níveis codificados		Fatores de entrada		Respostas
	$x_1$	$x_2$	Velocidade de arame ( $\xi_1$ ) (m/min)	Tensão ( $\xi_2$ ) (V)	Frequência de destacamento (gotas/s)
1	-1	-1	6	27	123.34
2	1	-1	7	27	174.94
3	-1	1	6	29	124.40
4	1	1	7	29	215.77
5	$-\sqrt{2}$	0	5.8	28	116.5
6	$\sqrt{2}$	0	7.2	28	218.65
7	0	$-\sqrt{2}$	6.5	26.6	142.51
8	0	$\sqrt{2}$	6.5	29.4	183.48
9	0	0	6.5	28	158.28
10	0	0	6.5	28	155.14
11	0	0	6.5	28	156.00
12	0	0	6.5	28	159.57

Por trabalhar com níveis codificados o valor da matriz X é igual que na Equação (3.1), o valor de y neste caso é dado pelas medidas realizadas da frequência de destacamento como:

$$y = (123.34, 174.94, 124.40, 215.77, 116.5, 218.65, 142.51, 183.48, 158.28, 155.14, 156.00, 159.57)^T \quad (3.16)$$

Assim,

$$X^T y = \begin{bmatrix} 1928.6 \\ 287.4 \\ 99.8 \\ 1308.8 \\ 1290.4 \\ 39.8 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} 157.25 \\ 35.93 \\ 12.48 \\ 3.75 \\ 1.46 \\ 9.94 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

, pelo que o modelo em função dos níveis codificados é:

$$\hat{y}_f = 157.25 + 35.93x_1 + 12.48x_2 + 3.75x_1^2 + 1.46x_2^2 + 9.94x_1x_2 \quad (3.19)$$

Mudando novamente os níveis codificados pelos valores correspondentes à Equação (2.1), o modelo de frequência de destacamento em função dos fatores de entrada é:

$$\hat{y}_f^* = 4737.27 - 679.78\xi_1 - 198.5\xi_2 + 15\xi_1^2 + 1.46\xi_2^2 + 19.88\xi_1\xi_2 \quad (3.20)$$

As Figuras 4.60, 4.61 e 4.62 apresentam os gráficos de resíduos e de valores medidos (nos experimentos) VS valores calculados pelo modelo e de distribuição de probabilidade normal dos resíduos.

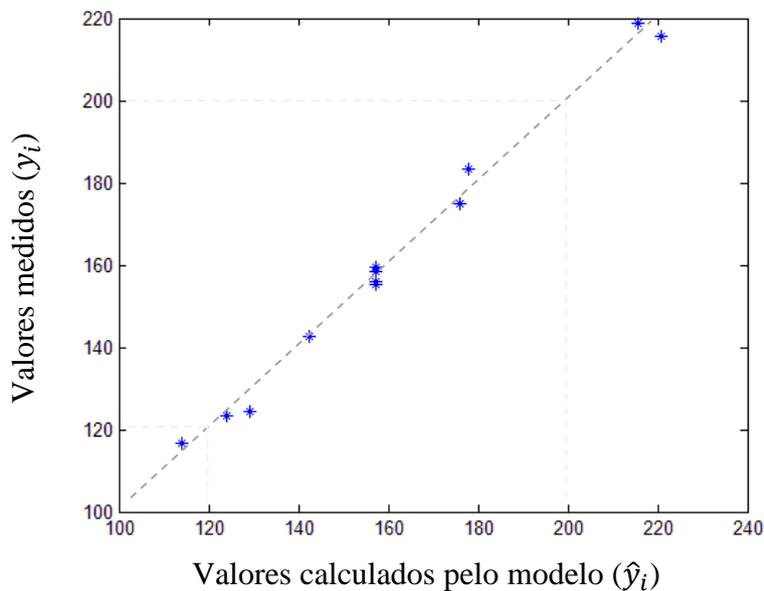


Figura 4.60. Valores medidos nos experimentos ( $y_i$ ) VS Valores calculados pelo modelo  $\hat{y}_i$  para frequência de destacamento das gotas.

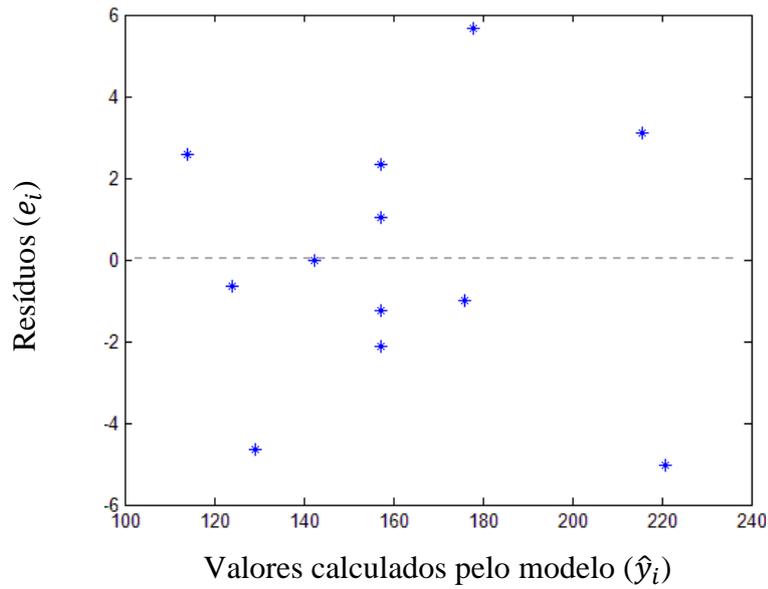


Figura 4.61. Resíduos ( $e_i$ ) VS Valores calculados pelo modelo  $\hat{y}_i$  para a frequência de destacamento das gotas.

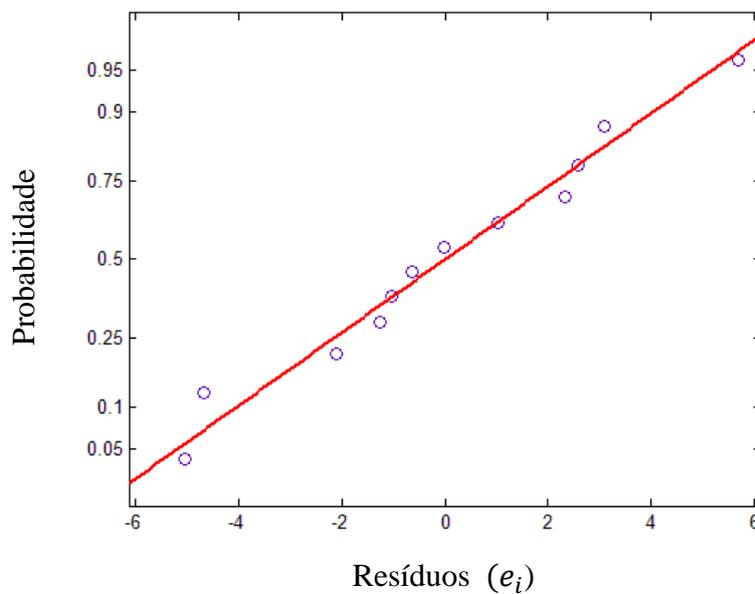


Figura 4.62. Probabilidade normal VS Resíduos ( $e_i$ ) para a frequência de destacamento das gotas.

Nos gráficos é possível observar uma boa aproximação do modelo em relação aos dados medidos dos experimentos com um erro distribuído de maneira aleatória e uniforme ao redor das respostas. A tabela 4.25 referência aos resíduos encontrados para cada ponto de trabalho.

Tabela 4.25. Resíduos para o modelo de frequência de destacamento das gotas.

Observação	Velocidade de arame (m/min)	Tensão (V)	Frequência de destacamento (gotas/s)		
			Valor medido	Resposta do modelo	Resíduo
1	6	27	123.34	123.98	-0.64
2	7	27	174.94	175.96	-1.02
3	6	29	124.40	129.06	-4.66
4	7	29	215.77	220.80	-5.03
5	5.8	28	116.5	113.93	2.57
6	7.2	28	218.65	215.55	3.10
7	6.5	26.6	142.51	142.51	0.00
8	6.5	29.4	183.48	177.81	5.67
9	6.5	28	158.28	157.25	1.03
10	6.5	28	155.14	157.25	-2.11
11	6.5	28	156.00	157.25	-1.25
12	6.5	28	159.57	157.25	2.32

Para este modelo, o valor da variância calculada foi de:

$$\hat{\sigma}^2 = s^2 = 18.21 \quad (3.21)$$

, o coeficiente de determinação múltipla ajustado é:

$$R^2 \text{ ajustado} = 0.9835 \quad (3.22)$$

, em porcentagem é:

$$\%R^2 \text{ ajustado} = 98.35\% \quad (3.23)$$

Este valor de coeficiente de determinação confirma uma favorável aproximação do modelo que mostraram as Figuras 4.60, 4.61 e 4.62. A Tabela 4.26 apresenta o desvio padrão e os intervalos de confiança  $100(1 - \alpha)\%$  (com  $t_{0.025,6}$ ) para cada valor calculado em cada ponto de trabalho.

Tabela 4.26. Desvio padrão e intervalo de confiança para as respostas do modelo de frequência de destacamento das gotas

Observação	Velocidade de arame (m/min)	Tensão (V)	Frequência de destacamento (gotas/s)		
			Resposta do modelo	Desvio padrão	Intervalo de confiança
1	6	27	123.98	3.37	±8.26
2	7	27	175.96	3.37	±8.26
3	6	29	129.06	3.37	±8.26
4	7	29	220.80	3.37	±8.26
5	5.8	28	113.93	3.37	±8.26
6	7.2	28	215.55	3.37	±8.26
7	6.5	26.6	142.51	3.37	±8.26
8	6.5	29.4	177.81	3.37	±8.26
9	6.5	28	157.25	2.13	±5.22
10	6.5	28	157.25	2.13	±5.22
11	6.5	28	157.25	2.13	±5.22
12	6.5	28	157.25	2.13	±5.22

A Figura 4.63 mostra uma vista da superfície de resposta para o modelo de frequência de destacamento, como em casos anteriores, as Figuras 4.64 e 4.65 apresentam as superfícies de resposta do modelo em função da velocidade de alimentação do arame e da tensão respectivamente. A Figura 4.66 apresenta o gráfico de contornos da superfície de resposta.

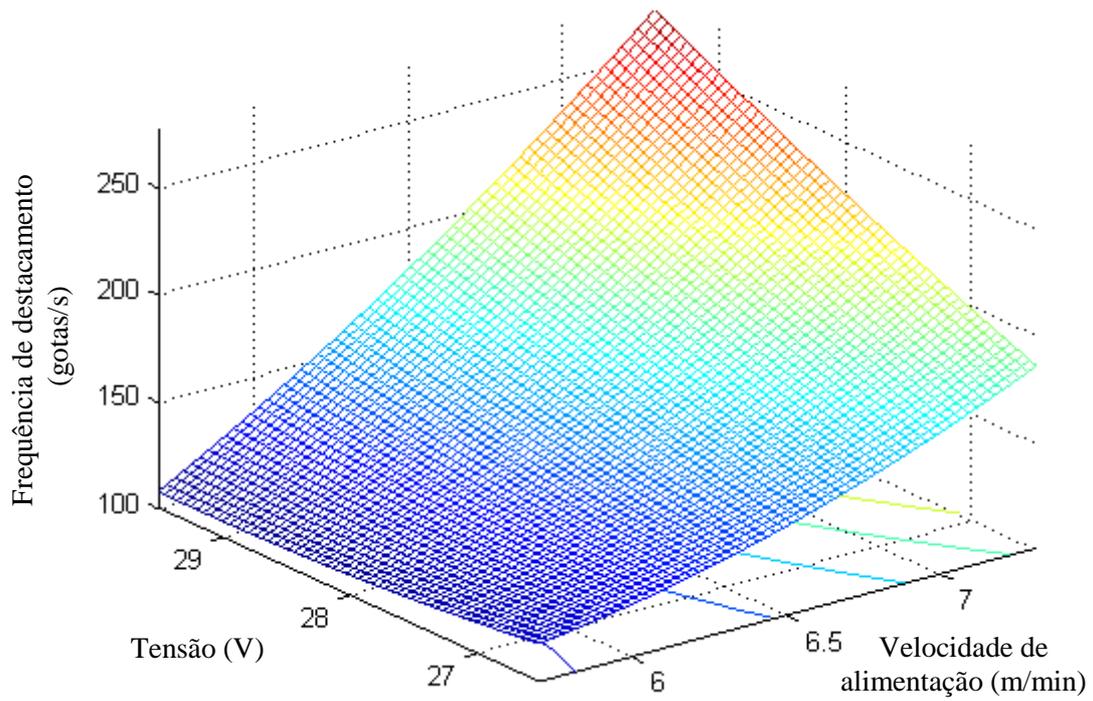


Figura 4.63. Superfície de resposta do modelo da frequência de destacamento das gotas.

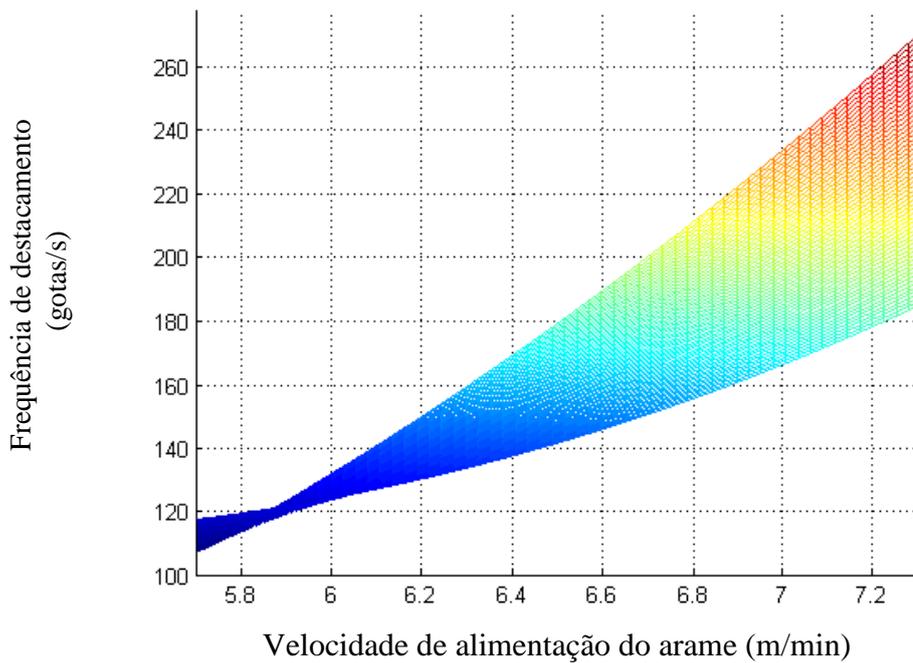


Figura 4.64. Superfície de resposta do modelo da frequência de destacamento das gotas em função da velocidade de arame.

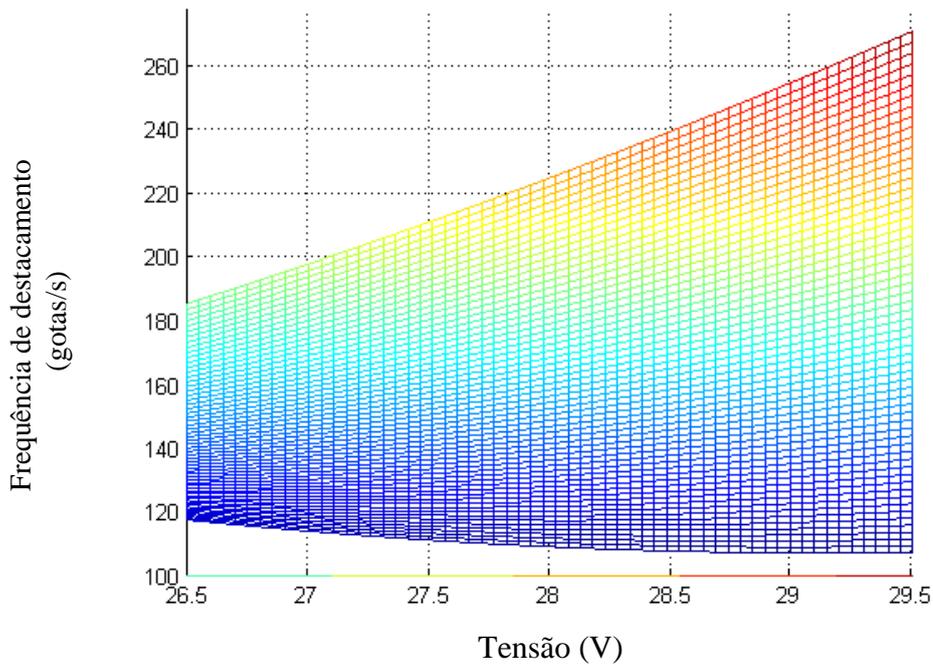


Figura 4.65. Superfície de resposta do modelo da frequência de destacamento das gotas em função da tensão.

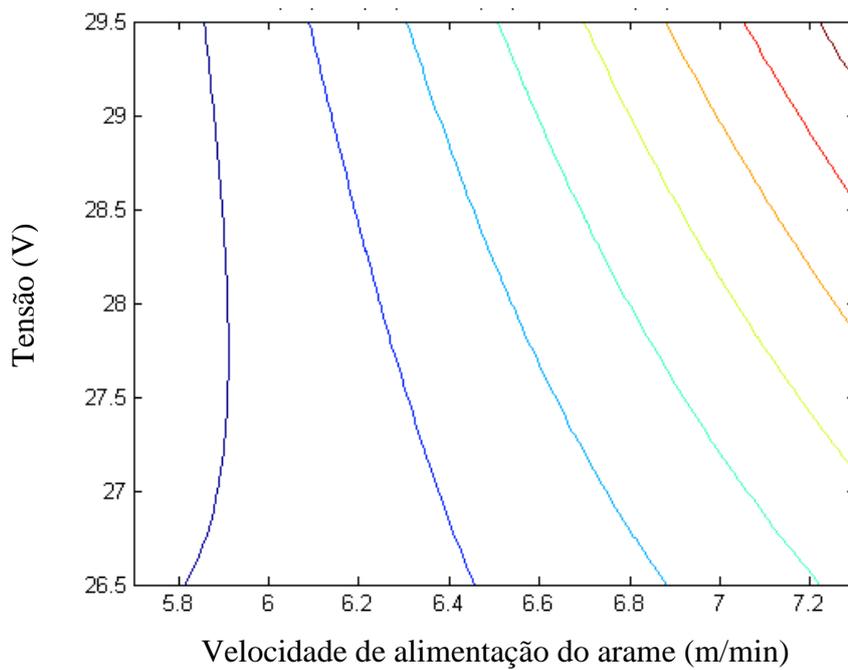


Figura 4.66. Contornos da superfície de resposta do modelo da frequência de destacamento das gotas com respeito a os fatores de entrada.

Neste caso, pode-se ver como o frequência de destacamento aumenta com os fatores de entrada. Uma comparação das superfícies de resposta da frequência de destacamento com as superfícies de resposta geradas para o tamanho da gota permitem ver uma relação

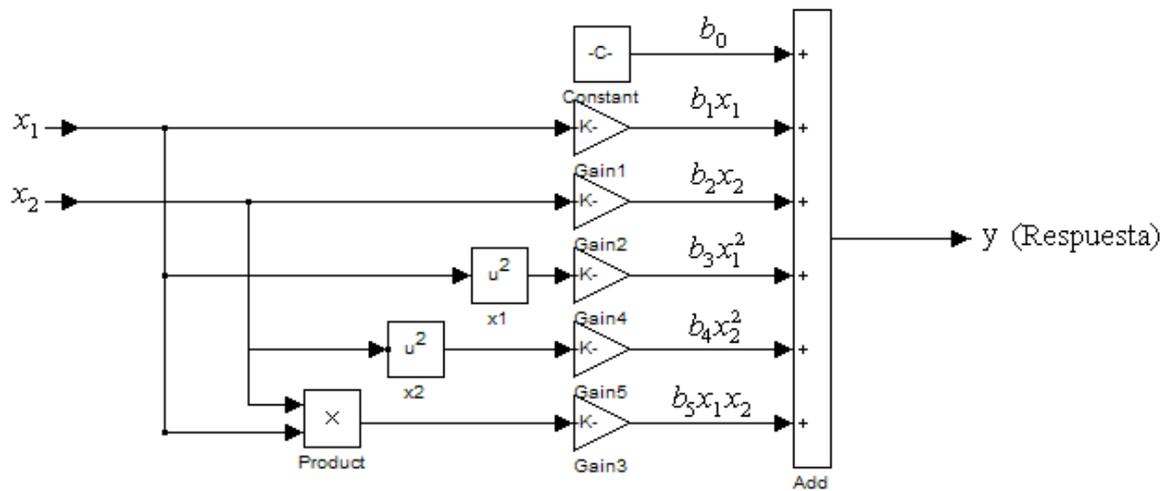
estreita entre estes dois parâmetros; esta relação é esperada porque o equilíbrio entre a taxa de consumo e a taxa de alimentação de material (arame) é estabelecido automaticamente, ou seja, se a alimentação aumenta e as gotas diminuem de tamanho, a frequência de destacamento precisa aumentar.

### 4.3 – SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE TRANSFERÊNCIA

Depois de estabelecer os modelos de tamanho e frequência de destacamento das gotas, uma simulação do processo de transferência é feita. Esta simulação mostra um visual do comportamento das gotas em transferência no modo goticular projetado (tamanho e frequência de destacamento) em função dos fatores de entrada de tensão e velocidade de alimentação do arame. Para este fim foi desenvolvido um protótipo tridimensional utilizando a plataforma de programação *Virtual Realm Builder 2.0*, a qual permite criar objetos virtuais e atribuir a cada objeto um comportamento determinado. Neste caso os objetos estabelecidos foram as gotas.

O comportamento das gotas no protótipo foi regulado usando o *Simulink*® do software *MATLAB*®, onde foram criados diferentes blocos que regulam os valores de tamanho e frequência de destacamento das gotas segundo os modelos estabelecidos. A comunicação entre os entorno virtual e o *Simulink* é realizada utilizando as ferramentas do *Virtual Reality Toolbox* do *Simulink*.

Os blocos que executam a função dos modelos possuem a forma da Figura 4.67, estes representam equações de segunda ordem onde cada (*Gain*, Figura 4.68 (a)) representa um coeficiente de regressão. Os multiplicadores da Figura 4.68 (b) e (c) representam a ordem do modelo, elevando ao quadrado os sinais ou multiplicando-os.



$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1^2 + b_4x_2^2 + b_5x_1x_2$$

Figura 4.67. Bloco que cumpre a função do modelo no Simulink e representa a equação de segunda ordem que acompanha a figura.

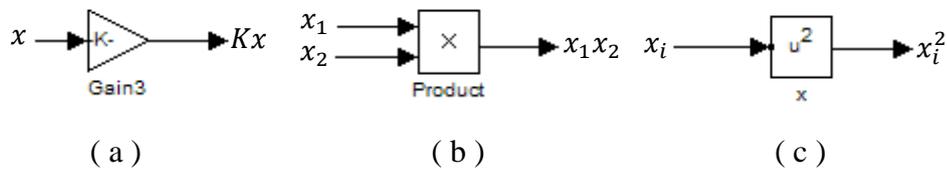


Figura 4.68. Blocos multiplicadores.

O tamanho da gota é gerenciado diretamente pelo bloco que representa a equação do modelo (Figura 4.67). No caso da frequência de destacamento é necessário uma sincronização de cada gota. Isto deve-se ao fato de que o modelo só proporciona informação relacionada com o tempo que transcorre entre cada destacamento de gota e, na simulação, precisa-se comunicar à gota quando tem que sair. Para isso foi criado um bloco que, em termos gerais, faz um cálculo de quando a gota tem que sair; a partir do modelo de frequência de destacamento das gotas, pode-se inferir o tempo que transcorre entre cada destacamento.

Com o objetivo de localizar espacialmente as gotas que saem da ponta do arame, foi criado um objeto que representa a peça a soldar (a chapa), para a qual foi construído um bloco

encarregado de movimentá-la. Este bloco não representa o movimento real da chapa e é usado só de forma ilustrativa. Outro fator usado para visualizar e localizar espacialmente as gotas em transferência é o cordão de solda, este é formado com as gotas que saem da ponta do arame e chegam até a chapa. Como no caso anterior o comportamento do cordão não representa o caso real, mas permite visualizar melhor o processo de transferência. No caso da formação do cordão, foi estabelecida uma sincronização espacial e temporal das gotas para que depois de que chegarem até a chapa se movimentem junto com ela na mesma velocidade.

A Figura 4.69 apresenta uma vista do protótipo virtual construído. Neste caso as dimensões do arame em relação aos outros objetos (chapa, bocal, pistola) são relativamente maiores que as normais. O diâmetro das gotas foi adequado para que os valores encontrados pelo modelo sejam relacionados diretamente com o diâmetro do arame encontrado nas medições. Assim pode-se ter um melhor ponto de comparação na hora de visualizar a transferência.

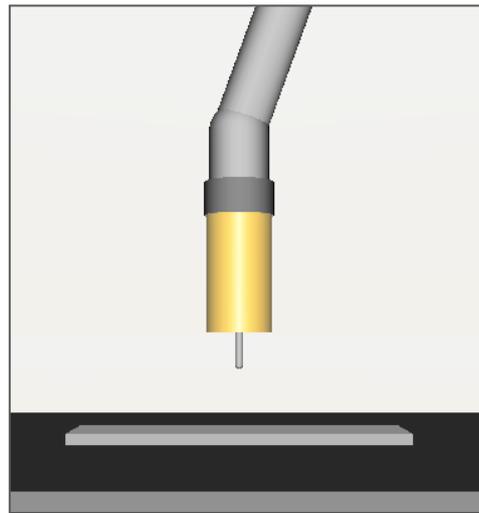
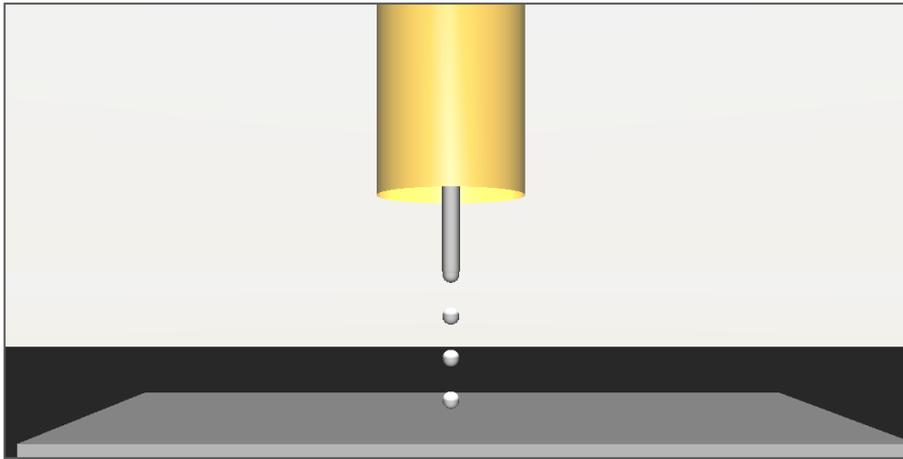
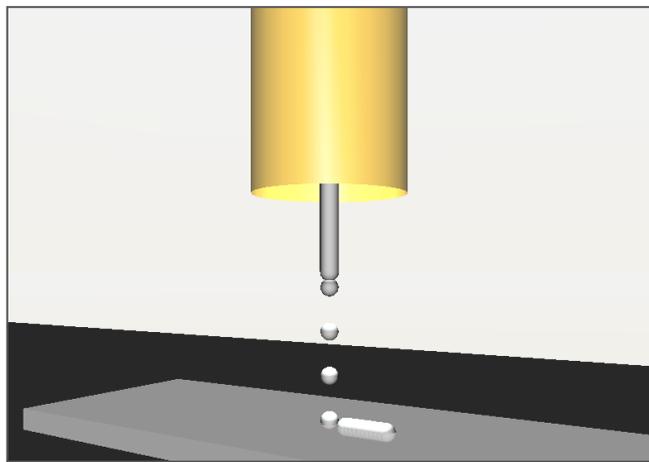


Figura 4.69. Protótipo virtual.

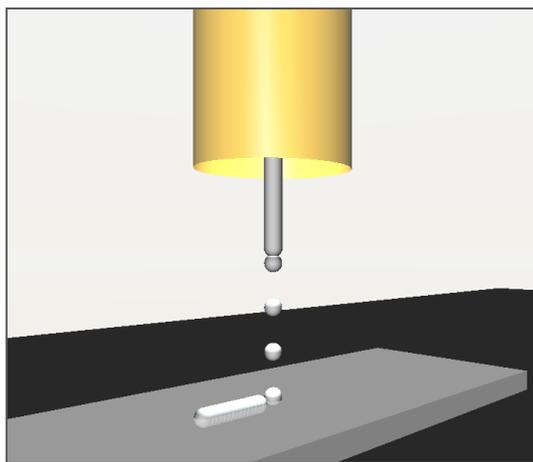
A Figura 4.70 apresenta um processo de simulação em diferentes momentos e em diferentes vistas, neste caso para uma velocidade de arame de 7 m/s e 27 V. Com o fim de visualizar os efeitos no diâmetro da gota e a frequência de destacamento nos modelos em relação aos fatores de entrada, a Figura 4.71 apresenta a simulação do processo para três valores diferentes de velocidade de arame com uma tensão constante.



(a)

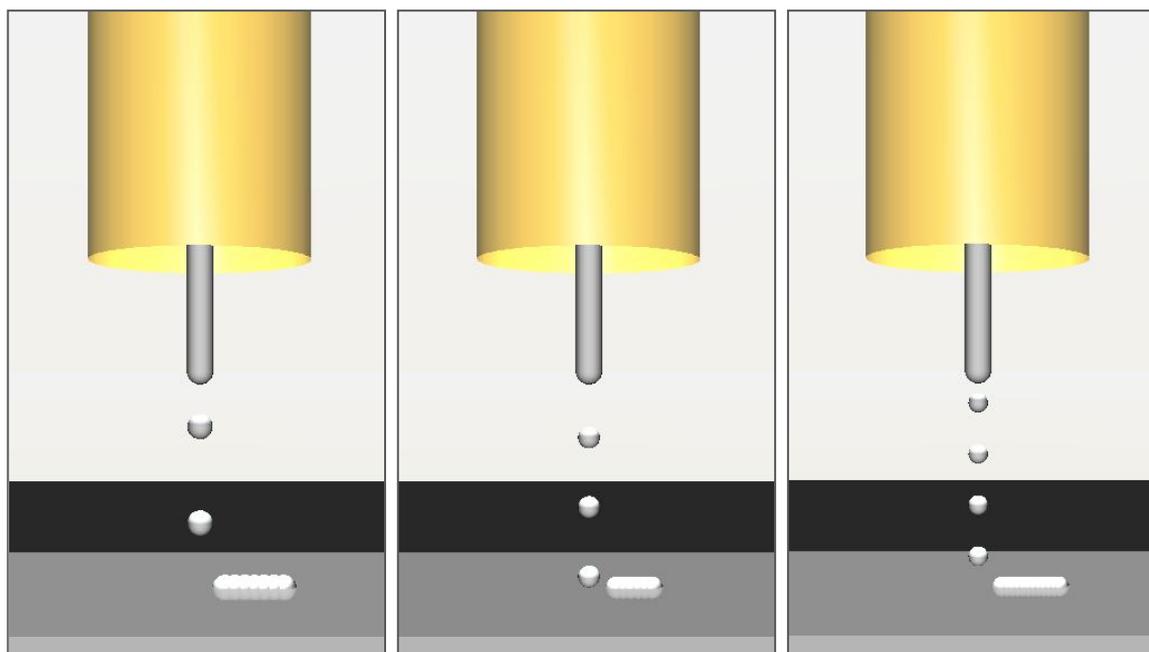


(b)



(c)

Figura 4.70. Simulação do processo de transferência metálica em vista e tempos diferentes  
Fatores de entrada 7m/s e 27 V.



( a )

( b )

( c )

Figura 4.71. Simulação da transferência goticular para três velocidades de arame e uma tensão constante de 28 V; (a) 5.8 m/min; (b) 6.5 m/min; (c) 7.2 m/min.

A simulação virtual permite visualizar diretamente os efeitos observados na superfície de resposta; pode-se ver na Figura 4.71 que à medida que a velocidade de arame aumenta o tamanho das gotas diminui e a frequência de destacamento aumenta, este último fato infere-se pela redução da distância entre as gotas adjacentes que saem do arame, o que indica que elas são destacadas mais rapidamente.

## 5 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este trabalho propõe a modelagem empírica da transferência goticular projetada em processos de soldagem GMAW. Conforme a revisão bibliográfica a transferência goticular é caracterizada pelo tamanho e a frequência de destacamento das gotas presentes no processo. Assim, optou-se por adotar a metodologia de superfície de resposta para realizar um planejamento experimental que permitisse encontrar dois modelos matemáticos de segunda ordem que representem estas características e com elas o modo de transferência goticular.

Decidiu-se trabalhar com modelos de segunda ordem em conformidade com as recomendações encontradas na bibliografia. Segundo o *Planejamento Composto Central*, para obter um modelo de segunda ordem usando a metodologia de superfície de resposta, nove pontos de trabalho necessitam ser testados dentro de uma região de estudo adequada, as respostas dos processos são medidas e desta forma são estabelecidas as variáveis de entrada e saída do modelo.

De acordo com os argumentos expostos, o primeiro passo na análise dos resultados foi determinar se os pontos de trabalho pertenciam a uma região de estudo adequada; o que implica que as respostas obtidas dentro da região apresentem uma distribuição normal; com este objetivo, um estudo estatístico por meio de histogramas e gráficos de distribuição de probabilidade normal, dos resíduos dos dados coletados, foi realizado e apresentado na seção 4.1 (Medição de características), nas figuras que se iniciam em 4.1 até 4.27 para o tamanho da gota e em 4.29 até 4.46 para a frequência de destacamento.

No caso das medições de tamanho, se apresentam histogramas da área e do diâmetro da gota, a segunda medida é derivada da primeira e os histogramas apresentam aparências similares. O importante dos histogramas para o tamanho e para a frequência de destacamento é que em ambos os casos os dados são agrupados na região central dos gráficos. Para o caso dos gráficos de probabilidade normal VS resíduos, os dados coletados em cada medição são distribuídos ao longo da linha reta que representa a distribuição

normal, o que confirma que as medições apresentam este tipo de distribuição e podem ser utilizadas para desenvolver os modelos.

Com o desvio padrão apresentado nas tabelas da Seção 4.1 foi calculado o coeficiente de variação ( $100 \cdot \text{desvio padrão} / \text{média amostral}$ ) o qual é apresentado na Tabela 5.1 para as medições de diâmetro e de frequência de destacamento das gotas. Estes valores foram encontrados aceitáveis por ser tido vistos nas revisões bibliográficas em trabalhos como Maia (2001) ou Weglowski *et al.* (2008). Um fato importante é que o maior diâmetro de gota encontrado no ponto de trabalho 6 m/min, 27 V não superou mais de 1.15 vezes (15%) o diâmetro do eletrodo, o que concorda com o critério adotado do IIW.

Tabela 5.1. Coeficiente de variação das medições de diâmetro e frequência de destacamento das gotas.

Observação	Fatores de entrada		Coeficiente de Variação (%)	
	Velocidade de arame (m/min)	Tensão (V)	Diâmetro	Frequência de destacamento
1	6	27	5.80	8.26
2	7	27	5.91	8.66
3	6	29	5.65	12.62
4	7	29	5.73	6.35
5	5.8	28	6.32	11.72
6	7.2	28	5.79	7.12
7	6.5	26.6	6.53	13.20
8	6.5	29.4	5.64	10.59
9	6.5	28	5.61	10.20
10	6.5	28	5.52	9.61
11	6.5	28	5.42	10.32
12	6.5	28	5.43	11.56

Os dados coletados experimentalmente, apresentados nas Figuras 4.28 e 4.47, oferecem uma idéia do comportamento das variáveis em estudo. Em relação à metodologia para obter os modelos, pode-se dizer que usando os níveis codificados a matriz  $X$  da Equação (3.1) sempre apresenta a mesma forma, o que simplifica o trabalho de encontrar novos modelos.

Depois de obter os modelos, a inspeção do gráfico de valores medidos nos experimentos ( $y_i$ ) VS valores calculados pelo modelo  $\hat{y}_i$  (Figuras 4.48 e 4.60) permitem observar que os modelos têm uma adequada aproximação às respostas encontradas nas medições. Os gráficos de resíduos ( $e_i$ ) VS valores calculados pelo modelo  $\hat{y}_i$  (Figuras 4.49 e 4.61) deixam ver que os desvios das respostas entregadas pelos modelos estão distribuídos de maneira uniforme em torno de zero. Os gráficos de probabilidade normal VS resíduos ( $e_i$ ) (figuras 4.50 e 4.62) verificam que os desvios das respostas do modelo apresentam uma distribuição normal.

Para o tamanho da gota (área) o modelo consegue descrever 95.53% das medições realizadas. Para o caso do diâmetro das gotas o modelo descreve 94% das variações apresentadas e no caso da frequência de destacamento, o modelo conseguiu descrever 98.35% das respostas medidas. Pela análise dos gráficos comentados anteriormente e pelas porcentagens com que os modelos conseguem descrever as medições, os modelos foram aceitos como adequados para descrever a transferência goticular.

Nos gráficos de superfície de resposta apresentados na seção de modelagem, em primeiro lugar, de acordo com os resumos das Figuras 4.28 e 4.47 e com a revisão bibliográfica, percebe-se que, a medida que os valores de tensão e velocidade do arame aumentam, o tamanho das gotas diminui e a frequência de destacamento aumenta, o que supõe um aumento da corrente em ambos os casos. No caso da velocidade de alimentação do arame, é sabido que esta é usada para controlar a corrente em fontes de soldagem de tipo tensão constante, ao aumentar a velocidade de alimentação, a corrente aumenta e assim se conserva o equilíbrio entre a taxa de fusão e alimentação do arame. No caso de aumentar a tensão e manter a *distância bico de contato-peça* (DBCP) constante, o comprimento do arco aumenta pois, a extensão livre do eletrodo diminui e assim a parcela de calor

produzida por efeito *Joule* diminui também, o que produz um aumento da corrente para manter o equilíbrio entre a taxa de fusão e alimentação do arame.

Para evidenciar o comportamento da corrente, foi realizado um modelo e sua correspondente superfície de resposta. Os dados utilizados são apresentados na Tabela 5.2 (se utiliza a média amostral como nos casos anteriores), o modelo é dado na Equação (5.1) para os níveis codificados e na Equação (5.2) para os fatores de entrada. As superfícies de respostas podem ser vistas nas Figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4.

Tabela 5.2. Medições de corrente nos pontos de trabalho.

Observação	Níveis codificados		Fatores de entrada		Respostas
	$x_1$	$x_2$	Velocidade de arame ( $\xi_1$ ) (m/min)	Tensão ( $\xi_2$ ) (V)	Corrente (A)
1	-1	-1	6	27	215.18
2	1	-1	7	27	232.51
3	-1	1	6	29	221.06
4	1	1	7	29	247.169
5	$-\sqrt{2}$	0	5.8	28	218.048
6	$\sqrt{2}$	0	7.2	28	245.661
7	0	$-\sqrt{2}$	6.5	26.6	224.115
8	0	$\sqrt{2}$	6.5	29.4	233.749
9	0	0	6.5	28	230.35
10	0	0	6.5	28	230.90
11	0	0	6.5	28	233.94
12	0	0	6.5	28	228.58

$$\hat{y}_{corrente} = 230.94 + 10.31x_1 + 4.27x_2 + 0.1x_1^2 - 1.36x_2^2 + 2.19x_1x_2 \quad (5.1)$$

$$\hat{y}_{corrente}^* = -274.79 - 107.22\xi_1 + 51.96\xi_2 + 0.4\xi_1^2 - 1.36\xi_2^2 + 4.38\xi_1\xi_2 \quad (5.2)$$

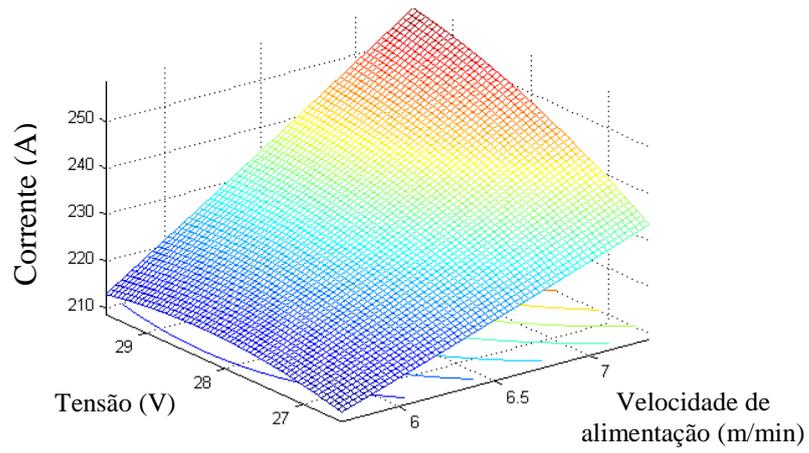


Figura 5.1. Superfície de resposta para o modelo de corrente.

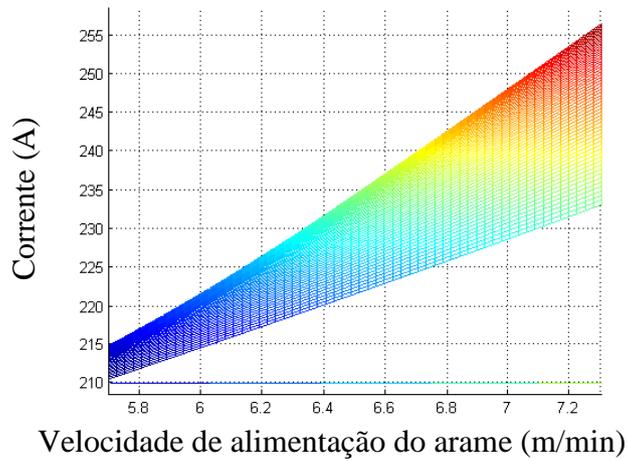


Figura 5.2. Superfície de resposta do modelo de corrente em função da velocidade de alimentação do arame.

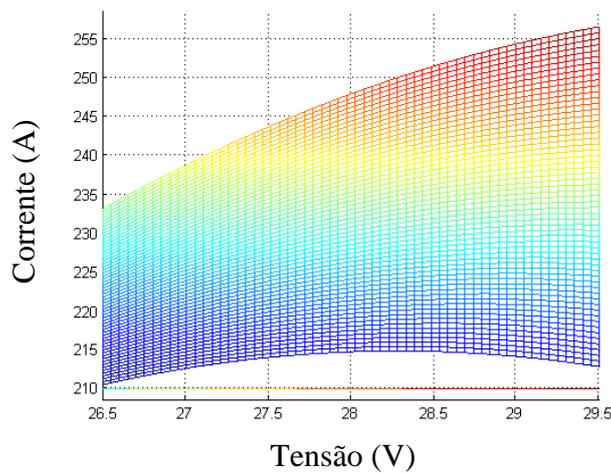


Figura 5.3. Superfície de resposta do modelo de corrente em função da tensão.

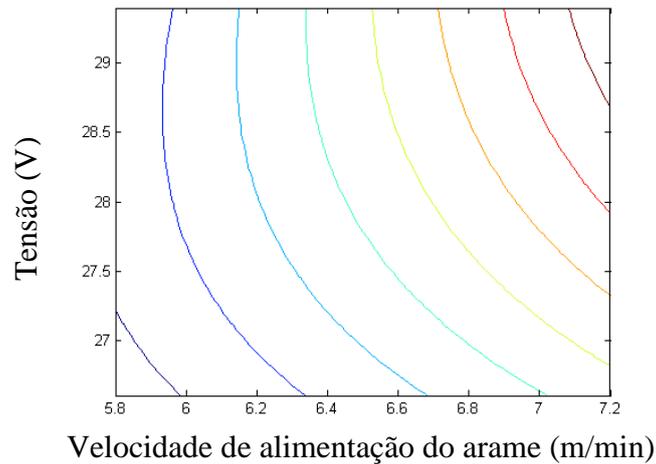


Figura 5.4. Contornos da superfície de resposta do modelo da corrente com respeito a os fatores de entrada.

Na Figura 5.2 observa-se a relação direta da corrente com a velocidade de alimentação do arame; nota-se que a medida em que a tensão aumenta, a corrente aumenta, com exceção de velocidades baixas de alimentação do arame (menores de 6.2 m/min), a Figura 5.4 evidencia que, nesta região, para tensões superiores a 28.5 V, a corrente diminui; este fato supõe que por estar iniciando o modo de transferência goticular, o aumento da tensão e com ela o aumento do comprimento do arco, colabora na formação e destacamento da gota, o que faz com que o processo diminua sua corrente para manter o equilíbrio entre a alimentação e a fusão. Depois, quando a velocidade do arame aumenta, a corrente aumenta e domina totalmente a transferência. Neste caso o aumento da corrente, quando se apresenta um aumento na tensão, se produz pelas diferenças do calor fornecido por efeito Joule exposto com anterioridade. As conclusões de esta hipótese tenderiam que ser comprovadas com experimentos específicos nesta região devido a que os valores de corrente estão muito próximos e os resultados nos gráficos poderiam ser produto de erros experimentais.

No caso das figuras de superfície de resposta de todos os modelos em função da velocidade do arame e em função da tensão (Figuras 4.52, 4.53, 4.57, 4.58, 4.64, 4.65, 5.2 e 5.3), percebe-se que as superfícies têm formas similares. No caso do tamanho da gota em relação à corrente e à frequência de destacamento, a relação se conserva mesmo que seja de forma invertida. As relações não são estritamente diretas, mas a similaridade se mantém pela correlação existente entre as variáveis.

Um comportamento interessante é apresentado nos gráficos de contornos das superfícies de resposta do tamanho e da frequência de destacamento das gotas (Figuras 4.54, 4.59 e 4.66), nelas pode-se observar que à medida que algum dos fatores de entrada aumenta, as mudanças nas respostas se apresentam mais rápidas (altera-se o valor com mais facilidade), principalmente depois do ponto central e especialmente quando há variação da velocidade de alimentação do arame, o que sugere que a maiores velocidades de alimentação ou tensão o comportamento da transferência é mais instável, ou seja, uma pequena mudança nos parâmetros pode ocasionar uma mudança maior nas respostas.

Este fato é importante principalmente quando se trabalha em ambientes não controlados, onde uma mudança nos parâmetros de entrada gera rápidas variações no tamanho e na frequência de destacamento das gotas. Assim, a idéia de encontrar regiões de trabalho dentro da região de transferência goticular onde a variação dos parâmetros produza alterações significativas nas respostas mais ou menos rápido pode ajudar a melhorar o controle dos processos.

Finalmente, o simulador virtual funciona a partir das variáveis de entrada de uma fonte de energia de tipo tensão constante e mostra de maneira gráfica e direta as respostas fornecidas pelos modelos para qualquer ponto de trabalho dentro da região de análise. Desta forma se apresentou como uma ferramenta útil e didática na hora de visualizar o tamanho e a frequência de destacamento das gotas, e permite fazer comparações diretas, com o diâmetro do eletrodo.

Nesta etapa o simulador somente apresenta a variação fornecida pelos modelos apresentados neste trabalho, mas com o desenvolvimento de novos modelos que acrescentem outras variáveis, como por exemplo, o comprimento do arco e com ele, o comprimento energizado do eletrodo, o reforço dos cordões de solda ou outros modos de transferência, o simulador se tornará mais real e poderá ser mais útil.

## 6 – CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS

### 6.1 – CONCLUSÕES

O objetivo geral do presente trabalho foi desenvolver uma modelagem empírica do tamanho e da frequência de destacamento das gotas em transferência goticular projetada. Foi utilizada a metodologia de superfície de respostas junto com técnicas de processamento de imagens digitais e uma câmera de alta velocidade. Os resultados do trabalho permitiram concluir:

- A configuração em “z” apresentada pelo expansor de feixe laser no sistema de perfilografia, com sua propagação de luz em forma de cone, permitiu adquirir imagens adequadas de transferência metálica no modo goticular.
- A sincronização das imagens com os sinais de corrente e tensão permitiram encontrar os parâmetros certos de funcionamento da câmera para realizar o processo de filmagem da transferência metálica a uma taxa de aquisição constante e sem perder informação.
- A análise das imagens adquiridas em diferentes regiões de trabalho, a partir dos fatores de entrada definidos como constantes, e mudanças de tensão e velocidade do arame na fonte de soldagem, possibilitou a delimitação de uma região de estudo na qual só se apresenta o modo de transferência goticular.
- A partir do *Planejamento Composto Central* fornecido pela metodologia de superfície de resposta e com a região de estudo estabelecida, foi possível encontrar os pontos de trabalho mais convenientes para realizar os modelos.
- Os programas computacionais que realizam o processamento das imagens digitais foram avaliados e validados como convenientes por apresentarem resultados conformes os requerimentos e as expectativas do trabalho.
- A correta segmentação do arame na limiarização global é o passo mais importante no processamento das imagens. A partir das coordenadas da ponta do arame as seções da imagem onde determinam-se o tamanho e a frequência de destacamento das gotas são estabelecidas.

- O “empescoçamento” produzido pelo efeito Pinch demonstrou ser um parâmetro adequado para rastrear e calcular a frequência de destacamento das gotas.
- A metodologia de superfície de resposta permitiu encontrar os modelos tanto do tamanho como da frequência de destacamento das gotas na transferência goticular projetada, os quais, por meio de testes estatísticos, foram avaliados como apropriados para descrever o modo de transferência.
- As superfícies de resposta geradas a partir dos modelos demonstraram ser uma ferramenta útil na hora de estudar o modo de transferência goticular. Através desta é possível inferir regiões de trabalho nas quais a porcentagem de variação das respostas é maior ou menor em relação às mudanças nos parâmetros de entrada, o que pode contribuir em etapas de controle nas quais o modo de transferência goticular seja predominante.
- As superfícies de resposta da corrente permitem observar um comportamento particular com respeito à tensão no início da região de estudo. Uma análise mais detalhada deste comportamento poderia ajudar a entender melhor o problema que alguns modelos teóricos possuem para descrever a zona de transição globular-goticular.
- O simulador virtual se apresenta como uma ferramenta útil e didática que permite, a partir do valor da tensão e da velocidade do arame dentro da região de estudo, visualizar diretamente o comportamento do tamanho e a frequência de destacamento das gotas.

## 6.2 – TRABALHOS FUTUROS

Um trabalho imediato é fazer a calibração da câmera, com a qual se realizarão as medições em unidades métricas. Desta forma é possível fazer comparações mais diretas no caso de trabalhar com o cordão de solda ou o comprimento do arame.

Os trabalhos futuros visam a aperfeiçoar a modelagem empírica da transferência goticular em duas linhas: a primeira com o estudo de fatores de entrada que neste caso permaneceram constantes como o tipo de gás de proteção e a *distância bico de contato-peça*, a segunda linha aponta a estudar outras respostas como o comprimento energizado

do arame e as variáveis que compreendem o cordão de solda como o reforço e a penetração.

Para finalizar, outra forma de fortalecer a simulação virtual é integrar novos modos de transferência, mas fora do modo goticular projetado pode ser difícil que um modelo gerado pela metodologia de superfície de resposta se adapte tão bem como neste caso, mas é um estudo que é necessário ser realizado para adotar ou descartar. No caso de não funcionar pretende-se integrar modelos teóricos que ajudem a descrever o processo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allemand, C.D., Schoeder, R., Ries, D.E. and Eagar, T.W., 1985, "A Method of Filming Metal Transfer in Welding Arcs", *Welding Journal*, Vol. 64, pp. 45-47.
- Allum, C.J., 1985, "Metal transfer in arc welding as a varicose instability: I. Varicose instability in a current-carrying liquid cylinder with surface change", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 18, pp. 1431-1446.
- Bálsamo, P.S., Vilarinho, L.O., Vilela, M. and Scotti, A., 2000, "Development of an Experimental Technique for Studying Metal Transfer in Welding: Synchronized Shadowgraphy", *International Journal for the Joining of Materials*, Vol. 12, No. 1, pp. 1-12.
- Benyounis, K.Y., Olabi, A.G., 2008, "Optimization of Different Welding Processes Using Statistical and Numerical Approaches – A Reference Guide", *Advances in Engineering Software*, Vol. 39, pp. 483-496.
- Box, G.E.P., Wilson, K.B., 1951, "On the Experimental Attainment of Optimum Conditions", *Journal of the Royal Statistical Society*, Vol. 13, pp 1-45.
- Box, G.E.P., Hunter, W., Hunter, J.S., 1978, "Statistics for Experimenters, An introduction to Design, Data Analysis, and Model Building", John Wiley & Sons, Inc., USA, 645 p.
- Castleman, K.R., 1996, "Digital Image Processing", Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA, 667 p.
- Correia, D., Gonçalves, C., da Cunha, S., Ferraresi, V., 2005, "Comparison Between Genetic Algorithms and Response Surface Methodology in GMAW Welding Optimization", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 160, pp. 70-76.
- Davies, M., Wahab, M., Painter, M., 2000, "An Investigation of the Interaction of a Molten Droplet with a liquid Weld Pool Surface: A Computational and Experimental Approach", *Welding Journal*, Vol. 79, No. 1, pp. 18-23.
- Devore, J.L., 2006, "Probabilidade e Estatística para Engenharia e Ciências" Pioneira Thomson Learning Ltda., São Paulo, Brasil, 692 p.
- Escalera, A., 2001, "Visión por Computador Fundamentos y métodos", Pearson Prentice Hall, Madrid, España, 303 p.

- Facon, J., 1996, "Morfologia Matemática, Teoria e Exemplos", Editora Universitária Champagnat da Pontífica Universidade Católica do Paraná, Curitiba, Brasil, 304 p.
- Fan, H.G., Kovacevic, R., 1998, "Transfer in Gas Metal Arc Welding - A Comparison of Numerical and Experimental Results", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 31, pp. 2929-2941.
- Fan, H.G., Kovacevic, R., 1999, "Droplet Formatio, Detachment, and Impingement on the Molten Pool in Gas Metal Arc Welding", Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 30, pp. 791-801.
- Figueiredo K.M, 2000, "Mapeamento dos Modos de Transferência Metálica na Soldagem MIG de Alumínio", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.
- Franco, L.D.N., 2007, "Sincronização, Captura e Análise de Imagens da Poça de Soldagem no Processo GMAW Convencional, no modo de Transferência Metálica por Curto-Circuito", Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.
- Franco, F.D., 2008, "Monitorização e Localização de Defeitos na Soldagem TIG através do Sensoriamento Infravermelho", Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.
- Gomes, O.M., 2001, "Processamento e Análise de Imagens Aplicados à Caracterização Automática de Materiais", Dissertação de Mestrado, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil.
- Gonçalves, B.H.B., 2007, "Estudo Comparativo da Resistência à Erosão por Cavitação do Metal de Solda Depositado por um Arame Tubular Tipo 13%Cr-4%Ni-0,4%Mo e do Aço Fundido ASTM A 743 CA-6NM", Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, M-G, Brasil.
- Gonzales, R., Woods, R., 2007, "Processamento de Imagens Digitais", Editora Blucher, São Paulo, SP, Brasil, 509 p.
- Gonzales, R., Woods, R., 2002 "Digital Image Processing, Second Edition" Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA, 793 p.
- Groetelaars, P.J., 2005, "Influência da Variação de Parâmetros de Soldagem Sobre a Transferência Metálica e perfil do cordão no processo MIG/MAG Duplo-Arame", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, M-G, Brasil.

- Haidar, J., Lowke, J., 1996, "Predictions of Metal Droplet Formation in Arc Welding", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 29, No. 12, pp. 2951-2960.
- Hariharan P., 1987, "Beam expander for making large rainbow holograms", *Applied Optics*, Vol. 26, pp. 1815.
- Hello, P., Man C. N., 1996, "Design of a Low-Loss Off-Axis Beam Expander", *Applied Optics*, Vol. 35, No. 15, pp. 2534-2536.
- Houghton, M., Lucas, J. and Lucas, W., 2007, "Vision Systems for Monitoring and Control of Arc Welding Operation", *Soldagem & Inspeção*, Vol. 12, No. 4, pp. 293-299.
- Hu, J., Tsai, H.L., 2006, "Effects of Current on Droplet Generation and Arc Plasma in Gas Metal Arc Welding", *Journal of Applied Physics*, Vol. 100, 12 p.
- Hu, J., Tsai, H.L., 2008, "Modelling of Transport Phenomena in 3D GMAW of Thick Metals with V Groove", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 41, 10 p.
- Iordachescu, D., Lucas, W., Ponomarev, V., 2006, Reviewing the "Classification of Metal Transfer", *IIW Doc.*, No. XII-1888-06, 10 p.
- Kim, Y., Eagar, T., 1988, "Modeling of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding", *Edison Welding Institute Annual North American Welding Research Seminar*, Columbus, OH, USA, pp. 1-20.
- Kim, Y., Eagar, T., 1993, "Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding", *Welding Journal*, Vol. 72, pp. 269-278.
- Lancaster, J.F., 1984, "The Physics of Welding", Pergamon, Oxford, United Kingdom, 232 p.
- Lopera, J.E.P., Muñoz, G.L.L., 2007, "Sistema Asistido de Segmentación, Clasificación y Conteo de Cromosomas en Metafase para la Elaboración de Cariotipos Basado en Visión Computacional", *Dissertação de graduação*, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.
- Lopes, F.M., 2003, "Um Modelo Perceptivo de Limiarização de Imagens Digitais", *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.
- Lowke, J.J., 2009, "Physical Basis for the Transition from Globular to Spray Modes in Gas Metal Arc Welding", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 42, 7p.
- Maia, T.C., 2001, "Utilização de Técnicas de Processamento Digital de Imagens no Estudo de Transferência Metálica em Soldagem a Arco Voltaico", *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, M-G, Brasil.

- Modenesi, P.J., 2001, “Introdução à Física do Arco Elétrico”, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 53 p.
- Murray, P.E., 2002, “Selecting Parameters for GMAW Using Dimensional Analysis”, *Welding Journal*, Vol. 81, No. 7, pp. 125-131
- Myers, R.H., Montgomery, D.C., Anderson-Cook, C., 2009, “Response Surface Methodology, Process and Product Optimization Using Designed Experiments, 3 Ed.”, John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, USA, 680 p.
- Myers, W.R., 2003, “Response Surface Methodology” *Encyclopedia of Biopharmaceutical Statistics*, Second Edition, pp. 858-869.
- Nemchinsky V., 1994, “Size and shape of the liquid droplet at the molten tip of an arc electrode”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 27, pp. 1433-1442.
- Otsu, N., 1979, “A threshold selection method from gray-level histograms”, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 9, No. 1, pp. 62-66.
- Ponomarev, V., Scotti, A., Norrish, J., Lucas, W., 2009, “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. IIW 2009. Paris : IIW, 2009. v. CD. p. 1-15.
- Praveen, P., Kang, M.J., Prasad, Y., 2006, “Behaviour of Metal Transfer Modes in Pulse Gas Metal Arc Welding of Aluminum”, *Proceedings of 2006 Advanced Materials Processing Technologies Conference*, Las Vegas, USA, pp. 1-8.
- Reis, R.P., 2009, “Assessment of Low Current Tandem GMAW Processes with Waveform Control and with Aid of Laser Beam”, *Tese de Doutorado*, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, M-G, Brasil.
- Resende, A., Keocheguerians, F., Vilarinho, L.O., 2009, “Influência dos Teores de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> na Corrente de Transição Globular-Goticular Utilizando Misturas a Base de Argônio Durante a Soldagem GMAW de Arame ER70S-6”, *Soldagem e Inspeção*, Vol. 14, pp. 26-35.
- Richetti, A., 2003, “Análise e Modelagem Empírica do Processo de Soldagem a Plasma com “Keyhole” em Aço Inoxidável” *Tese de Doutorado*, Universidade de Uberlândia, M-G. Brasil.
- Sahoo, P.K., Soltaini, S., Wong, A.K., 1988, “A Survey of Thresholding Techniques” *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Vol. 41, pp. 233-260.

- Scotti, A., 2000, "Mapping transfer modes for stainless steel gas metal arc welding", *Science and Technology of Welding & Joining*, Vol. 5, No. 4, pp. 227-234
- Scotti, A., Ponomarev, V., 2008, "Soldagem MIG/MAG melhor entendimento, melhor desempenho", Artliber Editora, São Paulo, Brasil 284 p.
- Shafer D. R., 1978, "Laser Beam Steerer-Expander", *Applied Optics*, Vol. 17, No. 22, pp. 3584-3586.
- Simpson, S.W., Zhu, P.Y., 1995, "Formation of Molten Droplets at a Consumable Anode in an Electric Welding Arc", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 28, pp. 1594-1600.
- Steen, W. and Watkins K., 2003, "Laser Material Processing", Ed. Springer, London, United Kingdom, 423 p.
- Subramaniam, S., White, D.R., Jones, J.E., Lyons, D.W., 1999, "A Method for Selection of Process Parameters in Pulsed GMAW Helps to Efficiently Develop Welding Procedures", *Welding Journal*, Vol. 78, No. 5, pp. 166-172
- Trucco E., Verri, A., 1998, "Introductory Techniques for 3-D Computer Vision", Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 343 p.
- Wang, F., Hou, W.K., Hu, S.J., Kannatey-Asibu, E., Schultz, W., 2003, "Modelling and Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 36, pp. 1143, 1152.
- Wang, Y., Tsai, H.L., 2001, "Impingement of Filler Droplets and Weld Pool Dynamics During Gas Metal Arc Welding Process", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 2067-2080
- Wang, Z., Zhang, Y., 2007, "Image Processing Algorithm for Automated Monitoring of Metal Transfer in Double-Electrode GMAW", *Measurement Science and Technology*, Vol. 18, No. 7, pp. 2048-2058.
- Waszink, J.H., Graat, L.H., 1983, "Experimental investigation of the forces acting on a drop of weld metal", *Welding Journal*, Vol. 62, pp. 108-116
- Weglowski, M., Huang, Y. and Zhang, Y., 2008, "Effect of Welding Current on Metal Transfer in GMAW", *Archives of Materials Science and Engineering*, Vol. 33, pp. 49-56.
- Weichel, H., 1990, "Laser Beam Propagation in the Atmosphere", Ed. SPIE, Washington, USA, 108 p.

- Weman, K., 2003, "Welding Processes Handbook", Woodhead Publishing Ltd, Cambridge, England, 208 p.
- Weska, J.S., 1978, "A Survey of Thresholding Selection Techniques", Computer Graphics and Image Processing, Vol. 5, pp. 382-399.
- Xu, G., Hu, J., Tsai, H.L., 2008, "Three-Dimensional Modeling of The Plasma Arc in Arc Welding", Journal of Applied Physics, Vol. 104, 10 p.
- Xu, G., Hu, J., Tsai, H.L., 2009, "Three-Dimensional Modeling of Arc Plasma and Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 52, pp. 1709-1724.