

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DO METAL DE ADIÇÃO NO PROCESSO GMAW  
POR FILMAGEM DE ALTA VELOCIDADE E AQUISIÇÃO DE SINAIS ELÉTRICOS

por

Gustavo Simões Teixeira

Tese para obtenção do Título de  
Doutor em Engenharia

Porto Alegre, Maio de 2018.

ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DO METAL DE ADIÇÃO NO PROCESSO GMAW  
POR FILMAGEM DE ALTA VELOCIDADE E AQUISIÇÃO DE SINAIS ELÉTRICOS

por

Gustavo Simões Teixeira  
Mestre em Engenharia

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Doutor em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Aprovada por:

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez (UFRGS / Porto Alegre – Brasil)

Prof. Dr. Ivan Guerra Machado (UFRGS / Porto Alegre – Brasil)

Prof. Dr. Richard Thomas Lermen (IMED / Passo Fundo – Brasil)

Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 04 de Maio de 2018.

Para Laura e Vanessa,  
meus pais, Tairo e Preta, e minha irmã Gabriela,  
com todo meu amor e gratidão eu dedico este trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro, por toda orientação, amizade e apoio recebidos durante todo o período acadêmico, desde o começo do mestrado. Mais que um orientador, foi o melhor exemplo de professor que tive, um mestre que tenho como um modelo a seguir por toda minha vida acadêmica.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS) Campus Rio Grande, pela concessão do afastamento para estudos do doutorado.

Aos meus colegas do Curso Técnico em Fabricação Mecânica do IFRS – Campus Rio Grande, pelo incentivo durante todo o meu período afastado para o doutorado.

Ao Prof. Dr. Nattan Roberto Caetano, pelo treinamento com a câmera de alta velocidade.

Ao Prof. Dr. Rodrigo Rossi, pelo empréstimo da câmera de alta velocidade.

Ao acadêmico e futuro Engenheiro Mecânico Filipi Giotti, pela ajuda com toda a parte experimental do trabalho.

Aos colegas e professores do Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas (LS&TC), pelo companheirismo, troca de conhecimentos e sugestões para realização do trabalho.

Aos amigos do Futebol GMAp, cuja amizade de longa data foi fundamental para aliviar as tensões desenvolvidas durante a elaboração da qualificação e tese de doutorado.

À minha esposa Vanessa e nossa filha Laura, por toda confiança depositada, palavras de incentivo e amor nas situações críticas. Peço desculpas pelos momentos em que estive ausente, longe de vocês sem poder ajudar vocês nas suas situações difíceis.

Aos meus pais, Tairo e Preta, e minha irmã Gabriela, só tenho a agradecer, principalmente pelo exemplo que me foi passado.

## RESUMO

O modo de transferência do metal de adição no processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) tem um importante papel na estabilidade do arco elétrico, na quantidade de gases absorvida pelo metal fundido na poça de fusão, na determinação da possibilidade de aplicação em certas posições de soldagem e influencia no nível de respingos gerados. O objetivo deste trabalho consistiu em obter imagens da transferência do metal até a poça de fusão, para mapear as regiões de transferência e suas fronteiras. Além disso, sinais elétricos de corrente de soldagem e tensão de arco foram adquiridos e comparados com as imagens geradas para confirmar os resultados. As imagens de alta velocidade serviram para identificar os modos de transferência do metal. Neste trabalho, uma câmera de alta velocidade foi utilizada para obter imagens dos arcos elétricos gerados por arames-eletrodos ER70S-6 com três diferentes diâmetros (0,8 1,0 e 1,2 mm) no processo GMAW, empregando diferentes gases (Ar e CO<sub>2</sub>) e misturas gasosas (Ar + 10% CO<sub>2</sub>, Ar + 25% CO<sub>2</sub>, Ar + 2% O<sub>2</sub>) como gás de proteção. Os modos de transferência do metal puderam ser observados em taxas de 5000 e 8000 quadros por segundo. Os valores médios dos sinais elétricos dos parâmetros de soldagem adquiridos foram representados em gráficos, onde se verificaram regiões pertencentes a cada modo de transferência. Além dos modos de transferência por curto-circuito, globular e aerossol, foram detectados modos de transferência intermitentes do metal.

Palavras-chave: Processo GMAW; Modos de Transferência do Metal; Parâmetros de Soldagem; Aquisição de Sinais Elétricos; Imagens de Alta Velocidade.

## **ABSTRACT**

Weld metal transfer modes in GMAW (Gas Metal Arc Welding) process have an important role in electric arc stability, in the amount of absorbed gases by the melted metal, allow out-of-position welding and influence in sparkles generation. The objective of the present work is to obtain images of the metal transfer to the weld pool, in order to better characterize the transfer modes boundaries. Besides, electric signals of welding current and voltage were acquired and compared with the generated images to confirm the results. High speed imaging helps to identify the weld metal transfer mode. In this work, a high speed camera was used to get images and movies of welding arcs generated by three different AWS ER70S-6 wire diameters (0,8 1,0 and 1,2 mm). Also, different shielding gases and mixtures were tested (Ar, Ar + 2% O<sub>2</sub>, Ar + 10% CO<sub>2</sub>, Ar + 25% CO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>). Metal transfer modes could be observed at a frame rates of 5000 and 8000 fps. Mean values of the welding parameters acquired electrical signals were plotted, where metal transfer regions were found, belonging for each transfer mode. Besides short-circuit, globular and spray transfer modes, interchangeable metal transfer modes were detected.

**Keywords:** GMAW Process; Metal Transfer Modes; Welding Parameters; Electrical Signals Acquisition; High Speed Imaging.

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos.....	2
1.2	Organização do Trabalho.....	3
<b>2</b>	<b>PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW CONVENCIONAL.....</b>	<b>5</b>
2.1	O Arco Elétrico.....	5
2.2	Transferência do Metal e Fluxo de Massa.....	7
2.4	Teoria de Balanço das Forças Estáticas.....	7
2.5	Teoria da Instabilidade Pinch.....	14
2.6	Número de Transferência e Índice de Tamanho de Gota.....	17
2.7	Teoria da Força do Plasma e Teoria da Velocidade Crítica.....	20
2.8	Classificação dos Modos de Transferência do Metal.....	20
2.9	Mapas de Transferência do Metal de Adição.....	25
2.10	Gases de Proteção para Soldagem GMAW.....	25
2.11	Misturas Gasosas para Soldagem GMAW.....	27
<b>3</b>	<b>IMAGENS EM SOLDAGEM.....</b>	<b>30</b>
3.1	Fundamentos de Visualização de Imagens em Processos de Soldagem.....	32
3.2	O Efeito da Radiação.....	34
3.3	Fundamentos de Visualização de Imagens em Alta Velocidade.....	34
3.4	Oscilogramas dos Sinais Elétricos – Tensão e Corrente.....	36
3.5	Perfilografia.....	38
3.6	Imagens em Soldagem com Iluminação por Banco de Diodos LASER.....	41
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>44</b>
4.1	Experimentos com Mistura Gasosa Ar + 10% CO <sub>2</sub> .....	45
4.2	Experimentos com Gases Puros e Misturas Gasosas.....	46
4.3	Equipamentos.....	47
4.4	Sincronização entre Imagens de Alta Velocidade e Sinais Elétricos Adquiridos.....	51

<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>55</b>
5.1	Resultados para os Experimentos com a Mistura Gasosa Ar + 10% CO <sub>2</sub> .....	55
5.1.1	Resultados para os Experimentos com Parâmetros de Soldagem Inferiores (LV) ....	55
5.1.2	Resultados para os Experimentos com Parâmetros de Soldagem Superiores (HV) ..	58
5.2	Resultados para os Experimentos com Gases Puros e Misturas Gasosas.....	61
5.2.1	Resultados para o Gás de Proteção Ar + 2% O <sub>2</sub> .....	61
5.2.2	Resultados para o Gás de Proteção Ar + 10% CO <sub>2</sub> .....	63
5.2.3	Resultados para o Gás de Proteção Ar + 25% CO <sub>2</sub> .....	64
5.2.4	Resultados para o Gás de Proteção Ar.....	65
5.2.5	Resultados para o Gás de Proteção CO <sub>2</sub> .....	67
5.2.6	Resultados para o Arame-Eletrodo AWS ER70S-6 (0,8 mm).....	68
5.2.7	Resultados para o Arame-Eletrodo AWS ER70S-6 (1,0 mm).....	69
5.2.8	Resultados para o Arame-Eletrodo AWS ER70S-6 (1,2 mm).....	71
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>74</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>77</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>78</b>
	<b>APÊNDICE A</b> Imagens dos Cordões de Solda dos Experimentos com Mistura Gasosa Ar + 10% CO <sub>2</sub> .....	<b>85</b>
	<b>APÊNDICE B</b> Resultados dos Experimentos com Parâmetros de Soldagem Inferiores (LV) e Experimentos com Parâmetros de Soldagem Superiores (HV).....	<b>92</b>
	<b>APÊNDICE C</b> Imagens dos Cordões de Solda dos Experimentos com Gases Puros e Misturas Gasosas .....	<b>94</b>
	<b>APÊNDICE D</b> Resultados dos Experimentos com Gases Puros e Misturas Gasosas.	<b>100</b>
	<b>APÊNDICE E</b> Geometria do Arco Elétrico Resultante nos Experimentos com Parâmetros de Soldagem Inferiores (LV) e Experimentos com Parâmetros de Soldagem Superiores (HV) .....	<b>103</b>
	<b>APÊNDICE F</b> Geometria do Arco Elétrico Resultante nos Experimentos com Gases Puros e Misturas Gasosas .....	<b>105</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Exemplo de imagem obtida por perfilografia [Scotti et al., 2014].....	3
Figura 1.2	Exemplo de imagem obtida neste trabalho, com detalhe da gota sendo transferida envolta pelo arco elétrico.....	3
Figura 2.1	Representação esquemática das regiões de um arco linear com a distribuição de tensão ao longo do arco [Roth, 1995 <i>apud</i> Lermen, 2011]..	6
Figura 2.2	Forças atuantes sobre a gota fundida na ponta do eletrodo consumível [Greene, 1960, Amson, 1965].....	8
Figura 2.3	Ângulo de raiz e área ativa do arame-eletrodo [Greene, 1960].....	11
Figura 2.4	Variação do fator $f_2$ em função do valor do ângulo de condução $\theta$ da corrente de soldagem [Smith, 1970].....	12
Figura 2.5	Modos de transferência do metal sucessivos no processo GMAW devido ao aumento da densidade de corrente (a. curto-circuito, b. globular, c. aerossol projetado, d. aerossol contínuo, e. aerossol rotacional) [Lancaster, 1986].....	16
Figura 2.6	Efeito do diâmetro do arame no diâmetro da gota [Adaptado de Greene, 1960].....	19
Figura 3.1	Câmara de alta velocidade [Brailsford e Shrubbs, 1948].....	30
Figura 3.2	Vista em corte (a) e superior (b) da câmara de alta velocidade [Brailsford e Shrubbs, 1948].....	30
Figura 3.3	Figura 3.3 – Imagens obtidas por câmara de alta velocidade da década de 40. (a) Eletrodo de carvão, 10 A, CA, em 1500 fps. (b) Eletrodo revestido, 120 A, CCEN, em 2500 fps.....	31
Figura 3.4	Esquema básico de detecção visual ativa [Adaptado de Ogawa, 2011].....	32
Figura 3.5	Reflexão dicromática em uma superfície [Adaptado de Ogawa, 2011].....	33
Figura 3.6	Influência do estado da superfície na reflexão da luz [Adaptado de Ogawa, 2011].....	33
Figura 3.7	Imagens de alta velocidade sem filtro: (a) Imagem inicial da soldagem, (b) Momento da abertura do arco, (c) Instante após abertura do arco, (d) Extinção do arco.....	35
Figura 3.8	Efeito do tamanho na qualidade da imagem [Ogawa, 2012].....	36

Figura 3.9	Observações instantâneas do destacamento da gota através da tensão de arco e corrente de soldagem [Adaptado de Rajasekaran et al., 1998].....	37
Figura 3.10	Princípio da perfilografia aplicada à soldagem [Bálsamo et al., 2000].....	39
Figura 3.11	Formação de ondas planas a partir de ondas esféricas pelo uso de uma lente convergente [Ramos et al., 2013].....	40
Figura 3.12	Exemplo do efeito da claridade excessiva (elipse em destaque) obtida por uma câmera Prosilica GC650 com sensor CCD (a), e exemplo de imagem obtida por uma câmera Prosilica GC750c com sensor CMOS (b) [Adaptado de Bengston, 2013].....	42
Figura 3.13	Aplicação da iluminação pelo CAVILUX® (810 nm de comprimento de onda) em processo de soldagem GTAW usando He como gás de proteção. [Adaptado de Stolz et al., 2015].....	43
Figura 3.14	Instante da ruptura da poça de fusão, em solda de canto efetuada pelo processo de soldagem a LASER Nd:YAG. No detalhe, a poça de fusão e a formação do <i>keyhole</i> [Adaptado de Eriksson et al., 2010].....	43
Figura 4.1	Esquema do arranjo experimental.....	44
Figura 4.2	Disposição dos equipamentos no laboratório.....	48
Figura 4.3	Câmera de alta velocidade.....	49
Figura 4.4	Fonte de soldagem Digiplus A7 450.....	49
Figura 4.5	Sistema automático de soldagem CNC Tartílope V4, em (a), o sistema completo e em (b) detalhe do manipulador robótico e suporte para a chapa a ser soldada.....	50
Figura 4.6	Sistema de aquisição de dados.....	51
Figura 4.7	Lente AF-S VR Micro-NIKKOR 105 mm f/2.8G IF-ED.....	51
Figura 4.8	Imagem instantânea de alta velocidade de uma gota de metal de adição.....	52
Figura 4.9	Oscilograma de tensão e corrente de soldagem com valores correspondentes ao instante 12,925 s (quadro 25954).....	53
Figura 4.10	Imagens instantâneas de alta velocidade de uma gota sendo transferida.....	53
Figura 4.11	Valores instantâneos de tensão e corrente de soldagem para as imagens da Figura 4.10.....	54

Figura 5.1	Mapas de transferência do metal das médias de tensão de arco em função das médias de corrente de soldagem para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 (0,8 1,0 e 1,2 mm) para os experimentos com parâmetros de soldagem inferiores (LV).....	56
Figura 5.2	Mapas de transferência do metal das médias de tensão de arco em função das médias de densidade de corrente para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 (0,8 1,0 e 1,2 mm) para os experimentos com parâmetros de soldagem inferiores (LV).....	56
Figura 5.3	Tempos de curto-circuito (a) e arco aberto (b) para os experimentos com parâmetros de soldagem inferiores (LV).....	57
Figura 5.4	Mapas de transferência do metal das médias de tensão de arco em função das médias de corrente de soldagem para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 (0,8 1,0 e 1,2 mm) para os experimentos com parâmetros de soldagem superiores (HV).....	58
Figura 5.5	Mapas de transferência do metal das médias de tensão de arco em função das médias de densidade de corrente para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 (0,8 1,0 e 1,2 mm) para os experimentos com parâmetros de soldagem superiores (HV).....	59
Figura 5.6	Tempos de curto-circuito para os experimentos com parâmetros de soldagem superiores (HV).....	60
Figura 5.7	Tempos de arco aberto para os experimentos com parâmetros de soldagem superiores (HV).....	61
Figura 5.8	Mapas de transferência do metal das médias de tensão de arco em função das médias de corrente de soldagem para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 (0,8 1,0 e 1,2 mm) com a mistura gasosa de Ar +2% O <sub>2</sub> como gás de proteção.....	62
Figura 5.9	Mapas de transferência do metal das médias de tensão de arco em função das médias de densidade de corrente para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 (0,8 1,0 e 1,2 mm) com a mistura gasosa de Ar +2% O <sub>2</sub> como gás de proteção.....	62

Figura 5.10	Mapas de transferência do metal das médias de tensão de arco em função das médias de corrente de soldagem para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 (0,8 1,0 e 1,2 mm) com a mistura gasosa de Ar +10% CO <sub>2</sub> (C10) como gás de proteção.....	63
Figura 5.11	Mapas de transferência do metal das médias de tensão de arco em função das médias de densidade de corrente para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 (0,8 1,0 e 1,2 mm) com a mistura gasosa de Ar +10% CO <sub>2</sub> (C10) como gás de proteção.....	64
Figura 5.12	Mapas de transferência do metal das médias de tensão de arco em função das médias de corrente de soldagem para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 (0,8 1,0 e 1,2 mm) com a mistura gasosa de Ar +25% CO <sub>2</sub> (C25) como gás de proteção.....	65
Figura 5.13	Mapas de transferência do metal das médias de tensão de arco em função das médias de densidade de corrente para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 (0,8 1,0 e 1,2 mm) com a mistura gasosa de Ar +25% CO <sub>2</sub> (C25) como gás de proteção.....	65
Figura 5.14	Mapas de transferência do metal das médias de tensão de arco em função das médias de corrente de soldagem para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 (0,8 1,0 e 1,2 mm) com Ar como gás de proteção.....	66
Figura 5.15	Mapas de transferência do metal das médias de tensão de arco em função das médias de densidade de corrente para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 (0,8 1,0 e 1,2 mm) com Ar como gás de proteção.....	66
Figura 5.16	Mapas de transferência do metal das médias de tensão de arco em função das médias de corrente de soldagem para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 (0,8 1,0 e 1,2 mm) com a mistura gasosa de CO <sub>2</sub> como gás de proteção.....	67
Figura 5.17	Mapas de transferência do metal das médias de tensão de arco em função das médias de densidade de corrente para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 (0,8 1,0 e 1,2 mm) com a mistura gasosa de CO <sub>2</sub> como gás de proteção.....	68

Figura 5.18	Mapas dos modos de transferência do metal para o arame-eletrodo AWS ER70S-6 (0,8 mm) das médias de tensão de arco pelas médias de corrente de soldagem.....	69
Figura 5.19	Mapas dos modos de transferência do metal para o arame-eletrodo AWS ER70S-6 (0,8 mm) das médias de tensão de arco pelas médias de densidade de corrente.....	69
Figura 5.20	Mapas dos modos de transferência do metal para o arame-eletrodo AWS ER70S-6 (1,0 mm) das médias de tensão de arco pelas médias de corrente de soldagem.....	70
Figura 5.21	Mapas dos modos de transferência do metal para o arame-eletrodo AWS ER70S-6 (1,0 mm) das médias de tensão de arco pelas médias de densidade de corrente.....	71
Figura 5.22	Mapas dos modos de transferência do metal para o arame-eletrodo AWS ER70S-6 (1,2 mm) das médias de tensão de arco pelas médias de corrente de soldagem.....	72
Figura 5.23	Mapas dos modos de transferência do metal para o arame-eletrodo AWS ER70S-6 (1,2 mm) das médias de tensão de arco pelas médias de densidade de corrente.....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Classificação dos modos de transferência de massa [IIW, 1976].....	21
Tabela 2.2	Classificação da transferência do metal para o processo GMAW de acordo com classes, grupos e modos [Scotti et al., 2012].....	22
Tabela 4.1	Experimentos com mistura gasosa de Ar + 10% CO <sub>2</sub> .....	46
Tabela 4.2	Experimentos com gases puros e misturas gasosas.....	47

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AISI	<i>American Iron &amp; Steel Institute</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
CA	Corrente Alternada
CCEN	Corrente Contínua, Eletrodo Negativo
CCEP	Corrente Contínua, Eletrodo Positivo
CCD	<i>Charged-Couple Device</i>
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide Semiconductor</i>
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
C10	Mistura Gasosa de Ar + 10% CO <sub>2</sub>
C25	Mistura Gasosa de Ar + 25% CO <sub>2</sub>
DBCP	Distância Bico de Contato à Peça
EDR	<i>Extreme Dynamic Range</i>
FCAW	<i>Flux-Cored Arc Welding</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
HV	<i>Higher Values</i> (Parâmetros de Soldagem Superiores)
IIW	<i>International Institute of Welding</i>
MIG/MAG	<i>Metal Inert Gas / Metal Active Gas</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LV	<i>Lower Values</i> (Parâmetros de Soldagem Inferiores)
Nd:YAG	<i>Neodymium-doped Yttrium Aluminium Garnet</i>
SAW	<i>Submerged Arc Welding</i>
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$B$	Fluxo magnético
$C_d$	Coefficiente de arraste
$E$	Campo elétrico
$F_\gamma$	Força de tensão superficial
$F_d$	Força de arraste do fluxo de gás de proteção (plasma)
$F_e$	Força eletromagnética
$F_g$	Força gravitacional
$F_V$	Força devido ao jato de vapor metálico
$f_2$	Fator geométrico
$f_p$	Frequência de perturbação da coluna líquida
$g_z$	Componente vertical da aceleração devido à gravidade
$I$	Corrente de soldagem
$J$	Densidade de corrente
$M$	Índice de tamanho de gota
$m_d$	Massa da gota de metal fundido
$m_a$	Taxa de fluxo de massa por unidade de superfície
$m_i$	Fator que considera a deformação da seção transversal em relação à original, podendo ser 0, 1 ou 2
$N$	Número de transferência
$p_e$	Condutividade elétrica
$R$	Raio do eletrodo
$R_d$	Raio da gota de metal fundido
$R_e$	Número de Reynolds
$R_i$	Raio do cilindro (igual ao raio do eletrodo)
$R_\gamma$	Energia livre de superfície
$r$	Coordenada radial
$S$	Área de contato
$t$	Tensão superficial
$U$	Tensão de arco
$V_d$	Volume da gota de metal fundido

$v$	Velocidade do jato de vapor em um ponto qualquer
$v_g$	Velocidade do gás de proteção (plasma)
$W$	Velocidade de alimentação de arame
$z$	Distância na direção longitudinal do cilindro
$\gamma$	Tensão superficial do metal líquido
$\varepsilon$	Amplitude da perturbação
$\xi$	Fator que considera a deformação da seção transversal em relação à original, que tem forma de circunferência
$\theta$	Metade do ângulo da raiz do arco
$\lambda$	Comprimento de onda da instabilidade
$\lambda_c$	Comprimento de onda crítico da instabilidade
$\mu_0$	Permeabilidade no vácuo
$\rho$	Massa específica real
$\rho_d$	Massa específica da gota de metal fundido
$\rho_g$	Massa específica do gás de proteção (plasma)
$\rho_T$	Massa específica efetiva da gota
$\nu_g$	Viscosidade do gás de proteção
$\varphi$	Ângulo a horizontal e o eixo do arco

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) tem como uma de suas principais características a alta taxa de deposição do metal, devido à fusão de um arame-eletrodo metálico e consumível, continuamente alimentado, que se transfere na forma de gotas de metal fundido através de um arco elétrico, a fonte de calor, formado entre este arame-eletrodo e o metal base, até atingir a poça de fusão, onde esses metais ao se solidificarem resultarão num cordão de solda.

O fluxo de massa de metal líquido num arco elétrico envolve desde o destacamento do metal do arame-eletrodo, a transferência deste em forma de gotas através do arco, até atingir a poça de fusão. Esse fluxo de massa é uma parte importante para os processos de soldagem cuja fonte de calor é um arco elétrico, especialmente nos processos em que o arame-eletrodo é, ao mesmo tempo, fonte de calor e de metal de adição [Lancaster, 1986]. O desempenho do processo de soldagem é determinado pelo modo de transferência do metal, que consiste na maneira com que as gotículas de metal se destacam do arame-eletrodo e são transferidas até a poça de fusão. Logo, o modo define o comportamento característico das gotículas que se transferem do arame-eletrodo até a poça de fusão [Scotti et al., 2012].

Estudos para explicar a transferência do metal de adição remontam a década de 30, inicialmente para tentar explicar as forças atuantes no deslocamento das gotas, até as pesquisas mais recentes, com modernas técnicas de visualização de imagens da região de soldagem com oscilogramas obtidos por sistemas de aquisição de sinais elétricos de parâmetros do processo de soldagem.

Este trabalho teve início com o intuito de usufruir uma câmera de alta velocidade disponibilizada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC) da Escola de Engenharia (EE) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), onde se propôs o uso desse equipamento para a filmagem dos elementos presentes no arco elétrico de um processo de soldagem.

Os primeiros experimentos com a câmera de alta velocidade consistiram em conseguir adquirir imagens de um arco elétrico do processo GMAW onde fosse possível visualizar o arame-eletrodo, o arco elétrico, a transferência das gotas de metal fundido e a poça de fusão. Isso se conseguiu com a atenuação dos efeitos do excesso de luminosidade do arco através da sobreposição de lentes escurecidas como filtros. Essas imagens obtidas deveriam estar sincronizadas com os dados adquiridos dos sinais elétricos do processo. A parte experimental

para os resultados definitivos da tese envolveram duas etapas, a inicial, onde os ensaios foram realizados com apenas um tipo de gás de proteção (Ar + 10% CO<sub>2</sub>), e a seguinte, com base nos resultados iniciais, com gases puros (Ar e CO<sub>2</sub>) e misturas gasosas (Ar + 2% O<sub>2</sub>, Ar + 10% CO<sub>2</sub>, Ar + 25% CO<sub>2</sub>) como gás de proteção.

Os resultados basearam-se na comparação de imagens de alta velocidade obtidas com os sinais elétricos de corrente e tensão adquiridos durante o processo de soldagem, além das combinações com os gases de proteção. As respostas geradas foram representadas na forma de mapas de transferência do metal, o que permite a compreensão da influência do tipo de gás de proteção no modo de transferência.

## 1.1 Objetivos

O objetivo principal do trabalho é estudar a transferência do metal de adição no processo de soldagem GMAW, através da sincronização entre imagens da região de soldagem obtidas por filmagem de alta velocidade com os dados elétricos do processo (tensão de arco, corrente de soldagem e velocidade de alimentação de arame) adquiridos por um sistema de aquisição de dados.

Como objetivos específicos, podem ser mencionados:

- Determinar a relação entre os parâmetros de soldagem e a influência dos gases de proteção no modo de transferência do metal de adição. As imagens de alta velocidade foram obtidas de forma que o detalhe do arco elétrico pode ser visto com clareza, o que permite a relação do seu formato com o modo de transferência do metal e o gás ou mistura gasosa empregado como gás de proteção. A perfilografia permite somente a visualização da gota formada, uma parte do metal base e do arame-eletrodo, como pode ser visto na Figura 1.1.
- Mapear as regiões de transferência do metal de adição, através de mapas de transferência, delimitando intervalos de parâmetros de soldagem onde um determinado modo de transferência possa ocorrer.
- Sincronização entre o instante da imagem de alta velocidade com o valor de tensão, corrente e velocidade de alimentação de arame com os oscilogramas obtidos pelo sistema de aquisição de dados.

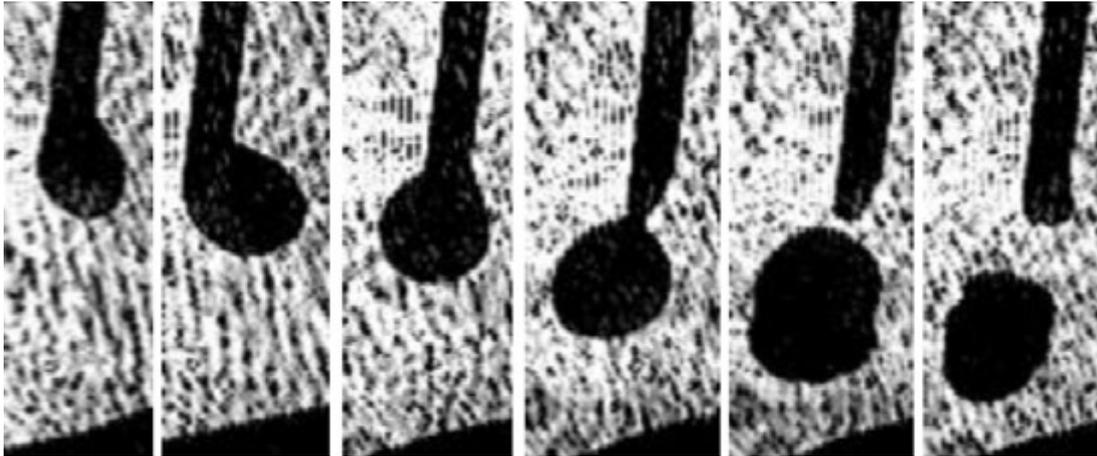


Figura 1.1 – Exemplo de imagem obtida por perfilografia [Scotti et al., 2014].

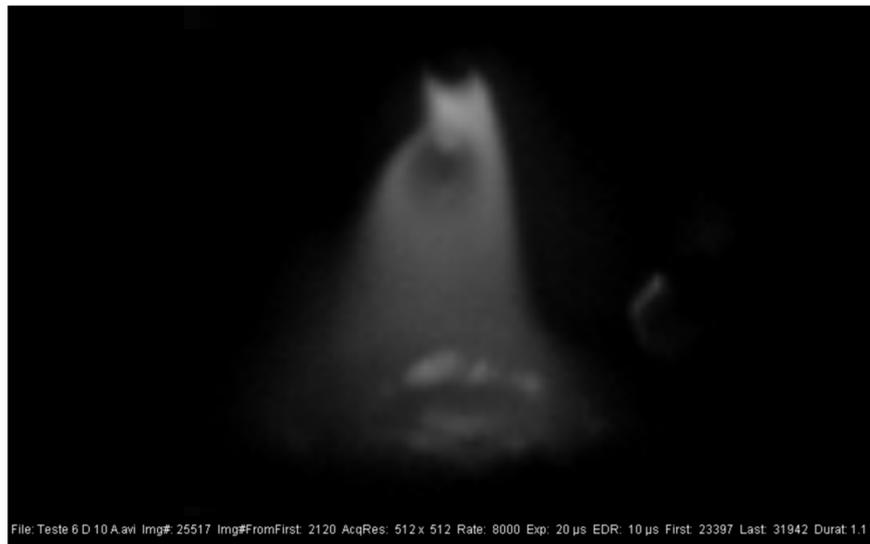


Figura 1.2 – Exemplo de imagem obtida neste trabalho, com detalhe da gota sendo transferida envolta pelo arco elétrico.

## 1.2 Organização do Trabalho

O trabalho foi organizado de forma que as diferentes áreas sejam explicadas em detalhes. As suas particularidades, características, vantagens e desvantagens serão abordadas sempre que for necessário.

O capítulo 2 inicia com uma introdução sobre o processo de soldagem GMAW, faz uma breve revisão sobre o arco elétrico em soldagem, seguido pelas teorias de transferência de massa e os modos de transferência do metal, finalizando com os gases puros e misturas gasosas empregados no processo.

O capítulo 3 aborda os fundamentos de geração de imagens e as técnicas para obtenção de imagens de alta velocidade em processos de soldagem por arco elétrico.

O capítulo 4 descreve como foram feitos os experimentos no Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas (LS&TC), desde o planejamento destes, equipamentos utilizados, até a forma como serão sincronizadas imagens e sinais elétricos adquiridos.

O capítulo 5 apresenta os resultados e discussões, desde a primeira etapa de experimentos, que utilizaram apenas a mistura gasosa de Ar + 10% CO<sub>2</sub> (C10) como gás de proteção, divididos em dois grupos, um com parâmetros de soldagem com valores de tensão de arco (22 e 24 V) e velocidade de alimentação de arame (de 4 e 6 m/min) mais baixos, denominados parâmetros de soldagem inferiores (LV), e o segundo grupo com esses parâmetros de tensão de arco (33 e 35 V) e velocidade de alimentação de arame (8 e 10 m/min) incrementados, denominados parâmetros de soldagem superiores (HV), sendo que estes foram valores pré-ajustados na fonte de soldagem. A segunda etapa de experimentos envolveu gases puros (Ar e CO<sub>2</sub>) e misturas gasosas (Ar + 2% O<sub>2</sub>, Ar + 10% CO<sub>2</sub>, Ar + 25% CO<sub>2</sub>) como gás de proteção, com os parâmetros de soldagem de tensão de arco (33 e 35 V) e velocidade de alimentação de arame (8 e 10 m/min) pré-ajustados na fonte de soldagem.

O capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho, com base nos resultados discutidos no capítulo anterior.

O capítulo 7 tem sugestões para futuros trabalhos a serem realizados, referente ao que foi desenvolvido nesta tese.

Os apêndices A e C contêm as imagens dos cordões de solda resultantes, enquanto que os apêndices B e D apresentam os valores obtidos das médias de corrente de soldagem, tensão de arco e velocidade de alimentação de arame para todos os experimentos realizados.

## 2 PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW CONVENCIONAL

O processo de soldagem GMAW tem uma grande versatilidade, pois apresenta alta produtividade, fácil manuseio, o que resulta num tempo relativamente curto de treinamento e qualificação de soldadores, e os cordões de solda resultantes geralmente apresentam bom acabamento e são livres de salpicos e porosidades. A alta produtividade se deve à alimentação contínua de arame, o que torna esse um processo com modo de operação semiautomático, visto que o soldador ou operador de soldagem é responsável pelo deslocamento da tocha ao longo da junta a ser soldada, iniciando e interrompendo a operação, enquanto o sistema de alimentação de arame conduz o metal de adição até a poça de fusão.

Essa velocidade de alimentação de arame é pré-ajustada antes de iniciar o procedimento, logo, pode-se dizer que independe de outros parâmetros de soldagem [Heald et al., 1994]. A transferência do metal de adição até a poça de fusão pode ocorrer por curto-circuito, globular e aerossol, sendo que esse último pode ser subdividido em aerossol projetado, aerossol contínuo e aerossol rotacional, cada um com suas características próprias de comprimento de arco, penetração e formato da poça de fusão [IIW, 1976]. Esses modos de transferência têm diferentes características, como estabilidade de arco, penetração da poça de fusão, geração de salpicos e porosidades e nível de solubilidade de gases. Kim e Eagar, 1993, salientam que Lesnewich, 1958, mostrou que o modo de transferência do metal depende de inúmeras variáveis operacionais, como corrente de soldagem, a extensão do eletrodo após o bico de contato (*stickout*), pressão ambiente, diâmetro do eletrodo e polaridade, e posteriormente Smith, 1966, observou que os modos de transferência do metal são completamente diferentes se utilizados com um gás ativo ou um gás inerte. Lancaster, 1986, salienta que o eletrodo consumível no processo GMAW ao mesmo tempo é fonte de calor e de metal líquido para preenchimento da junta. As forças envolvidas na transferência do metal consistem na força eletromagnética, tensão superficial, gravitacional, pressão no cátodo e forças devido ao jato de plasma e forças decorrentes da formação de bolhas de gás na gota formada na ponta do eletrodo consumível.

### 2.1 O Arco Elétrico

Segundo a definição de Guile, 1971, um arco é uma descarga elétrica entre eletrodos em um gás ou vapor gerado a partir de eletrodos, em que a queda de tensão junto ao cátodo é

da ordem do potencial de excitação de vapor do eletrodo (da ordem de 10 V) e na qual o fluxo de corrente pode ter qualquer valor limite, acima de um valor mínimo, que é de cerca de 100 mA, mas varia com o tipo de material do eletrodo, podendo chegar a 1 A.

A corrente em um arco deve passar entre um gás e um circuito elétrico através de um eletrodo que, em soldagem, pode ser feito de carbono ou metal, sólido ou líquido. O eletrodo negativo de onde os elétrons partem em direção ao gás é chamado de cátodo, enquanto que o eletrodo positivo é conhecido por ânodo. A coluna do arco corresponde à região de condução gasosa entre os eletrodos (Figura 2.1). Entre estes, o ânodo é menos problemático que o cátodo, pois este requer um fluxo de íons positivos em sua direção ou a extração de elétrons dele, ou a combinação de ambos (chegada de íons positivos e saída de elétrons).

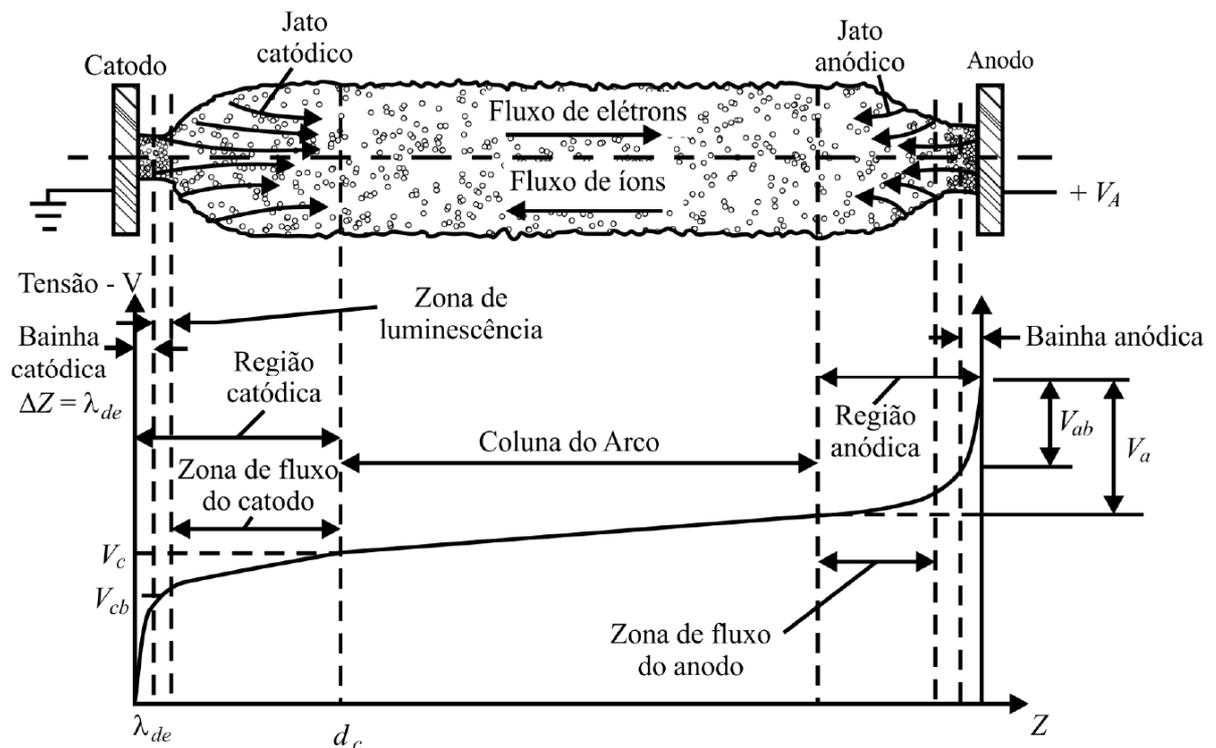


Figura 2.1 - Representação esquemática das regiões de um arco linear com a distribuição de tensão ao longo do arco [Roth, 1995 *apud* Lermen, 2011].

No caso da aplicação do arco elétrico em soldagem, um dos eletrodos é um arame e o outro uma chapa metálica, em que a corrente do arco pode se expandir lateralmente e gerar um jato de plasma que flui no sentido da peça. Na soldagem com eletrodos revestidos estes jatos podem ser intensificados ou dominados por um fluxo de gases provenientes da decomposição do revestimento do eletrodo. Da mesma forma, na soldagem por plasma existe

um fluxo de gás externo para a mesma finalidade. Tais jatos são importantes para manter a rigidez e direção do arco, propriedades essenciais para o sucesso da operação de soldagem. Outro fator importante na soldagem por arco elétrico é a transferência do metal líquido do arame-eletrodo para a poça de fusão [Lancaster, 1986].

## **2.2 Transferência do Metal e Fluxo de Massa**

O calor proveniente de um arco elétrico e o fluxo de corrente através do arame, que atua como um eletrodo em qualquer polaridade, funde a sua ponta, que se destaca na forma de uma gota de metal fundido, a qual é transferida pelo arco devido a uma combinação de forças eletromagnéticas, fluidodinâmicas e gravitacional. A força gravitacional não é sempre uma força predominante, dependendo da posição de soldagem, no destacamento da gota de metal fundido formada na ponta do eletrodo, uma vez que outras forças surgem devido à interação da corrente elétrica e seu campo magnético. As forças eletromagnéticas consideradas diretas consistem nas forças de Lorentz, com origem no próprio corpo da gota prestes a ser destacada, e as forças eletromagnéticas consideradas indiretas consistem naquelas devidas ao fluxo do plasma do arco e dos gases na ponta do eletrodo, induzidas pelas forças de Lorentz conduzindo o plasma, com um fluxo violento e em alta velocidade, destacando e deslocando gotas de metal fundido ao longo do eixo do arco até a poça de fusão [Amson, 1965].

Modelos teóricos foram propostos devido a essa quantidade considerável de forças que influenciam na transferência, como a Teoria de Balanço das Forças Estáticas [Greene, 1960; Amson, 1965; Waszink e Gratt, 1983], onde a separação da gota tem comportamento regido por um balanço de forças estáticas (Figura 2.2), e a Teoria da Instabilidade Pinch [Lancaster, 1979; Allum, 1985a; Allum, 1985b], que atua na separação final da gota ao atingir a poça de fusão. Além destes modelos, a Teoria da Força do Plasma [Needham et al., 1960] e a Teoria da Velocidade Crítica [Waszink e van den Heuvel, 1982] foram propostas para explicar a transição entre os modos de transferência do metal globular e aerossol [Kim e Eagar, 1988].

## **2.4 Teoria de Balanço das Forças Estáticas**

Esta teoria pressupõe que a gota formada na ponta do eletrodo se destaca quando as forças estáticas de destacamento atuando sobre a gota superam as forças estáticas de retenção da mesma [Greene, 1960; Amson, 1965; Waszink e Gratt, 1983].

A condição de equilíbrio das forças é dada pela Equação 2.1:

$$\vec{F}_\gamma + \vec{F}_V = \vec{F}_g + \vec{F}_d + \vec{F}_e \quad (2.1)$$

Onde:

$F_\gamma$  = Força de tensão superficial;

$F_V$  = Força devido ao jato de vapor metálico;

$F_g$  = Força gravitacional;

$F_d$  = Força de arraste do fluxo de gás de proteção (plasma);

$F_e$  = Força eletromagnética.

O destacamento da gota da ponta do eletrodo ocorrerá quando a resultante das forças eletromagnética, do plasma e gravitacional superarem as forças de vaporização e de tensão superficial, neste caso:

$$\vec{F}_\gamma + \vec{F}_V < \vec{F}_g + \vec{F}_d + \vec{F}_e \quad (2.2)$$

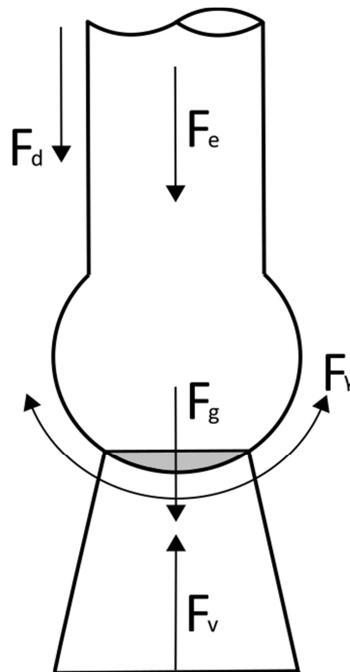


Figura 2.2 – Forças atuantes sobre a gota fundida na ponta do eletrodo consumível [Greene, 1960, Amson, 1965].

Com a passagem da corrente pelo eletrodo, gera-se um campo eletromagnético ao redor do condutor (eletrodo) cuja componente de forças é composta por forças radiais em direção ao centro do condutor. Quanto maior for a densidade de corrente  $\mathbf{J}$ , maior a intensidade da força eletromagnética.

A força eletromagnética pode obtida a partir das leis de Biot-Savart e de Lorentz. De acordo com Biot-Savart, o fluxo magnético  $\mathbf{B}$  em um condutor de raio  $R$  é dado pela Equação 2.3:

$$\vec{B} = \mu_0 I \frac{r^2}{R^2} \quad (2.3)$$

Onde:

$I$  = Corrente de soldagem;

$\mu_0$  = Permeabilidade no vácuo;

$r$  = Coordenada radial;

$R$  = Raio do eletrodo.

A força eletromagnética, pela lei de Lorentz, é dada pela Equação 2.4:

$$\vec{F}_e = p_e \vec{E} \vec{J} \vec{B} \quad (2.4)$$

Onde:

$p_e$  = Condutividade elétrica;

$\mathbf{E}$  = Campo elétrico;

$\mathbf{J}$  = Densidade de corrente no eletrodo.

Considerando que uma gota de metal fundido seja esférica e de alta condutividade elétrica, a componente de destacamento longitudinal aproximada da força de pinçamento é calculada pela Equação 2.5 [Greene, 1960]:

$$\vec{F}_e = \int_v (\vec{J} \times \vec{B}) \cdot \vec{e}_r \phi dV \therefore \vec{F}_e = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} f_2 \quad (2.5)$$

$$f_2 = \left[ \ln \frac{R_d \sin \theta}{R} - \left( \frac{1}{4} + \frac{1}{1 - \cos \theta} \right) + \frac{2}{1 - \cos \theta^2} \ln \frac{2}{1 + \cos \theta} \right] \quad (2.6)$$

Onde:

$\theta$  = Metade do ângulo da raiz do arco;

$f_2$  = Fator geométrico, função do ângulo de condução  $\theta$ ;

$R_d$  = Raio da gota de metal fundida.

O ângulo  $\theta$  consiste no ângulo de condução em relação ao eixo do arame-eletrodo. A raiz do arco é a interface entre o arame-eletrodo e o arco elétrico, por onde a corrente se transfere, conforme a Figura 2.3. De acordo com a Equação 2.5, a força de destacamento aumenta com o incremento da corrente de soldagem e com o aumento do ângulo de condução. Entretanto, quando esse é muito pequeno e a corrente de soldagem se converge em praticamente um ponto, o sinal da força se torna negativo e a força eletromagnética atua como uma força de fixação ao invés de destacamento. A influência dessa força para um condutor sólido é desprezível, entretanto, para o caso de uma gota de metal líquido a tendência é que ocorra compressão exercida pela força eletromagnética, dependente do raio do condutor, sendo mais intensa para menores seções transversais de condução. O que irá influenciar diretamente é a área do eletrodo onde passa a corrente, a qual é dependente das interfaces entre o arame-eletrodo e a gota, e entre a gota e o arco elétrico. Para baixas correntes a pressão exercida pela força eletromagnética é máxima na parte inferior da gota, por causa da densidade de corrente convergente, retendo a gota no ponto mais abissal do eletrodo. Por outro lado, para altas correntes, a densidade de corrente é divergente, o que causa um aumento na seção transversal do condutor, deixando-o maior que o diâmetro do eletrodo. Com isso, a força eletromagnética passa a atuar no destacamento da gota. Ao atingir um diâmetro crítico, tem início à estricção da interface entre o arame-eletrodo e a gota, com o consequente aumento da densidade de corrente e pressão nessa região devido à redução da seção transversal do arame-eletrodo, resultando no destacamento da gota por pinçamento (pinch) [Amson, 1965].

A geometria utilizada na Equação 2.6 consiste no fator geométrico, função do ângulo de condução  $\theta$  gráfico de  $f_2$ , de acordo com a Figura 2.4. Quando o ângulo de condução é baixo, a zona afetada é pequena então as linhas de corrente convergem, logo o fator  $f_2$  é negativo e a força eletromagnética atua como uma força repulsiva. Entretanto, quando o ângulo de condução é grande o suficiente para as linhas de correntes divergirem, então o fator  $f_2$  é positivo e a força eletromagnética se torna uma força de destacamento de gota [Smith, 1970].

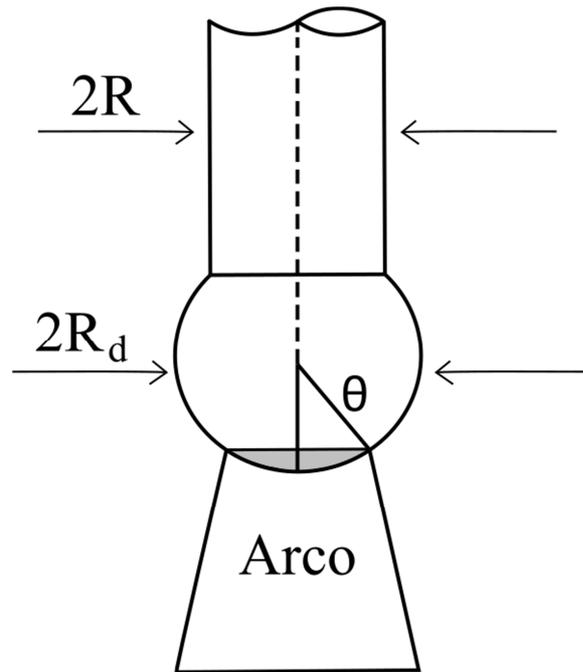


Figura 2.3 – Ângulo de raiz e área ativa do arame-eletrodo [Greene, 1960].

A força de arraste do fluxo de gás de proteção ou força de arraste do plasma sobre uma gota líquida tem origem no jato de plasma em contato com a gota. Para fins de comparação, pode ser considerada como a força de arraste de uma esfera imersa em um fluido em velocidade uniforme, conforme a Equação 2.7:

$$\vec{F}_d = C_d (\pi R_d^2) \left( \frac{\rho_g \cdot v_g^2}{2} \right) \quad (2.7)$$

Onde:

$v_g$  = Velocidade do gás de proteção (plasma);

$\rho_g$  = Massa específica do gás de proteção (plasma);

$C_d$  = Coeficiente de arraste.

O coeficiente de arraste, por sua vez, é função do número de Reynolds, como pode ser visto na Equação 2.8:

$$R_e = \frac{2v_g R_d \rho_g}{\nu_g} \quad (2.8)$$

Onde:

$R_e$  = Número de Reynolds;

$\nu_g$  = Viscosidade do gás de proteção.

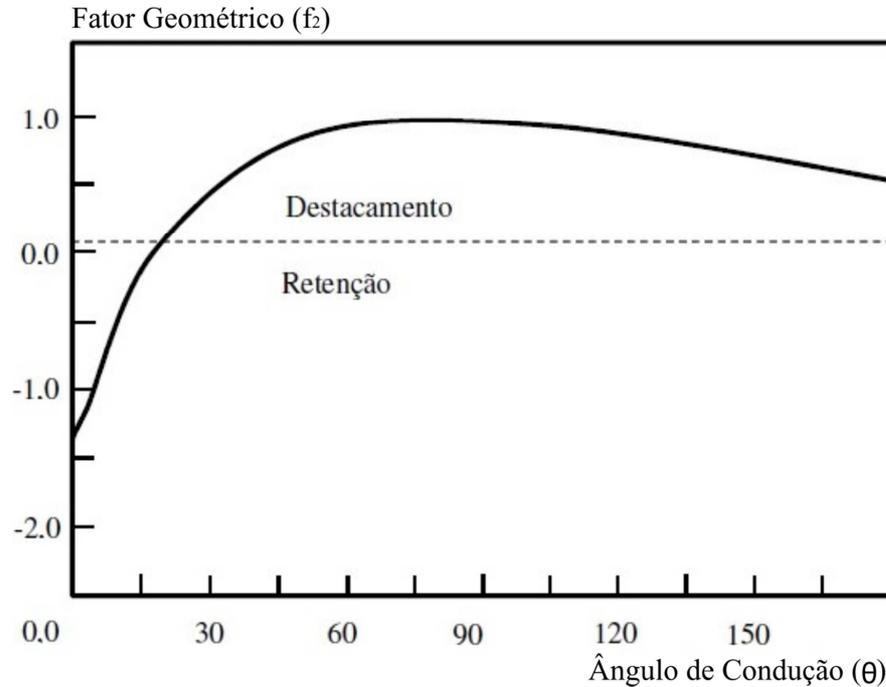


Figura 2.4 – Variação do fator  $f_2$  em função do valor do ângulo de condução  $\theta$  da corrente de soldagem [Smith, 1970].

A força de arraste exercida sobre o metal líquido é devido ao fluxo de gás de proteção, que depende da velocidade do jato de plasma, da composição e massa específica do gás de proteção e do tamanho da gota de metal fundido, sendo que a força de arraste será maior quando o tamanho da gota aumenta, ou seja, para baixas correntes de soldagem [Needham et al., 1960].

A força de tensão superficial que atua na retenção da gota no eletrodo é dada pela Equação 2.9:

$$\vec{F}_\gamma = 2\pi R \gamma \quad (2.9)$$

Onde:

$\gamma$  = Tensão superficial do metal líquido.

A força gravitacional é devida à massa da gota e atua como força de destacamento quando a solda ocorre na posição plana.

$$\vec{F}_g = m_d g_z \quad (2.10)$$

Onde:

$m_d$  = Massa da gota de metal fundido;

$g_z$  = Componente vertical da aceleração devido à gravidade, onde  $g_z = 9,81 \sin \varphi$ , em que  $\varphi$  é o ângulo a horizontal e o eixo do arco.

$$\rho = \frac{m_d}{V_d} \quad \therefore \quad m_d = \rho_d V_d = \frac{4}{3} \pi R_d^3 \rho_d \quad (2.11)$$

Onde:

$\rho_d$  = Massa específica da gota de metal fundido;

$V_d$  = Volume da gota de metal fundido.

Logo, a força gravitacional pode ser calculada como:

$$\vec{F}_g = \frac{4}{3} \pi R_d^3 \rho g_z \quad (2.12)$$

A força gravitacional pode atuar de forma favorável ou não ao destacamento da gota, evento que irá depender da posição de soldagem. Nos casos em que a solda é realizada na posição plana, (arame-eletrodo a  $0^\circ$ ) até a posição em que o arame-eletrodo fica num plano horizontal (arame-eletrodo a  $90^\circ$ ), a força da gravidade atua no sentido de destacar a gota. Ao tomar uma posição angular ( $90$  a  $180^\circ$ , entre as posições horizontal ou vertical até sobrecabeça), a componente z vertical da força de aceleração da gravidade forçará a gota contra o eletrodo, dificultando a sua transferência [Scotti e Ponomarev, 2008].

A força decorrente do jato de vapor metálico tem origem na vaporização dos componentes do metal do eletrodo na região do acoplamento do arco com a gota, onde o alto calor presente gera jatos de vapores metálicos. Com altas densidades de corrente, na superfície da gota de metal líquido em contato direto com a raiz do arco, a tendência é ocorrer

aceleração térmica de partículas de vapor no jato de plasma, o que resulta numa força oposta de separação da gota. A força de vaporização pode ser calculada através da seguinte equação:

$$\vec{F}_v = \int m_a \cdot v \cdot dS \quad (2.13)$$

Onde:

$m_a$  = Taxa de fluxo de massa por unidade de superfície;

$v$  = Velocidade do jato de vapor em um ponto qualquer;

$S$  = Área de contato.

Scotti e Ponomarev, 2008, salientam que a ação desta força é quatro a cinco vezes menores na polaridade positiva (quando o eletrodo é ânodo) em comparação com a polaridade negativa (quando eletrodo é cátodo), pois nesta polaridade a área da mancha anódica é maior, logo, a densidade de corrente torna-se menor, o que resulta numa menor intensidade de vaporização, se comparado com a mancha catódica (eletrodo como cátodo).

Além disso, a teoria de balanço das forças estáticas apresenta dificuldades para explicar diversos fenômenos de transferência do metal no processo de soldagem GMAW. Inicialmente, o efeito da extensão do eletrodo é difícil de explicar, pois esse não é considerado nessa teoria. Ademais, as análises de transferência do metal para essa teoria foram feitas com eletrodos de aço ao carbono e usando argônio como gás de proteção. Outras configurações de parâmetros de soldagem que resultam em transferência globular repelida não puderam ser explicadas por essa teoria [Waszink e Graat, 1979; Kim e Eagar, 1993].

## 2.5 Teoria da Instabilidade Pinch

A teoria da instabilidade pinch ou efeito pinch foi desenvolvida a partir do modelo proposto por Lord Rayleigh, 1879, da instabilidade da coluna de líquido. Qualquer perturbação no líquido da coluna tende a ativar forças que podem causar a quebra da coluna de líquido em gotas, uma vez que essas têm menor energia livre que a coluna de líquido. As condições para quebra da coluna de líquido foram derivadas por Rayleigh a partir dos princípios de conservação de energia mecânica de um sistema. Para um sistema sem carga e sem viscosidade, o tamanho de gota mais provável criado pela desintegração da coluna de líquido é calculado como sendo o dobro do diâmetro da coluna de líquido. De acordo com a teoria da instabilidade pinch, a força de pinçamento sobre uma coluna de líquido submetida a

uma força eletromagnética autoinduzida provoca a quebra dessa em gotículas. Se a perturbação no cilindro é aplicada na direção  $z$  e  $\xi$ , o raio  $R_i$  decresce e a superfície é dada por uma equação no seguinte formato:

$$R_i = f(z; \xi) \quad (2.14)$$

$$R_i = R + \varepsilon \cos \left[ -m_i \xi + \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) z \right] \quad (2.15)$$

$$f_p = \frac{2\pi R}{\lambda} \quad (2.16)$$

Onde:

$\lambda$  = Comprimento de onda da instabilidade;

$\varepsilon$  = Amplitude da perturbação;

$R_i$  = Raio do cilindro (igual ao raio do eletrodo);

$m_i$  = Fator que considera a deformação da seção transversal em relação à original, podendo ser 0, 1 ou 2;

$z$  = Distância na direção longitudinal do cilindro;

$\xi$  = Fator que considera a deformação da seção transversal em relação à original, que tem forma de circunferência;

$f_p$  = Frequência de perturbação da coluna líquida.

Quando  $m_i = 0$ , a frequência máxima resultante  $f_p = 0,696$ , e o tamanho de gota mais provável é duas vezes maior que o diâmetro da coluna líquida.

Nos casos em que  $m$  é diferente de 0, ocorrem casos de alta instabilidade, ou seja, quando  $m = 1$  (instabilidade “torcional”) e  $m = 2$  (instabilidade “ranhurada”). Essas instabilidades são observadas em soldagem GMAW com alta intensidade de corrente e na soldagem Plasma-MIG. Entretanto, a instabilidade torcional em soldagem (designada como transferência por aerossol rotacional, de acordo com o IIW), aparece espontaneamente logo após o modo de transferência por aerossol projetado, e a espiral formada pela transferência rotacional gera seu próprio campo magnético longitudinal, como uma espira. Os modos de transferência do metal decorrentes do aumento da corrente de soldagem são mostrados na Figura 2.5.

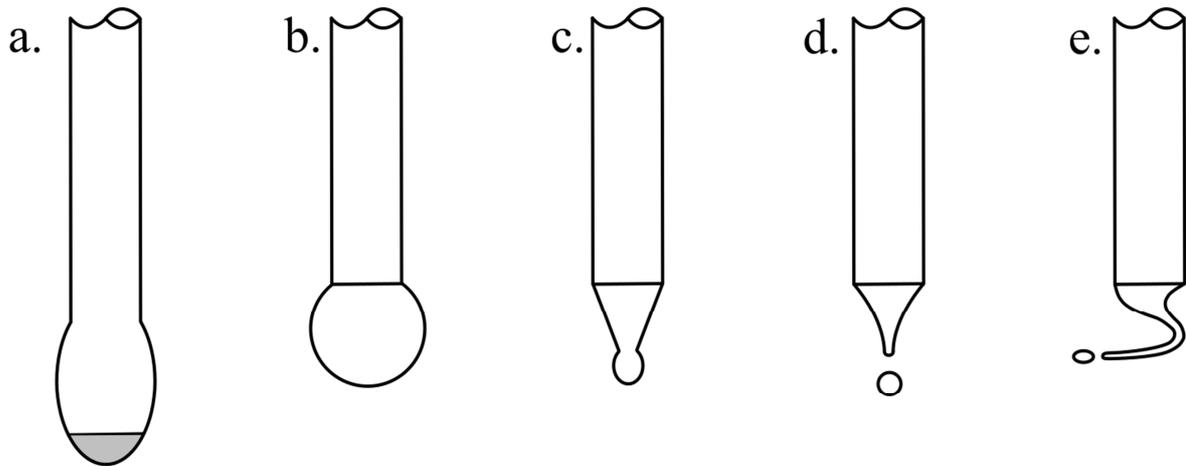


Figura 2.5 – Modos de transferência do metal sucessivos no processo GMAW devido ao aumento da densidade de corrente (a. curto-circuito, b. globular, c. aerossol projetado, d. aerossol contínuo, e. aerossol rotacional) [Lancaster, 1986].

Para o caso de  $m_i = 0$ , a solução analítica mais adequada para o comprimento de onda crítico da instabilidade é dada pela Equação 2.17:

$$\lambda_c = \frac{2\pi R}{\left[1 + \frac{\mu_0 I^2}{2\pi^2 R_\gamma}\right]^{1/2}} \quad (2.17)$$

Onde:

$\lambda_c$  = Comprimento de onda crítico da instabilidade;

$R_\gamma$  = Energia livre de superfície.

A Equação 2.17 mostra que na presença de corrente elétrica, o comprimento de onda crítico da instabilidade de um jato de líquido é reduzido, o que resulta numa redução do tamanho de gota. Deste modo, o efeito pinch explica por que as gotas de metal fundido são menores e mais frequentes à medida que aumenta a corrente de soldagem, o que marca a mudança abrupta de transferência globular para aerossol [Lesnewich, 1958]. De acordo com a teoria de balanço das forças estáticas e da instabilidade pinch, o tamanho de gota diminuiria continuamente com o aumento da corrente de soldagem.

De forma simplificada, acima de certo valor de corrente e, conseqüentemente, com uma maior geração de calor, a ponta fundida do arame-eletrodo torna-se cilíndrica e não mais

em formação progressiva de uma gota. O rompimento deste cilindro em gotas sequenciais decorre da instabilidade da coluna de líquido. A tensão superficial tende a reconstruir a camada cilíndrica do eletrodo, anulando a sua constrição. Entretanto, o efeito pinch tende a restringir as constrições que surgem. Se esse superar a tensão superficial, então a coluna se romperá e uma pequena gota residual se forma, tornando desprezíveis as demais forças (força gravitacional, de arraste e vaporização) [Lancaster, 1978].

Anno, 1977, derivou a frequência de um jato viscoso com mudança na carga superficial e mostrou que a viscosidade e a superfície carregada têm efeito estabilizador. Por outro lado, Allum, 1985, mostrou que os efeitos da viscosidade são desprezíveis no metal líquido, entretanto, o efeito estabilizador da carga superficial é significativo para baixas correntes de soldagem.

Ambas as teorias conseguiram explicar a transferência globular de uma maneira qualitativa, porém, não obtiveram sucesso ao explicar a transferência por aerossol, especialmente o modo de transferência por aerossol contínuo. Logo, essa análise se aplica somente a uma pequena faixa de valores de parâmetros de soldagem que resultam em transferência globular. Essa faixa de parâmetros de soldagem analisada compreende o uso de argônio como gás de proteção, arames-eletrodos de aço ao carbono e alumínio, comprimento energizado do arame-eletrodo constante e baixas correntes de soldagem. Em outros casos como o uso de hélio ou dióxido de carbono como gás de proteção, em que o modo de transferência do metal pode ocorrer de forma globular repelida, a transição para transferência por aerossol não está bem definida [Ries, 1983]. Quanto maior o comprimento energizado do eletrodo, menor a corrente de soldagem para transferência por aerossol [Ludwig, 1957]. Para a liga de Ti6Al4V com argônio como gás de proteção, a transferência do metal ocorre de forma globular repelida para baixas correntes de soldagem, e para altas correntes de soldagem por aerossol projetado [Lancaster, 1986].

## **2.6 Número de Transferência e Índice de Tamanho de Gota**

Um fator importante para obter um resultado adequado em um processo de soldagem por arco elétrico depende da forma como o metal fundido se transfere para a poça de fusão. Gotas muitas grandes resultam em cordões de solda irregulares e, em muitos casos, com a presença de salpicos, o que representa uma perda na eficiência da deposição, além de propiciar um aspecto ruim à junta soldada. Greene, 1960, propôs um modelo teórico para

explicar a transferência do metal até a poça de fusão, através de um parâmetro adimensional, o número de transferência ( $N$ ), em que para uma transferência do metal satisfatória esse número deve estar entre  $0,01 < N < 1$ , de acordo com a Equação 2.18:

$$N = \left( \frac{I^2 R_d^3}{A^2 t} \right) \quad (2.18)$$

Onde:

$R_d$  = Raio do eletrodo;

$I/A$  = Densidade de corrente;

$t$  = Tensão superficial.

Com esse parâmetro do número de transferência, se estabelece qual modo de transferência, de acordo com o arco elétrico, é o mais adequado para uma determinada situação. Outro parâmetro proposto por Greene foi o índice de tamanho de gota ( $M$ ), em que o tamanho máximo de gota que pode ser suportado na ponta do arame-eletrodo ocorre quando o diâmetro do arame é igual ao diâmetro do pescoço formado. A superfície da gota deve terminar na periferia do arame-eletrodo, se uma solução estável existir. Quando o diâmetro do pescoço é maior que o diâmetro do arame-eletrodo não há solução estável, logo, a gota deverá ser transferida devido a seu próprio peso. Se o diâmetro do pescoço é menor que o diâmetro do arame-eletrodo, então a gota pode crescer até um determinado tamanho, até que a força de tensão superficial não consiga mais suportar a força gravitacional contrária. Num limite crítico inferior  $((\rho/t)^{1/2})$  na base da gota, o diâmetro do pescoço e o diâmetro máximo da gota se tornam iguais.

Esse diâmetro consiste no tamanho máximo permitido ao formar uma gota, que independe do diâmetro do arame. Isso ocorre quando  $(\rho/t)^{1/2}$  multiplicado pelo diâmetro do arame resultar em 1,7 (Figura 2.6).

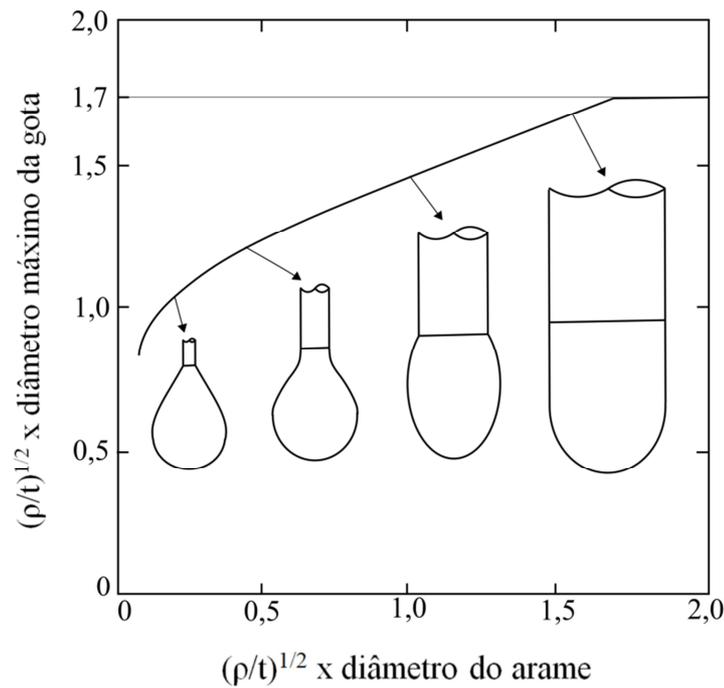


Figura 2.6 – Efeito do diâmetro do arame no diâmetro da gota [Adaptado de Greene, 1960].

Para verificar o efeito da massa específica sobre a gota, esses dados são colocados em um gráfico tendo como ordenada uma taxa entre raio da gota ( $R_d$ ) e o raio do eletrodo ( $r$ ), e no eixo das abscissas a relação expressa pela Equação 2.19:

$$\frac{R^2}{t} \rho_T = k_3 \quad (2.19)$$

Onde:

$\rho_T$  = Massa específica efetiva da gota de metal fundido;

O raio máximo que uma gota pode suportar contra a ação gravitacional tem uma relação que envolve a tensão superficial e massa específica, ou seja, a força de tensão superficial decresce com o aumento da massa específica da gota. Agrupando os termos, tem-se:

$$M = \frac{R^2}{t} \rho \quad (2.20)$$

Em que o índice de tamanho de gota ( $M$ ) é adimensional. Quando as forças do arco (eletromagnética, arraste e vaporização) não são significativas, a massa específica efetiva da gota ( $\rho_T$ ) é igual à massa específica real ( $\rho$ ) devido à gravidade apenas.

Vale ressaltar que essa teoria se aplica a arcos em que a densidade de corrente na superfície ativa do eletrodo é uniforme e permanece constante com as mudanças de intensidade de corrente de soldagem. Essa condição não se satisfaz para transferência por aerossol rotacional e em arcos em corrente contínua, eletrodo negativo (CCEN), parcialmente estabilizados, onde a ação de emissão termiônica, quente e fria, ocorre simultaneamente. Também se considera que a tensão superficial, massa específica, e diâmetro do eletrodo permanecem constantes com as mudanças de temperatura. Se ocorrerem variações, essas irão influenciar nos valores obtidos para o número de transferência  $N$  e para o índice de tamanho de gota  $M$ .

## **2.7 Teoria da Força do Plasma e Teoria da Velocidade Crítica**

Numa tentativa de explicar a transição abrupta no modo de transferência globular para aerossol, Needham et al., 1960, propuseram a Teoria da Força do Plasma, em que a transição entre esses modos de transferência ocorre quando o plasma envolve a gota, exercendo uma força de arraste, o que aprimora a teoria do balanço das forças estáticas, pois explica essa transição entre modos de transferência. Entretanto, não houve uma análise quantitativa dos resultados.

A Teoria da Velocidade Crítica [Waszink e van den Heuvel, 1982] foi proposta a partir da analogia com a transição de uma coluna de líquido escoando através de um bico cilindro em que o fluxo se altera de contínuo para aerossol em uma taxa crítica de fluxo de massa. Entretanto, essa teoria despreza muitas das forças envolvidas durante a soldagem, como a força eletromagnética e a força de arraste.

## **2.8 Classificação dos Modos de Transferência do Metal**

A transferência do metal de adição no processo GMAW tem um papel importante na estabilidade do arco elétrico, na quantidade de gases absorvida pela poça de fusão, na possibilidade de soldagem fora de posição e na geração de salpicos. A primeira classificação dos modos de transferência do metal foi proposta pelo *International Institute of Welding*

(IIW) em 1976, e até os dias de hoje é utilizada por pesquisadores e profissionais da indústria. Essa classificação pode ser conferida na Tabela 2.1 e foi possível através da técnica de visualização de imagens por alta velocidade [Lancaster, 1986].

Tabela 2.1 – Classificação dos modos de transferência de massa [IIW, 1976].

<b>Tipo de Transferência do Metal</b>	<b>Processos de Soldagem (Exemplos)</b>
<b>1. Transferência por Voo Livre</b>	
1.1 Globular	
1.1.1 Gota	GMAW baixa densidade de corrente (até 110 A/mm <sup>2</sup> ) e gás inerte
1.1.2 Repelido	GMAW com gás ativo
1.2 Aerossol	
1.2.1 Projetado	GMAW baixa densidade de corrente (até 110 A/mm <sup>2</sup> )
1.2.2 Contínuo	GMAW média densidade de corrente (até 220 A/mm <sup>2</sup> )
1.2.3 Rotacional	GMAW alta densidade de corrente (até 310 A/mm <sup>2</sup> )
1.3 Explosiva	SMAW
<b>2. Transferência por Ponte ou Contato</b>	
2.1 Curto-circuito	GMAW com baixa densidade de corrente (até 110 A/mm <sup>2</sup> ) e arco curto
2.2 Ponte sem interrupção	Soldagem com adição contínua de metal
<b>3. Transferência Protegida por Escória</b>	
3.1 Guiada por parede de fluxo	SAW
3.2 Outros modos	SMAW, arame tubular, eletroescória

Fonte: Adaptado de International Institute of Welding, 1976, e Gonzalez, 1997.

Essa classificação divide os modos de transferência do metal em duas classes: transferência natural e transferência controlada. A transferência do metal natural consiste nos modos que ocorrem sem a interferência de nenhum controle adaptativo de parâmetros de soldagem, como tensão de arco, corrente de soldagem e indutância. Logo, a transferência das gotas de metal é dirigida pela resultante física do balanço de forças que atuam sobre a gota. Com isso, dois diferentes grupos podem ser formados dentro da classe de transferência do metal natural. No primeiro grupo, a transferência da gota se dá por contato direto desta com a poça de fusão, enquanto que no segundo grupo essa se transfere à poça de fusão por voo livre.

Por outro lado, a classe de transferência do metal controlada consiste num aperfeiçoamento dos modos naturais para obter melhores características do processo, como diminuição de salpicos, controle da geometria do cordão de solda e estabilização do aporte de calor. Por consequência, o balanço de forças atuando ainda prevalece, porém estas podem ser controladas ou modificadas deliberadamente. Alguns exemplos dessa classe são a transferência aerossol controlada por pulso de corrente (contínua ou alternada), transferência

por contato controlada por corrente e transferência por contato controlada pela corrente a alimentação de arame.

Uma terceira classe de transferência de metal para aplicações científicas, denominada transferência intermitente, é descrita como a ocorrência de dois ou mais modos de transferência de metal natural que acontecem numa sequência repetitiva periódica, um modo seguido do outro, sendo que este é consequência do modo anterior, sem interferência do operador de soldagem ou de algum sistema de controle adaptativo. Exemplos dessa classe são as transferências por curto-circuito/aerossol, globular/aerossol, globular/curto-circuito/aerossol/globular, que ocorrem entre períodos de transferências naturais e não podem ser confundidas com transição entre modos de transferências, caracterizada como uma instabilidade natural ocasional entre dois modos de transferência [Scotti et al., 2012]. Uma classificação proposta para uso científico é detalhada na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Classificação da transferência do metal para o processo GMAW de acordo com classes, grupos e modos [Scotti et al., 2012].

<b>Classe de Transferência Natural do Metal</b>	<b>Classe de Transferência Controlada do Metal</b>	<b>Classe de Transferência Intermitente do Metal</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <b>Grupo de Transferência por Contato:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ponte;</li> <li>• Curto-circuito;</li> <li>• Curto-circuito forçado.</li> </ul> </li> <li>➤ <b>Grupo de Transferência por Voo Livre:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Globular;</li> <li>• Globular repelido;</li> <li>• Aerossol projetado;</li> <li>• Aerossol contínuo;</li> <li>• Aerossol rotacional;</li> <li>• Explosão.</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aerossol controlado por pulso de corrente contínua;</li> <li>• Aerossol controlado por pulso de corrente alternada;</li> <li>• Por contato controlado pela corrente;</li> <li>• Por contato controlado pela corrente e alimentação de arame;</li> <li>• Outros.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Curto-circuito/aerossol projetado;</li> <li>• Curto-circuito/aerossol contínuo;</li> <li>• Globular/aerossol projetado;</li> <li>• Globular/aerossol contínuo;</li> <li>• Globular/curto-circuito/aerossol projetado/globular;</li> <li>• Outros.</li> </ul>

Fonte: Adaptado de Scotti et al., 2012.

Iordachescu e Quintino, 2008, propuseram uma nova classificação dos modos de transferência do metal para o processo de soldagem GMAW, com base nas principais forças atuando no destacamento das gotas de metal fundido do arame-eletrodo:

- A. Curto-circuito: a tensão superficial é a principal força atuante;
- B. Globular: a força gravitacional é a principal força atuante;
- C. Aerossol: a pressão do arco é a principal força atuante.

Conseqüentemente, seis modos básicos de transferência do metal foram propostos:

A – Curto-circuito; B1 – Globular goticular; B2 – Globular repelido; C1 – Aerossol goticular; C2 – Aerossol contínuo; C3 – Aerossol Rotacional.

Needham et al., 1960, estudaram a taxa de fusão de arame e a taxa de transferência do metal na soldagem de alumínio pelo processo GMAW e comprovaram a existência de uma corrente de transição, dependente do diâmetro do arame, em que abaixo dessa a transferência ocorria por grandes gotas, aparentemente influenciadas pela ação da força gravitacional, enquanto que acima da corrente de transição as gotas são projetadas através do arco (transferência contínua).

Pintard, 1966, utilizou a filmagem por alta velocidade para obter informações quantitativas sobre a transferência do metal no processo GMAW com arames de aço carbono de 1,2 mm de diâmetro, e descobriu que as gotas de metal fundido têm uma velocidade e aceleração no instante em que são destacadas do arame, e logo após são aceleradas após a sua passagem pelo arco.

Bálsamo et al., 2000, através da sincronização de imagens em alta velocidade obtidas por perfilografia com sinais elétricos de corrente de soldagem e tensão de arco, conseguiu identificar o comportamento desses sinais durante as fases da transferência do metal e quantificar o tamanho das gotas transferidas, a extensão do eletrodo e o comprimento do arco.

Scotti et al., 2014, estudaram a transferência de metal intermitente, e concluíram que essa ocorre somente se todas as condições necessárias estão presentes, o que envolve a combinação de parâmetros como corrente de soldagem, comprimento de arco, material e diâmetro do arame, gás de proteção (não ocorre para misturas gasosas com mais de 12% de CO<sub>2</sub>), DBCP, e condições dinâmicas favoráveis (indutância) da fonte de soldagem. As soldas consistiram na deposição de cordões de solda sobre chapas (*bead-on-plate*) de aço-carbono com o arame AWS ER70S-6, diâmetro de 1,0 mm. A técnica da perfilografia foi utilizada para obtenção das imagens (2000 quadros por segundo), através de uma câmera de alta velocidade com o contraste feito por LASER de He-Ne de comprimento de onda de 632,2 nm.

A estabilidade do processo de soldagem é uma propriedade do arco elétrico. Para que este seja considerado estável, os seguintes requisitos devem ser atendidos:

- Transferência de material uniforme;

- para a transferência do metal em curto-circuito, o tempo de abertura do arco e de curto-circuito devem ser uniformes;
- para a transferência do metal em aerossol, o tempo de transferência entre duas gotas subsequentes deve sempre ser o mesmo;
- para a transferência pulsada, uma gota deve ser transferida a cada pulso;
- comprimento do arco deve se manter constante;
- ausência de salpicos.

A presença de salpicos é o resultado de uma baixa estabilidade do processo. Consiste em gotas de metal fundido que não formam a poça de fusão e solidificam sobre o cordão de solda e sua periferia. Além de caracterizarem perda de material, deixam a solda com má aparência e aderem ao bocal de soldagem, prejudicando a passagem de gás de proteção, exigindo a sua limpeza constante [Suban e Tušek, 2003].

A transferência por curto-circuito é caracterizada por uma extinção e reignição cíclica do arco, o que resulta em grandes flutuações de tensão e corrente. O metal é transferido em baixas corrente e tensão, geralmente entre 30 e 200 A e 15 a 22 V, respectivamente, sendo por isso também denominado “arco curto” (*short arc*), utilizando arame-eletrodos de pequena bitola. Como não existe arco no momento em que ocorre o curto-circuito, o metal fundido é transferido devido à tensão superficial. Este modo de transferência produz uma poça de fusão relativamente pequena, de rápida solidificação, sendo indicado para a soldagem de seções finas em todas as posições [Lancaster, 1986].

O modo de transferência globular caracteriza-se pela formação de uma gota de metal fundido na ponta do eletrodo consumível com diâmetro superior a este. Quando a gota atinge tamanho suficiente para romper a tensão superficial, por meio das forças da gravidade e eletromagnéticas que causam o efeito pinch, ela se destaca do eletrodo consumível e se transfere através do arco em direção à poça de fusão. Novamente, a transferência de grandes gotas de metal resulta em grandes flutuações de tensão e corrente, que são facilmente detectadas e diferentes do modo de transferência em curto-circuito.

Como resultado de alta densidade de corrente e das forças de Lorentz, o modo de transferência por aerossol é tipicamente caracterizado por pequenas gotas transferidas através do arco. O diâmetro da gotícula é aproximadamente o mesmo do eletrodo consumível ou menor. Este modo é similar ao globular, porém, a diferença entre eles está no tamanho e na frequência com que estas são transferidas. O destacamento de pequenas gotículas influencia na tensão e corrente, logo, este modo de transferência se caracteriza pela ausência de grandes

flutuações destes parâmetros, conforme visto nos modos globular e aerossol [Heald et al., 1994]. Esse modo de transferência não ocorre com gases altamente oxidantes ou ativos, além do que a mudança do regime de transferência para aerossol provoca uma notável transformação na aparência e ruído do arco.

## **2.9 Mapas de Transferência do Metal de Adição**

Mapas de transferência do metal de adição consistem em diagramas que representam regiões onde diferentes modos de transferência ocorrem em função da corrente de soldagem ou velocidade de alimentação de arame e a tensão de soldagem ou comprimento de arco. Muitos estudos envolvendo estes mapas já foram realizados, onde a maioria tem em comum a utilização de uma única condição de soldagem, como DPBC e faixa de corrente, para o mapeamento de diferentes modos de transferência [Souza, 2010]. Como exemplos, têm-se trabalhos como o de Figueiredo, 2000, onde foram elaborados mapas de transferência da tensão de arco em função da velocidade de alimentação de arame e do comprimento do arco em função da corrente de soldagem com DPBC fixa em ambos os casos. Scotti, 2000, confeccionou mapas de transferência com DPBC fixa para mostrar a influência de mudanças na composição do gás de proteção na transferência do metal de adição resultante. Liu e Siewert, 1989, por meio de imagens de alta velocidade e aquisição de sinais elétricos de tensão e corrente desenvolveram um critério para determinação dos modos de transferência com base na flutuação dos sinais de tensão, em que as menores flutuações correspondiam a transferência por aerossol (0,5 a 1,0 V) e as maiores flutuações correspondiam a transferência globular (1,0 a 8,0 V) e por curto-circuito (acima de 8,0 V). Heald et al., 1994, construíram mapas de transferência em função das médias de tensão de arco e corrente de soldagem e das médias de tensão de arco e velocidade de alimentação de arame, ambos para diferentes DPBC.

## **2.10 Gases de Proteção para Soldagem GMAW**

Os gases de proteção e suas misturas têm um importante papel no modo de transferência do metal, pois influem no modo de transferência do metal do arame-eletrodo até a peça, nas propriedades mecânico-metalúrgicas da junta soldada, da geometria e aparência da junta soldada, na estabilidade do arco elétrico, na determinação da máxima velocidade de

soldagem, na tendência ao aparecimento de mordeduras, e no custo de operação. Entretanto, a sua função principal consiste na proteção do arame-eletrodo, gota de metal fundida a ser transferida e poça de fusão da contaminação pelo ar atmosférico. A vazão do gás de proteção deve ser laminar, pois se for deficiente ocorre contaminação da poça de fusão pelo ar atmosférico, e se for turbulento, resultante de uma alta vazão de gás combinada com baixa velocidade de soldagem, ocorre sucção de ar para dentro do arco elétrico.

Machado, 1996, cita que os gases considerados inertes para a soldagem GMAW ou MIG são os que não reagem com metais sob o arco, tendo como principais exemplos o argônio (Ar) e o hélio (He). Dentre as diferenças entre esses gases, destacam-se:

- O hélio possui um custo maior que o argônio, sendo pouco usado no Brasil;
- o argônio possui menor potencial de ionização, logo, inicia e mantém o arco mais facilmente que o hélio;
- o hélio possui maior condutividade térmica que o argônio, o que resulta num plasma cujo núcleo se mantém a mais alta temperatura;
- o argônio provoca menor queda no gradiente de potencial do arco que o hélio, com a variação no seu comprimento afetando menos a tensão de trabalho;
- o argônio é 10 vezes mais denso que o hélio, e 1,3 vezes mais denso que o ar. Isso faz com que a vazão de hélio seja 2,5 vezes maior que a do argônio, para similar proteção;
- para uma mesma corrente de soldagem, a tensão de arco é maior com hélio que com o argônio, resultando numa maior produção de energia. Portanto, é mais vantajoso empregar o hélio para soldar peças espessas, ou materiais de alta condutividade térmica, pois seu calor específico e condutividade térmica maiores produzem um arco mais quente;
- o argônio produz cordões com maior penetração no centro do que nas bordas, enquanto que o hélio produz maior reforço, com grande e constante penetração;
- a transferência por aerossol é mais fácil de se obter com argônio do que com o hélio.

As grandes vantagens do argônio estão na estabilidade do arco, boa penetração e obter transferência do metal por aerossol, além de apresentar uma proteção gasosa mais efetiva por ser mais pesado que o ar, e tem uma ação de limpeza, ou seja, a remoção dos óxidos da superfície de soldagem antes da deposição do arame. A principal vantagem do hélio está na elevada condutividade térmica, sendo indicado para a soldagem de chapas grossas e de materiais com alta condutividade térmica. Misturas entre esses gases são feitas para reunir as

vantagens de cada um, como a alta energia do arco (hélio) e a menor quantidade de salpicos durante a soldagem (argônio) [Canto, 1990].

Os principais problemas decorrentes do uso de argônio puro para proteção gasosa na soldagem GMAW dos aços está na instabilidade do arco ao se utilizar baixas densidades de corrente e a elevada tensão superficial do metal de adição. Essa instabilidade é devida ao mecanismo de transferência do metal, que lança grandes gotas de metal fundido de forma errática em direção à poça de fusão [Breyemeier, 1952, apud Canto, 1990], uma transferência globular. Logo, os cordões produzidos são irregulares e com pouca penetração. Com o aumento da densidade de corrente, o arco passa a ser estável com transferência por aerossol, o que resulta em cordões uniformes, com boa penetração e ausência de salpicos. A elevada tensão superficial do metal de adição ocasiona defeitos com mordeduras e falta de coalescência. Com a adição de pequenas parcelas de oxigênio ( $O_2$ ) ou dióxido de carbono ( $CO_2$ ) ocorre a redução da tensão superficial, pois esses gases atuam na oxidação do metal de adição [Bortoni, 1983, apud Canto, 1990].

O dióxido de carbono puro tem uma grande aplicação na soldagem dos aços ao carbono e baixa, com características como boas propriedades mecânicas, boa penetração e baixo custo. Entretanto, as limitações envolvem o elevado número de salpicos e a tendência à trinca de solidificação por formas cordões estreitos e profundos em altas correntes de soldagem. Uma alternativa para a redução dos salpicos é a adição de uma pequena parcela de oxigênio ( $O_2$ ) ao  $CO_2$ . Os modos de transferência do metal mais comuns ao utilizar dióxido de carbono puro são o curto-circuito e o globular.

O nitrogênio ( $N_2$ ) é considerado um gás neutro, diatômico, de alto rendimento energético e com baixo custo para soldagem do cobre e proteção da raiz da solda. Uma limitação são os fumos tóxicos produzidos durante a soldagem.

O hidrogênio ( $H_2$ ) é considerado um gás redutor, adicionado nas misturas de  $Ar + CO_2$  ou  $Ar + O_2$  na soldagem de aços inoxidáveis austeníticos e alguns não ferrosos por possuir o mais alto calor específico dos gases de soldagem e alta condutividade térmica. Esse gás nunca deve ser utilizado na soldagem de aços ao carbono, baixa liga e outros ferrosos em geral.

## **2.11 Misturas Gasosas para Soldagem GMAW**

A adição de parcelas de oxigênio no argônio é uma alternativa para aprimorar o processo de soldagem GMAW ao invés de utilizar argônio puro como gás de proteção. Com

isso, a densidade de corrente necessária para atingir o modo de transferência por aerossol se torna menor, além de diminuir a tensão superficial do metal de adição, o que resulta num melhor aspecto dos cordões de solda e eliminação de mordeduras.

Smith, 1966, realizou testes com a mistura de Ar + 5% O<sub>2</sub> e Ar + 20% CO<sub>2</sub> (C20). Nessas situações, os modos de transferência resultantes foram os mesmos obtidos com argônio puro. Para níveis mais altos de CO<sub>2</sub>, até o CO<sub>2</sub> puro, a gota na ponta do eletrodo se torna maior e com forma irregular, além de ser repelida pelo arco. O estudo concluiu que para uma efetiva transferência do metal para a poça de fusão utilizando proteção gasosa de CO<sub>2</sub> com baixas correntes seria possível apenas com transferência por curto-circuito.

Liu e Sievert, 1989, investigaram a combinação de efeitos da corrente e tensão na transferência por curto-circuito na soldagem de aços baixo carbono com proteção gasosa por CO<sub>2</sub> e Ar + 2% O<sub>2</sub>. A seleção de parâmetros de forma empírica, como estabilidade do arco e ruído uniforme desse, é explicada em termos dos fenômenos fundamentais do arco, como a relação entre corrente e tensão com as características de transferência do metal. Os seus experimentos utilizaram imagens de alta velocidade (3000 quadros por segundo) através da técnica da perfilografia para obter imagens da região de soldagem.

Rhee e Kannatey-Asibu Jr., 1992, analisaram influência do gás de proteção na transferência do metal, além de investigar a corrente de transição. Os gases utilizados foram o argônio, hélio e dióxido de carbono, além de misturas Ar e CO<sub>2</sub> (5, 15 e 25%). Para obter as imagens utilizaram imagens de alta velocidade (1000 quadros por segundo) através da técnica da perfilografia. Concluíram que a adição de CO<sub>2</sub> ao argônio aumenta a corrente de transição do modo de transferência globular para aerossol, porém, a mistura de 5% de CO<sub>2</sub> no argônio apresentou uma corrente de transição menor do que utilizando o argônio puro como gás de proteção, fato atribuído à diminuição da tensão superficial. Também verificaram não ser possível obter o modo de transferência por aerossol com 100% CO<sub>2</sub> ou 100% hélio como gás de proteção. Outra conclusão foi que o ângulo de condução da gota de metal fundida com argônio como gás de proteção é maior do que para o dióxido de carbono e hélio, devido ao seu baixo potencial de ionização. Devido a isso, a frequência de transferência de gotas do argônio é maior do que para esses gases, além de apresentar uma força eletromagnética maior para essas condições de soldagem. Pelo fato de a corrente de transição diminuir com o aumento do comprimento energizado do eletrodo, pois esse aumento na extensão do eletrodo também provoca um aumento no efeito Joule na interface entre a gota de metal fundida e o arame-eletrodo sólido, o que resulta num aumento na frequência das gotas. Observou-se que o

efeito do aumento da extensão do eletrodo não foi significativo nos modos de transferência globular e por aerossol, porém importante na transição entre esses modos de transferência.

Heald et al., 1994, também utilizaram imagens de alta velocidade (1000 quadros por segundo) e a técnica da perfilografia para identificar o modo de transferência do metal para um arame AWS ER100S-1 de 1,2 mm de diâmetro, utilizando a mistura gasosa de Ar + 2% O<sub>2</sub> como gás de proteção para mapear os efeitos da distância do bico de contato à peça (DBCP), corrente, tensão e taxa de alimentação de arame na transferência do metal. Esses mapas, que delimitaram as regiões de transferência de metal, podem ser usados para monitorar o modo com que o metal irá se transferir para a poça de fusão de acordo com os parâmetros de soldagem, tornando-os importantes para o controle de um processo GMAW.

Jönsson et al., 1995, observaram em seu estudo que a adição de pequenas parcelas de oxigênio, entre 2 e 5%, afeta as características da coluna do arco em uma pequena extensão, mais especificamente, o fluxo de massa, quantidade de movimento do escoamento, potencial elétrico e temperatura são alterados quando o oxigênio é adicionado ao argônio. Além disso, comprovaram que a adição de oxigênio atua no gradiente de tensão superficial e no fluxo convectivo do metal líquido na poça de fusão.

### 3 IMAGENS EM SOLDAGEM

Os primórdios da visualização de imagens em soldagem remontam à década de 40. Brailsford e Shrubbs, 1948, publicaram *High-speed Photography of Welding Arcs*, onde descreviam o funcionamento de uma câmera de alta velocidade (Figura 3.1) projetada e utilizada para fotografar a transferência do metal de adição, com capacidade para fotografar até 2500 quadros por segundo, tirando 45 retratos sucessivos em um filme de 35 mm com 25 in (635 mm). A Figura 3.2 apresenta vistas em corte e superior dessa câmera de alta velocidade.

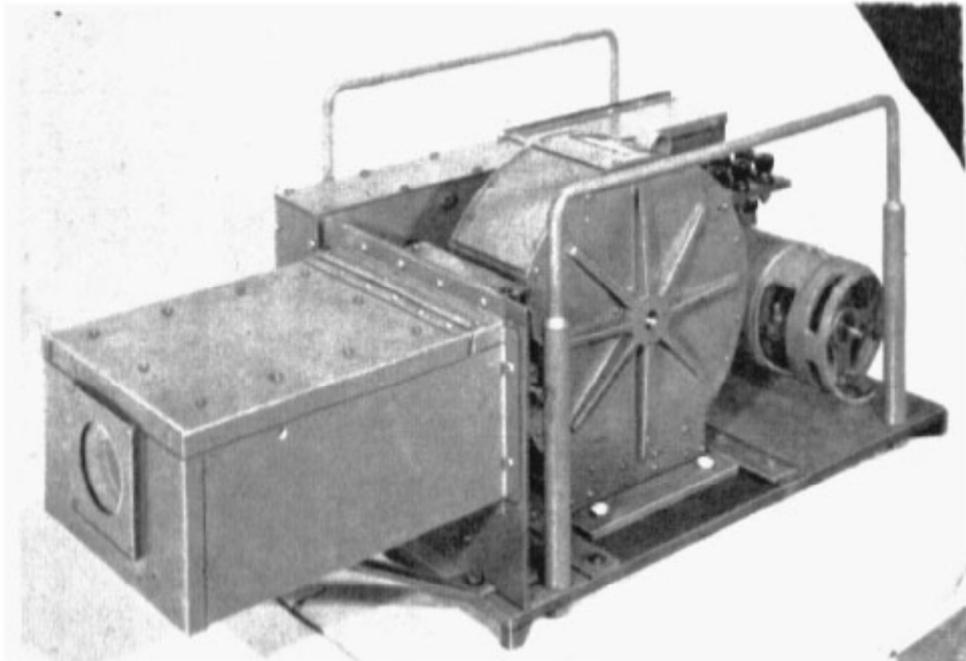


Figura 3.1 – Câmera de alta velocidade [Brailsford e Shrubbs, 1948].

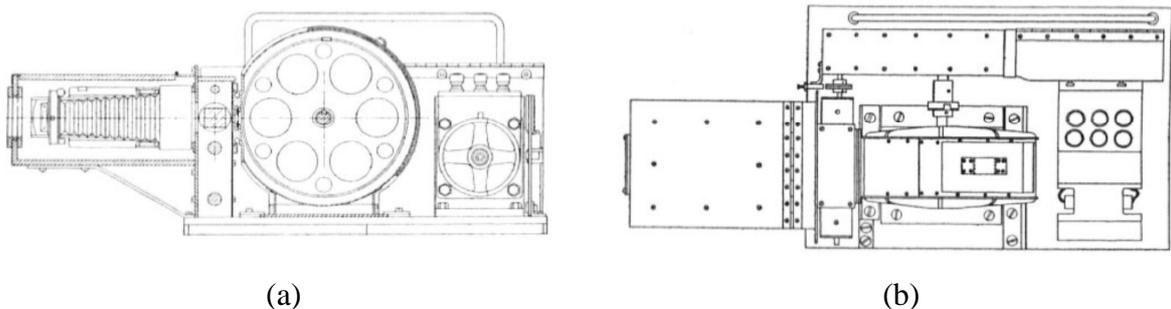


Figura 3.2 – Vista em corte (a) e superior (b) da câmera de alta velocidade [Brailsford e Shrubbs, 1948].

Para obter uma imagem adequada, a iluminação atrás do arco elétrico era feita através de um arco elétrico com eletrodo de carvão ou com uma lâmpada de mercúrio, além de uma lente com um revestimento para proteção. A Figura 3.3 mostra imagens obtidas com essa técnica, considerada muito cara para a época, pois os autores a descrevem como inviável se for necessário uma grande quantidade de imagens.

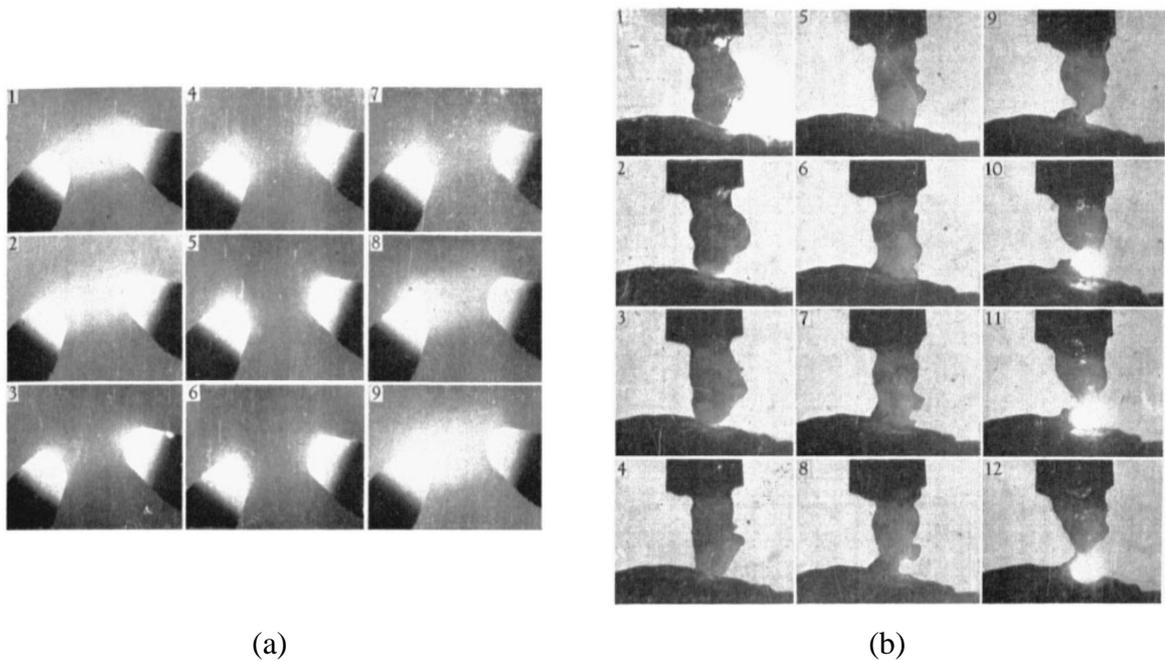


Figura 3.3 – Imagens obtidas por câmera de alta velocidade da década de 40. (a) Eletrodo de carvão, 10 A, CA, em 1500 fps. (b) Eletrodo revestido, 120 A, CCEN, em 2500 fps.

Ao invés de utilizar uma iluminação de alta intensidade atrás do arco elétrico, a técnica da perfilografia utiliza um LASER disposto atrás do arco elétrico, alinhado com a câmera de alta velocidade, e um filtro passa-banda que permite a passagem de uma pequena faixa de comprimentos de onda, de acordo com o comprimento de onda do LASER. A imagem capturada pela câmera consiste numa sombra da imagem da região de soldagem, ou seja, a imagem da luz do LASER que passa por essa região e pelo passa-banda [Allemand et al., 1985].

### 3.1 Fundamentos de Visualização de Imagens em Processos de Soldagem

A Figura 3.4 mostra um esquema básico de detecção visual ativa, onde uma luz externa é utilizada para analisar as propriedades físicas de um determinado meio. A previsão de que a absorção e dispersão de luz, proveniente de uma fonte externa, sejam mínimas antes de atingir o alvo, e o observador captura a imagem refletida desta luz na forma de uma imagem. Observações da luz refletida e transmitida são importantes a fim de se compreender as propriedades dinâmicas do meio, pois ao se iluminar uma superfície uma parte da luz será refletida, e esta tem o mesmo caráter da luz incidente, portanto, esta luz refletida pela superfície trará as características deste corpo que será analisado pelo observador. Além disso, a luz refletida do corpo contém dados térmicos. Considerando que a luz refletida é uma parte da luz incidente e, dependendo das condições da superfície, esta análise é possível, como sugere a Figura 3.5 [Ogawa, 2011].



Figura 3.4 – Esquema básico de detecção visual ativa [Adaptado de Ogawa, 2011].

A reflexão da luz do arco elétrico e do eletrodo de tungstênio aquecido pode ser considerada como um problema para a medição de temperatura por infravermelho em processos de soldagem, visto que estes fatores diminuem a exatidão do método, especialmente para materiais com alta refletividade, como ligas de alumínio e magnésio [Liu et al., 2007].

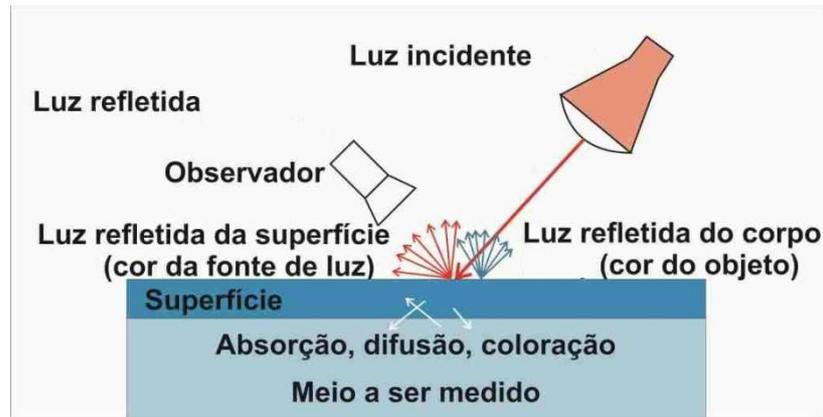


Figura 3.5 – Reflexão dicromática em uma superfície [Adaptado de Ogawa, 2011].

As condições de uma poça de fusão de metal fundido e do metal sólido são bastante diferentes, como pode ser visto na Figura 3.6. A superfície da poça de fusão é lisa e regular devido à tensão superficial, por isso que luz incidente nela é refletida completamente de acordo com as suas condições geométricas. Por outro lado, superfícies sólidas tem a superfície rugosa e irregular, logo, a luz incidente é refletida em todas as direções. A diferença nestes comportamentos é importante e relevante para obtenção de imagens do arco elétrico em processos de soldagem. Outro obstáculo importante é a eficiência de radiação, que é afetada pelas condições da superfície, além de que a radiação dos óxidos é maior que nas superfícies limpas.

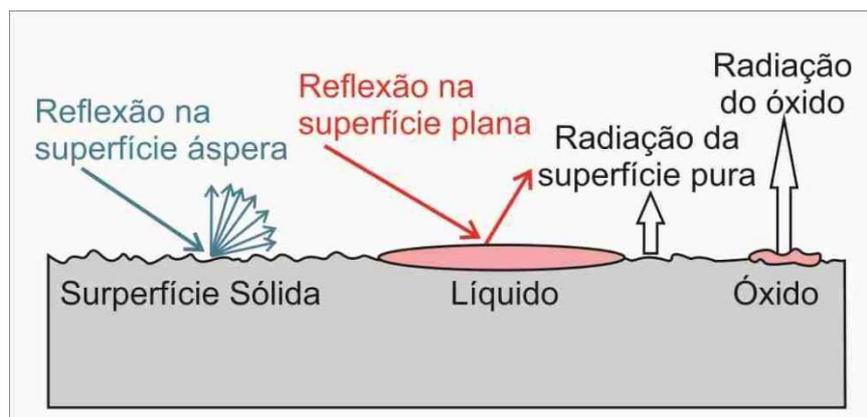


Figura 3.6 – Influência do estado da superfície na reflexão da luz [Adaptado de Ogawa, 2011].

### 3.2 O Efeito da Radiação

As condições da superfície da poça de fusão e do metal base sólido são bem diferentes. A primeira é lisa como um espelho devido à tensão superficial, resultando na reflexão total da luz incidente na poça de fusão na direção geométrica. Diferentemente, a superfície do metal base sólido tem uma superfície grosseira, e a luz incidente é refletida em diversas direções. Outra importante diferença é a eficiência de radiação na superfície grosseira, sendo que a radiação dos óxidos é maior que nas superfícies lisas [Ogawa, 2008].

O principal objetivo de visualizar imagens do arco elétrico é obter uma imagem bidimensional monocromática a partir de um objeto policromático. A distribuição de frequências óticas em um determinado ponto fornece importantes informações sobre as temperaturas do arco, como temperaturas dos elétrons, íons e átomos.

### 3.3 Fundamentos de Visualização de Imagens em Alta Velocidade

No caso de um processo de soldagem, os sinais mais úteis para verificar são tensão de arco e corrente de soldagem. Para melhorar a compreensão da transferência do metal de adição até a poça de fusão a filmagem em alta velocidade passou a ser utilizada como ferramenta de auxílio. O mais importante para obter uma imagem de boa qualidade de um arco elétrico, em um processo de soldagem, é eliminar o excesso de luz irradiado pelo próprio arco, impedindo de observar o procedimento. No caso do processo de soldagem GTAW os elétrons emitidos pelo cátodo de tungstênio atingem o metal de base. Alguns átomos do gás de proteção inerte, cuja finalidade é impedir a oxidação do metal fundido, ionizam na coluna do arco, que é o canal de passagem da corrente entre o cátodo e o ânodo caracterizada pelo mesmo número de íons e elétrons. A consequência disso na coluna do arco é uma luz intensa, irradiada devido às reações de recombinação entre íons e elétrons [Ogawa, 2012].

Segundo a definição de Ogawa [Ogawa, 2008], uma câmera de vídeo de alta velocidade nada mais é que um processador digital com uma imensa memória. No caso de câmeras monocromáticas, somente uma cor é guardada em cada pixel. Para câmeras coloridas, a captura ocorre para três cores (vermelho, verde e azul) por pixel. Porém, a luz do arco elétrico tem um intervalo de comprimentos de onda que se estendem desde o ultravioleta até o infravermelho. Uma câmera de vídeo normal é ajustada para se adequar à visão do ser humano, logo, a luz que está fora do intervalo coberto pelos olhos humanos é evitada.

Entretanto, as radiações ultravioleta e infravermelha emitidas pelo arco são muito intensas se comparadas a uma imagem normal, por isso irá afetar na cor do tom da imagem capturada. Na Figura 3.7 podem ser vistos o instante inicial de soldagem, a abertura do arco, durante a execução do cordão de solda e após a extinção do arco, sem nenhum tipo de filtro, de um eletrodo revestido E6013 de 3,25 mm de diâmetro em uma chapa de aço AISI 1020. As imagens obtidas foram feitas por uma câmera de alta velocidade, configurada para resolução de 512 x 384, tempo de exposição de 1900  $\mu$ s e 500 fps (*frames per second* – quadros por segundo), com iluminação de um refletor de LED. Como não existe nenhum tipo de filtro, é impossível visualizar qualquer elemento da região de soldagem.

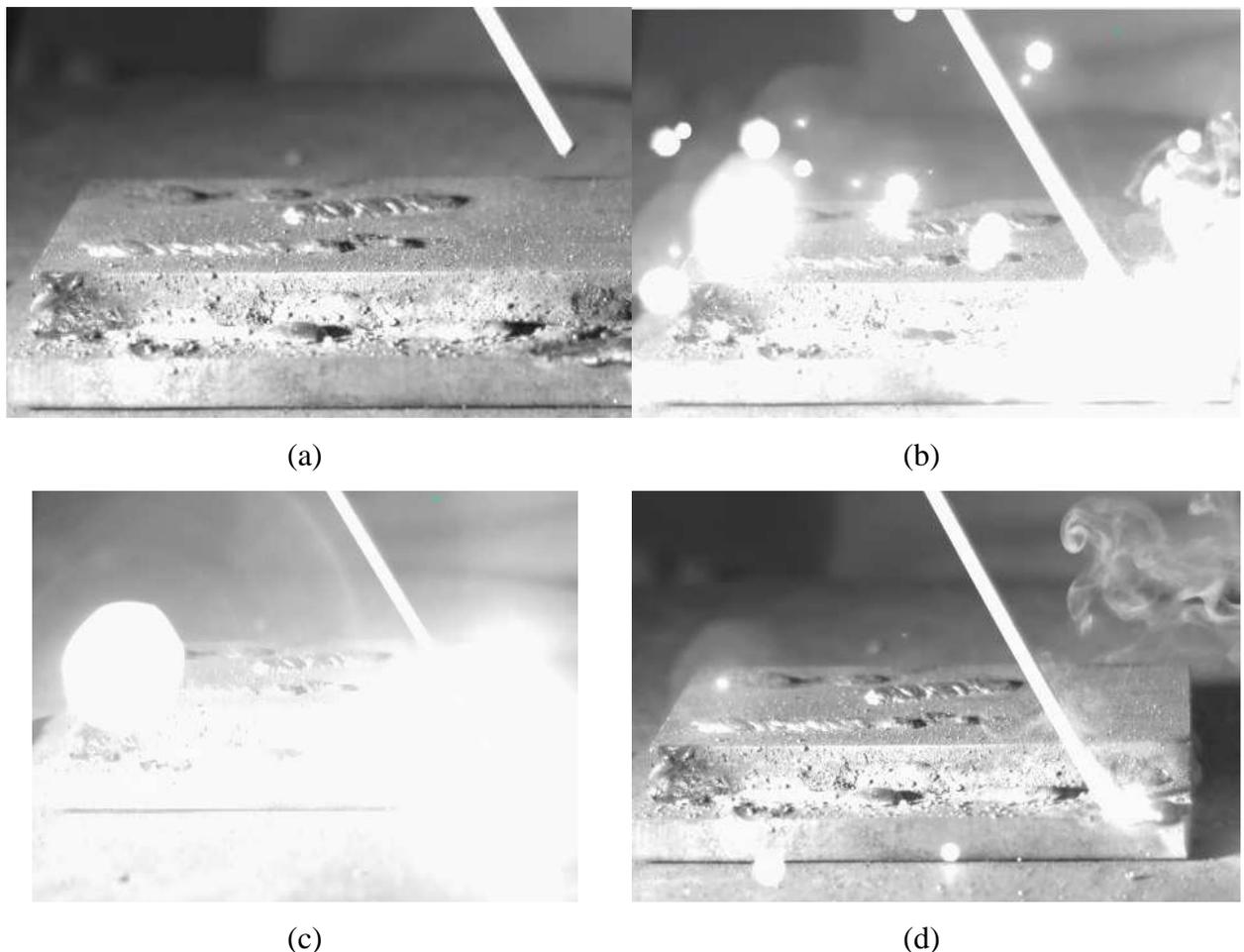


Figura 3.7 – Imagens de alta velocidade sem filtro: (a) Imagem inicial da soldagem, (b) Momento da abertura do arco, (c) Instante após abertura do arco, (d) Extinção do arco.

Quando a câmera de alta velocidade está ajustada para obter uma imagem do arco, quase todo o fundo se torna preto, conforme a Figura 3.8. Nesta figura nota-se que no caso (a) a região do arco elétrico é muito pequena em relação à figura, logo uma fonte de luz normal é

suficiente; em (b) a região do arco elétrico se torna maior, portanto uma fonte de luz mais forte é necessária para obter uma boa imagem de todo o aparato; finalmente em (c) se tem um tipo de figura usual em imagens de alta velocidade, em que o destaque para a região do arco elétrico é muito grande, onde o uso de uma fonte de luz normal é insuficiente devido à alta radiação do arco [Ogawa, 2012]. Uma solução para capturar uma imagem com fundo claro é utilizar uma intensa fonte de luz externa. Outra solução é utilizar filtros de interferência de banda estreita, o que protege a luz do arco e permite a passagem da luz do fundo. Informações oriundas de espectroscopia também são úteis para entender as características [Ogawa, 2008].

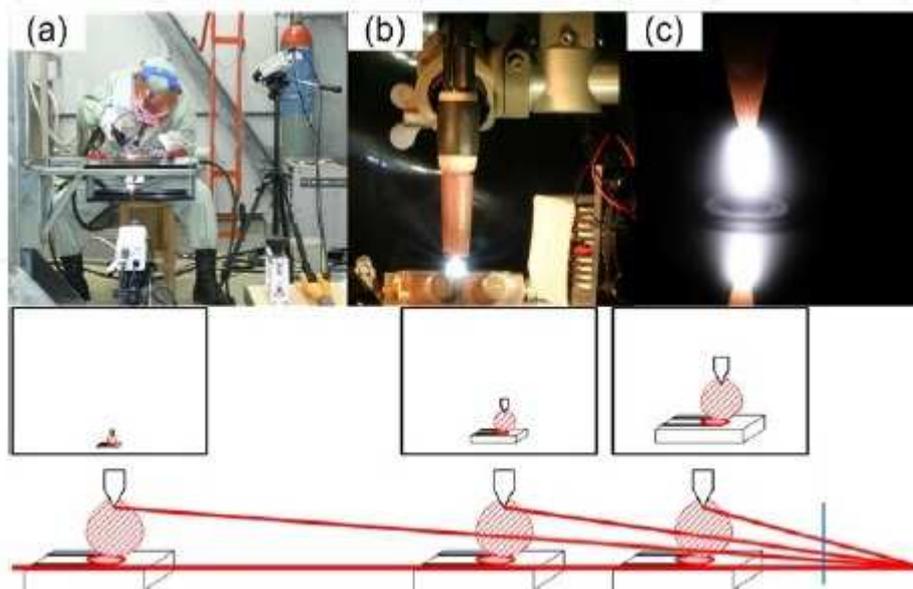


Figura 3.8 – Efeito do tamanho na qualidade da imagem [Ogawa, 2012].

### 3.4 Oscilogramas dos Sinais Elétricos – Tensão e Corrente

Com o uso de osciloscópios é possível observar o formato dos sinais de tensão e corrente gerados em um processo de soldagem. Estes sinais podem imitar alguns modos de transferência. Por exemplo, durante a transferência do metal por curto-circuito quando a gota começa a se desenvolver, a tensão oscila ao redor de um valor médio, mas tende a zero quando a gota toca a poça de fusão, instante em que ocorre o curto-circuito. Um pico de tensão ocorre logo após o destacamento da gota devido ao fenômeno da reignição do arco [Bálsamo et al., 2000], conforme a Figura 3.9. O destacamento gera um pequeno ruído sonoro (“*blip*”) no sinal da tensão do arco, provavelmente devido ao aumento da resistência elétrica

ao romper o pescoço da gota de metal fundido em contato com o arame [Nixon e Norrish, 1988, *apud* Bálamo, 2000].

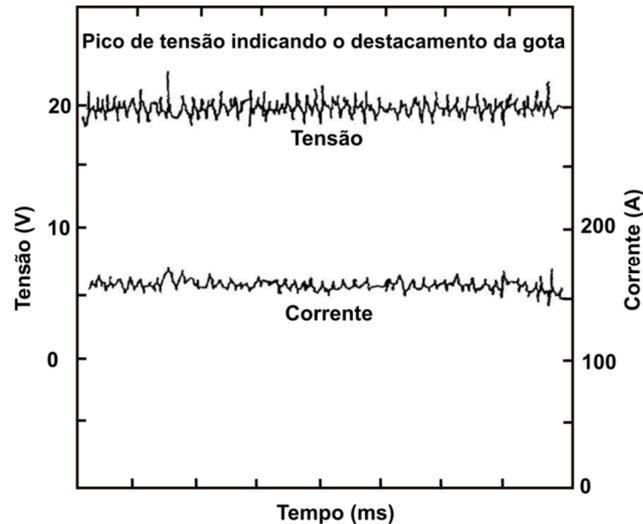


Figura 3.9 – Observações instantâneas do destacamento da gota através da tensão de arco e corrente de soldagem [Adaptado de Rajasekaran et al., 1998].

Também citados no trabalho de Bálamo, 2000, Wang e Li, 1997, alegam que a determinação do momento de destacamento da gota de metal fundido através dos sinais de tensão só é efetiva para os modos de transferência por curto-circuito e globular. Para a transferência por aerossol a relação sinal-ruído é muito baixa, o que torna difícil a identificação do sinal puro do ruído existente.

Heald et al., 1994, investigaram a relação entre os desvios padrão da corrente de soldagem e os modos de transferência do metal de um eletrodo AWS ER100S-1 de 1,2 mm de diâmetro e Ar como gás de proteção com 2% O<sub>2</sub>. O objetivo deste trabalho foi mapear os efeitos da corrente, tensão, taxa de alimentação e DPBC de 13, 19 e 25 mm na transferência do metal. Os modos de transferência foram identificados e mapeados pelo som emitido pelo arco e pelas imagens obtidas por um sistema de filmagem de alta velocidade iluminado por LASER, denominados como *through the arc LASER imaging*. Os modos de transferência foram correlacionados com os dados obtidos das flutuações de tensão e corrente. Os mapas contiveram informações detalhadas de modo de transferência por aerossol, incluindo os limites entre transferência por aerossol globular, aerossol com alongamento e aerossol rotacional. A utilidade desse estudo está em sua aplicação em sistemas de soldagem inteligentes, os quais precisam executar um serviço similar ao de soldadores qualificados,

reproduzindo a sua habilidade ao manipular o eletrodo ao longo de uma junta, com capacidade de detectar condições insatisfatórias e até mesmo oferecer uma ação corretiva ou finalizar o processo de soldagem.

O monitoramento de sinais elétricos (sensoriamento através do arco) é uma estratégia de sensoriamento para um sistema de soldagem por controle inteligente. Perturbações elétricas da transferência do metal de adição no processo de soldagem GMAW podem ser usadas para monitorar alterações nas condições de soldagem. Apesar desta relação entre sinais elétricos com características do arco remontar à década de 50 [Lesnewich, 1958], os avanços nas tecnologias de captura digital e técnicas de processamento de imagens têm ajudado bastante na capacidade de utilizar os sinais do arco para controlar o mesmo. O conhecimento das inter-relações entre os sinais do arco e os modos de transferência permite que um sistema de soldagem controlado determine uma resposta adequada para uma condição insatisfatória e decida se uma correção é necessária [Heald et al., 1994].

Johnson, 1991, com o objetivo de identificar o modo de transferência, posicionou filtros de rejeição de banda de 360 Hz nas conexões dos sensores dos circuitos aos digitalizadores, uma vez que a fonte de potência utilizada era um transformador-retificador trifásico com grandes ondulações de 360 Hz de ruído nos sinais de saída. Entretanto, Subramanian et al., 1998, mesmo utilizando uma fonte de soldagem inversora, foram capazes de identificar o instante do destacamento através do filtragem do sinal da tensão do arco com um filtro passa-baixa com frequência de corte de 5 kHz. Rajasekaran et al., 1998, também usaram um filtro passa-baixa de 5 kHz para eliminar o problema dos ruídos da alta frequência e do processo nos sinais da tensão e corrente. A técnica de investigação do destacamento das gotas através dos oscilogramas de tensão e também foi usada por Dutra, 1989, Grubic e Andric, 1995, e Rajasekaran et al., 1998, [Bálsamo et al., 2000].

### **3.5 Perfilografia**

A perfilografia consiste na visualização da sombra de um objeto em situações onde se tem excesso de luz que implica no obscurecimento da imagem real. Em soldagem, devido à velocidade com que ocorrem os fenômenos físicos, são utilizadas câmeras de alta velocidade na filmagem. Esta técnica, também conhecida por *shadowgraphy* ou *back-lighting*, tem sido usada para descrever a sombra projetada dos elementos de uma região de soldagem sobre uma

superfície plana. Como a luz do arco é intensa, devido às altas correntes utilizadas, e irradiada para todas as direções, logo, não é fácil de obter a sua sombra [Bálsamo et al., 2000].

Lopera et al., 2011, destacam que 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 em custos relativamente elevados e de perdas de informação nas imagens. A técnica da perfilografia faz uso da iluminação direcional a contraluz com um feixe de LASER como fonte de luz, o que soluciona em grande parte os problemas apresentados anteriormente [Lopera et al., 2011]. Ramos et al., 2013, explicam que uma fonte de luz como um LASER ilumina a região que se deseja observar, de modo que a imagem de interesse seja a sombra dessa região. O feixe de luz é normalmente ampliado com o auxílio de um arranjo de lentes. Do outro lado, uma câmera com filtro passa-banda captura a luz que está na região de comprimento de onda do LASER e o que não estiver nessa região fica escuro, como a sombra do metal sendo depositado.

O esquema demonstrado na Figura 3.10 tem um expensor de feixe LASER do tipo Galileu, onde uma lente divergente é utilizada na entrada do feixe e uma lente convergente é a saída, o que produz uma frente de onda plana na saída do expensor, não tendo assim distorção nem ampliação na geometria dos elementos [Hecht, 2002, apud Ramos et al., 2013].

A frente de onda plana se consegue quando as frentes de onda esféricas de luz que entram na lente convergente partem do mesmo ponto focal da mesma. Depois de atravessar a lente, os raios ficam paralelos ao eixo ótico e as frentes de onda perpendiculares ao mesmo, conforme a Figura 3.11, onde a letra F representa o ponto focal da lente e a luz incidente se propaga na direção das setas. Assim, os pontos focais das duas lentes se coincidem e o feixe de luz está colimado.

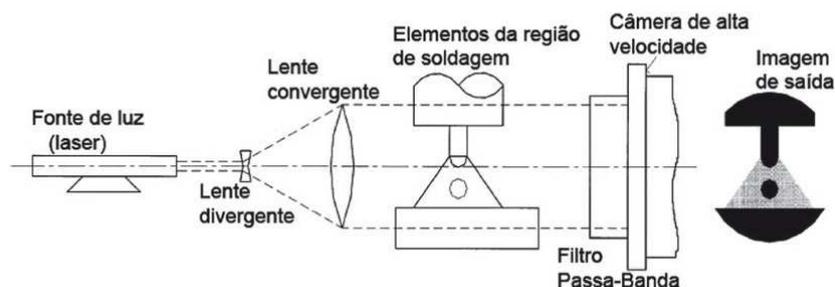


Figura 3.10 – Princípio da perfilografia aplicada à soldagem [Bálsamo et al., 2000].

A perfilografia é indicada como uma técnica bastante adequada de aquisição de imagens dos modos de transferência do metal em soldagem, pois resulta num bom contraste entre o fundo e os elementos envolvidos da região de soldagem (arame, metal transferido e metal de base), como pode ser conferido em trabalhos como o de Bálsamo et al., 2000, Groetelaars, 2005, Lopera et al., 2011, e Ramos et al., 2013. Entretanto, uma desvantagem da perfilografia é que esta só pode ser utilizada com a tocha de soldagem fixa por causa do arranjo ótico.

O estudo da transferência do metal através de visualização das gotas de metal fundido requer uma instrumentação capaz de visualizar uma quantidade mínima de gotículas de metal viajando através do arco elétrico, o que pode ser resolvido com filmagem ou fotografia de alta velocidade. A fotografia de alta velocidade tem a sua aplicação muito limitada devido à demora entre o experimento e a análise de resultados. O uso de câmeras de alta velocidade (1000 quadros por segundo ou superior) permite medições mais exatas do tamanho das gotas de metal fundido transferidas.

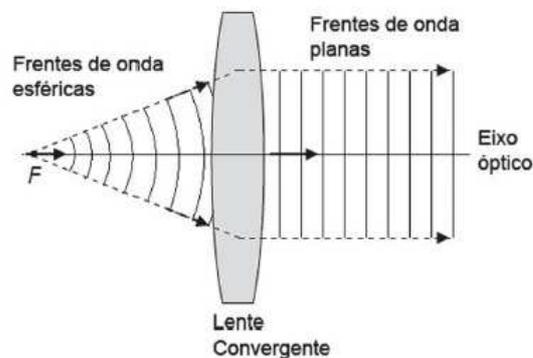


Figura 3.11 – Formação de ondas planas a partir de ondas esféricas pelo uso de uma lente convergente [Ramos et al., 2013].

Utilizando apenas as imagens da câmera de alta velocidade de um processo de soldagem pulsado, não é possível saber se as gotas de metal fundido se destacam do arame durante o pulso ou no início do período. Esta é a razão pela qual alguns pesquisadores procuram sincronizar as imagens da perfilografia com oscilogramas de tensão e corrente [Bálsamo et al., 2000]. O trabalho de Heald et al., 1994, é um exemplo deste cruzamento de dados coletados dos oscilogramas de tensão e corrente e imagens de perfilografia, onde utilizaram um LASER de 20 mW He-Ne, uma câmera de alta velocidade (acima de 1000 quadros/segundo) de 90 mm, lente F/3.5, um espelho, duas lentes de foco, um filtro passa-

banda para filtrar o LASER, e um vidro fosco para proteção. A metodologia da coleta de dados consistiu em relacionar a tensão e corrente reais com a imagem da ponta do eletrodo quando ocorria a transferência para o metal de base. Um pulso elétrico era emitido e fazia com que o sinal do arco iniciasse a coleta de dados. O pulso também era sincronizado com a imagem da transferência do metal. Junto com outros dados audiovisuais coletados, os vídeos gravados com os sinais do arco foram utilizados para determinar o modo de transferência e definir as regiões limites entre cada um dos modos.

### **3.6 Imagens em Soldagem com Iluminação por Banco de Diodos LASER**

Considerando que a radiação emitida pelo arco elétrico durante um processo de soldagem é muito intensa, se faz necessário o uso de um filtro para minimizar ao máximo os efeitos da radiação emitida. Porém, ao usar uma máscara de soldagem com um filtro adequado, o máximo que o soldador consegue visualizar é o clarão do arco elétrico e a poça de fusão, sem uma riqueza de detalhes. Um soldador com anos de experiência desenvolve a habilidade de ver, sentir e ouvir durante uma operação de soldagem manual ou semiautomática, e isso se deve ao fato do cérebro humano ter a capacidade de guardar uma imensa quantidade de informações sobre como realizar uma tarefa. Considerando que essa habilidade humana de executar tarefas não é fácil de reproduzir em um sistema automatizado de soldagem, a importância em conseguir enxergar o que acontece durante a execução da solda está em coletar dados para desenvolver um algoritmo que seja capaz de imitar e repetir essas tarefas [Bengston, 2013].

Uma técnica empregada é o uso de fonte de luz externa, mais especificamente um LASER para iluminação com comprimento de onda definido e direcionado à poça de fusão. De forma análoga, a câmera de alta velocidade é posicionada num ângulo cujo foco esteja na poça de fusão iluminada pelo LASER, de forma a captar as imagens da transferência do metal no instante da operação de soldagem. Na lente da câmera é colocado um filtro passa-banda para permitir a passagem apenas de uma determinada faixa de frequências, no caso, a mesma do LASER de iluminação.

Atualmente, o modelo de referência para estes testes consiste no LASER de iluminação CAVILUX® HF, cujo comprimento de onda é de 810 nm e potência de 500 W. Tal equipamento é fabricado pela Cavitar, que recomenda a sua aplicação para processos que emitem radiação térmica, tais como soldagem e explosões. Entretanto, o problema deste

sistema todo para visualização de imagens é o alto custo, especialmente do LASER CAVILUX® HF, além de operar em um curto espaço de tempo para aplicações de alta velocidade.

Devido a isso, Bengston, 2013, desenvolveu um sistema de visualização de imagens em soldagem, mais específico para ser aplicado na soldagem de chapas em uma linha de produção de automóveis. Os testes foram realizados com uma iluminação por uma placa de diodos LASER da OSRAM, modelo SPL PL903, com comprimento de onda de 905 nm e potência de 75 W em um período de 100 ns. Para a captação das imagens, foram testadas duas câmeras, uma com sensor CMOS (*complementary metal-oxide semiconductor* ou semiconductor de metal-óxido complementar) modelo Prosilica GC750c, e outra com sensor CCD (*charged-coupled device* ou dispositivo de carga acoplada) modelo Prosilica GC650.

O uso de câmeras com sensor CCD tem como benefício a alta eficiência quântica (medida da sensibilidade de uma câmera à presença de luz) na região do comprimento de onda da luz visível, ao passo que é baixa na região de infravermelho. Porém, a desvantagem está justamente no excesso de claridade, que satura os pixels do sensor CCD, deixando a imagem com listras verticais [Bengston, 2013]. Um exemplo disso está na Figura 3.12a, onde o autor destaca o efeito causado pelo clarão na imagem, e destaca que a câmera com sensor CMOS apresenta uma qualidade de imagem melhor do que a câmera com sensor CCD, como pode ser visto na Figura 3.12b.

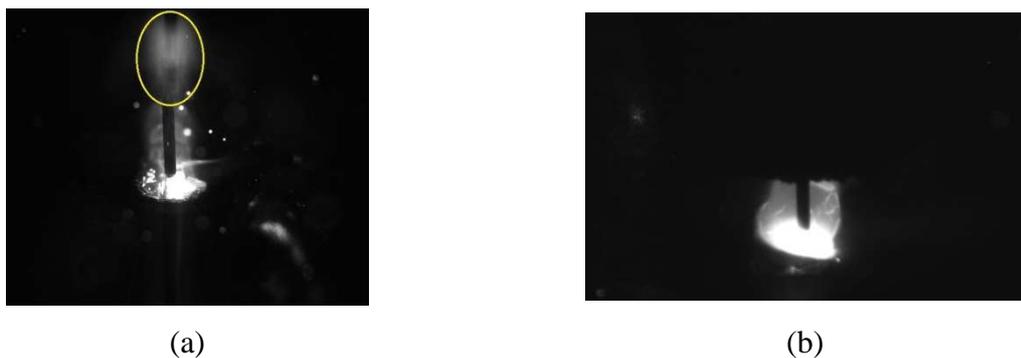


Figura 3.12 – Exemplo do efeito da claridade excessiva (elipse em destaque) obtida por uma câmera Prosilica GC650 com sensor CCD (a), e exemplo de imagem obtida por uma câmera Prosilica GC750c com sensor CMOS (b) [Adaptado de Bengston, 2013].

Entretanto, mesmo com essa técnica, não é possível visualizar a transferência do metal como na perfilografia. Imagens de melhor qualidade foram obtidas com iluminação pelo

CAVILUX®, como pode ser visto nos trabalhos de Stolz et al., 2015, na Figura 3.13, e Eriksson et al., 2010, na Figura 3.14.

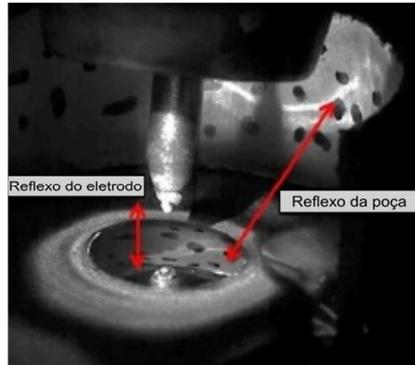


Figura 3.13 – Aplicação da iluminação pelo CAVILUX® (810 nm de comprimento de onda) em processo de soldagem GTAW usando He como gás de proteção. [Adaptado de Stolz et al., 2015].

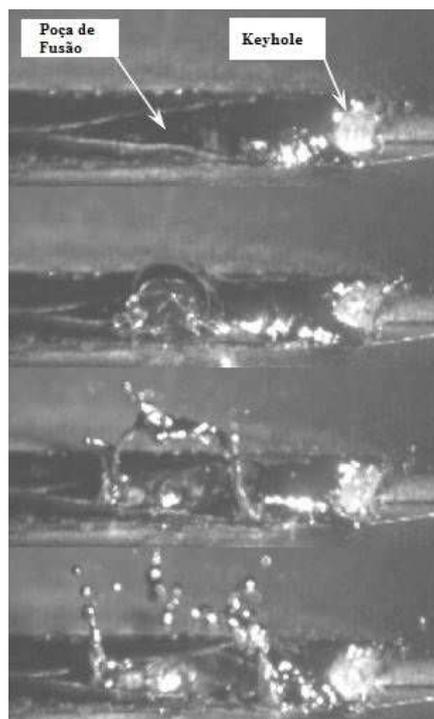


Figura 3.14 – Instante da ruptura da poça de fusão, em solda de canto efetuada pelo processo de soldagem a LASER Nd:YAG. No detalhe, a poça de fusão e a formação do *keyhole* [Adaptado de Eriksson et al., 2010].

#### 4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Os experimentos de soldagem foram executados todos no Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas do Centro de Tecnologia (CT) da UFRGS, com o objetivo de reproduzir condições de soldagem para obter os diferentes modos de transferência do metal de adição no processo GMAW. Soldas de topo (*bead-on-plate*) foram realizadas em chapas de aço ao carbono AISI 1020 com 6,3 mm de espessura, com dimensões de 150 x 100 mm, utilizando arames-eletrodos AWS ER70S-6 com três diferentes diâmetros: 0,8 1,0 e 1,2 mm. Uma fonte de soldagem IMC Digiplus A7 450 foi utilizada para a execução dos cordões de solda. A tocha de soldagem foi mantida estacionária, com uma distância bico de contato à peça de 20 mm, enquanto que a chapa metálica (metal base) era movimentada. Esse tipo de arranjo permitiu manter uma distância constante da câmera de alta velocidade até a região de soldagem (tocha, arame-eletrodo, arco e poça de fusão). Um sistema de aquisição de dados de sinais elétricos permite a leitura instantânea da corrente de soldagem, tensão de arco e velocidade de alimentação de arame. Um esquema do arranjo experimental está disponível na Figura 4.1.

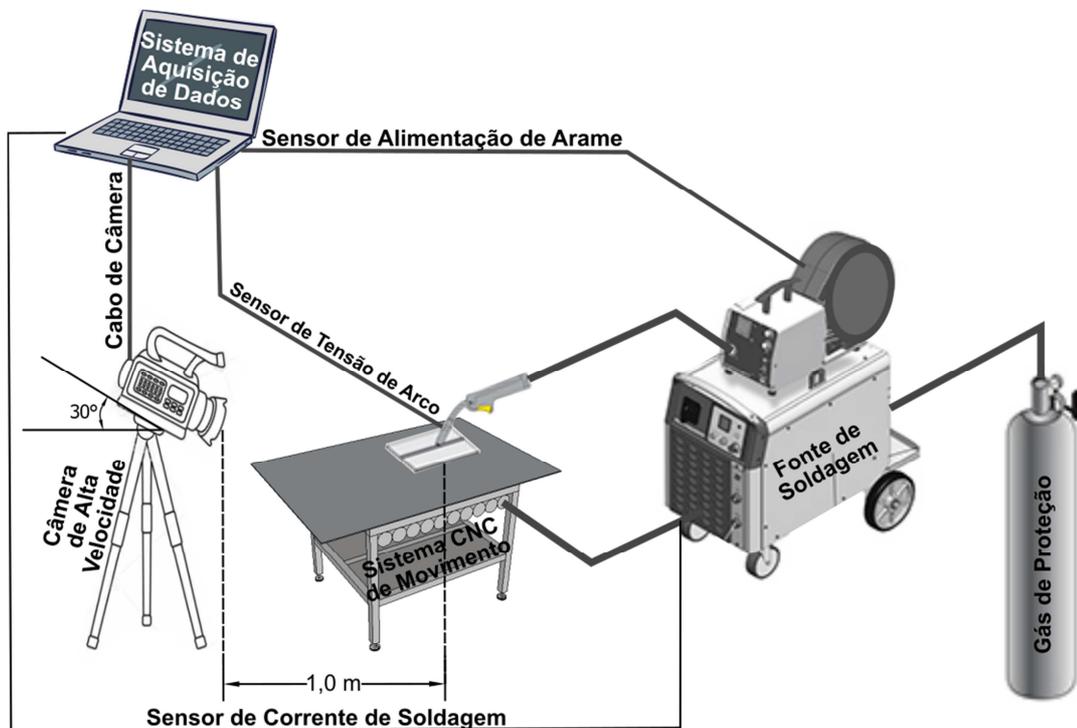


Figura 4.1 – Esquema do arranjo experimental.

Os experimentos foram divididos em duas etapas. Inicialmente, foram executadas filmagens de cordões de solda com o processo GMAW com proteção gasosa exclusivamente pela mistura de Ar + 10% CO<sub>2</sub>. Na segunda etapa, os experimentos com o mesmo processo de soldagem envolveram mais gases de proteção (Ar e CO<sub>2</sub>) e misturas gasosas (Ar + 2% O<sub>2</sub>, Ar + 10% CO<sub>2</sub> e Ar + 25% CO<sub>2</sub>). Como a primeira etapa de experimentos envolveu apenas uma mistura gasosa como gás de proteção (Ar + 10% CO<sub>2</sub>), a ideia de realizar mais experimentos com diversos gases e misturas como gás de proteção deveu-se à necessidade de ter mais resultados para comparação entre os modos de transferência do metal de adição e os parâmetros de soldagem obtidos pela aquisição de sinais elétricos.

Os parâmetros de soldagem foram obtidos através de ensaios preliminares empíricos, cujos cordões de solda resultantes seriam satisfatórios para a combinação de gases e arames-eletrodos. Os cordões de solda foram avaliados através de inspeção visual, de acordo com a presença de descontinuidades.

#### **4.1 Experimentos com Mistura Gasosa Ar + 10% CO<sub>2</sub>**

A primeira etapa de experimentos consistiu em utilizar somente a mistura gasosa de Ar + 10% CO<sub>2</sub> (C10) como gás de proteção. Dois grupos de parâmetros de soldagem foram escolhidos, o primeiro, denominado parâmetros inferiores, visando obter uma transferência do metal de adição por curto-circuito e globular, e outro de parâmetros superiores, a fim de obter o modo de transferência do metal de adição por aerossol e suas variações. A velocidade de soldagem dos experimentos com parâmetros de soldagem inferiores (LV) foi de 4 mm/s, aumentada para 10 mm/s para os experimentos com parâmetros de soldagem superiores (HV). A vazão de gás de proteção (12 l/min), a velocidade de soldagem (10 mm/s) e a distância do bico de contato à peça (20 mm) se mantiveram constantes para todos os experimentos, a tensão (U) e velocidade de alimentação de arame (W) correspondem aos valores pré-ajustados na fonte de soldagem.

Cada experimento nesta etapa teve uma repetição, sendo realizados de forma aleatória, a fim de evitar algum erro no ajuste dos parâmetros de soldagem, sendo que cada bloco de experimentos correspondente a um diâmetro de arame foi realizado em um único dia, totalizando três dias. Os experimentos dessa etapa estão descritos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Experimentos com mistura gasosa de Ar + 10% CO<sub>2</sub>.

Experimento	Bloco	U (V)	W (m/min)	Diâmetro Arame (mm)	Experimento	Bloco	U (V)	W (m/min)	Diâmetro Arame (mm)
2 D 12 LV	1	22	6	1,2	2 D 12 HV	1	33	10	1,2
6 D 12 LV	1	22	6	1,2	6 D 12 HV	1	33	10	1,2
3 D 12 LV	1	24	4	1,2	3 D 12 HV	1	35	8	1,2
4 D 12 LV	1	24	6	1,2	4 D 12 HV	1	35	10	1,2
8 D 12 LV	1	24	6	1,2	8 D 12 HV	1	35	10	1,2
5 D 12 LV	1	22	4	1,2	5 D 12 HV	1	33	8	1,2
1 D 12 LV	1	22	4	1,2	1 D 12 HV	1	33	8	1,2
7 D 12 LV	1	24	4	1,2	7 D 12 HV	1	35	8	1,2
2 D 10 LV	2	22	6	1,0	2 D 10 HV	2	33	10	1,0
6 D 10 LV	2	22	6	1,0	6 D 10 HV	2	33	10	1,0
3 D 10 LV	2	24	4	1,0	3 D 10 HV	2	35	8	1,0
4 D 10 LV	2	24	6	1,0	4 D 10 HV	2	35	10	1,0
8 D 10 LV	2	24	6	1,0	8 D 10 HV	2	35	10	1,0
5 D 10 LV	2	22	4	1,0	5 D 10 HV	2	33	8	1,0
1 D 10 LV	2	22	4	1,0	1 D 10 HV	2	33	8	1,0
7 D 10 LV	2	24	4	1,0	7 D 10 HV	2	35	8	1,0
2 D 08 LV	3	22	6	0,8	2 D 08 HV	3	33	10	0,8
6 D 08 LV	3	22	6	0,8	6 D 08 HV	3	33	10	0,8
3 D 08 LV	3	24	4	0,8	3 D 08 HV	3	35	8	0,8
4 D 08 LV	3	24	6	0,8	4 D 08 HV	3	35	10	0,8
8 D 08 LV	3	24	6	0,8	8 D 08 HV	3	35	10	0,8
5 D 08 LV	3	22	4	0,8	5 D 08 HV	3	33	8	0,8
1 D 08 LV	3	22	4	0,8	1 D 08 HV	3	33	8	0,8
7 D 08 LV	3	24	4	0,8	7 D 08 HV	3	35	8	0,8

Fonte: Próprio autor.

## 4.2 Experimentos com Gases Puros e Misturas Gasosas

A segunda etapa de experimentos consistiu em utilizar os gases argônio, dióxido de carbono e as misturas gasosas de Ar + 2% O<sub>2</sub>, Ar + 10% CO<sub>2</sub> (C10) e Ar + 25% CO<sub>2</sub> (C25) como gases de proteção. A vazão de gás de proteção (12 l/min), a velocidade de soldagem (10 mm/s) e a distância do bico de contato à peça (20 mm) se mantiveram constantes para todos os experimentos, a tensão (U) e velocidade de alimentação de arame (W) correspondem aos valores pré-ajustados na fonte de soldagem.

Nesta etapa os experimentos não tiveram repetições. Também foram executados de forma aleatória, a fim de evitar algum erro no ajuste dos parâmetros de soldagem, sendo que

cada bloco de experimentos correspondente a um diâmetro de arame foi realizado em um único dia, totalizando três dias. Os experimentos dessa etapa estão descritos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Experimentos com gases puros e misturas gasosas.

Experimento	Bloco	U (V)	W (m/min)	Gás de Proteção	Diâmetro Arame (mm)	Experimento	Bloco	U (V)	W (m/min)	Gás de Proteção	Diâmetro Arame (mm)
1	1	33	8	Ar + 2% O <sub>2</sub>	1,2	31	2	35	8	Ar + 25% CO <sub>2</sub>	1,0
2	1	33	10	Ar + 2% O <sub>2</sub>	1,2	32	2	35	10	Ar + 25% CO <sub>2</sub>	1,0
3	1	35	8	Ar + 2% O <sub>2</sub>	1,2	33	2	33	8	100% Ar	1,0
4	1	35	10	Ar + 2% O <sub>2</sub>	1,2	34	2	33	10	100% Ar	1,0
5	1	33	8	Ar + 10% CO <sub>2</sub>	1,2	35	2	35	8	100% Ar	1,0
6	1	33	10	Ar + 10% CO <sub>2</sub>	1,2	36	2	35	10	100% Ar	1,0
7	1	35	8	Ar + 10% CO <sub>2</sub>	1,2	37	2	33	8	100% CO <sub>2</sub>	1,0
8	1	35	10	Ar + 10% CO <sub>2</sub>	1,2	38	2	33	10	100% CO <sub>2</sub>	1,0
9	1	33	8	Ar + 25% CO <sub>2</sub>	1,2	39	2	35	8	100% CO <sub>2</sub>	1,0
10	1	33	10	Ar + 25% CO <sub>2</sub>	1,2	40	2	35	10	100% CO <sub>2</sub>	1,0
11	1	35	8	Ar + 25% CO <sub>2</sub>	1,2	41	3	33	8	Ar + 2% O <sub>2</sub>	0,8
12	1	35	10	Ar + 25% CO <sub>2</sub>	1,2	42	3	33	10	Ar + 2% O <sub>2</sub>	0,8
13	1	33	8	100% Ar	1,2	43	3	35	8	Ar + 2% O <sub>2</sub>	0,8
14	1	33	10	100% Ar	1,2	44	3	35	10	Ar + 2% O <sub>2</sub>	0,8
15	1	35	8	100% Ar	1,2	45	3	33	8	Ar + 10% CO <sub>2</sub>	0,8
16	1	35	10	100% Ar	1,2	46	3	33	10	Ar + 10% CO <sub>2</sub>	0,8
17	1	33	8	100% CO <sub>2</sub>	1,2	47	3	35	8	Ar + 10% CO <sub>2</sub>	0,8
18	1	33	10	100% CO <sub>2</sub>	1,2	48	3	35	10	Ar + 10% CO <sub>2</sub>	0,8
19	1	35	8	100% CO <sub>2</sub>	1,2	49	3	33	8	Ar + 25% CO <sub>2</sub>	0,8
20	1	35	10	100% CO <sub>2</sub>	1,2	50	3	33	10	Ar + 25% CO <sub>2</sub>	0,8
21	2	33	8	Ar + 2% O <sub>2</sub>	1,0	51	3	35	8	Ar + 25% CO <sub>2</sub>	0,8
22	2	33	10	Ar + 2% O <sub>2</sub>	1,0	52	3	35	10	Ar + 25% CO <sub>2</sub>	0,8
23	2	35	8	Ar + 2% O <sub>2</sub>	1,0	53	3	33	8	100% Ar	0,8
24	2	35	10	Ar + 2% O <sub>2</sub>	1,0	54	3	33	10	100% Ar	0,8
25	2	33	8	Ar + 10% CO <sub>2</sub>	1,0	55	3	35	8	100% Ar	0,8
26	2	33	10	Ar + 10% CO <sub>2</sub>	1,0	56	3	35	10	100% Ar	0,8
27	2	35	8	Ar + 10% CO <sub>2</sub>	1,0	57	3	33	8	100% CO <sub>2</sub>	0,8
28	2	35	10	Ar + 10% CO <sub>2</sub>	1,0	58	3	33	10	100% CO <sub>2</sub>	0,8
29	2	33	8	Ar + 25% CO <sub>2</sub>	1,0	59	3	35	8	100% CO <sub>2</sub>	0,8
30	2	33	10	Ar + 25% CO <sub>2</sub>	1,0	60	3	35	10	100% CO <sub>2</sub>	0,8

Fonte: Próprio autor.

### 4.3 Equipamentos

Os equipamentos utilizados consistiram numa fonte de soldagem com alimentador de arame, um sistema de movimentação por CNC, cilindros de gases de proteção, uma câmera de alta velocidade, um sistema de aquisição de dados de sinais elétricos, lentes e filtros,

conforme já descrito na Figura 4.1. A Figura 4.2 mostra uma disposição dos equipamentos no laboratório.



Figura 4.2 – Disposição dos equipamentos no laboratório.

A câmera de alta velocidade é do modelo Phantom v411 (Figura 4.3), do fabricante Vision Research. Essa possui um sensor de imagem de tecnologia CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor* - semicondutor de metal-óxido complementar), com capacidade para captar um máximo de 4200 quadros por segundo em uma resolução de 1280 x 800 pixels ou até 600000 quadros por segundo em uma resolução de 128 x 8 pixels, sendo que cada pixel mede 20  $\mu\text{m}$ . Quanto maior a resolução, menor quantidade de quadros por segundo que a câmera consegue gravar. O tempo de exposição à luz mínimo do sensor é de 1  $\mu\text{s}$ , sendo que ela conta com o recurso de EDR (*Extreme Dynamic Range* – Alcance Dinâmico Extremo), que serve para atenuar os efeitos do excesso de brilho em uma imagem com pontos de pouca luz em contraste com pontos de intensa luminosidade, através do uso de diferentes tempos de exposição. Normalmente, o recomendado pelo fabricante é que o EDR seja a metade a um quarto do tempo de exposição. A câmera também conta com o recurso de *auto-trigger* (gatilho automático) em que grava os vídeos após detectar a presença de movimento, e também de *pre/post trigger recording*, onde as imagens antes do *auto-trigger* ser acionado são gravadas, de acordo com um tempo pré-determinado nas suas configurações.



Figura 4.3 – Câmera de alta velocidade.

Uma fonte de soldagem Digiplus A7 450 (Figura 4.4), marca IMC Soldagem, foi utilizada para a execução dos cordões de solda. Essa possui as seguintes características elétricas:

- Tensão de alimentação trifásica 220/380/440 V (rede elétrica do LS&TC: 220 V trifásica);
- tensão em vazio de 50/68/85 V (pré-configurado de fábrica);
- corrente de soldagem de 280 A a 100 % de fator de carga;
- potência nominal de 10 kVA;
- faixa de corrente de 5 a 450 A;
- corrente nominal por fase (220/380/440 V) de 26/15/13 A;
- *ripple* de corrente de 8 A;
- fator de potência de 0,92.



Figura 4.4 – Fonte de soldagem Digiplus A7 450.

Para conseguir uma velocidade de soldagem, ângulos de trabalho e deslocamento e distância do bico de contato à peça da tocha GMAW constantes, utilizou-se um sistema automatizado de soldagem por comando numérico computadorizado (CNC) Tartílope V4 (Figura 4.5), fabricado pela SPS – Sistemas e Processos de Soldagem. Este equipamento consiste num manipulador robótico com movimentação automática em quatro eixos, o que permite a reprodução, com garantia de repetitividade, dos movimentos necessários para a execução de tarefas de soldagem, mesmo as mais complexas. Esse sistema tem como componentes principais um computador, que processa e controla os movimentos, um controle de manipulação da tocha, responsável pela movimentação desta ao longo de uma trajetória pré-estabelecida, uma interface homem-máquina, para programar e configurar o equipamento, e um controle de correção manual, que permite ao operador iniciar, finalizar e ajustar a posição inicial de soldagem.



(a)



(b)

Figura 4.5 – Sistema automático de soldagem CNC Tartílope V4, em (a), o sistema completo e em (b) detalhe do manipulador robótico e suporte para a chapa a ser soldada.

Utilizou-se um sistema de aquisição de dados em soldagem SAP v.4.01 (Figura 4.6), fabricado pela IMC Soldagem, que permite a leitura instantânea de corrente (até 600 A) e tensão (até 100 V) de soldagem, velocidade de alimentação de arame (até 500 m/min) e vazão de gás de proteção (até 20 l/min), em uma taxa de aquisição de 5 kHz. Sensores de medição instantânea de corrente de soldagem, tensão de arco e velocidade de alimentação de arame são posicionados no cabo positivo da fonte de soldagem por meio de um alicate amperímetro

(sensor de corrente de soldagem), na tocha de soldagem, próximo ao bico de contato (sensor de tensão de arco) e em contato com o arame-eletrodo entre os roletes de tração do alimentador de arame (sensor de medição da velocidade de alimentação de arame) enviam os sinais elétricos para o computador.



Figura 4.6 – Sistema de aquisição de dados.

A lente utilizada foi uma AF-S VR Micro-NIKKOR 105 mm f/2.8G IF-ED (Figura 4.7), marca Nikon, com distância focal de 105 mm, abertura máxima f/2.8, abertura mínima f/32, distância focal mínima de 0,314 m, dimensões de 83 x 116 mm. A principal aplicação dessa lente consiste na fotografia de close-ups e macros a uma grande distância.

Para atenuar os efeitos da radiação, utilizaram-se duas lentes filtro sobrepostas de tonalidade W6, com transmitância luminosa nominal de 0,72%, transmitância luminosa máxima de 1,18%, transmitância luminosa mínima de 0,44%, transmitância luminosa no ultravioleta distante de 0,01% e transmitância luminosa no infravermelho de 1,5% cada uma.



Figura 4.7 – Lente AF-S VR Micro-NIKKOR 105 mm f/2.8G IF-ED.

#### 4.4 Sincronização entre Imagens de Alta Velocidade e Sinais Elétricos Adquiridos

Os vídeos gravados pela câmera de alta velocidade dispunham de informações como quadro instantâneo (*Img#*), primeiro (*First*) e último quadro (*Last*), número do quadro a partir

do primeiro quadro do vídeo (*Img#FromFirst*), resolução de imagem (*AcqRes*), quantidade de quadros por segundo (*Rate*), tempo de exposição (*Exp*), alcance dinâmico extremo (*EDR*), duração (*Durat*) e nome do arquivo (*File*), como pode ser visto na Figura 4.8. A sincronização das imagens de alta velocidade e dos sinais elétricos foi possível devido ao tempo total do vídeo e seu número total de quadros.

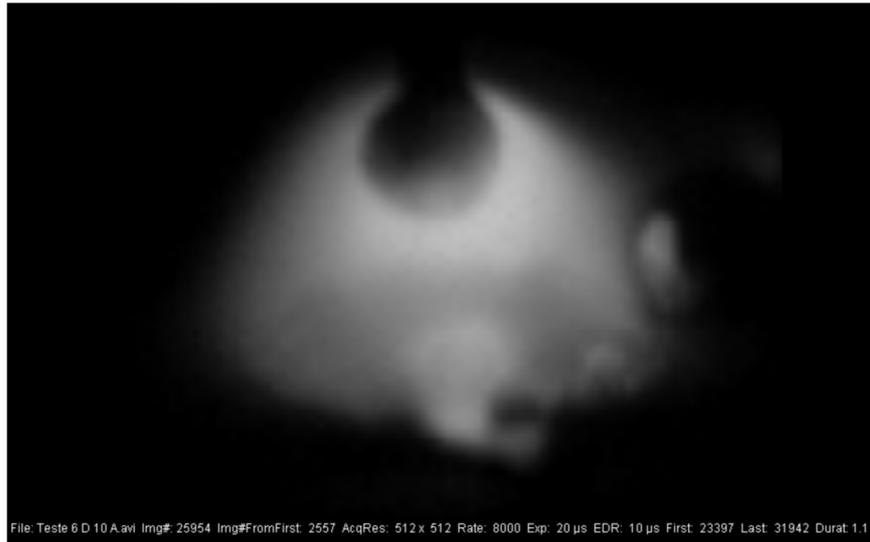


Figura 4.8 – Imagem instantânea de alta velocidade de uma gota de metal de adição.

A Figura 4.8 corresponde aos sinais elétricos instantâneos para o quadro número 25954. De acordo com o oscilograma (Figura 4.9) de tensão e corrente de soldagem, nesse quadro esses valores correspondiam a 30,2 V e 213 A, respectivamente, além de uma velocidade de alimentação de arame de 9,1 m/min (151,67 mm/s) nesse instante.

A Figura 4.10 tem exemplos de imagens instantâneas de alta velocidade do experimento 6 D 10 HV, onde (a) corresponde a uma gota de metal fundido sendo transferida, (b) a gota seguinte ainda presa a arame-eletrodo, (c) formação do pescoço entre a gota e o arame, (d) a gota de metal fundido, ainda presa ao arame-eletrodo, prestes a tocar a poça de fusão, (e) curto-circuito após a gota tocar a poça de fusão, (f) nova gota de metal fundido sendo transferida após o curto-circuito. Logo, é possível relacionar tais imagens com o oscilograma de tensão e corrente em cada instante de tempo, respectivamente, 12,949 s para o instante (a), 12,991 s para (b), 13,009 s para (c), 13,019 s para (d), 13,022 s para (e), 13,029 s para (f).

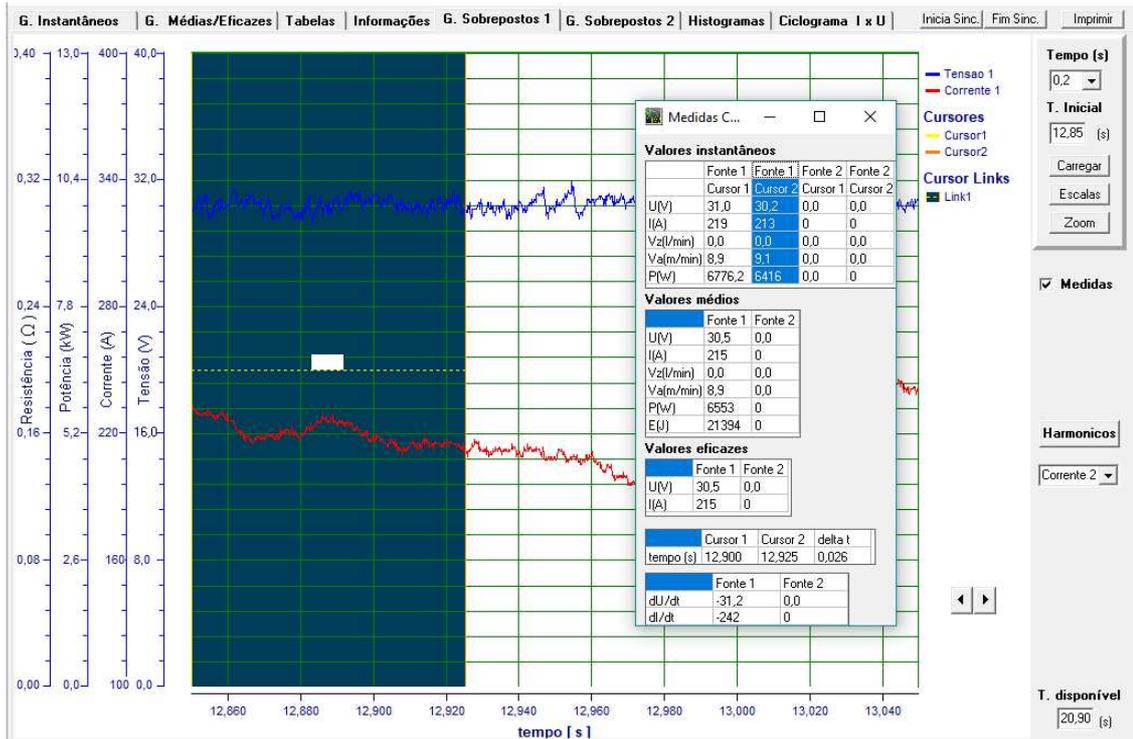


Figura 4.9 – Oscilograma de tensão e corrente de soldagem com valores correspondentes ao instante 12,925 s (quadro 25954).

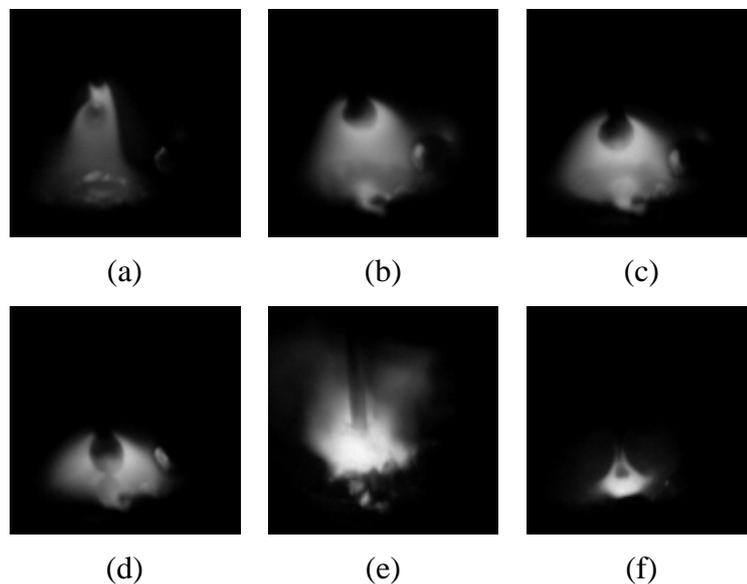


Figura 4.10 – Imagens instantâneas de alta velocidade de uma gota sendo transferida.

A Figura 4.11 mostra uma relação entre imagens instantâneas de alta velocidade com os sinais elétricos adquiridos através do oscilograma de tensão e corrente.

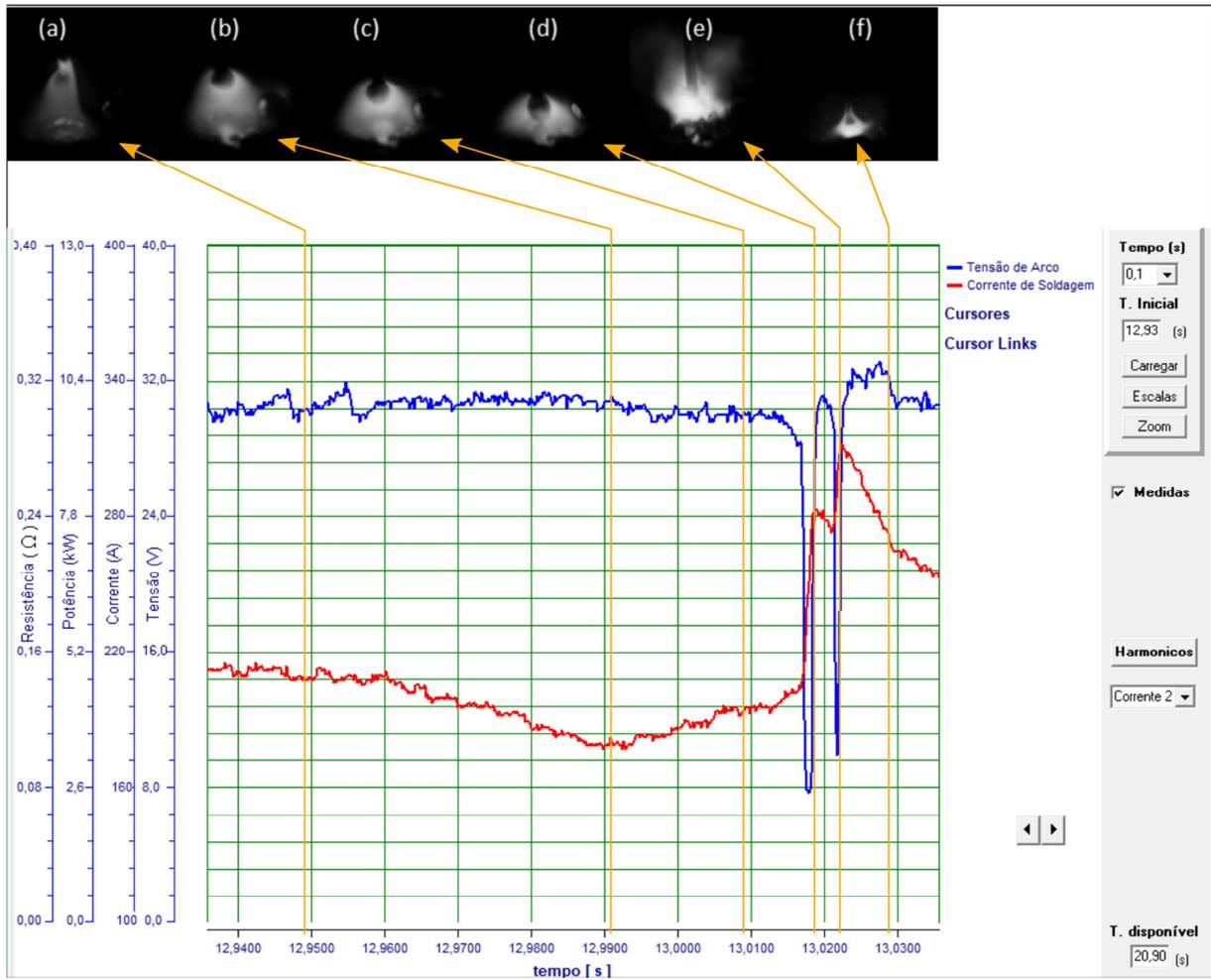


Figura 4.11 – Valores instantâneos de tensão e corrente de soldagem para as imagens da Figura 4.10.

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os resultados obtidos nas diferentes etapas do trabalho são apresentados neste capítulo, bem como a discussão pertinente aos mesmos. As duas etapas dos experimentos foram analisadas: os ensaios com proteção gasosa pela mistura de Ar + 10% CO<sub>2</sub> e os ensaios que envolveram os gases de proteção puros (Ar e CO<sub>2</sub>) e as misturas gasosas (Ar + 2% O<sub>2</sub>, Ar + 10% CO<sub>2</sub> e Ar + 25% CO<sub>2</sub>), todos com o processo de soldagem GMAW, empregando o arame-eletrodo AWS ER70S-6 de três diferentes diâmetros (0,8 1,0 e 1,2 mm). Mapas dos modos de transferência do metal foram elaborados para cada combinação de metal de adição e gás de proteção, assim como suas misturas gasosas.

### **5.1 Resultados para os Experimentos com a Mistura Gasosa Ar + 10% CO<sub>2</sub>**

Conforme já descrito na Tabela 4.1, os experimentos com a mistura gasosa de Ar + 10% CO<sub>2</sub> (C10) como gás de proteção foram executados em três blocos, sendo que cada bloco era executado em um dia de trabalho. A aleatorização seguiu descrita na Tabela 4.1, sendo que os experimentos com os parâmetros de soldagem inferiores (LV) foram executados antes dos parâmetros de soldagem superiores (HV) em cada bloco. A vazão de gás de proteção e a distância do bico de contato à peça, 12 l/min e 20 mm, respectivamente, se mantiveram constantes para todos os experimentos.

Nos subcapítulos seguintes, inicialmente serão analisados os resultados dos experimentos com parâmetros de soldagem inferiores, em seguida, a análise dos resultados dos experimentos com os parâmetros de soldagem superiores.

#### **5.1.1 Resultados para os Experimentos com Parâmetros de Soldagem Inferiores (LV)**

A Figura 5.1 apresenta um mapa dos modos de transferência do metal, com as médias da tensão de arco em função das médias de corrente de soldagem, e a Figura 5.2 apresenta o mapa dos modos de transferência do metal com as médias da tensão de arco em função das médias de densidade de corrente, para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 de 0,8 1,0 e 1,2 mm, empregando a mistura gasosa de Ar + 10% CO<sub>2</sub> como gás de proteção.

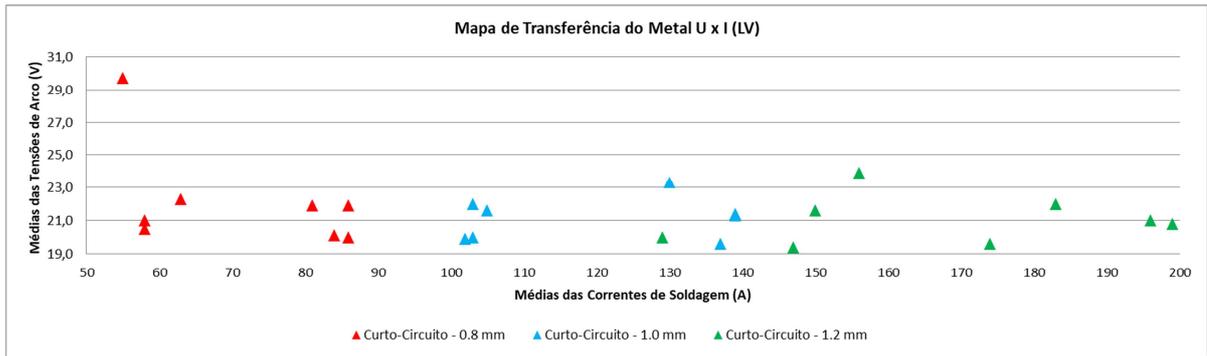


Figura 5.1 – Mapas de transferência do metal das médias de tensão de arco em função das médias de corrente de soldagem para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 (0,8 1,0 e 1,2 mm) para os experimentos com parâmetros de soldagem inferiores (LV).

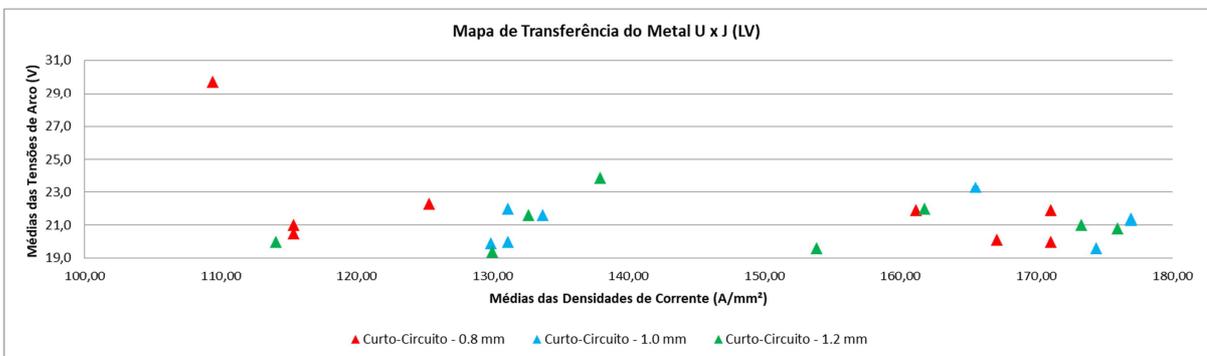


Figura 5.2 – Mapas de transferência do metal das médias de tensão de arco em função das médias de densidade de corrente para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 (0,8 1,0 e 1,2 mm) para os experimentos com parâmetros de soldagem inferiores (LV).

Para essa faixa de parâmetros de soldagem, todos os experimentos apresentaram a transferência do metal por curto-circuito. Para o arame-eletrodo de menor diâmetro (0,8 mm), a média de corrente de soldagem oscilou entre 55 e 86 A, com a presença constante da formação de grandes gotas na extremidade do arame-eletrodo, que tocavam a poça de fusão, causando o curto-circuito, antes de conseguir se destacar.

Para o arame-eletrodo de 1,0 mm, os experimentos com maiores médias de corrente de soldagem (4 D 10 LV e 8 D 10 LV), em torno de 139 A, tiveram a formação de grandes gotas que se destacaram do arame-eletrodo, como na transferência do metal globular. Porém, isso ocorreu pouquíssimas vezes, sendo que a maior parte da execução do cordão de solda apresentou transferência do metal por curto-circuito.

Finalmente, para o arame-eletrodo de maior diâmetro (1,2 mm), mais uma vez todos os experimentos apresentaram a transferência do metal por curto-circuito. A particularidade

para esse arame consistiu na formação de grandes gotas e sua transferência por voo livre (transferência globular), assim como no arame-eletrodo de 1,0 mm, entretanto, com maior frequência, mais especificamente no começo e no final do cordão de solda. Os experimentos com maiores médias de corrente de soldagem (4 D 12 LV e 8 D 12 LV) foram os que tiveram maior quantidade de períodos de transferência globular, mas sem ocorrer de forma cíclica, o que não permite a sua classificação como transferência do metal intermitente curto-circuito/globular.

Os parâmetros de soldagem pré-ajustados na fonte de soldagem (tensão de arco e velocidade de alimentação de arame) favoreceram a ocorrência de transferência exclusivamente por curto-circuito para esses experimentos. A velocidade de alimentação de arame maior que a taxa de fusão de arame faz com que esse possa ficar próximo à poça de fusão. Isso combinado com uma baixa corrente de soldagem torna inevitável a transferência do metal por curto-circuito. Além disso, pela quantidade de períodos de curto-circuito e de arco aberto em relação aos experimentos com parâmetros de soldagem superiores, que obtiveram outros modos de transferência, corrobora o fato de a transferência ocorrer por curto-circuito, conforme os gráficos das Figuras 5.3.

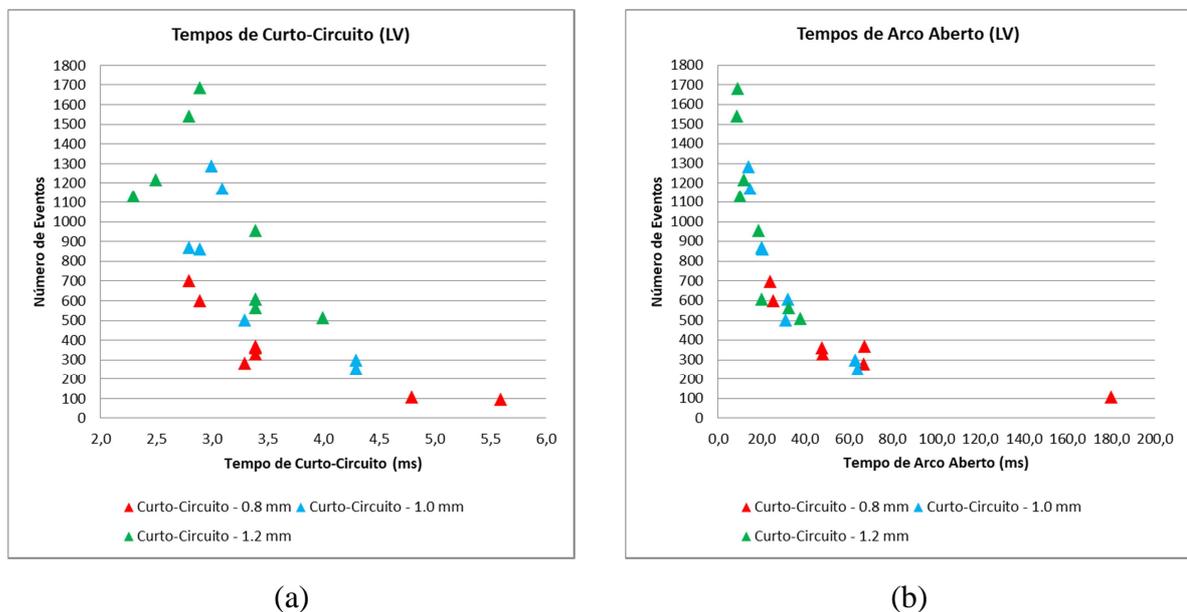


Figura 5.3 – Tempos de curto-circuito (a) e arco aberto (b) para os experimentos com parâmetros de soldagem inferiores (LV).

### 5.1.2 Resultados para os Experimentos com Parâmetros de Soldagem Superiores (HV)

A Figura 5.4 apresenta um mapa dos modos de transferência do metal, com as médias da tensão de arco em função das médias de corrente de soldagem, e a Figura 5.5 apresenta o mapa dos modos de transferência do metal com as médias da tensão de arco em função das médias de densidade de corrente, para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 de 0,8 1,0 e 1,2 mm, empregando a mistura gasosa de Ar + 10% CO<sub>2</sub> como gás de proteção.

O arame-eletrodo de 0,8 mm obteve uma transferência do metal globular para todos os experimentos. Entre as particularidades nesse caso, houve uma tendência de passagem para curto-circuito e aerossol, não chegando a ser intermitente, para os experimentos cujo pré-ajuste da velocidade de alimentação de arame no nível superior (6 m/min). A gota de metal fundido que se forma na ponta do arame tem a sua resistência elétrica aumentada, o que torna a corrente de soldagem menor, dificultando a passagem para aerossol. Junto a isso, tem o fato de a presença do dióxido de carbono na mistura gasosa do gás de proteção também contribuir para o aumento da corrente de transição para aerossol. Pelo fato da gota se destacar, a corrente de soldagem volta a aumentar, restabelecendo as condições iniciais. Nos experimentos com menor velocidade de alimentação de arame, a formação de gotas grandes, que demoravam a cair em direção à poça de fusão, possivelmente devido à repulsão causada pela quantidade de fumos gerados.

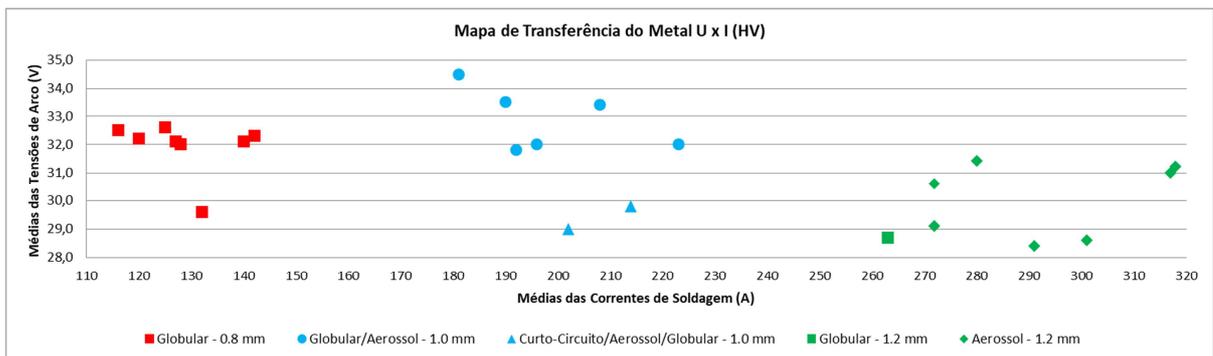


Figura 5.4 – Mapas de transferência do metal das médias de tensão de arco em função das médias de corrente de soldagem para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 (0,8 1,0 e 1,2 mm) para os experimentos com parâmetros de soldagem superiores (HV).

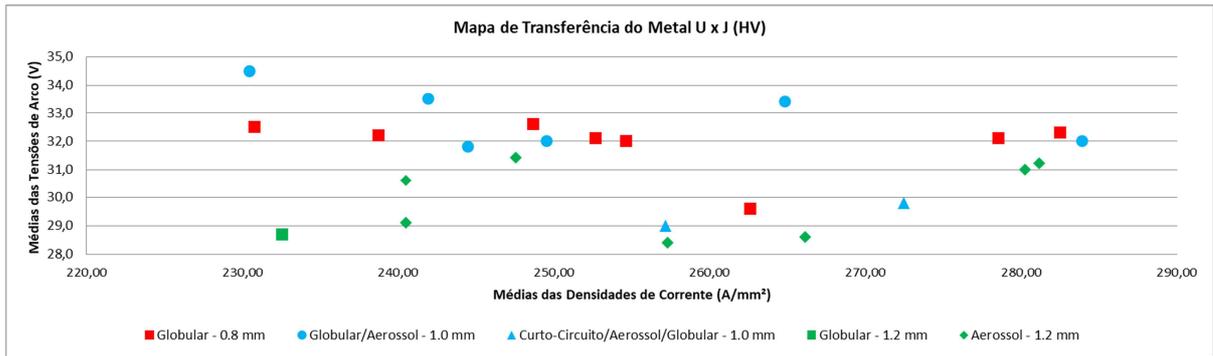


Figura 5.5 – Mapas de transferência do metal das médias de tensão de arco em função das médias de densidade de corrente para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 (0,8 1,0 e 1,2 mm) para os experimentos com parâmetros de soldagem superiores (HV).

O arame-eletrodo de 1,0 mm apresentou intermitência em todos os experimentos, sendo que em dois casos (2 D 10 A e 6 D 10 A), com menores médias de tensão de arco, tiveram transferência intermitente do metal curto-circuito/globular/aerossol. Nesses dois casos, uma grande gota era formada na extremidade do arame-eletrodo, o que causava uma redução na corrente de soldagem devido à resistência gerada pelo tamanho da gota. Isso causa uma redução na taxa de fusão de arame enquanto a gota se desloca em direção à poça de fusão. Quando esta se destaca do arame-eletrodo, a consequência é um aumento na extensão do eletrodo, resultando na diminuição da resistência elétrica, voltando a aumentar a corrente de soldagem. Entretanto, esse aumento na corrente de soldagem não é suficiente para sobrepor a corrente de transição globular/aerossol, ocorrendo um curto-circuito seguido de uma alta corrente de soldagem, que permanece temporariamente acima da corrente de transição, com as gotículas se transferindo por aerossol. Com isso, a taxa de fusão de arame se torna momentaneamente maior que a velocidade de alimentação de arame, aumentando o comprimento do arco. Porém, isso causa um aumento na resistência na coluna do arco, o que reduz a corrente de soldagem, restabelecendo a transferência globular e iniciando um novo ciclo. Nos experimentos que a transferência foi apenas globular/aerossol, o curto-circuito após o destacamento da gota de metal fundido não ocorria, visto que a corrente de soldagem era imediatamente aumentada com a redução da resistência do arame-eletrodo, ultrapassando a corrente de transição, porém, retornando ao estado globular com o aumento da resistência na coluna do arco.

O arame-eletrodo de 1,2 mm apresentou uma transferência do metal por aerossol para quase todos os experimentos, exceto por um caso (1 D 12 A) com os menores valores de tensão de arco e velocidade de alimentação de arame pré-ajustados, que apresentou

transferência globular. O outro experimento que tinha os mesmos parâmetros de soldagem pré-ajustados que esse (5 D 12 A) apresentou transferência por aerossol, mas com períodos de transferência globular aleatórios.

Ao contrário dos experimentos com os parâmetros inferiores de soldagem (LV), em que a transferência do metal ocorreu exclusivamente por curto-circuito, em que houve um grande número de curtos-circuitos, como pôde ser conferido na Figura 5.3. Para os experimentos dos parâmetros de soldagem superiores (HV), que não apresentaram transferência por curto-circuito, esse número foi bem menor, como pode ser conferido nas Figuras 5.6 e 5.7.

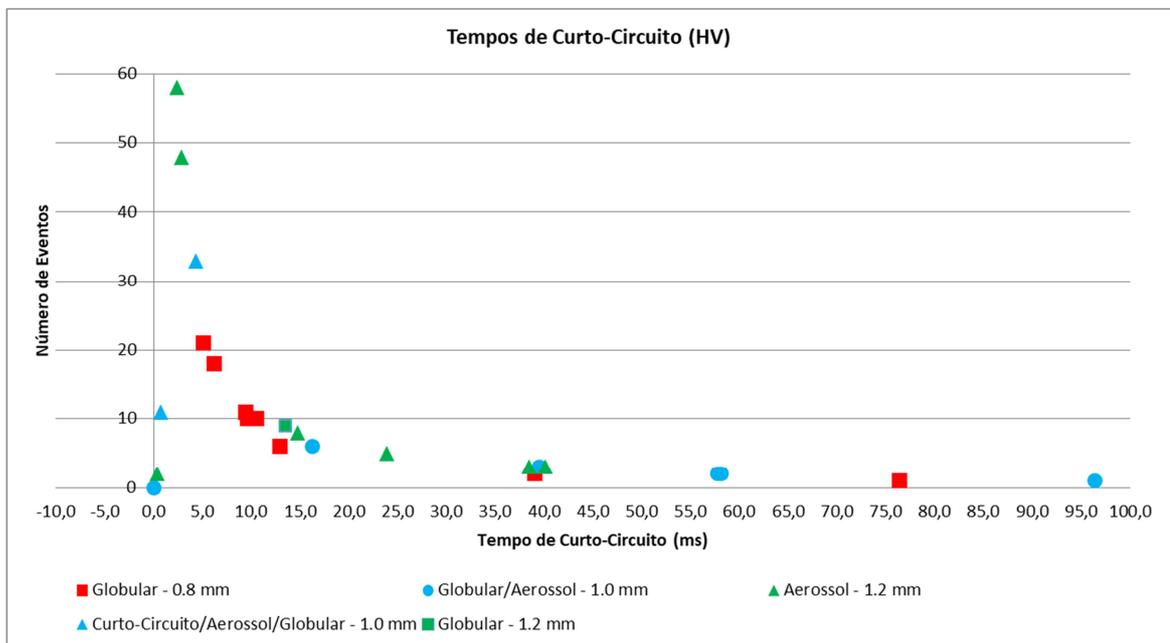


Figura 5.6 – Tempos de curto-circuito para os experimentos com parâmetros de soldagem superiores (HV).

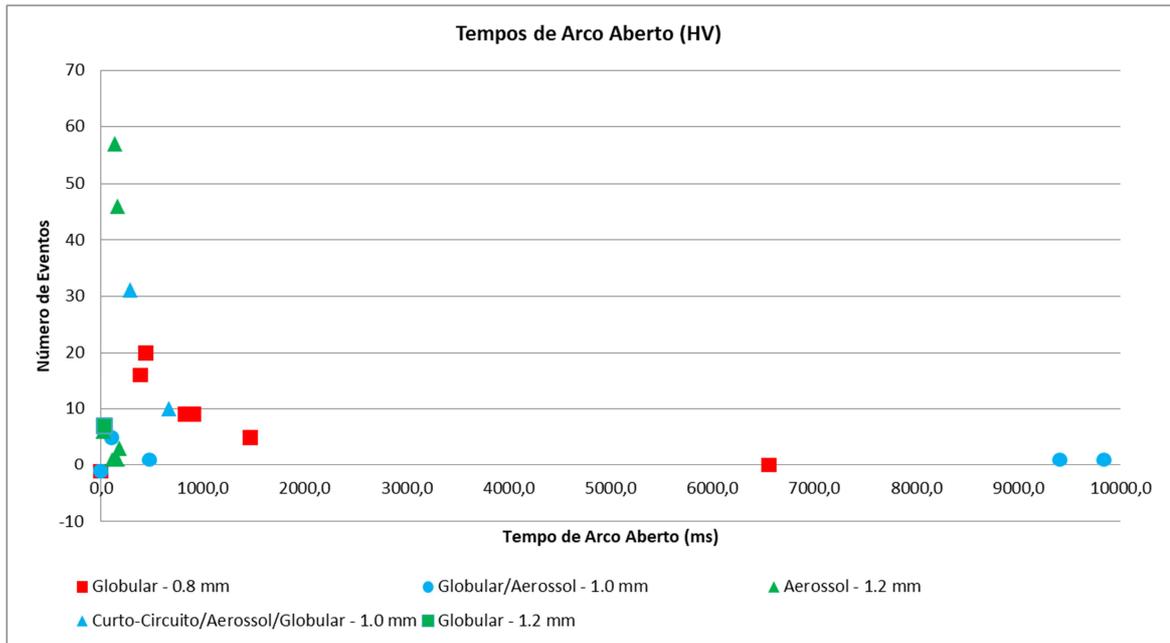


Figura 5.7 – Tempos de arco aberto para os experimentos com parâmetros de soldagem superiores (HV).

## 5.2 Resultados para os Experimentos com Gases Puros e Misturas Gasosas

Conforme já descrito na Tabela 4.2, os experimentos com gases puros e misturas gasosas empregadas como gás de proteção foram executados em três blocos, sendo que cada bloco era executado em um dia de trabalho. A aleatorização seguiu a mesma ordem dos experimentos com a mistura gasosa de Ar + 10% CO<sub>2</sub>. A vazão de gás de proteção e a distância do bico de contato à peça, 12 l/min e 20 mm, respectivamente, se mantiveram constantes para todos os experimentos.

Os primeiros subcapítulos contêm a análise dos resultados de cada gás de proteção individualmente. Após, a análise dos resultados foi separada por diâmetro de arame-eletrodo.

### 5.2.1 Resultados para o Gás de Proteção Ar + 2% O<sub>2</sub>

A Figura 5.8 apresenta um mapa dos modos de transferência do metal, com as médias da tensão de arco em função das médias de corrente de soldagem, e a Figura 5.9 apresenta o mapa dos modos de transferência do metal com as médias da tensão de arco em função das médias de densidade de corrente, para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 de 0,8 1,0 e 1,2 mm, empregando a mistura gasosa de Ar + 2% O<sub>2</sub> como gás de proteção.

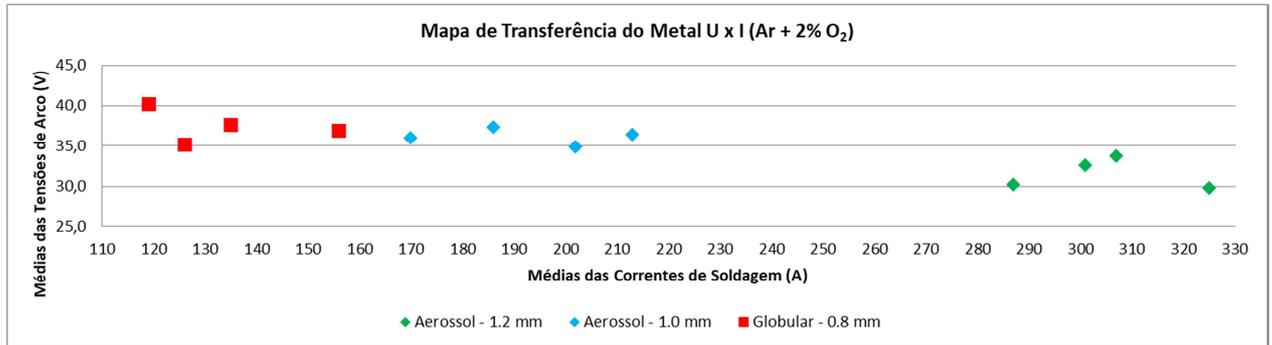


Figura 5.8 – Mapas de transferência do metal das médias de tensão de arco em função das médias de corrente de soldagem para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 (0,8 1,0 e 1,2 mm) com a mistura gasosa de Ar +2% O<sub>2</sub> como gás de proteção.

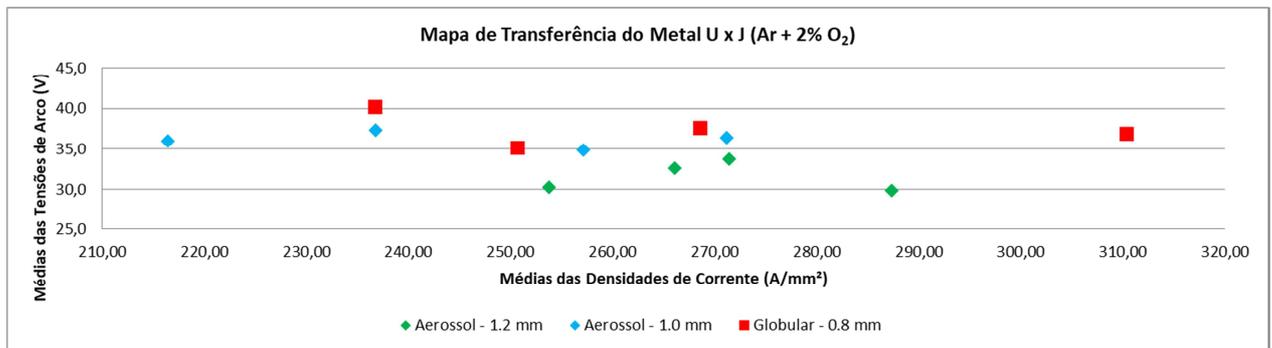


Figura 5.9 – Mapas de transferência do metal das médias de tensão de arco em função das médias de densidade de corrente para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 (0,8 1,0 e 1,2 mm) com a mistura gasosa de Ar +2% O<sub>2</sub> como gás de proteção.

Pode-se observar que a transferência do metal por aerossol ocorre acima de 170 A para o arame com diâmetro de 1,0, em um intervalo de 170 a 220 A. A presença de grandes gotas com diâmetro maior que o do arame foi notado, seguida por um fluxo contínuo de pequenas gotículas, típicas da transferência por aerossol, no início dos cordões de solda que apresentaram os menores valores médios de corrente de soldagem.

Ao executar testes com o arame de 1,2 mm, as imagens exibiram a transferência do metal por aerossol em todos os casos, numa faixa de corrente média de soldagem que variou entre 285 e 315 A. O comprimento do arco foi ligeiramente maior para os experimentos com velocidade de alimentação de arame mais baixa.

Entretanto, para o arame com menor diâmetro (0,8 mm), a faixa média de corrente de soldagem variou de 115 a 155 A, o que resultou numa transferência do metal globular, com

gotas grandes e de queda lenta até a poça de fusão para os experimentos com menores valores de velocidade de alimentação de arame (experimentos 41 e 43). Os dois outros testes para esse diâmetro de arame resultaram em gotas menores e mais numerosas, com uma tendência a passar para transferência por aerossol. A intermitência cíclica entre os modos de transferência globular e aerossol não foi detectada usando a proteção gasosa dessa mistura para qualquer um dos diâmetros de arame.

### 5.2.2 Resultados para o Gás de Proteção Ar + 10% CO<sub>2</sub>

A Figura 5.10 apresenta um mapa dos modos de transferência do metal, com as médias da tensão de arco em função das médias de corrente de soldagem, e a Figura 5.11 apresenta o mapa dos modos de transferência do metal com as médias da tensão de arco em função das médias de densidade de corrente, para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 de 0,8 1,0 e 1,2 mm, empregando a mistura gasosa de Ar + 10% CO<sub>2</sub> como gás de proteção.

No primeiro arame testado (1,2 mm), o modo de transferência do metal por aerossol ocorreu apenas para as médias mais altas de corrente e tensão (experimento 8). Apesar da alta média de corrente de soldagem (260 A), para o experimento 6 o modo de transferência detectado foi globular, isso devido às altas médias de velocidade de soldagem (em torno de 140 mm/s), o que resultou num comprimento de arco curto, com as gotas de metal fundido sendo destacadas próximas à poça de fusão, quase como em uma transferência por curto-circuito. Os outros dois experimentos (5 e 7) resultaram numa oscilação entre globular e aerossol, em uma alternância cíclica entre esses modos do início ao fim do cordão de solda.

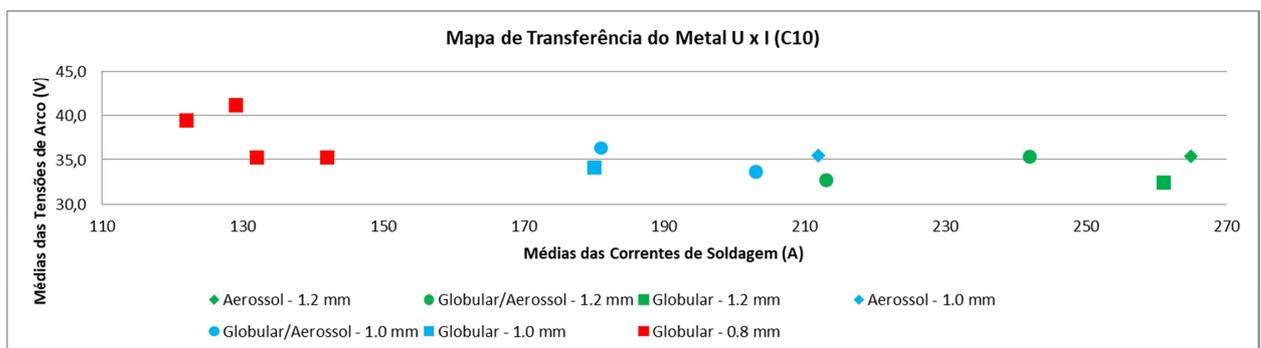


Figura 5.10 – Mapas de transferência do metal das médias de tensão de arco em função das médias de corrente de soldagem para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 (0,8 1,0 e 1,2 mm) com a mistura gasosa de Ar +10% CO<sub>2</sub> (C10) como gás de proteção.

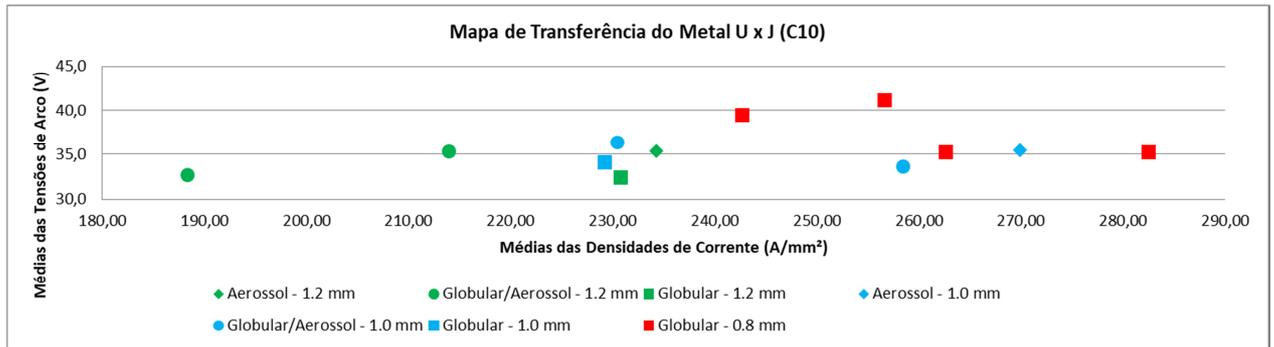


Figura 5.11 – Mapas de transferência do metal das médias de tensão de arco em função das médias de densidade de corrente para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 (0,8 1,0 e 1,2 mm) com a mistura gasosa de Ar +10% CO<sub>2</sub> (C10) como gás de proteção.

Para o arame de 1,0 mm, a alta média de valores de corrente de soldagem (experimento 28) resultou na transferência por aerossol, com a mesma média de tensão de arco do experimento 8. Para os dois experimentos que tiveram intermitência entre globular e aerossol, ambos exibiram a formação de gotas grandes, seguidas por um fluxo de gotículas de metal, ao longo de todo cordão de solda. Para o cordão de solda com os menores valores médios de corrente de soldagem ocorreu a formação de gotas muito próximas da poça de fusão, resultando em transferência globular, com poucos momentos tendendo a iniciar o fluxo de gotículas típicas do aerossol.

Para o arame de menor diâmetro (0,8 mm) as médias de corrente de soldagem oscilaram entre 120 e 145 A, resultando em transferência do metal globular para todos os casos, com grandes gotas ovais que caíam lentamente, que permaneciam presas ao arame-eletrodo pelos seus pescoços e oscilando, nos instantes antes de cair em direção à poça de fusão, onde giravam ao redor do seu próprio eixo ao longo da queda.

### 5.2.3 Resultados para o Gás de Proteção Ar + 25% CO<sub>2</sub>

A Figura 5.12 apresenta um mapa dos modos de transferência do metal, com as médias da tensão de arco em função das médias de corrente de soldagem, e a Figura 5.13 apresenta o mapa dos modos de transferência do metal com as médias da tensão de arco em função das médias de densidade de corrente, para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 de 0,8 1,0 e 1,2 mm, empregando a mistura gasosa de Ar + 25% CO<sub>2</sub> como gás de proteção.

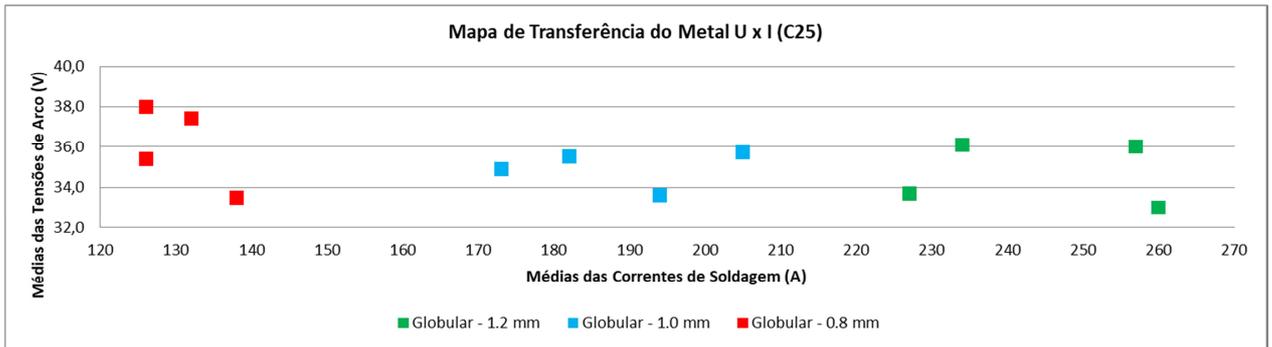


Figura 5.12 – Mapas de transferência do metal das médias de tensão de arco em função das médias de corrente de soldagem para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 (0,8 1,0 e 1,2 mm) com a mistura gasosa de Ar +25% CO<sub>2</sub> (C25) como gás de proteção.

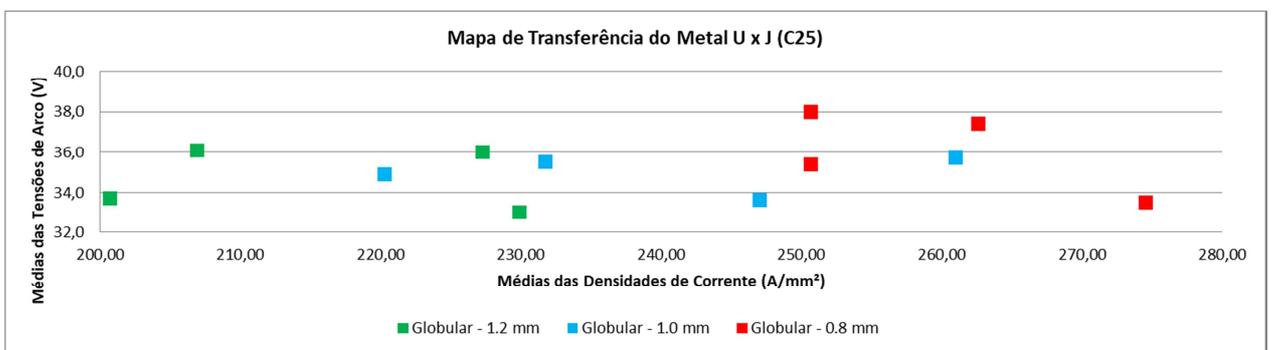


Figura 5.13 – Mapas de transferência do metal das médias de tensão de arco em função das médias de densidade de corrente para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 (0,8 1,0 e 1,2 mm) com a mistura gasosa de Ar +25% CO<sub>2</sub> (C25) como gás de proteção.

O modo de transferência globular foi detectado para todos os arames, com grandes gotas formadas, transferidas de forma bem lenta em direção à poça de fusão. Porém, não houve nenhum caso de transferência intermitente ao utilizar essa mistura gasosa como gás de proteção.

Nos experimentos 10 e 12, com o arame de 1,2 mm, por algumas vezes um fluxo contínuo de gotículas esteve prestes a iniciar e chegava a transferir umas poucas gotículas por aerossol, entretanto, isso logo cessava e a formação e transferência de grandes gotas voltava a ocorrer. Além disso, esse fato ocorreu de forma aleatória, não tinha uma regularidade.

#### 5.2.4 Resultados para o Gás de Proteção Ar

A Figura 5.14 apresenta um mapa dos modos de transferência do metal, com as médias da tensão de arco em função das médias de corrente de soldagem, e a Figura 5.15 apresenta o mapa dos modos de transferência do metal com as médias da tensão de arco em função das médias de densidade de corrente, para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 de 0,8, 1,0 e 1,2 mm, empregando o gás Ar puro como gás de proteção.

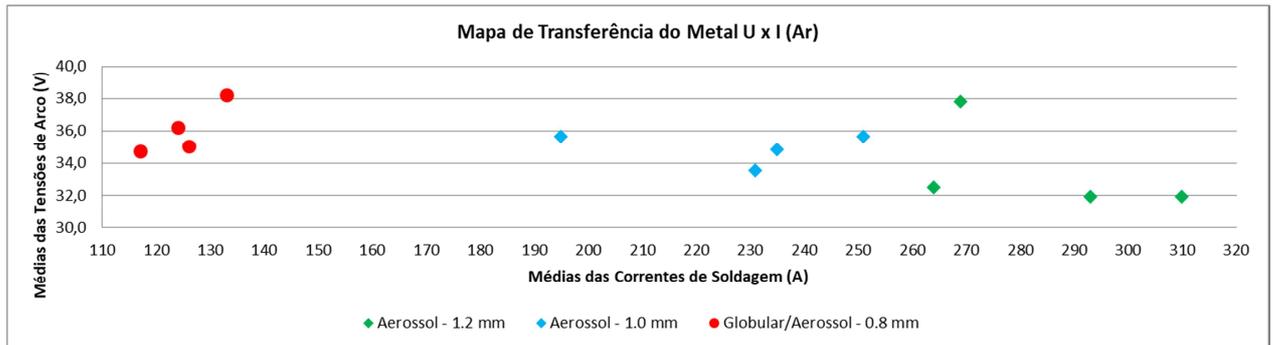


Figura 5.14 – Mapas de transferência do metal das médias de tensão de arco em função das médias de corrente de soldagem para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 (0,8 1,0 e 1,2 mm) com Ar como gás de proteção.

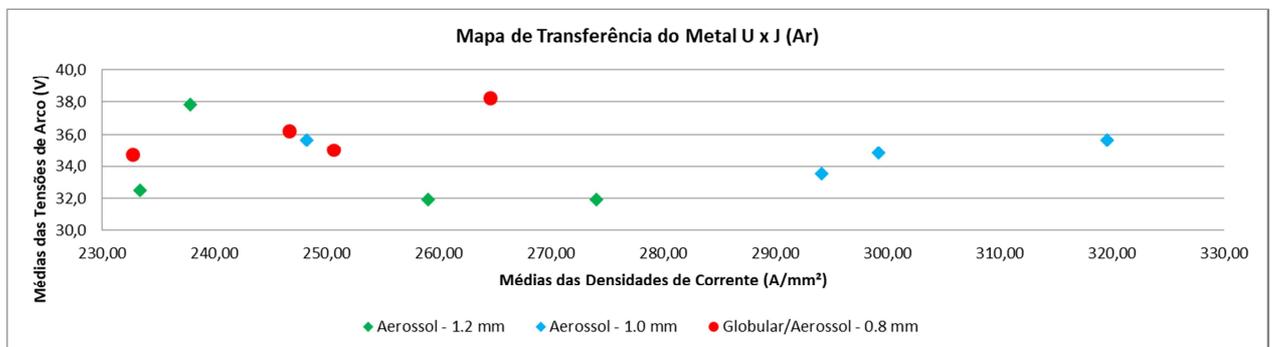


Figura 5.15 – Mapas de transferência do metal das médias de tensão de arco em função das médias de densidade de corrente para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 (0,8 1,0 e 1,2 mm) com Ar como gás de proteção.

Os experimentos 14 e 16 com arame de 1,2 mm tiveram a presença de transferência do metal por aerossol rotacional no início do cordão de solda, sendo em breve alterado para aerossol contínuo até o final da sua execução. Esse comportamento de aerossol rotacional não foi detectado para os demais experimentos com arame de 1,2 mm, tampouco para as soldas com arame de 1,0 e 0,8 mm.

Para o arame de 1,0 mm, a transferência por aerossol projetada ocorreu em todos os experimentos, enquanto que o arame de 0,8 mm apresentou intermitência entre os modos de transferência globular e aerossol para todos os experimentos. O ciclo iniciava com a formação de uma grande gota que após a sua transferência era seguido por um fluxo contínuo de gotículas, depois novamente retornando a formar grandes gotas, isso sucessivamente.

### 5.2.5 Resultados para o Gás de Proteção CO<sub>2</sub>

A Figura 5.16 apresenta um mapa dos modos de transferência do metal, com as médias da tensão de arco em função das médias de corrente de soldagem, e a Figura 5.17 apresenta o mapa dos modos de transferência do metal com as médias da tensão de arco em função das médias de densidade de corrente, para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 de 0,8 1,0 e 1,2 mm, empregando o gás CO<sub>2</sub> puro como gás de proteção.

O experimento 18 do arame de 1,2 mm apresentou dificuldades para a abertura do arco, o que explica o valor médio de tensão de arco ser tão elevado (acima de 55 V).

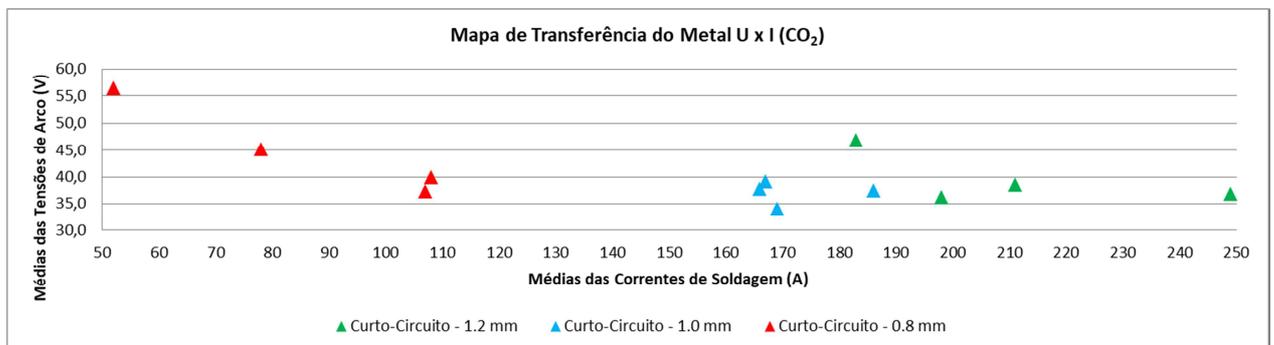


Figura 5.16 – Mapas de transferência do metal das médias de tensão de arco em função das médias de corrente de soldagem para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 (0,8 1,0 e 1,2 mm) com a mistura gasosa de CO<sub>2</sub> como gás de proteção.

Os demais experimentos ocorreram sem problemas, com o arco bem curto e com o arame praticamente tocando a poça. As gotas chegavam a tocar a poça de fusão ainda presas ao arame, o que resultou em transferência por curto-circuito para todos os experimentos envolvendo esse gás de proteção.

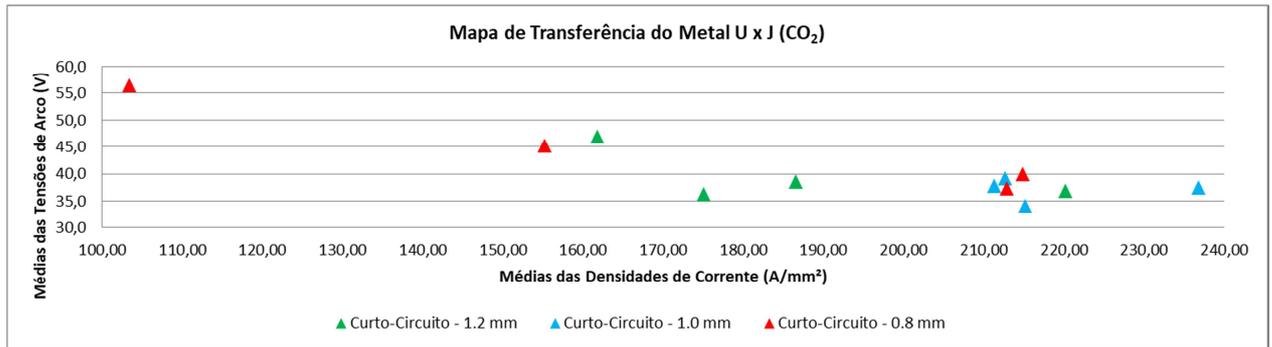


Figura 5.17 – Mapas de transferência do metal das médias de tensão de arco em função das médias de densidade de corrente para os arames-eletrodos AWS ER70S-6 (0,8 1,0 e 1,2 mm) com a mistura gasosa de CO<sub>2</sub> como gás de proteção.

### 5.2.6 Resultados para o Arame-Eletrodo AWS ER70S-6 (0,8 mm)

A Figura 5.18 apresenta os mapas dos modos de transferência do metal para o arame-eletrodo AWS ER70S-6 com diâmetro de 0,8 mm, das médias de tensão de arco pelas médias de corrente de soldagem, enquanto que a Figura 5.19 apresenta os mapas dos modos de transferência do metal do mesmo arame com as médias de tensão de arco pelas médias de densidade de corrente.

O modo de transferência do metal globular foi identificado para as misturas gasosas de Ar + 2% O<sub>2</sub>, Ar + 10% CO<sub>2</sub> (C10) e Ar + 25% CO<sub>2</sub> (C25). Para esse diâmetro de arame, o uso de argônio puro como gás de proteção apresentou intermitência entre a formação de grandes gotas de metal, típico da transferência globular, com o fluxo de gotículas da transferência por aerossol, o que se explica pela ausência de dióxido de carbono e, pelo aumento da resistividade elétrica, as gotículas se tornarem maiores na coluna do arco. Além disso, segundo Freeman e Eagar, 1992, a ausência de oxigênio no argônio puro resulta em gotículas menores do que na mistura de Ar + 2% O<sub>2</sub>, logo, a adição de oxigênio acarreta num aumento do tamanho da gota [Jönsson, 1993], pois esse diminui a tensão superficial, o que diminui a retenção da gota na ponta do arame-eletrodo em relação ao argônio puro [Jönsson et al., 1995]. Consequentemente, o argônio puro apresentou uma grande formação de gotículas que tinham um aumento na resistividade elétrica e redução na corrente de soldagem, até o instante que atingiam a poça de fusão, causando um breve curto-circuito, se destacando e aumentando o comprimento energizado do eletrodo, seguido pela redução da resistência elétrica e aumento da corrente de soldagem novamente, ultrapassando a corrente de transição até atingir a zona de transferência do metal por aerossol.

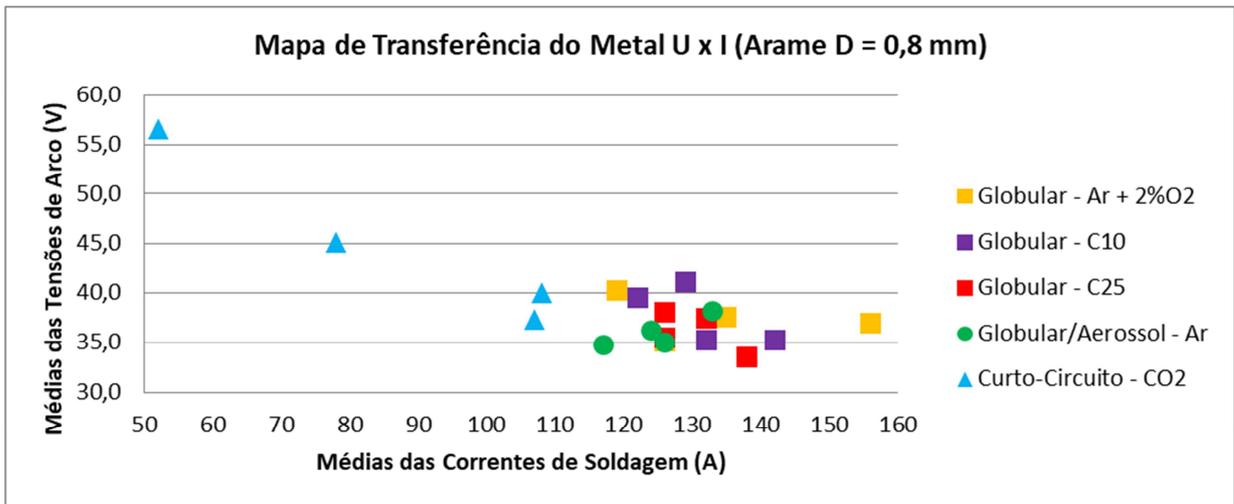


Figura 5.18 – Mapas dos modos de transferência do metal para o arame-eletrodo AWS ER70S-6 (0,8 mm) das médias de tensão de arco pelas médias de corrente de soldagem.

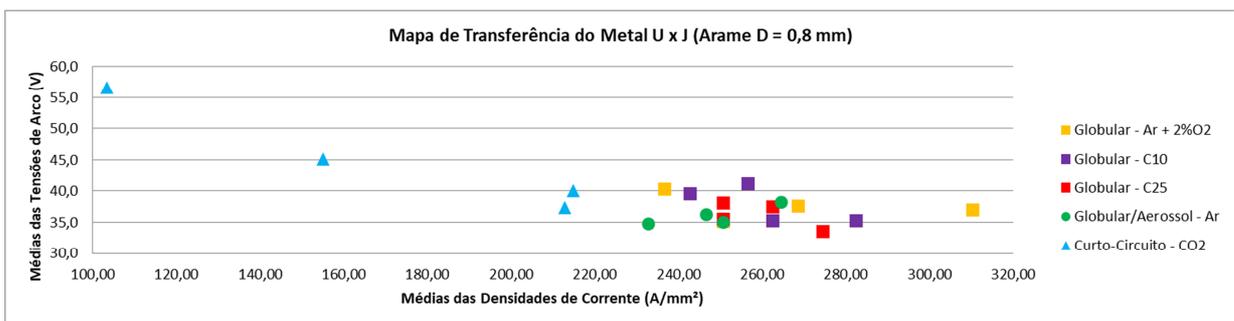


Figura 5.19 – Mapas dos modos de transferência do metal para o arame-eletrodo AWS ER70S-6 (0,8 mm) das médias de tensão de arco pelas médias de densidade de corrente.

O dióxido de carbono puro, como esperado, apresentou a transferência por curto-circuito, com baixos valores de correntes de soldagem em relação aos outros gases e misturas gasosas. Particularmente, esse arame resultou em cordões de solda de baixa qualidade, com uma grande presença de salpicos e falta de penetração que puderam ser verificados por inspeção visual. Além disso, conforme a Figura 5.18, os resultados das médias de tensão de arco e corrente de soldagem apresentaram uma grande dispersão entre os experimentos realizados com esse gás de proteção, bem diferente dos resultados apresentados pelos demais gases de proteção e misturas gasosas.

### 5.2.7 Resultados para o Arame-Eletrodo AWS ER70S-6 (1,0 mm)

A Figura 5.20 apresenta os mapas dos modos de transferência do metal para o arame-eletrodo AWS ER70S-6 com diâmetro de 1,0 mm, das médias de tensão de arco pelas médias de corrente de soldagem, enquanto que a Figura 5.21 apresenta os mapas dos modos de transferência do metal do mesmo arame com as médias de tensão de arco pelas médias de densidade de corrente.

Para a mistura gasosa de Ar + 2% O<sub>2</sub>, ocasionalmente uma grande gota com diâmetro maior que o arame-eletrodo se formava, e tinha a queda em direção à poça de fusão bem lenta, seguida pelo fluxo de gotículas se transferindo por aerossol, entretanto, não em alternância cíclica como apresentado pela mistura gasosa de Ar + 10% CO<sub>2</sub>.

O argônio puro como gás de proteção apresentou as maiores densidades de corrente entre todos os experimentos, variando entre 300 e 320 A/mm<sup>2</sup>, sendo que os demais gases de proteção e misturas gasosas ficaram numa faixa de 210 a 270 A/mm<sup>2</sup>.

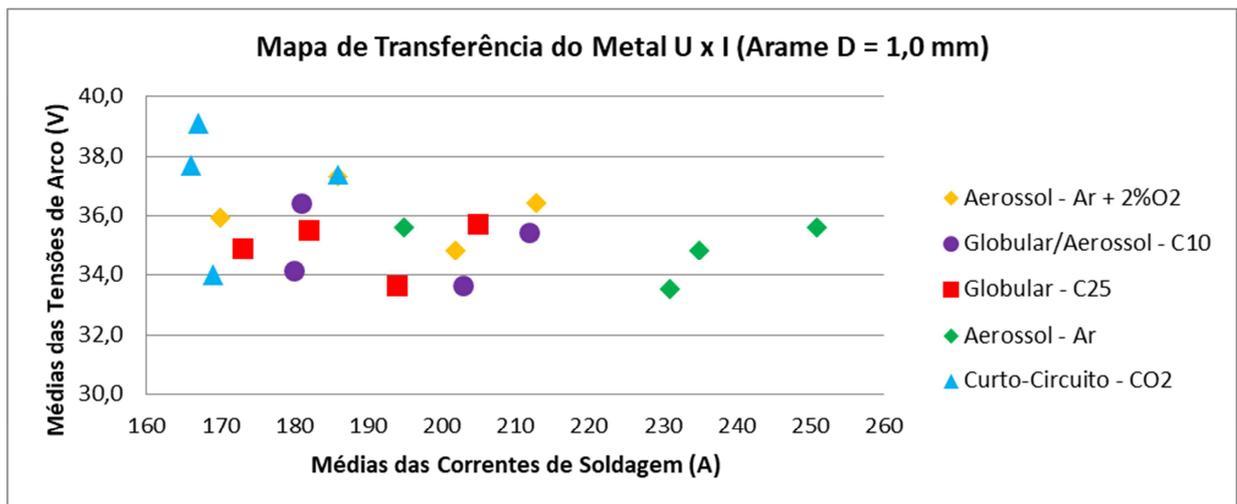


Figura 5.20 – Mapas dos modos de transferência do metal para o arame-eletrodo AWS ER70S-6 (1,0 mm) das médias de tensão de arco pelas médias de corrente de soldagem.

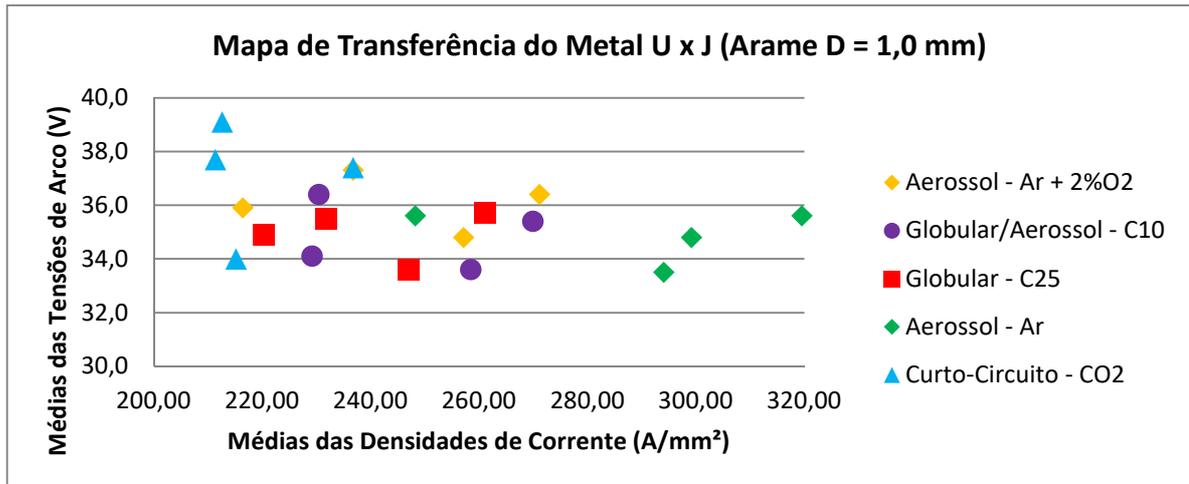


Figura 5.21 – Mapas dos modos de transferência do metal para o arame-eletrodo AWS ER70S-6 (1,0 mm) das médias de tensão de arco pelas médias de densidade de corrente.

Além disso, a região em que os pontos dessa mistura se encontram está entre as regiões de transferência globular da mistura gasosa de Ar + 25% CO<sub>2</sub> e de transferência por aerossol do argônio puro e Ar + 2% O<sub>2</sub>. Os pontos do dióxido de carbono puro, que apresentaram transferência por curto-circuito, ficaram levemente segregados.

### 5.2.8 Resultados para o Arame-Eletrodo AWS ER70S-6 (1,2 mm)

A Figura 5.22 apresenta os mapas dos modos de transferência do metal para o arame-eletrodo AWS ER70S-6 com diâmetro de 1,2 mm, das médias de tensão de arco pelas médias de corrente de soldagem, enquanto que a Figura 5.23 apresenta os mapas dos modos de transferência do metal do mesmo arame com as médias de tensão de arco pelas médias de densidade de corrente.

Os resultados para esse arame são muito similares aos do arame de 1,0 mm. Apesar da presença de diferentes modos de transferência do metal, uma sobreposição entre regiões de transferência de metal pode ser observada. Ao aumentar a velocidade de alimentação de arame e a tensão para o gás de proteção Ar + 10% CO<sub>2</sub> provoca um crescimento no tamanho da gota de metal fundido na extremidade do arame-eletrodo, o que implica numa redução na taxa de fusão do arame, aumentando a resistividade e consequentemente reduzindo a corrente de soldagem.

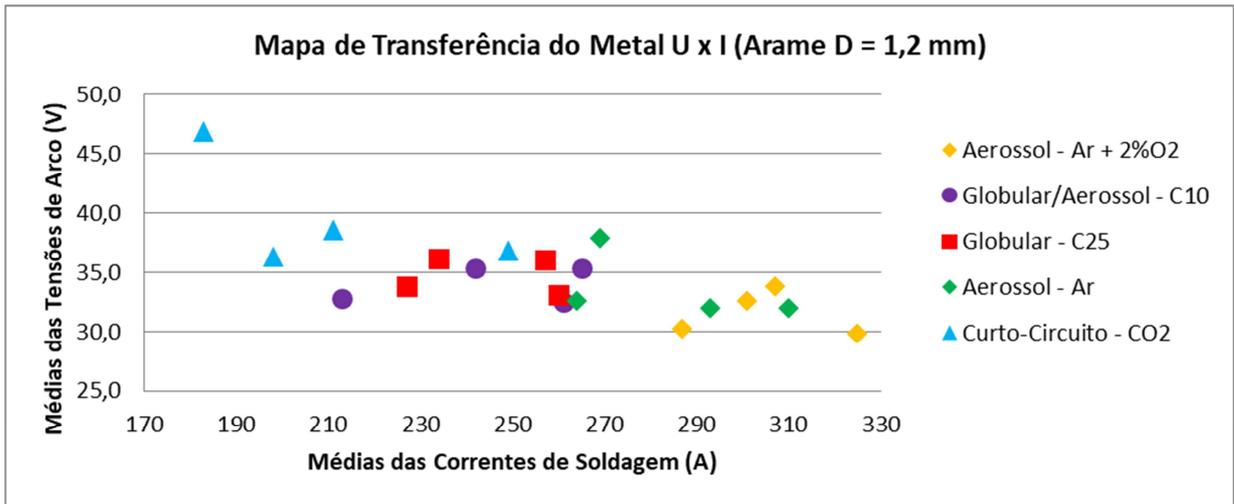


Figura 5.22 – Mapas dos modos de transferência do metal para o arame-eletrodo AWS ER70S-6 (1,2 mm) das médias de tensão de arco pelas médias de corrente de soldagem.

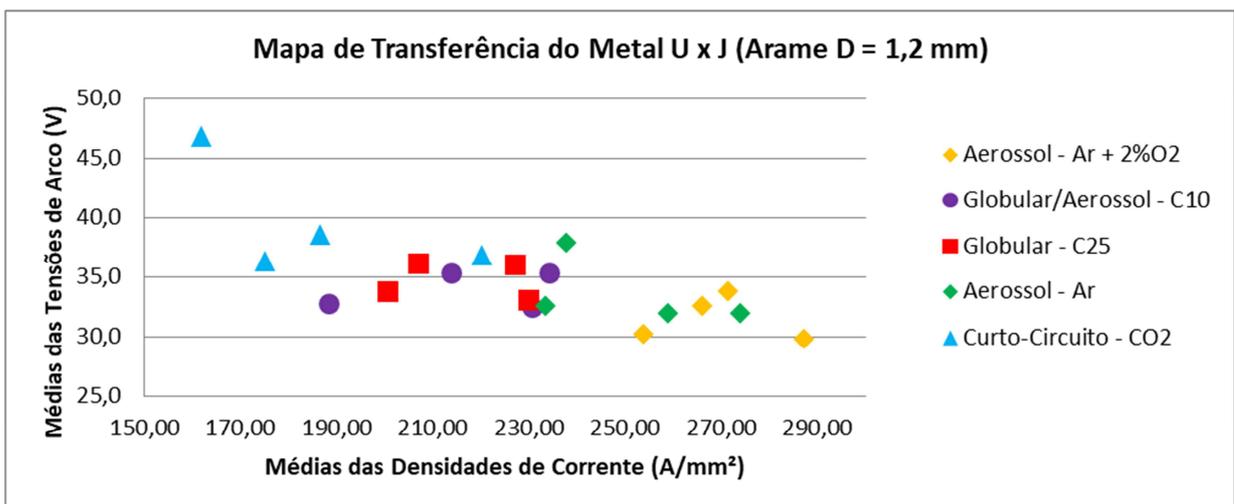


Figura 5.23 – Mapas dos modos de transferência do metal para o arame-eletrodo AWS ER70S-6 (1,2 mm) das médias de tensão de arco pelas médias de densidade de corrente.

Devido à redução na taxa de fusão de arame, a gota ainda presa ao arame fica muito próxima à poça de fusão, causando um curto-circuito. Como consequência, ocorre um aumento da extensão do eletrodo, a resistência elétrica começa a reduzir até que a baixa resistividade do arame domine a resistividade da coluna do arco e a corrente de soldagem volte a crescer. Logo, a corrente de soldagem atinge valores acima da corrente de transição, que é menos intensa para misturas de Ar e CO<sub>2</sub>, atingindo a região de transferência por aerossol. A alta taxa de fusão e corrente de soldagem provoca um aumento no comprimento do arco, seguido por uma redução na corrente de soldagem, restaurando as condições para

transferência globular, reiniciando um novo ciclo. A mistura gasosa de Ar + 2% O<sub>2</sub> resultou em uma transferência por aerossol, enquanto que o dióxido de carbono puro resultou em transferência por curto-circuito, apesar das altas médias de corrente de soldagem (acima de 180 A). A mistura gasosa de Ar + 25% CO<sub>2</sub> produziu transferência do metal globular, com grandes gotas e arcos elétricos bem curtos, por algumas vezes tendendo a mudar para transferência por aerossol, entretanto, de forma aleatória, fato esse devido à baixa resistividade da coluna do arco se comparada com a formação de grandes gotas, e ao alto percentual de dióxido de carbono (25%) no gás de proteção, pois o alto teor de dióxido de carbono na mistura gasosa causa um efeito de aumento da corrente de transição para aerossol, o que torna mais difícil atingir esse nível e ultrapassá-la.

Com a mistura gasosa de Ar + 10% CO<sub>2</sub> ocorreu a transferência intermitente entre os modos globular e aerossol, especialmente devido ao menor percentual de dióxido de carbono (10%) na mistura gasosa, o que torna resistência da coluna de arco menor em comparação com as gotículas de metal, o que é possibilitado pelo uso de misturas gasosas com menos de 12% de CO<sub>2</sub> [Scotti et al., 2014]. A região de transferência do metal intermitente entre globular e aerossol com o gás de proteção C10 se localiza entre os pontos da região globular do gás de proteção C25 e os pontos da região aerossol da mistura Ar + 2% O<sub>2</sub>. O dióxido de carbono ao ser utilizado como gás de proteção resultou em transferência por curto-circuito em todos os experimentos. Um dos experimentos apresentou um problema na abertura do arco (experimento 18), o que resultou em valores médios discrepantes (46,8 V e 183 A) em relação aos demais. Nos demais experimentos, todos se caracterizaram por um arco elétrico curto, com formação de gota na extremidade do arame-eletrodo que não chegava a se destacar, pois logo tocava a poça de fusão. Scotti et al., 2012, descrevem esse fenômeno como uma transferência por curto-circuito forçada, caracterizado por um arco curto, alta velocidade de alimentação de arame (acima de 10 m/min), que produzem correntes de soldagem entre 250 e 350 A. Como a transferência é governada por uma forte força eletromagnética, as gotas não apresentam um volume muito grande, pois não há tempo suficiente para crescerem com uma alta taxa de transferência, o que minimiza os efeitos da tensão superficial. O problema é o alto nível de salpicos produzidos.

## 6 CONCLUSÕES

Após a análise das imagens obtidas pela câmera de alta velocidade e pelos sinais elétricos adquiridos dos parâmetros de soldagem, as conclusões são as seguintes:

O modo de transferência do metal intermitente globular/aerossol foi observado nos três diâmetros de arame-eletrodo (0,8, 1,0 e 1,2 mm), nos experimentos envolvendo gases puros (Ar e CO<sub>2</sub>) e misturas gasosas (Ar + 2% O<sub>2</sub>, Ar + 10% CO<sub>2</sub> e Ar + 25% CO<sub>2</sub>).

Entretanto, para os experimentos iniciais, com o gás de proteção Ar + 10% CO<sub>2</sub> (C10), esse modo de transferência ocorreu apenas para o arame-eletrodo de 1,0 mm, nos ensaios com os parâmetros de soldagem superiores (HV). Essa intermitência globular/aerossol foi observada em um intervalo de médias de corrente de soldagem entre 180 e 225 A, e em um intervalo de médias de tensão de arco entre 31,5 a 34,5 V. Para dois experimentos deste arame-eletrodo, com médias de corrente de soldagem entre 200 e 215 A, porém com médias de tensão de arco inferiores (29 a 30 V) observou-se uma transferência do metal intermitente por curto-circuito/aerossol/globular. Para os demais arames-eletrodos dos experimentos com parâmetros de soldagem superiores, o de menor diâmetro (0,8 mm) apresentou transferência do metal globular em todos os casos, com uma região de médias de corrente de soldagem entre 115 e 145 A, e com uma região de médias de tensão de arco bem definida entre 32 e 33 V, exceto por um experimento com média de 29,6 V. O arame-eletrodo de maior diâmetro (1,2 mm) apresentou uma região média de correntes de soldagem entre 270 e 320 A, e região média de tensão de arco entre 28 e 31,5 V, com transferência do metal por aerossol para quase todos os experimentos, em exceto para um caso, justo o que obteve menor média de corrente de soldagem (263 A).

Os experimentos com gás de proteção Ar + 10% CO<sub>2</sub> (C10) com parâmetros de soldagem inferiores (LV) apresentaram, em sua totalidade, transferência do metal por curto-circuito. Outro fato que evidenciou essa transferência foram os histogramas de curto-circuito e arcos dos experimentos com parâmetros de soldagem LV e HV. Nos primeiros (LV) a quantidade de curtos-circuitos variou de 100 a 1700 curtos-circuitos por cordão de solda, em períodos de 2,0 a 6,0 ms, enquanto que nos experimentos HV, onde não ocorreu transferência por curto-circuito em nenhum caso, a quantidade máxima de curtos-circuitos que ocorreu em um cordão de solda foi inferior a 60 eventos. Os mesmos números se observaram para os histogramas de arco, tanto para os experimentos LV quanto HV.

O arame-eletrodo de menor diâmetro (0,8 mm) foi o que apresentou mais problemas de instabilidade do arco, com salpicos ao longo dos cordões de solda, tanto para os experimentos com os gases puros e misturas gasosas, quanto para os experimentos com parâmetros de soldagem inferiores (LV) e superiores (HV) com a mistura gasosa de Ar + 10% CO<sub>2</sub> (C10) como gás de proteção. Isso se evidenciou mais ainda com o uso de dióxido de carbono puro como gás de proteção.

Ao comparar os resultados entre os experimentos com parâmetros de soldagem superiores (HV), e os experimentos que utilizaram o gás de proteção C10, visto que estes utilizaram os mesmos parâmetros de soldagem e consumíveis, mostrou grande semelhança de resultados, especialmente no caso do arame-eletrodo de 0,8 mm de diâmetro, em que as médias obtidas de corrente de soldagem e tensão de arco foram muito similares, além de apresentarem a transferência do metal globular. O arame-eletrodo de 1,0 mm de diâmetro também apresentou valores médios similares entre estes parâmetros de soldagem, porém, com diferentes modos de transferência. Enquanto que os experimentos HV apresentaram transferência intermitente globular/aerossol e curto-circuito/aerossol/globular, os experimentos com gás de proteção C10 tiveram transferência globular/aerossol, aerossol e globular. No caso dos arames-eletrodos de maior diâmetro (1,2 mm), os valores médios foram diferentes. Para os experimentos HV, as médias de corrente de soldagem estiveram no intervalo de 260 a 320 A, com transferência por aerossol em quase todos os casos, somente uma ocorrência de transferência globular, enquanto que nos experimentos com gás de proteção C10 este ficou entre 210 e 270 A, com transferência intermitente globular/aerossol, globular e aerossol.

Modos de transferência do metal intermitentes ocorreram apenas para os gases de proteção Ar + 10% CO<sub>2</sub> (C10) e Ar puro. Para a mistura gasosa de Ar + 25% CO<sub>2</sub> (C25) como gás de proteção, devido ao alto percentual de dióxido de carbono presente na mistura (25%), a corrente de transição aumenta, dificultando a mudança para transferência aerossol. A presença do oxigênio na mistura gasosa Ar + 2% O<sub>2</sub> produziu gotículas menores que no Ar puro, para o arame-eletrodo de 0,8 mm. Por serem gotas de menor tamanho, a corrente de soldagem não diminuiu tanto durante a formação da gota, logo, após o destacamento desta, o incremento na corrente não foi suficiente para ultrapassar a corrente de transição. Entretanto, a mistura Ar + 2% O<sub>2</sub> apresentou médias de corrente de soldagem e tensão de arco um pouco maiores que o Ar puro. Com isso, conclui-se que o oxigênio, assim como o dióxido de carbono, aumenta o valor da corrente de transição globular/aerossol.

O modo de transferência do metal intermitente globular/aerossol não ocorreu para o dióxido de carbono puro como gás de proteção, devido ao aumento da corrente de transição que esse gás causa. Além disso, o CO<sub>2</sub> puro apresentou transferência por curto-circuito em todos os experimentos.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, são sugeridas:

- Execução de cordões de solda para unir chapas chanfradas ou sem chanfro, com ou sem abertura de raiz, formando juntas de topo, com filmagens através da câmera de alta velocidade e aquisição de sinais elétricos de tensão e corrente de soldagem, para verificar a relação entre os parâmetros de soldagem e os modos de transferência do metal.
- Aprimorar a qualidade de imagens, através do desenvolvimento de um sistema de iluminação por diodo LASER de alta intensidade, com feixe expandido e colimado, diminuindo o efeito do excesso de luminosidade produzido pela intensidade do arco elétrico. Isso permitirá estudos não apenas da transferência do metal, mas de outras regiões do arco elétrico, como a poça de fusão e o arco elétrico, especialmente em processos sem adição de metal, como GTAW autógeno.
- Com o uso da câmera de alta velocidade, investigar fenômenos relacionados à poça de fusão do processo GMAW e demais processos, como GTAW, FCAW e SMAW.
- Investigar a transferência do metal para os processos GTAW, FCAW e SMAW.
- Investigar a transferência do metal no processo GMAW empregando misturas gasosas de argônio com outros percentuais de dióxido de carbono e oxigênio, além de outros gases de proteção puros ou em misturas, como o hélio, nitrogênio e hidrogênio.
- Verificar os diâmetros de arco elétrico produzidos pelos diversos gases de proteção deste trabalho, por meio das imagens de alta velocidade adquiridas nos experimentos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allemand, C. D.; Schoeder, R.; Ries, D. E.; Eagar, T. W. A Method of Filming Metal Transfer in Welding Arcs. **Welding Journal**, vol. 64, p. 45-47, 1985.

Allum, C. J. Metal transfer in arc welding as a varicose instability: I – Varicose instabilities in current-carrying liquid cylinder with surface change. **Journal of Physics D: Applied Physics** **18**, p. 1431-1446, 1985.

Allum, C. J. Metal transfer in arc welding as a varicose instability: II – Development of model for arc welding. **Journal of Physics D: Applied Physics** **18**, p. 1447-1468, 1985.

Amson, J. C. Lorentz force in the molten tip of an arc electrode. **British Journal of Applied Physics**, vol. 16, p. 1169-1179, 1965.

Anno, J. N. **The Mechanics of Liquid Jets**. Lexington Books, Lexington, Massachusetts, EUA, 1977.

Bálsamo, P. S. S.; Vilarinho, L. O.; Vilela, M.; Scotti, A. Development of an experimental technique for studying metal transfer in welding: synchronized shadowgraphy. **Int. J. for the Joining of Materials**, 12 (1), 2000.

Bengston, K. **Development of an intelligent vision system for monitoring on welding process**. Projeto de conclusão de curso, Copenhagen University College of Engineering, Center for Information Technology & Electronics, Ballerup, Dinamarca, 2013.

Bortoni, O. E. **Gases de protección usados em soldadura eléctrica**. Gonarco Boletim Tecnico, n. 9 (78), Dec. 1983.

Brailsford, F.; Shrubbs, K. F. High-speed Photography of Welding Arcs. **Journal of Scientific Instruments**, vol. 25, p. 211-213, Jun. 1948.

Breyemeier, R. T. Metal transfer in sigma welding. **Welding Journal** 31 (5), p. 393-8, May 1952.

Canto, M. A. A. **Influência dos Gases de Proteção Utilizados no Processo MIG/MAG sobre as Propriedades Mecânicas do Metal de Solda**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 1990.

Dutra, J. C. Procedimento Computadorizado do Estudo de Transferência Metálica para a Determinação das Variáveis de Soldagem com Corrente Pulsada. **XV ENTS**, p. 637-652, São Paulo, 1989.

Eickhoff, S. T. **Gas metal arc welding in pure argon**. Dissertação de mestrado, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 1988.

Eriksson, I.; Powell, J.; Kaplan, A. F. Ultra-high speed camera investigations of laser beam welding. **Proceedings of the International Congress in Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO)**, Anaheim, CA, Estados Unidos, 2010.

Figueiredo, K. M. **Mapeamento dos Modos de Transferência Metálica na Soldagem MIG do Alumínio**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, 2000.

Freeman, J. J.; Eagar, T. W. An Investigation of gas metal arc welding of steel in pure argon. Interim Report, Materials Processing Center, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 1992.

Gonzalez, A. R. **Efeito da forma de onda sobre as características de fusão na soldagem MIG/MAG com corrente pulsada**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 1997.

Grubic, K.; Andric, S. Factors at pulsed MIG welding, their relationships and effects. **Proceedings of the International Conference on the Joining of Materials**, JOM-7, p. 360-367, 1995.

Greene, W. J. An Analysis of Transfer in Gas-Shielded Welding Arcs. **Trans. American Institute of Electrical Engineers**, Part. 2, p. 194-203, Jul. 1960.

Groetelaars, P. J. **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, Minas Gerais, 2005.

Guile, A. E. Arc-Electrode Phenomena. **Proc. IEE**, IEE Reviews, vol. 118, n. 9R, p. 1131, 1971.

Heald, P. R.; Madigan, R. B.; Siewert, T. A.; Liu, S. Mapping the Droplet Transfer Modes for an ER100S-1 GMAW Electrode. **Welding Journal**, p. 38-44, Feb. 1994.

Hecht, E. **Optics**. Ed. Addison Wesley, San Francisco, CA, EUA, 2002.

International Institute of Welding. Classification of Metal Transfer. **IIW Doc. XII-636-76**, 1976.

Iordachescu, D.; Quintino, L. Steps toward a new classification of metal transfer in gas metal arc welding. **Journal of Materials Processing Technology** 202, p. 391-397, 2008.

Johnson, J. A. Process control of GMAW: Sensing of metal transfer mode. **Welding Journal**, p. 91-99, Apr. 1991.

Jönsson, P. G. **Arc properties and metal transfer in gas metal arc welding**. Tese de Doutorado, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 1993.

Jönsson, P. G.; Murphy, A. B.; Szekely, J. The Influence of Oxygen Additions on Argon-Shielded Gas Metal Arc Welding Processes. **Welding Journal**, p. 48-58, Feb. 1995.

Kim, Y. S.; Eagar, T. W. Modeling of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding. **Edison Welding Institute Annual North American Welding Research Seminar**, Columbus, Ohio, 1988.

Kim, Y. S.; Eagar, T. W. Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding. **Welding Journal**, p. 269-278, Jun. 1993.

Lancaster, J. F. Metal Transfer in Fusion Welding. **Welding Institute Conference on Arc Physics and Weld Pool Behaviour**, May 1979.

Lancaster, J. F. **The Physics of Welding**. 2nd. Ed., The International Institute of Welding, Pergamon Press, Headington Hill Hall, Oxford, Inglaterra, 1986.

Lermen, R. T. **Desenvolvimento de uma Tocha de Plasma Híbrida para o Processamento de Materiais**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2011.

Lesnewich, A. Electrode activation for inert-gas-shielded metal arc welding. **Welding Journal** 34 (12), p. 1167-1178, 1958.

Liu, L., M.; Huang, R. S.; Song, G. Infrared temperature measurement and interference analysis of magnesium alloys in hybrid laser-TIG welding process. **Materials Science and Engineering**, A 447, p. 239-243, 2007.

Liu, S.; Siewert, T. A. Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding Droplet Rate. **Welding Journal**, February 1989, p. 52-58, 1989.

Lopera, J. E. P.; Ramos, E. G.; Carvalho, G. C.; Alfaro, S. C. A. Uso da Técnica de “Perfilografia” para Visualização dos Modos de Transferência Metálica no Processo de Soldagem GMAW Usando uma Câmera CMOS de Alta Velocidade. **6º Congresso Brasileiro**

de Engenharia de Fabricação, Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2011.

Lord Rayleigh On the Instability of Jets. **Proceeding London Mathematical Society**, 10, p. 4-13, 1879.

Ludwig, H. C. Metal transfer characteristics in gas-shielded arc welding. **Welding Journal** 36 (1), p. 23-26, 1957.

Machado, I. G. **Soldagem e técnicas conexas: processos**. Porto Alegre: editado pelo autor, 1996.

Needham, J. C.; Cooksey, C. J.; Milner, D. R. Metal transfer in inert-gas shielded arc-welding. **British Welding Journal** 7(2), p. 101-114, 1960.

Nixon, J. H.; Norrish, J. Determination of pulsed MIG process parameters. **Welding and Metal Fabrication**, p. 4-7, Apr. 1988.

Ogawa, Y. Accurate three dimensional measurement of the arc welding phenomena. **J. Soc. Instrum. Control Eng.**, vol. 47, p. 65-68, 2008.

Ogawa, Y. High speed imaging technique Part 1 – high speed imaging of arc welding phenomena. **Science and Technology of Welding and Joining**, vol. 16, no. 1, 2011.

Ogawa, Y. Visual Analysis of Welding Processes. **Welding Processes**, Ed. Dr. Radovan Kovacevic, ISBN: 978-953-51-0854-2, InTech, DOI: 10.5772/53519. <http://www.intechopen.com/books/welding-processes/visual-analysis-of-welding-processes>, 2012, Acesso em: 20/07/2015.

Pintard, J. Formation et croissance des gouttes. Forces auxquelles elles sont surmises avant et pendant le transfer. **IIW Doc.** 212-89-66, 1966.

Rajasekaran, S.; Kulkarni, S. D.; Mallya, U. D.; Chaturvedi, C. Droplet detachment and plate fusion characteristics in pulsed current gas metal arc welding. **Welding Journal**, p. 254-269, Jun. 1998.

Ramos, E. G.; Carvalho, G. C.; Alfaro, S. C. A. Análise da Oscilação da Poça de Solda em P-GMAW por Meio de Processamento de Imagens Obtidas por Perfilografia. **Soldagem & Inspeção** vol. 18, n° 01, p. 039-049, São Paulo, 2013.

Rhee, S.; Kannatey-Asibu Jr, E. Observation of Metal Transfer during Gas Metal Arc Welding. **Welding Journal**, p. 381-386, Oct. 1992.

Ries, D. E. **Gas metal arc welding of titanium**. Dissertação de mestrado, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 1983.

Roth, J. R. **Industrial Plasma Engineering Volume 1: Principles**. Institute of Physics Publishing Ltd., Bristol, UK, 1995.

Scotti, A. Mapping the Transfer Modes for Stainless Steel GMAW. **Journal of Science and Technology of Welding and Joining**, vol. 5, N° 4, p. 227-234, 2000.

Scotti, A.; Ponomarev, V. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**. Artliber Editora, 284 p., São Paulo, 2008.

Scotti, A.; Ponomarev, V.; Lucas, W. A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding. **Journal of Materials Processing Technology** 212, p. 1406-1413, 2012.

Scotti, A.; Ponomarev, V.; Lucas, W. Interchangeable metal transfer phenomenon in GMA welding: Features, mechanisms, classification. **Journal of Materials Processing Technology** 214, p. 2488-2496, 2014.

Smith, A. A. Characteristics of the Short-circuiting CO<sub>2</sub> – Shielded Arc. **Physics of the Welding Arc**, Institute of Welding, p. 75-91, 1966.

Souza, D. **Levantamento de Mapas Operacionais de Transferência Metálica para Soldagem MIG/MAG de Aço ao Carbono na Posição Plana**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, 2010.

Stolz, C.; Coniglio, N.; Mathieu, A.; Aubreton, O. Real time polarization imaging of weld pool surface. **The 12th International Conference on Quality Control by Artificial Vision 2015**, International Society for Optics and Robotics, University of Bourgogne, Le Creusot, França, 2015.

Suban, M.; Tušek, J. Methods for the determination of arc stability. **Journal of Materials Processing Technology** 143-144, p. 430-437, 2003.

Subramaniam, S. White, D. R.; Jones, J. E.; Lyons, D. W. Droplet transfer in pulsed gas metal arc welding of aluminum. **Welding Journal**, p. 458-464, Nov. 1998.

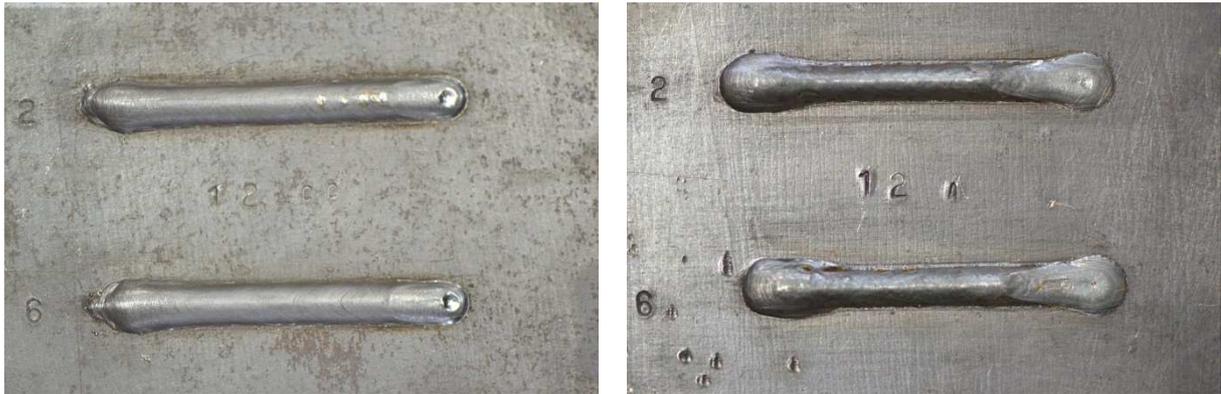
Wang, Q. L.; Li, P. J. Arc light sensing of droplet transfer and its analysis in pulsed GMAW process. **Welding Journal**, p. 458-469, Nov. 1997.

Waszink, J. H.; Gratt, L. H. J. Experimental Investigation of the Forces Acting on a Drop Weld Metal. **Welding Journal**, vol. 62 (4), p. 108-116, Apr. 1983.

Waszink, J. H.; Van Den Heuvel, G. J. P. M. Heat generation and heat flow in the filler metal in GMA welding. **Welding Journal** 61, p. 269-282, 1982.

## APÊNDICE A – Imagens dos Cordões de Solda dos Experimentos com Mistura Gasosa Ar + 10% CO<sub>2</sub>

O procedimento de soldagem para realização dos cordões de solda sobre as chapas de aço ao carbono, conforme descrito no capítulo 4.1, resultou 16 experimentos (8 experimentos com parâmetros de soldagem inferiores e 8 experimentos com parâmetros de soldagem superiores) por diâmetro (0,8, 1,0 e 1,2 mm) de arame-eletrodo, totalizando 48 cordões de solda por deposição (*bead-on-plate*) sobre chapas com as dimensões de 100 x 150 mm. Em cada chapa foram depositados dois cordões de solda, sempre os cordões com os mesmos parâmetros de soldagem, de acordo com o projeto de experimentos. As imagens desses cordões de solda encontram-se nas Figuras A.1 a A.12.



(a)

(b)

Figura A.1 – Imagens dos cordões de solda dos experimentos 2 e 6 com parâmetros de soldagem inferiores (a) e dos experimentos 2 e 6 com parâmetros de soldagem superiores (b), com arame de 1,2 mm.



(a)

(b)

Figura A.2 – Imagens dos cordões de solda dos experimentos 3 e 7 com parâmetros de soldagem inferiores (a) e dos experimentos 3 e 7 com parâmetros de soldagem superiores (b), com arame de 1,2 mm.



(a)



(b)

Figura A.3 – Imagens dos cordões de solda dos experimentos 4 e 8 com parâmetros de soldagem inferiores (a) e dos experimentos 4 e 8 com parâmetros de soldagem superiores (b), com arame de 1,2 mm.



(a)



(b)

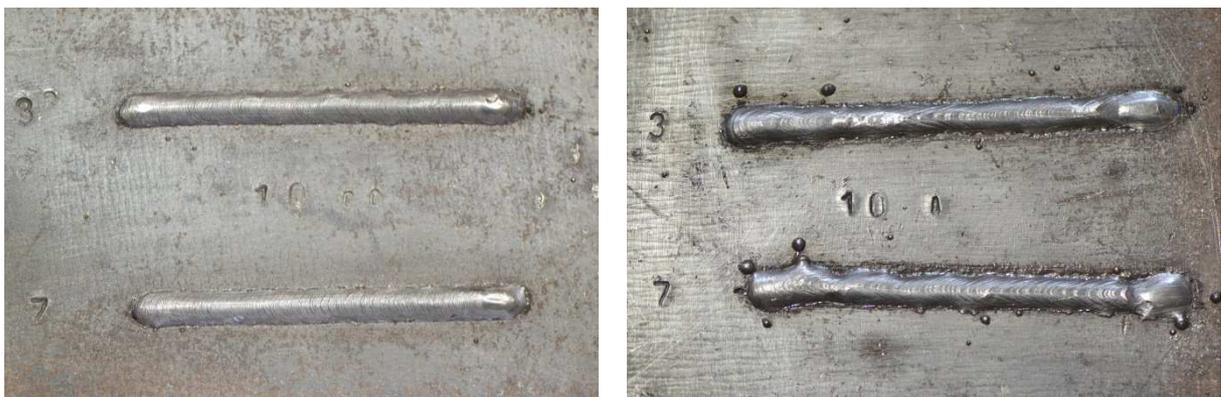
Figura A.4 – Imagens dos cordões de solda dos experimentos 5 e 1 com parâmetros de soldagem inferiores (a) e dos experimentos 5 e 1 com parâmetros de soldagem superiores (b), com arame de 1,2 mm.



(a)

(b)

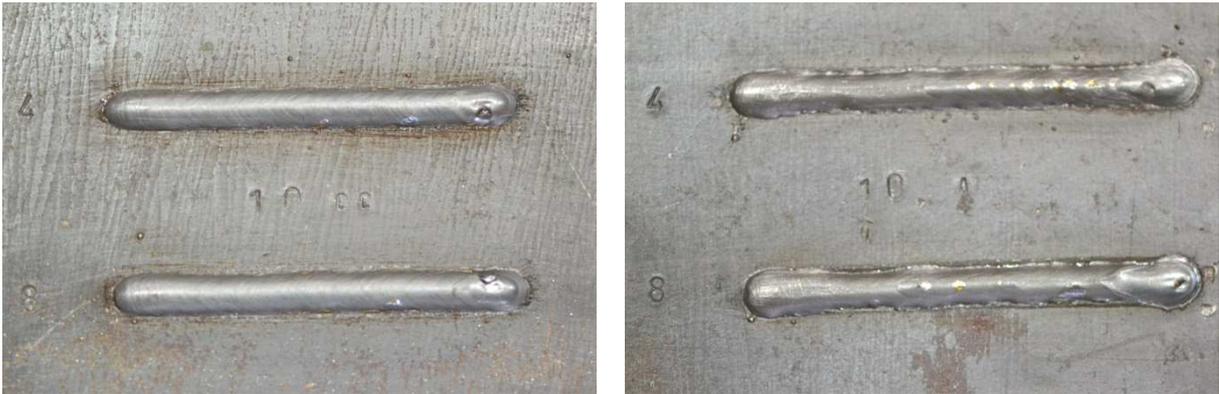
Figura A.5 – Imagens dos cordões de solda dos experimentos 2 e 6 com parâmetros de soldagem inferiores (a) e dos experimentos 2 e 6 com parâmetros de soldagem superiores (b), com arame de 1,0 mm.



(a)

(b)

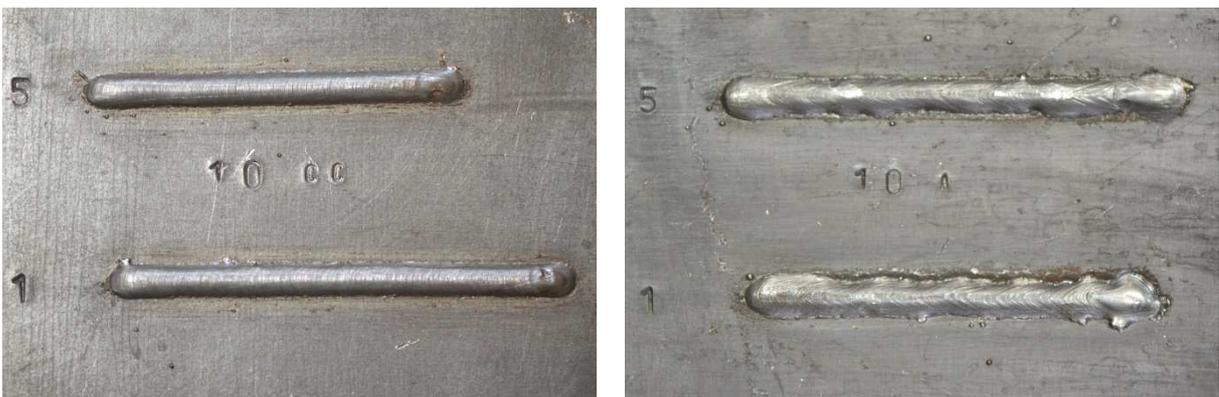
Figura A.6 – Imagens dos cordões de solda dos experimentos 3 e 7 com parâmetros de soldagem inferiores (a) e dos experimentos 3 e 7 com parâmetros de soldagem superiores (b), com arame de 1,0 mm.



(a)

(b)

Figura A.7 – Imagens dos cordões de solda dos experimentos 4 e 8 com parâmetros de soldagem inferiores (a) e dos experimentos 4 e 8 com parâmetros de soldagem superiores (b), com arame de 1,0 mm.



(a)

(b)

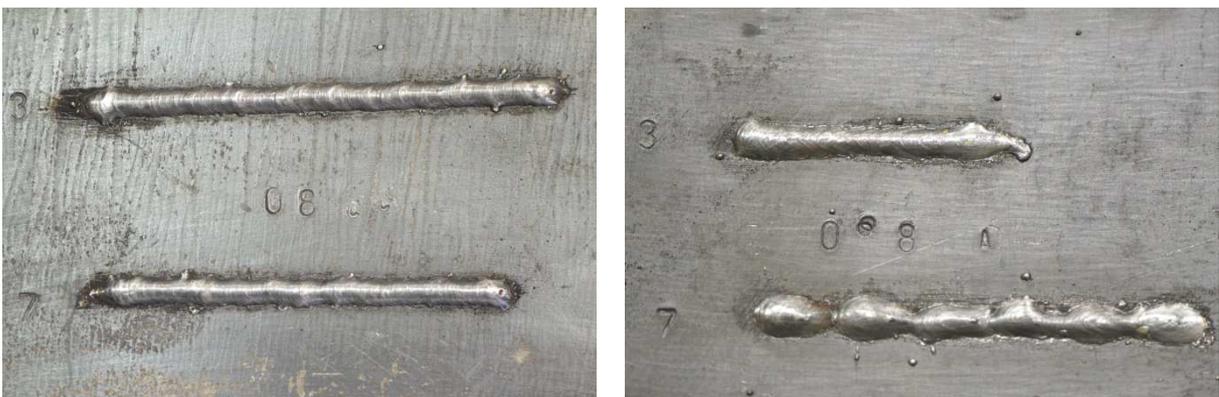
Figura A.8 – Imagens dos cordões de solda dos experimentos 5 e 1 com parâmetros de soldagem inferiores (a) e dos experimentos 5 e 1 com parâmetros de soldagem superiores (b), com arame de 1,0 mm.



(a)

(b)

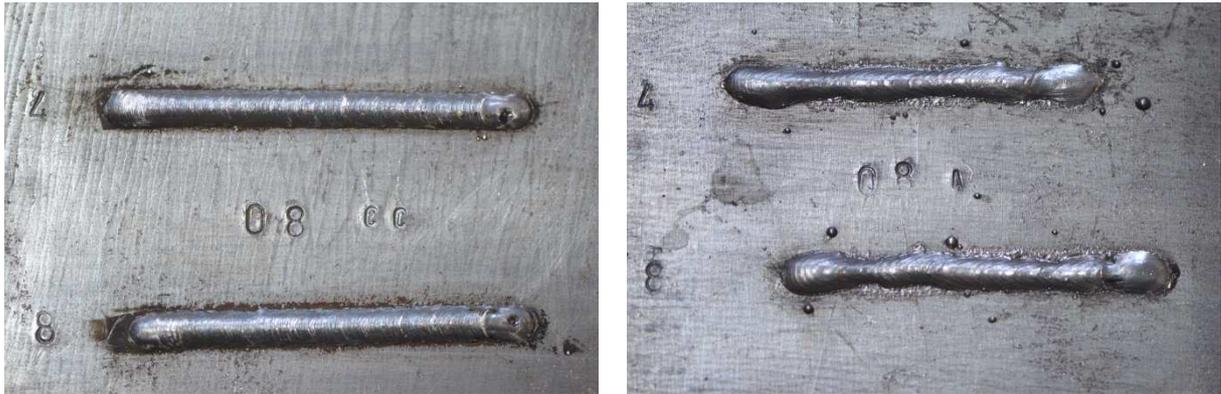
Figura A.9 – Imagens dos cordões de solda dos experimentos 2 e 6 com parâmetros de soldagem inferiores (a) e dos experimentos 2 e 6 com parâmetros de soldagem superiores (b), com arame de 0,8 mm.



(a)

(b)

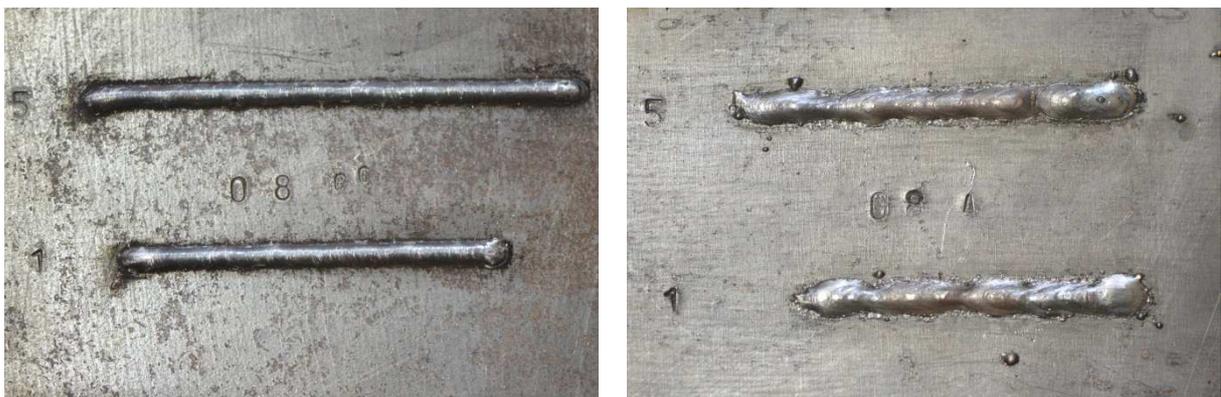
Figura A.10 – Imagens dos cordões de solda dos experimentos 3 e 7 com parâmetros de soldagem inferiores (a) e dos experimentos 3 e 7 com parâmetros de soldagem superiores (b), com arame de 0,8 mm.



(a)

(b)

Figura A.11 – Imagens dos cordões de solda dos experimentos 4 e 8 com parâmetros de soldagem inferiores (a) e dos experimentos 4 e 8 com parâmetros de soldagem superiores (b), com arame de 0,8 mm.



(a)

(b)

Figura A.12 – Imagens dos cordões de solda dos experimentos 5 e 1 com parâmetros de soldagem inferiores (a) e dos experimentos 5 e 1 com parâmetros de soldagem superiores (b), com arame de 0,8 mm.

**APÊNDICE B – Resultados dos Experimentos com Parâmetros de Soldagem Inferiores (LV) e Experimentos com Parâmetros de Soldagem Superiores (HV)**

Seguem abaixo as Tabelas B.1 e B.2, com os resultados dos experimentos com os parâmetros de soldagem inferiores (LV) e dos experimentos com os parâmetros de soldagem superiores (HV), respectivamente. Consiste nos valores medidos da corrente de soldagem (I), tensão de arco (U), velocidade de alimentação de arame (W) em m/min e mm/s, além do modo de transferência do metal observado.

Tabela B.1 – Resultados dos experimentos com parâmetros de soldagem inferiores (LV).

<b>Experimento</b>	<b>I(A)</b>	<b>U(V)</b>	<b>W(m/min)</b>	<b>W (mm/s)</b>	<b>Modo de Transferência</b>
Teste 2 D 12 LV	183	22,0	4,8	80,0	Curto-circuito
Teste 6 D 12 LV	174	19,6	4,7	78,3	Curto-circuito
Teste 3 D 12 LV	150	21,6	3,1	51,7	Curto-circuito
Teste 4 D 12 LV	196	21,0	4,3	71,7	Curto-circuito
Teste 8 D 12 LV	199	20,8	4,4	73,3	Curto-circuito
Teste 5 D 12 LV	147	19,4	3,0	50,0	Curto-circuito
Teste 1 D 12 LV	129	20,0	2,9	48,3	Curto-circuito
Teste 7 D 12 LV	156	23,9	3,6	60,0	Curto-circuito
Teste 2 D 10 LV	137	19,6	5,3	88,3	Curto-circuito
Teste 6 D 10 LV	130	23,3	5,3	88,3	Curto-circuito
Teste 3 D 10 LV	105	21,6	3,6	60,0	Curto-circuito
Teste 4 D 10 LV	139	21,3	5,1	85,0	Curto-circuito
Teste 8 D 10 LV	139	21,4	5,4	90,0	Curto-circuito
Teste 5 D 10 LV	103	20,0	3,5	58,3	Curto-circuito
Teste 1 D 10 LV	102	19,9	3,5	58,3	Curto-circuito
Teste 7 D 10 LV	103	22,0	3,5	58,3	Curto-circuito
Teste 2 D 08 LV	86	20,0	5,0	83,3	Curto-circuito
Teste 6 D 08 LV	84	20,1	4,7	78,3	Curto-circuito
Teste 3 D 08 LV	55	29,7	3,2	53,3	Curto-circuito
Teste 4 D 08 LV	81	21,9	3,7	61,7	Curto-circuito
Teste 8 D 08 LV	86	21,9	4,8	80,0	Curto-circuito
Teste 5 D 08 LV	58	21,0	3,1	51,7	Curto-circuito
Teste 1 D 08 LV	58	20,5	3,5	58,3	Curto-circuito
Teste 7 D 08 LV	63	22,3	3,7	61,7	Curto-circuito

Tabela B.2 – Resultados dos experimentos com parâmetros de soldagem superiores (HV).

<b>Experimento</b>	<b>I(A)</b>	<b>U(V)</b>	<b>W(m/min)</b>	<b>W (mm/s)</b>	<b>Modo de Transferência</b>
Teste 2 D 12 HV	291	28,4	6,8	113,3	Aerossol
Teste 6 D 12 HV	301	28,6	8,7	145,0	Aerossol
Teste 3 D 12 HV	280	31,4	6,2	103,3	Aerossol
Teste 4 D 12 HV	318	31,2	8,2	136,7	Aerossol
Teste 8 D 12 HV	317	31,0	8,2	136,7	Aerossol
Teste 5 D 12 HV	272	29,1	6,6	110,0	Aerossol
Teste 1 D 12 HV	263	28,7	6,6	110,0	Globular
Teste 7 D 12 HV	272	30,6	6,8	113,3	Aerossol
Teste 2 D 10 HV	214	29,8	8,6	143,3	CC/Aerossol/Globular
Teste 6 D 10 HV	202	29,0	8,2	136,7	CC/Aerossol/Globular
Teste 3 D 10 HV	196	32,0	7,0	116,7	Globular/Aerossol
Teste 4 D 10 HV	208	33,4	8,6	143,3	Globular/Aerossol
Teste 8 D 10 HV	223	32,0	8,7	145,0	Globular/Aerossol
Teste 5 D 10 HV	192	31,8	7,0	116,7	Globular/Aerossol
Teste 1 D 10 HV	181	34,5	6,8	113,3	Globular/Aerossol
Teste 7 D 10 HV	190	33,5	7,1	118,3	Globular/Aerossol
Teste 2 D 08 HV	132	29,6	8,8	146,7	Globular
Teste 6 D 08 HV	127	32,1	8,9	148,3	Globular
Teste 3 D 08 HV	128	32,0	7,2	120,0	Globular
Teste 4 D 08 HV	142	32,3	9,2	153,3	Globular
Teste 8 D 08 HV	140	32,1	9,1	151,7	Globular
Teste 5 D 08 HV	116	32,5	7,3	121,7	Globular
Teste 1 D 08 HV	120	32,2	7,5	125,0	Globular
Teste 7 D 08 HV	125	32,6	7,4	123,3	Globular

## APÊNDICE C – Imagens dos Cordões de Solda dos Experimentos com Gases Puros e Misturas Gasosas

O procedimento de soldagem para realização dos cordões de solda sobre as chapas de aço ao carbono, conforme descrito no capítulo 4.2, resultou 20 experimentos, sendo 4 experimentos para cada gás de proteção puro (Ar e CO<sub>2</sub>) e mistura gasosa (Ar + 2% O<sub>2</sub>, Ar + 10% CO<sub>2</sub> e Ar + 25% CO<sub>2</sub>), por diâmetro (0,8, 1,0 e 1,2 mm) de arame-eletrodo, totalizando 60 cordões de solda por deposição (*bead-on-plate*) sobre chapas com as dimensões de 100 x 150 mm. Em cada chapa foram depositados dois cordões de solda e as imagens desses cordões de solda encontram-se nas Figuras C.1 a C.15.



(a)



(b)

Figura C.1 – Imagens dos cordões de solda dos experimentos 1 e 2 (a) e dos experimentos 3 e 4 (b), com gás de proteção Ar + 2% O<sub>2</sub> e arame de 1,2 mm.



(a)



(b)

Figura C.2 – Imagens dos cordões de solda dos experimentos 5 e 6 (a) e dos experimentos 7 e 8 (b), com gás de proteção Ar + 10% CO<sub>2</sub> e arame de 1,2 mm.



(a)

(b)

Figura C.3 – Imagens dos cordões de solda dos experimentos 9 e 10 (a) e dos experimentos 11 e 12 (b), com gás de proteção Ar + 25% CO<sub>2</sub> e arame de 1,2 mm.



(a)

(b)

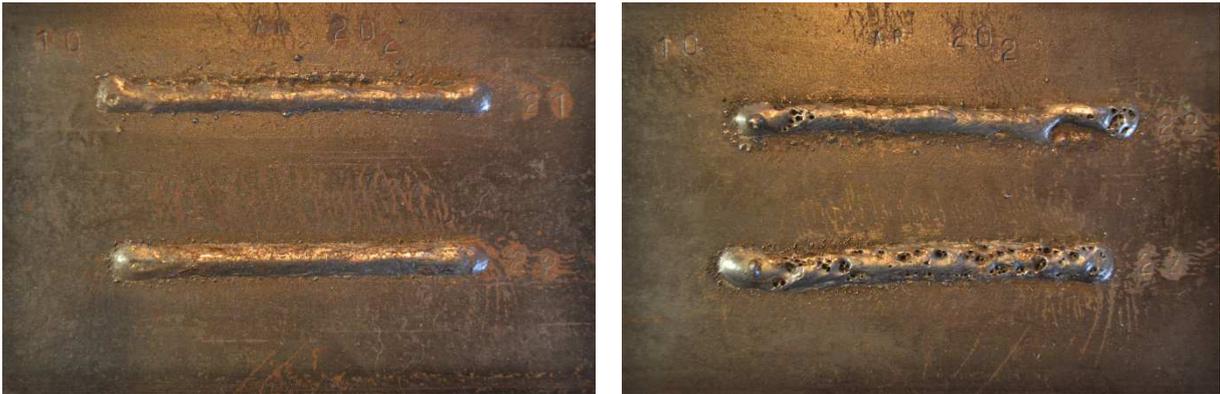
Figura C.4 – Imagens dos cordões de solda dos experimentos 13 e 14 (a) e dos experimentos 15 e 16 (b), com gás de proteção Ar e arame de 1,2 mm.



(a)

(b)

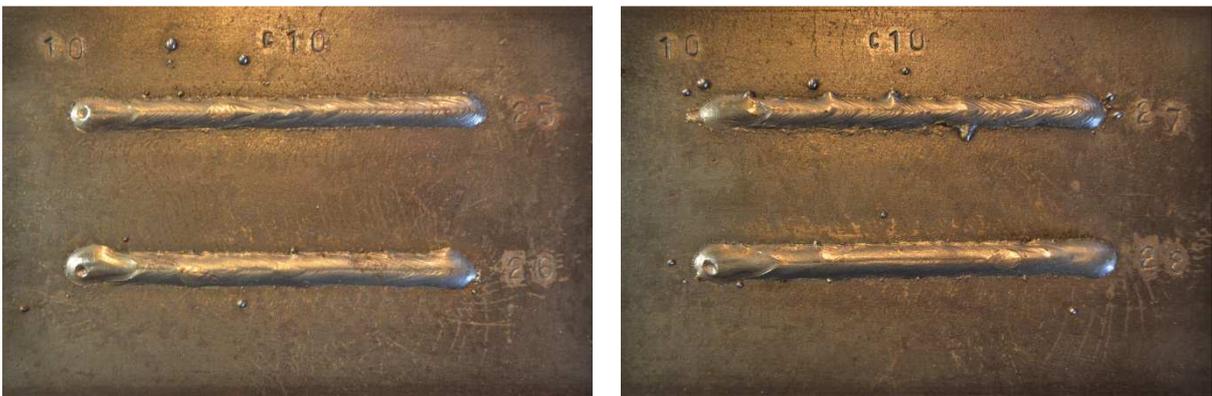
Figura C.5 – Imagens dos cordões de solda dos experimentos 17 e 18 (a) e dos experimentos 19 e 20 (b), com gás de proteção CO<sub>2</sub> e arame de 1,2 mm.



(a)

(b)

Figura C.6 – Imagens dos cordões de solda dos experimentos 21 e 22 (a) e dos experimentos 23 e 24 (b), com gás de proteção Ar + 2% O<sub>2</sub> e arame de 1,0 mm.



(a)

(b)

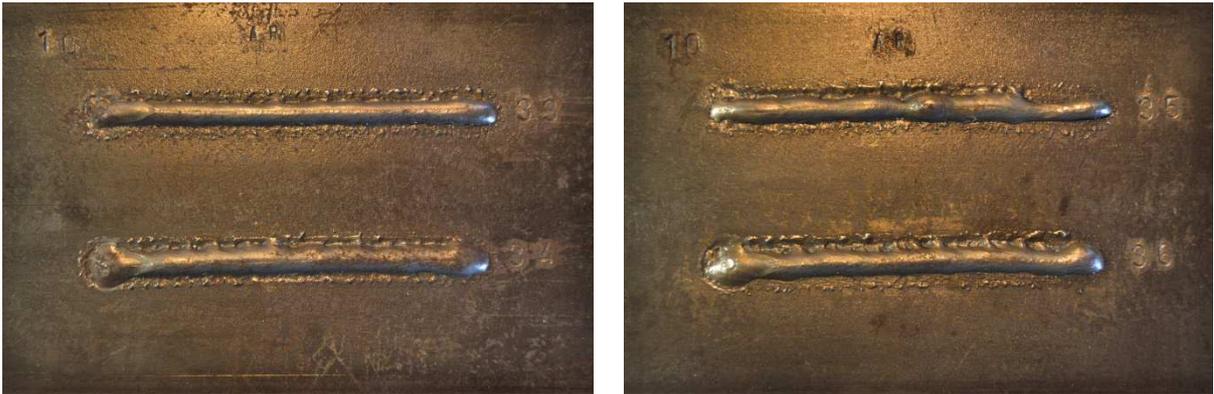
Figura C.7 – Imagens dos cordões de solda dos experimentos 25 e 26 (a) e dos experimentos 27 e 28 (b), com gás de proteção Ar + 10% CO<sub>2</sub> e arame de 1,0 mm.



(a)

(b)

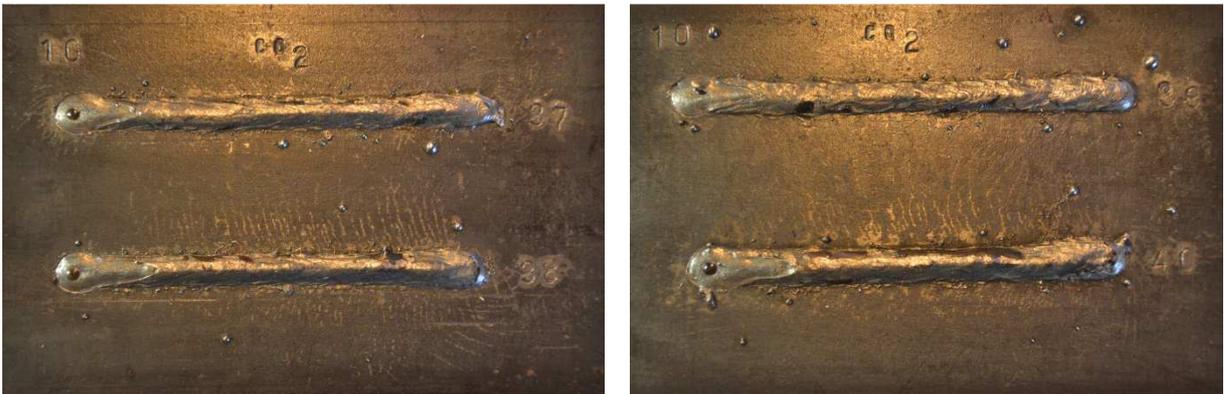
Figura C.8 – Imagens dos cordões de solda dos experimentos 29 e 30 (a) e dos experimentos 31 e 32 (b), com gás de proteção Ar + 25% CO<sub>2</sub> e arame de 1,0 mm.



(a)

(b)

Figura C.9 – Imagens dos cordões de solda dos experimentos 33 e 34 (a) e dos experimentos 35 e 36 (b), com gás de proteção Ar e arame de 1,0 mm.



(a)

(b)

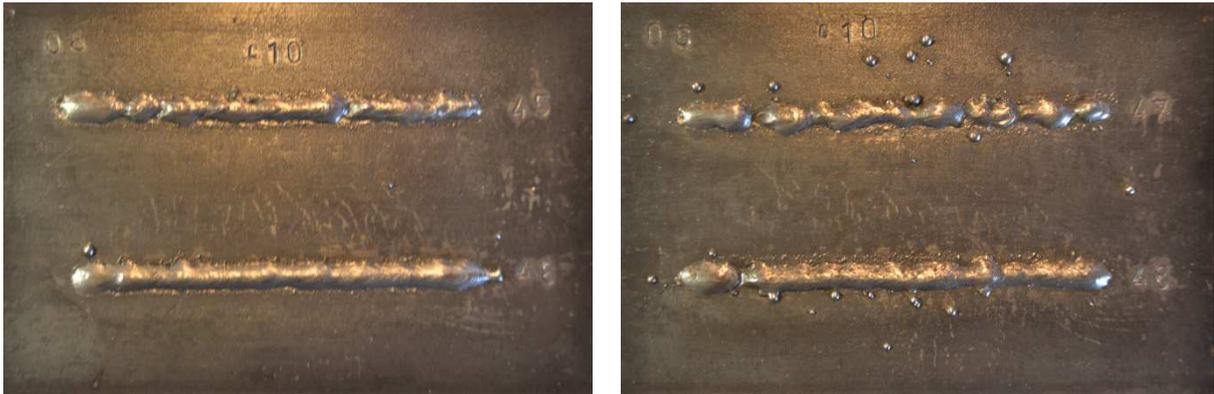
Figura C.10 – Imagens dos cordões de solda dos experimentos 37 e 38 (a) e dos experimentos 39 e 40 (b), com gás de proteção  $\text{CO}_2$  e arame de 1,0 mm.



(a)

(b)

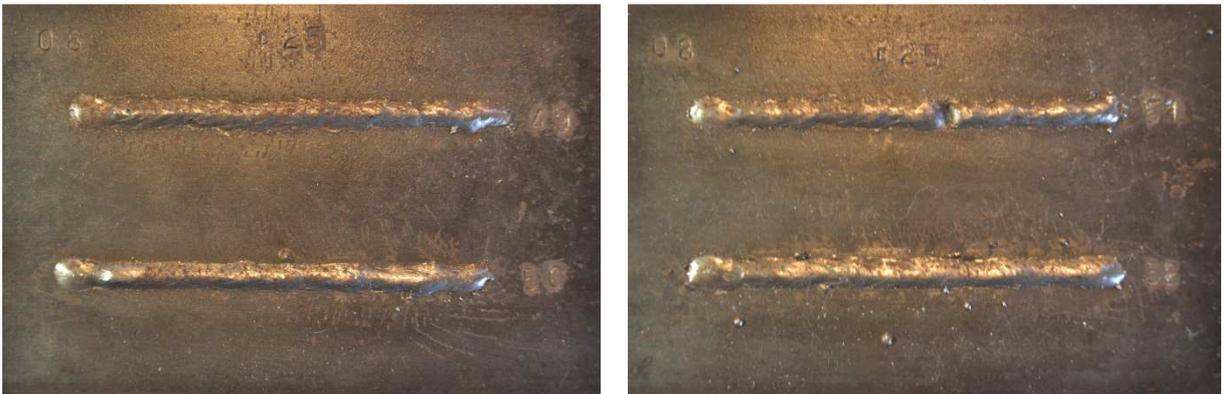
Figura C.11 – Imagens dos cordões de solda dos experimentos 41 e 42 (a) e dos experimentos 43 e 44 (b), com gás de proteção Ar + 2%  $\text{O}_2$  e arame de 0,8 mm.



(a)

(b)

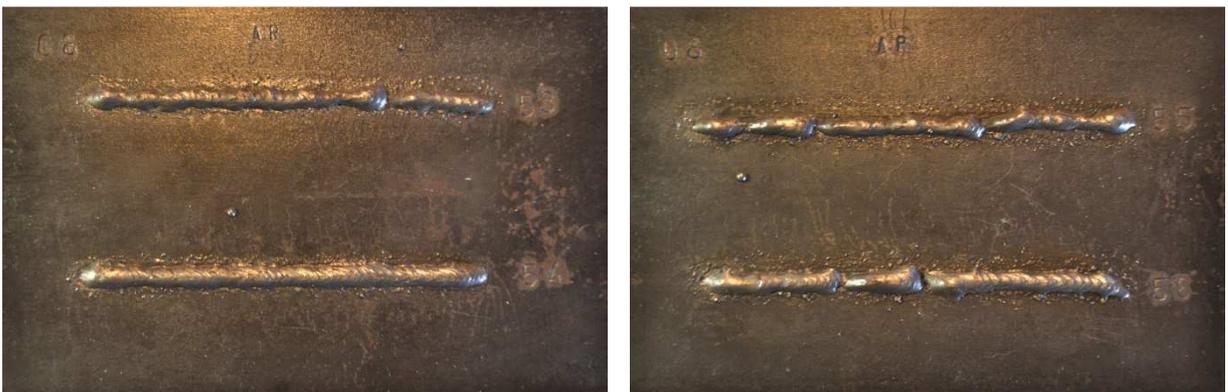
Figura C.12 – Imagens dos cordões de solda dos experimentos 45 e 46 (a) e dos experimentos 47 e 48 (b), com gás de proteção Ar + 10% CO<sub>2</sub> e arame de 0,8 mm.



(a)

(b)

Figura C.13 – Imagens dos cordões de solda dos experimentos 49 e 50 (a) e dos experimentos 51 e 52 (b), com gás de proteção Ar + 25% CO<sub>2</sub> e arame de 0,8 mm.



(a)

(b)

Figura C.14 – Imagens dos cordões de solda dos experimentos 53 e 54 (a) e dos experimentos 55 e 56 (b), com gás de proteção Ar e arame de 0,8 mm.



(a)

(b)

Figura C.15 – Imagens dos cordões de solda dos experimentos 57 e 58 (a) e dos experimentos 59 e 60 (b), com gás de proteção  $\text{CO}_2$  e arame de 0,8 mm.

## APÊNDICE D – Resultados dos Experimentos com Gases Puros e Misturas Gasosas

Seguem abaixo as Tabelas D.1, D.2 e D.3, com os resultados dos experimentos com gases puros (Ar e CO<sub>2</sub>) e misturas gasosas (Ar + 2% O<sub>2</sub>, Ar + 10% CO<sub>2</sub> e Ar + 25% CO<sub>2</sub>). Consiste nos valores medidos da corrente de soldagem (I), tensão de arco (U), velocidade de alimentação de arame (W) em m/min e mm/s, além do modo de transferência do metal observado.

Tabela D.1 – Resultados dos experimentos com gases puros e misturas gasosas para o arame-eletrodo de 1,2 mm.

<b>Experimento</b>	<b>U(V)</b>	<b>I(A)</b>	<b>W(m/min)</b>	<b>W(mm/s)</b>	<b>Modo de Transferência</b>
1 Ar O2 12 mm	30,2	287	7,5	125,0	Aerossol
2 Ar O2 12 mm	29,8	325	9,4	156,7	Aerossol
3 Ar O2 12 mm	32,5	301	7,5	125,0	Aerossol
4 Ar O2 12 mm	33,7	307	8,4	140,0	Aerossol
5 C10 12 mm	32,7	213	6,1	101,7	Globular/Aerossol
6 C10 12 mm	32,4	261	8,5	141,7	Globular
7 C10 12 mm	35,3	242	6,8	113,3	Globular/Aerossol
8 C10 12 mm	35,3	265	8,3	138,3	Aerossol
9 C25 12 mm	33,7	227	6,8	113,3	Globular
10 C25 12 mm	33,0	260	8,5	141,7	Globular
11 C25 12 mm	36,1	234	7,0	116,7	Globular
12 C25 12 mm	36,0	257	8,2	136,7	Globular
13 Ar 12 mm	32,5	264	6,8	113,3	Aerossol
14 Ar 12 mm	31,9	293	8,4	140,0	Aerossol
15 Ar 12 mm	31,9	310	7,4	123,3	Aerossol
16 Ar 12 mm	37,8	269	7,5	125,0	Aerossol
17 CO2 12 mm	36,3	198	5,9	98,3	Curto-circuito
18 CO2 12 mm	46,8	183	8,3	138,3	Curto-circuito
19 CO2 12 mm	38,5	211	6,6	110,0	Curto-circuito
20 CO2 12 mm	36,8	249	8,1	135,0	Curto-circuito

Tabela D.2 – Resultados dos experimentos com gases puros e misturas gasosas para o arame-eletrodo de 1,0 mm.

<b>Experimento</b>	<b>U(V)</b>	<b>I(A)</b>	<b>W(m/min)</b>	<b>W(mm/s)</b>	<b>Modo de Transferência</b>
21 Ar O2 10 mm	35,9	170	6,4	106,7	Aerossol
22 Ar O2 10 mm	34,8	202	8,3	138,3	Aerossol
23 Ar O2 10 mm	37,3	186	6,6	110,0	Aerossol
24 Ar O2 10 mm	36,4	213	8,1	135,0	Aerossol
25 C10 10 mm	34,1	180	6,7	111,7	Globular
26 C10 10 mm	33,6	203	6,9	115,0	Globular/Aerossol
27 C10 10 mm	36,4	181	5,5	91,7	Globular/Aerossol
28 C10 10 mm	35,4	212	7,1	118,3	Aerossol
29 C25 10 mm	34,9	173	6,5	108,3	Globular
30 C25 10 mm	33,6	194	8,2	136,7	Globular
31 C25 10 mm	35,5	182	6,9	115,0	Globular
32 C25 10 mm	35,7	205	8,3	138,3	Globular
33 Ar 10 mm	35,6	195	6,3	105,0	Aerossol
34 Ar 10 mm	33,5	231	8,3	138,3	Aerossol
35 Ar 10 mm	34,8	235	6,9	115,0	Aerossol
36 Ar 10 mm	35,6	251	8,3	138,3	Aerossol
37 CO2 10 mm	34	169	6,9	115,0	Curto-circuito
38 CO2 10 mm	39,1	167	7,8	130,0	Curto-circuito
39 CO2 10 mm	37,7	166	6,5	108,3	Curto-circuito
40 CO2 10 mm	37,4	186	7,9	131,7	Curto-circuito

Tabela D.3 – Resultados dos experimentos com gases puros e misturas gasosas para o arame-eletrodo de 0,8 mm.

<b>Experimento</b>	<b>U(V)</b>	<b>I(A)</b>	<b>W(m/min)</b>	<b>W(mm/s)</b>	<b>Modo de Transferência</b>
41 Ar O2 08 mm	35,1	126	6,5	108,3	Globular
42 Ar O2 08 mm	40,2	119	7,0	116,7	Globular
43 Ar O2 08 mm	37,6	135	6,7	111,7	Globular
44 Ar O2 08 mm	36,9	156	8,4	140,0	Globular
45 C10 08 mm	35,2	132	6,8	113,3	Globular
46 C10 08 mm	35,2	142	8,4	140,0	Globular
47 C10 08 mm	39,5	122	6,3	105,0	Globular
48 C10 08 mm	41,1	129	7,8	130,0	Globular
49 C25 08 mm	35,4	126	6,9	115,0	Globular
50 C25 08 mm	38,0	126	8,3	138,3	Globular
51 C25 08 mm	33,5	138	6,6	110,0	Globular
52 C25 08 mm	37,4	132	8,5	141,7	Globular
53 Ar 08 mm	34,7	117	6,8	113,3	Globular/Aerossol
54 Ar 08 mm	35,0	126	8,3	138,3	Globular/Aerossol
55 Ar 08 mm	36,2	124	6,9	115,0	Globular/Aerossol
56 Ar 08 mm	38,2	133	8,0	133,3	Globular/Aerossol
57 CO2 08 mm	45,2	78	6,8	113,3	Curto-circuito
58 CO2 08 mm	37,3	107	8,1	135,0	Curto-circuito
59 CO2 08 mm	56,5	52	6,8	113,3	Curto-circuito
60 CO2 08 mm	40,0	108	8,3	138,3	Curto-circuito

## APÊNDICE E – Geometria do Arco Elétrico Resultante nos Experimentos com Parâmetros de Soldagem Inferiores (LV) e Experimentos com Parâmetros de Soldagem Superiores (HV)

Seguem abaixo as Tabelas E.1 e E.2, com comentários sobre as geometrias dos arcos elétricos resultantes nos experimentos com os parâmetros de soldagem inferiores (LV) e dos experimentos com os parâmetros de soldagem superiores (HV), respectivamente. Nos experimentos com parâmetros de soldagem inferiores, onde todos obtiveram transferência por curto-circuito, o arco elétrico se manteve curto e com formato de sino.

Tabela E.1 – Geometria do arco elétrico resultante nos experimentos com parâmetros de soldagem inferiores (LV).

Experimento	Observações
Teste 2 D 12 LV	Ocorrência de transferência globular nos instantes finais do vídeo (duas gotas transferidas)
Teste 6 D 12 LV	Sem presença de períodos de transferência globular
Teste 3 D 12 LV	Gotas chegam a se formar na ponta do eletrodo. Num instante, duas gotas são transferidas
Teste 4 D 12 LV	Por vezes a transferência é globular, porém, sem intermitência entre CC e globular
Teste 8 D 12 LV	Por vezes a transferência é globular, porém, sem intermitência entre CC e globular
Teste 5 D 12 LV	Sem presença de períodos de transferência globular
Teste 1 D 12 LV	Por um instante apenas, ocorre uma transferência por gota (globular)
Teste 7 D 12 LV	Breve período de transferência globular no início e final do cordão
Teste 2 D 10 LV	Sem presença de períodos de transferência globular
Teste 6 D 10 LV	Sem presença de períodos de transferência globular
Teste 3 D 10 LV	Presença constante de uma grande gota na ponta do eletrodo, que não chega a se destacar, toca a poça e ocorre o curto
Teste 4 D 10 LV	Ocorrem períodos de transferência globular, com grandes gotas formadas na ponta do eletrodo que conseguem se destacar
Teste 8 D 10 LV	Ocorrem períodos de transferência globular, com grandes gotas formadas na ponta do eletrodo que conseguem se destacar
Teste 5 D 10 LV	Sem presença de períodos de transferência globular
Teste 1 D 10 LV	Sem presença de períodos de transferência globular
Teste 7 D 10 LV	Presença constante de uma grande gota na ponta do eletrodo, que não chega a se destacar, toca a poça e ocorre o curto
Teste 2 D 08 LV	Presença constante de uma grande gota na ponta do eletrodo, que não chega a se destacar, toca a poça e ocorre o curto
Teste 6 D 08 LV	Presença constante de uma grande gota na ponta do eletrodo, que não chega a se destacar, toca a poça e ocorre o curto
Teste 3 D 08 LV	Presença constante de uma grande gota na ponta do eletrodo, que não chega a se destacar, toca a poça e ocorre o curto
Teste 4 D 08 LV	Presença constante de uma grande gota na ponta do eletrodo, que não chega a se destacar, toca a poça e ocorre o curto
Teste 8 D 08 LV	Presença constante de uma grande gota na ponta do eletrodo, que não chega a se destacar, toca a poça e ocorre o curto
Teste 5 D 08 LV	Presença constante de uma grande gota na ponta do eletrodo, que não chega a se destacar, toca a poça e ocorre o curto
Teste 1 D 08 LV	Presença constante de uma grande gota na ponta do eletrodo, que não chega a se destacar, toca a poça e ocorre o curto
Teste 7 D 08 LV	Presença constante de uma grande gota na ponta do eletrodo, que não chega a se destacar, toca a poça e ocorre o curto

Tabela E.2 – Geometria do arco elétrico resultante nos experimentos com parâmetros de soldagem superiores (HV).

<b>Experimento</b>	<b>Observações</b>
Teste 2 D 12 HV	Período de curto-circuito e globular no início do cordão, arco longo, formato sino.
Teste 6 D 12 HV	Período de curto-circuito devido a alta velocidade de alimentação de arame, arco longo, formato sino.
Teste 3 D 12 HV	Gotas grandes, mas frequentes, arco médio, formato sino.
Teste 4 D 12 HV	Arco bem curto devido a alta velocidade de alimentação de arame.
Teste 8 D 12 HV	Arco bem curto devido a alta velocidade de alimentação de arame.
Teste 5 D 12 HV	Aerossol com tendência a globular, como no teste 1, arco com formato de sino.
Teste 1 D 12 HV	Globular tentando a aerossol, pode estar na fase de transição, comprimento de arco intermediário.
Teste 7 D 12 HV	Arco mais curto, devido a velocidade de alimentação de arame ser maior que o teste 3.
Teste 2 D 10 HV	Arco de comprimento variável, formato de sino e elipse.
Teste 6 D 10 HV	Arco de comprimento variável, formato de sino e elipse.
Teste 3 D 10 HV	Intermitência entre globular e aerossol, comprimento de arco variável, formato de sino e elipse.
Teste 4 D 10 HV	Breve período de curto-circuito no início da solda, arco formato elíptico nos instantes de globular.
Teste 8 D 10 HV	Breve período de curto-circuito no início da solda, arco formato elíptico nos instantes de globular.
Teste 5 D 10 HV	Intermitência entre globular e aerossol, com arco elíptico (globular) e sino (aerossol).
Teste 1 D 10 HV	Intermitência entre globular e aerossol, com arco elíptico (globular) e sino (aerossol).
Teste 7 D 10 HV	Arco de comprimento variável, formato de sino e elipse.
Teste 2 D 08 HV	Breve período de curto-circuito e aerossol, voltando para globular, arco elíptico.
Teste 6 D 08 HV	Breve período de curto-circuito e aerossol, voltando para globular, arco elíptico.
Teste 3 D 08 HV	Gotas grandes e lentas, arco elíptico.
Teste 4 D 08 HV	Breve período de aerossol com retorno ao estado globular, arco elíptico.
Teste 8 D 08 HV	Breve período de aerossol com retorno ao estado globular, arco elíptico.
Teste 5 D 08 HV	Gotas grandes e lentas, arco elíptico.
Teste 1 D 08 HV	Gotas grandes e lentas, arco elíptico.
Teste 7 D 08 HV	Gotas grandes e lentas, arco elíptico.

## APÊNDICE F – Geometria do Arco Elétrico Resultante nos Experimentos com Gases Puros e Misturas Gasosas

Seguem abaixo as Tabelas F.1, F.2 e F.3, com comentários sobre as geometrias dos arcos elétricos resultantes nos experimentos com gases puros (Ar e CO<sub>2</sub>) e misturas gasosas (Ar + 2% O<sub>2</sub>, Ar + 10% CO<sub>2</sub> e Ar + 25% CO<sub>2</sub>). Os formatos de arco elétrico obtidos foram elípticos, para os experimentos que apresentaram transferência globular, e em forma de sino, para os experimentos transferência por aerossol.

Tabela F.1 – Geometria do arco elétrico gerado nos experimentos com gases puros e misturas gasosas para o arame-eletrodo de 1,2 mm.

Experimento	Observações
1 Ar O2 12 mm	Comprimento de arco longo e formato de sino.
2 Ar O2 12 mm	Comprimento de arco curto e formato de sino.
3 Ar O2 12 mm	Comprimento de arco longo e formato de sino.
4 Ar O2 12 mm	Comprimento de arco curto e formato de sino.
5 C10 12 mm	Ocorrência de curto-circuitos na abertura do arco, arco curto com formato alternado entre elíptico e sino.
6 C10 12 mm	Curto-circuitos na abertura do arco, arco muito curto, gota se transfere muito próxima ao MB, quase um curto-circuito
7 C10 12 mm	Comprimento de arco longo, arco curto com formato alternado entre elíptico (globular) e sino (aerossol).
8 C10 12 mm	Comprimento de arco curto, curto-circuito na abertura do arco e por alguns instantes, formato alternado.
9 C25 12 mm	Globular com grandes gotas formadas, por vezes explodem antes de chegar à poça, arco médio e elíptico.
10 C25 12 mm	Globular com arco curto e elíptico, por vezes tendendo a passar para aerossol.
11 C25 12 mm	Globular com grandes gotas, arco longo e elíptico.
12 C25 12 mm	Globular com arco curto e elíptico, por vezes tendendo a passar para aerossol.
13 Ar 12 mm	Arco de comprimento médio e formato de sino.
14 Ar 12 mm	Arco médio com forma de sino, com breve início de transferência rotacional após a abertura do arco.
15 Ar 12 mm	Arco longo e forma de sino.
16 Ar 12 mm	Arco médio com forma de sino, breve início de transferência rotacional após a abertura do arco.
17 CO2 12 mm	Arco curto, chega a iniciar a formação de gota, mas logo toca a poça de fusão, forma de sino.
18 CO2 12 mm	Longo período sem arco no início, provável defeito. Arco com forma de sino e bem curto.
19 CO2 12 mm	Arco curto e forma de sino, chega a iniciar a formação de gota, mas logo toca a poça de fusão.
20 CO2 12 mm	Arco curto e forma de sino, chega a iniciar a formação de gota, mas logo toca a poça de fusão.

Tabela F.2 – Geometria do arco elétrico gerado nos experimentos com gases puros e misturas gasosas para o arame-eletrodo de 1,0 mm.

Experimento	Observações
21 Ar O2 10 mm	Arco médio e forma de sino, demora ao formar uma grande gota, e ao cair vem o fluxo de gotículas típicas do aerossol.
22 Ar O2 10 mm	Arco médio com forma de sino.
23 Ar O2 10 mm	Arco médio e forma de sino, demora ao formar uma grande gota, e ao cair vem o fluxo de gotículas típicas do aerossol.
24 Ar O2 10 mm	Arco longo e forma de sino, com breve transferência rotacional após a abertura do arco.
25 C10 10 mm	Arco muito curto e elíptico, maior parte transferência globular com poucos instantes em aerossol.
26 C10 10 mm	Arco médio e forma alternada, formação de gotas grandes com consequente fluxo de gotículas típicas do aerossol.
27 C10 10 mm	Arco médio e forma alternada, formação de gotas grandes com consequente fluxo de gotículas típicas do aerossol.
28 C10 10 mm	Comprimento de arco médio e forma de sino.
29 C25 10 mm	Arco médio forma elíptica, transferência globular com períodos de curto-circuito no início da solda.
30 C25 10 mm	Arco médio forma elíptica, transferência globular com períodos de curto-circuito e instantes de fluxo goticular.
31 C25 10 mm	Arco médio e forma elíptica, transferência de gotas grandes, por vezes caindo rolando (girando norte-sul).
32 C25 10 mm	Arco médio e forma elíptica, transferência de gotas grandes, por vezes caindo rolando (girando norte-sul).
33 Ar 10 mm	Arco elétrico longo e delgado (sino), típica transferência por aerossol.
34 Ar 10 mm	Arco elétrico longo e delgado (sino), típica transferência por aerossol.
35 Ar 10 mm	Arco elétrico longo e delgado (sino), típica transferência por aerossol.
36 Ar 10 mm	Arco elétrico comprimento um pouco menor e delgado (sino), típica transferência por aerossol.
37 CO2 10 mm	Arco curto e forma de sino, chega a iniciar a formação de gota, mas logo toca a poça de fusão
38 CO2 10 mm	Arco curto e forma de sino, chega a iniciar a formação de gota, mas logo toca a poça de fusão
39 CO2 10 mm	Arco curto e forma de sino, chega a iniciar a formação de gota, mas logo toca a poça de fusão
40 CO2 10 mm	Arco curto e forma de sino, chega a iniciar a formação de gota, mas logo toca a poça de fusão

Tabela F.3 – Geometria do arco elétrico gerado nos experimentos com gases puros e misturas gasosas para o arame-eletrodo de 0,8 mm.

Experimento	Observações
41 Ar O2 08 mm	Gotas grandes e lentas ao cair, arco elíptico.
42 Ar O2 08 mm	Transferência globular com gotas menores e mais frequentes do que o experimento 41, arco elíptico.
43 Ar O2 08 mm	Gotas grandes e lentas ao cair, arco elíptico.
44 Ar O2 08 mm	Transferência globular com gotas menores e mais frequentes do que o experimento 43, arco elíptico.
45 C10 08 mm	Formação de gotas grandes e levemente ovais, ficando presas no arame por algum tempo pelo pescoço, arco com forma elíptica.
46 C10 08 mm	Formação de gotas médias, ficando presas no arame por algum tempo pelo pescoço, arco com forma elíptica.
47 C10 08 mm	Formação de gotas grandes e levemente ovais, ficando presas no arame por algum tempo pelo pescoço, arco com forma elíptica.
48 C10 08 mm	Formação de gotas médias e levemente ovais, ficando presas no arame por algum tempo pelo pescoço, arco com forma elíptica.
49 C25 08 mm	Formação de gotas grandes e levemente ovais, ficando presas no arame por algum tempo pelo pescoço, arco com forma elíptica.
50 C25 08 mm	Arco médio e forma elíptica, transferência de gotas grandes, por vezes caindo rolando (girando norte-sul).
51 C25 08 mm	Gotas grandes e lentas ao cair, arco elíptico.
52 C25 08 mm	Gotas um pouco menores e lentas ao cair, arco elíptico.
53 Ar 08 mm	Formação de gota grande com subsequente transferência de gotas menores e com maior frequência, periodicamente, arco de forma alternada.
54 Ar 08 mm	Formação de gota grande com subsequente transferência de gotas menores e com maior frequência, periodicamente, arco de forma alternada.
55 Ar 08 mm	Formação de gota grande com subsequente transferência de gotas menores e com maior frequência, periodicamente, arco de forma alternada.
56 Ar 08 mm	Formação de uma gota grande seguido de fluxo de gotículas, nesse instante o arco modifica de elíptico para forma de sino.
57 CO2 08 mm	Gota chega a se formar, mas ao transferir toca na poça de fusão ainda presa ao arame, arco com forma de sino.
58 CO2 08 mm	Gota chega a se formar, mas ao transferir toca na poça de fusão ainda presa ao arame, arco com forma de sino.
59 CO2 08 mm	Gota não chega a se formar, arco com forma de sino.
60 CO2 08 mm	Gota chega a se formar, mas ao transferir toca na poça de fusão ainda presa ao arame, arco com forma de sino.