

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**APLICAÇÃO DO PROCESSO MIG/MAG PULSADO COM DUPLO  
ARAME E POTENCIAIS ISOLADOS EM SOLDAGENS DE  
REVESTIMENTO**

**TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA  
CATARINA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**MARCELO FERREIRA MOTTA**

**FLORIANÓPOLIS – SC, SETEMBRO DE 2002**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

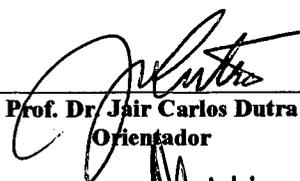
**MARCELO FERREIRA MOTTA**

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de

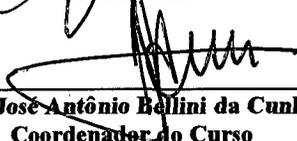
**DOUTOR EM ENGENHARIA**

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA**

sendo aprovada em sua forma final.



**Prof. Dr. Jair Carlos Dutra**  
Orientador



**Prof. Dr. José Antônio Bellini da Cunha Neto**  
Coordenador do Curso

**BANCA EXAMINADORA**

  
**Prof. Dr. Jesualdo Pereira Farias**  
Membro  
**Prof. Dr. Américo Scotti**  
Membro  
**Prof. Dr. Carlos Eduardo Iconomus Baixo**  
Membro  
**Prof. Dr. Carlos Enrique Bohorques Niño**  
Membro

**“Se queres progredir não deves  
repetir a história, mas fazer uma  
história nova.  
Para construir uma nova história é  
preciso trilhar novos caminhos.”  
Gandhi**

À minha esposa, Raquel.  
Ao meu filho, Pedro.  
Aos meus pais, Sebastião e Aguiar.

## Agradecimentos

Agradeço, muitíssimo, àqueles que me ajudaram a realizar este trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Jair Carlos Dutra, pela orientação e pelo profissionalismo demonstrado nestes quatro anos de trabalho, contribuindo em muito para o meu aperfeiçoamento.

Ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia mecânica da UFSC, pela oportunidade de realização deste trabalho, em especial, ao Prof. Coordenador Julio César Passos, por apoiar e financiar o transporte da bancada de experimentos para a Universidade Federal de Uberlândia, onde foi realizada uma etapa dos ensaios experimentais.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Universidade Federal do Ceará (UFC) pelo apoio financeiro.

Aos colegas da Universidade Federal do Ceará, em especial ao Prof. Antônio Salvador da Rocha, por ter assumido minhas atividades nesse período em que me afastei.

À equipe de profissionais do LAPROSOLDA/UFU, representada pelos professores Américo Scotti e Valtair Ferrarezi, pelo empréstimo da bancada de filmagem e auxílio na realização dos ensaios.

Ao engenheiro Carlos Eduardo Iconomos Baixo, pelas valiosas informações e sugestões passadas durante o período de elaboração e realização do trabalho.

Ao engenheiro Raul Gohr Jr, pelo auxílio no desenvolvimento dos “softwares” e “hardwares” que foram valiosos para a concretização da tese.

Aos engenheiros Moisés Alves de Oliveira, Erwin Teichman e Victor Vergara pelas inúmeras colaborações e sugestões dadas durante a realização dos ensaios.

Aos colegas da equipe LABSOLDA, Denise Donim, Jean Vieira, Pablo Arruda, Tiago Cunha e Valério Quadros que sempre se mostraram prestativos e muito contribuíram com esse trabalho.

Ao bolsista e amigo Abílio Orcioli Neto, que muito me ajudou na realização e análise dos experimentos.

Aos demais bolsistas do LABSOLDA pela amizade desenvolvida ao longo dessa jornada.

Ao companheiro Larry Fiori Ollé, que em inúmeras vezes nos auxiliou nesta pesquisa, e a quem tenho imensa admiração e carinho (*In Memorium*).

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	x
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xvi
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	xviii
<b>RESUMO</b> .....	xx
<b>ABSTRACT</b> .....	xxi
<b>1.1 Introdução</b> .....	1
<b>1.2 Apresentação da tese</b> .....	4
<b>2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS</b> .....	5
<b>2.1 Introdução</b> .....	5
<b>2.2 Arco Voltaico</b> .....	5
2.2.1 Região de queda catódica .....	6
2.2.2 Coluna de plasma .....	6
2.2.3 Região anódica .....	7
<b>2.3 Influência de campos magnéticos sobre os arcos</b> .....	7
<b>2.4 Transferência metálica</b> .....	9
2.4.1 Tipos de transferência metálica.....	12
2.4.1.1 Transferência metálica por curto-circuito.....	12
2.4.1.2 Transferência por vôo livre na forma globular.....	13
2.4.1.3 Transferência por projeção goticular (“spray”).....	13
<b>2.5 Pressão do arco</b> .....	14
<b>2.6 Penetração em soldagem</b> .....	15
<b>2.7 Efeitos da velocidade sobre os depósitos</b> .....	16
<b>2.8 Corrente Pulsada no Processo MIG/MAG</b> .....	17
2.8.1 Determinação dos parâmetros de destacamento de gotas.....	18
2.8.1.1 Requisito 1 – Características da transferência de material.....	19
2.8.1.2 Requisito 2 – Características de fusão de material.....	20
2.8.1.3 Requisito 3 – Critério de estabilidade do arco no período de base..	22
2.8.2 Técnicas de identificação da transferência por projétil para determinação dos parâmetros de destacamento de gota.....	22
2.8.3 Procedimento para determinação dos parâmetros e das variáveis da corrente pulsada.....	23
<b>2.9 Corrente pulsada com pulsação térmica</b> .....	24
<b>2.10 O Processo MIG/MAG com Dois Arames</b> .....	25
2.10.1 Classificação.....	25
<b>2.11 Alinhamento dos eletrodos em relação à direção de deslocamento das tochas</b> .....	29
<b>2.12 Efeitos de variáveis do processo sobre o perfil do cordão</b> .....	31
<b>3 SISTEMAS DE MEDIÇÃO, EQUIPAMENTOS DE SOLDAGEM E DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE RESPOSTAS DO PROCESSO</b> .....	33
<b>3.1 Introdução</b> .....	33
<b>3.2 Sistemas de medição</b> .....	33
3.2.1 Sistema de medição das tensões e correntes de soldagem .....	33
3.2.2 Sistema de medição das velocidades de arames (MVA) .....	34
3.2.3 Sistema de aquisição de dados .....	35
3.2.4 Sistema de comando das fontes .....	36
<b>3.3 Equipamento e acessórios de soldagem</b> .....	36
3.3.1 Sistema de deslocamento das soldagens .....	36

3.3.2	Tochas de soldagem e suportes de fixação .....	36
3.3.3	Robô industrial .....	37
3.3.4	Fontes de soldagem MTE DIGITEC 450 .....	37
3.4	Características dinâmicas das fontes de soldagem .....	38
3.5	Implementação da tecnologia de defasagem dos pulsos de corrente .....	40
3.6	Definição das variáveis de resposta dos experimentos .....	41
3.7	Metodologia de medição das características geométricas dos depósitos .....	42
3.8	Considerações finais .....	42
<b>4</b>	<b>BANCADA DE FILMAGEM E SISTEMA DE SINCRONISMO DE SINAIS .....</b>	<b>43</b>
4.1	Introdução.....	43
4.2	Filmagens com a câmera de alta velocidade.....	43
4.2.1	Bancada de Filmagem.....	43
4.2.2	Incerteza associada ao sincronismo das imagens com os sinais elétricos de soldagem.....	47
4.2.2.1	Incerteza máxima no sincronismo das imagens com o sinal da corrente de soldagem.....	48
4.2.3	Programas para tratamento dos sinais e análise das transferências metálicas.....	49
4.2.4	Avaliação dos sistemas utilizados para realizar o sincronismo dos sinais.....	50
4.2.4.1	Soldagem com o Duplo Arame no modo de transferência por curto-circuito.....	50
4.2.4.2	Soldagem com o Duplo Arame no modo corrente pulsada.....	53
4.2.5	“Software” para estudo da transferência metálica.....	57
4.3	Considerações finais.....	58
<b>5</b>	<b>ESTUDO DA DEFASAGEM NOS PULSOS DE CORRENTE - TRANSFERÊNCIA METÁLICA.....</b>	<b>59</b>
5.1	Introdução.....	59
5.2	Metodologia Experimental.....	59
5.2.1	Bancada de equipamentos e materiais utilizados.....	59
5.2.2	Definição dos parâmetros de destacamento de gotas.....	60
5.2.3	- Definição dos fatores de entrada (variáveis independentes).....	62
5.2.4	Definição da variável de resposta.....	63
5.2.5	Procedimento Experimental.....	65
5.2.5.1	Metodologia de medição das trajetórias das gotas.....	65
5.2.6	Resultados experimentais e análise estatística.....	65
5.2.6.1	Análise de correlação.....	67
5.2.7	Discussão dos resultados.....	67
5.2.7.1	Efeitos dos fatores sobre os desvios nas trajetórias das gotas (“ $\theta_e$ ” e “ $\theta_d$ ”) .....	67
5.2.7.2	Efeitos sobre o módulo da velocidade da gota metálica.....	71
5.3	Considerações finais.....	76
<b>6</b>	<b>ESTUDO DA DEFASAGEM NOS PULSOS DE CORRENTE – ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DAS SOLDAS.....</b>	<b>77</b>

<b>6.1 Introdução.....</b>	<b>77</b>
<b>6.2 Metodologia Experimental.....</b>	<b>77</b>
6.2.1 Etapa 1 – Soldagem de deposição sobre chapas na posição plana.....	77
6.2.1.1 Definição dos fatores de entrada (variáveis independentes).....	77
6.2.1.2 Definição das variáveis de saída.....	78
6.2.1.3 Ensaios experimentais.....	78
6.2.2 Etapa 2 - Soldagem sobre chapas na posição sobre cabeça.....	80
6.2.2.1 Definição dos fatores de entrada (variáveis independentes).....	80
6.2.2.2 Definição das variáveis de resposta.....	80
6.2.2.3 Ensaios experimentais.....	81
6.2.3 Resultados experimentais e Análise estatística.....	82
6.2.3.1 Etapa 1 – Soldagem de deposição sobre chapas na posição plana...	82
6.2.3.2 Parte 2 - Soldagem sobre chapas na posição sobre cabeça.....	89
<b>6.3 Considerações finais.....</b>	<b>102</b>
<b>7 ESTUDO DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO.....</b>	<b>104</b>
<b>7.1 Introdução.....</b>	<b>104</b>
<b>7.2 Metodologia Experimental.....</b>	<b>104</b>
<b>7.3 Bancada de ensaios e materiais .....</b>	<b>104</b>
<b>7.4 Definição das variáveis de saída.....</b>	<b>105</b>
<b>7.5 Ensaios experimentais.....</b>	<b>105</b>
7.5.1 Etapa 1 – Efeito da variável ângulo entre as tochas sobre as características geométricas dos depósitos. ....	105
7.5.1.1 Procedimento experimental.....	106
7.5.2 Etapa 2 - Efeitos da variável distancia entre arames sobre as características geométricas dos depósitos. ....	106
7.5.2.1 Procedimento experimental.....	106
7.5.3 Etapa 3 - Efeitos das variáveis posicionamentos dos eletrodos em relação ao deslocamento da soldagem; corrente média; comprimento dos arcos e defasagem dos pulsos de corrente sobre o perfil dos cordões.....	107
7.5.3.1 Definição dos níveis das variáveis selecionadas.....	107
7.5.3.2 Procedimento experimental.....	107
<b>7.6 Resultados dos ensaios experimentais e discussão</b>	<b>109</b>
7.6.1 Etapa 1 – Efeito da variável ângulo entre as tochas sobre as características geométricas dos depósitos.....	109
7.6.2 Etapa 2 - Efeito da distância entre os eletrodos sobre as características geométricas das soldas. ....	111
7.6.3 Etapa 3 Efeitos das variáveis posicionamentos dos eletrodos; corrente média; comprimento dos arcos e defasagem dos pulsos de corrente sobre o perfil dos cordões.....	112
7.6.3.1 Análise de correlação.....	112
7.6.3.2 Análise de correlação parcial.....	114
<b>7.7 Considerações finais.....</b>	<b>115</b>
<b>8 APLICAÇÃO DO PROCESSO MIG/MAG PULSADO COM DUPLO ARAME E POTENCIAIS ISOLADOS EM OPERAÇÕES DE REVESTIMENTO METÁLICO.....</b>	<b>116</b>
<b>8.1 Introdução.....</b>	<b>116</b>
<b>8.2 Metodologia Experimental.....</b>	<b>116</b>
<b>8.3 Bancada de equipamentos, materiais utilizados e software para comando remoto das fontes de soldagem.....</b>	<b>117</b>

<b>8.4 Determinação dos parâmetros de destacamento de gotas do eletrodo tubular em estudo.....</b>	<b>119</b>
<b>8.5 Estudo das variáveis fixas e das ajustáveis do processo duplo arame para a realização das soldagens de revestimento metálico.....</b>	<b>121</b>
8.5.1 Variáveis fixas.....	122
8.5.2 Variáveis ajustáveis.....	130
8.5.3 Definição das variáveis de saída.....	131
8.5.4 Procedimento experimental para determinação da faixa operacional do duplo arame nas operações de revestimento.....	131
8.5.5 Resultados experimentais e análise estatística.....	133
<b>8.6 Programa de seleção das variáveis de soldagem do processo MIG/MAG Pulsado Térmico com Duplo Arame e Potenciais Isolados, quando aplicado às operações de revestimento.....</b>	<b>136</b>
<b>8.7 Verificação experimental das equações do programa proposto.....</b>	<b>139</b>
<b>8.8 Considerações finais.....</b>	<b>142</b>
<b>9 CONCLUSÕES.....</b>	<b>144</b>
<b>10 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>146</b>
<b>11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>147</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Capítulo 1 - INTRODUÇÃO</b>	
Figura 1.1 - Representação esquemática da defasagem dos pulsos de corrente entre os dois arcos voltaicos.....	2
<b>Capítulo 2 – CONCEITOS FUNDAMENTAIS</b>	
Figura 2.1 - Representação esquemática da queda de tensão ao longo de um arco.....	5
Figura 2.2 - Isotermas de temperatura de um arco TIG em corrente contínua com polaridade direta (CC <sup>+</sup> ).....	7
Figura 2.3 - a) Representação esquemática do sopro causado pelo efeito da posição da conexão da corrente; b) circuito equivalente ilustrando a concentração das linhas de força (QUITES & DUTRA, 1979).....	8
Figura 2.4 – Interação de campos magnéticos entre dois condutores paralelos; a) fluxo de corrente no mesmo sentido em ambos os condutores; b) fluxo em sentidos opostos (QUITES & DUTRA, 1979).....	8
Figura 2.5 - Representação esquemática do sopro magnético causado pela proximidade dos arcos; a) correntes fluem no mesmo sentido; b) correntes fluem em sentidos opostos (QUITES & DUTRA, 1979).....	9
Figura 2.6 - Geometria do fluxo de corrente dentro da gota; a) fluxo divergente, a força eletromagnética age tendendo a destacar a gota; b) fluxo convergente, a força tende a sustentar a gota (NORRISH, 1992).....	11
Figura 2.7 - Representação esquemática da força eletromagnética ( $F_{elm}$ ) e de suas componentes radial ( $F_{elmr}$ ) e longitudinal ( $F_{elml}$ ). $i$ representa as linhas de corrente. ....	14
Figura 2.8 - Representação esquemática de um perfil geométrico de um cordão de solda. L – largura; R – reforço Pp - penetração primária; Ps – penetração secundária. ....	15
Figura 2.9 - Oscilograma de corrente pulsada. $I_p = 300$ A; $t_p = 3,9$ ms; $I_b = 50$ A; $t_b = 23$ ms. ....	18
Figura 2.10 - Regiões de relacionamento entre corrente e tempo de pulso e as respectivas condições de transferência metálica (ALLUM, 1985).....	19
Figura 2.11 - Oscilograma de corrente pulsada com pulsação térmica. $I_p$ - corrente de pulso; $t_p$ – tempo de pulso; $I_b-P$ – corrente de base no período de pulso térmico; $I_b-B$ – corrente de base no período de base térmica; $t_b-P$ – tempo de base no período de pulso térmico; $t_b-B$ – tempo de base na base térmica; $\tau-P$ – tempo de pulso térmico; $\tau-B$ – tempo de base térmica.....	25
Figura 2.12 - Representação do sistema com potencial único.....	26
Figura 2.13 - Representação do sistema com potencial único empregando duas fontes de potência.....	27
Figura 2.14 - Representação de oscilograma de corrente, retratando o sincronismo na pulsação das fontes (pulsos ocorrendo simultaneamente). ....	28
Figura 2.15 - Representação esquemática dos sistemas com duplo arame com potenciais isolados. ....	28
Figura 2.16 - Foto de duas tochas montadas para realizar soldagem automatizada com o processo MIG/MAG duplo arame. Eletrodos posicionados lado a lado.....	30
<b>Capítulo 3 – SISTEMAS DE MEDIÇÃO, EQUIPAMENTOS DE SOLDAGEM E DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE RESPOSTA DO PROCESSO.</b>	

Figura 3.1 - Medidor de tensão e corrente. ....	33
Figura 3.2 - Transdutor de corrente do tipo "Hall".....	34
Figura 3.3 - MVA e o transdutor ótico usado para medir velocidade de arame. ....	33
Figura 3.4 – Placa de aquisição de sinais utilizada (INTERDATA).....	36
Figura 3.5 - Sistema de deslocamento das soldagens.....	36
Figura 3.6 - Suportes de fixação e tochas de soldagem utilizados nos ensaios experimentais deste trabalho.....	37
Figura 3.7 - Fotos das fontes que compõem o sistema MIG/MAG Duplo Arame Com Potenciais Isolados.....	38
Figura 3.8 - Taxas de variação da corrente na subida e na descida dos pulsos.....	39
Figura 3.9 - Sobreposição das curvas da figura 3.8 para comparação das taxas de subida e de descida das correntes de ambas as fontes de soldagem.....	39
Figura 3.10 - Defasagem de tempo entre os pulsos de corrente das fontes. A diferença entre os tempos " $\Delta$ tempo", na parte inferior dos oscilogramas, corresponde ao tempo de defasagem " $T_d$ "( $15,7-5,5 = 10,2$ ms). ....	40
Figura 3.11 - Pulsos de corrente em fase de destacamento de gotas ( $T_d = 0,01$ ms). ....	41
Figura 3.12 - Representação esquemática das dimensões geométricas das seções transversais dos cordões de solda. ....	41
 <b>Capítulo 4 – BANCADA DE FILMAGEM E SISTEMA DE SINCRONISMO DE SINAIS</b>	
Figura 4.1 - Representação esquemática da bancada montada para executar as filmagens: 1- câmera de filmagem; 2 – sensores de corrente; 3 – dispositivo de rotação dos tubos; 4 – sistemas de aquisição de dados e 5 – sistema laser/óptico. ....	44
Figura 4.2 - Representação esquemática do sistema laser/óptico.....	45
Figura 4.3 - Representação esquemática do sistema de aquisição e sincronismos dos sinais. U1 – sinal de tensão do arco 1; U2 – sinal de tensão do arco 2; I1 – sinal da corrente que passa pelo arco 1 e I2 – sinal da corrente que passa pelo arco 2.....	46
Figura 4.4 - Representação esquemática da transformação do sinal da câmera. ....	47
Figura 4.5 - Ilustração esquemática da incerteza máxima no sincronismo entre o instante de gravação da imagem e o sinal adquirido no canal 1 (canal de aquisição de corrente que passa pelo arco 1).....	48
Figura 4.6 – Ilustração esquemática da incerteza máxima no sincronismo entre o instante de gravação da imagem e o sinal adquirido no canal 3 (canal de aquisição de tensão do arco 1).....	48
Figura 4.7 – Fluxograma da lógica do programa GERADADOS.....	50
Figura 4.8 - Verificação do sincronismo entre as imagens gravadas e os sinais de tensão e corrente de ambos os arcos elétricos: a) seqüência de imagens de curtos circuitos em ambos os eletrodos; b) oscilogramas de tensão e corrente do eletrodo da esquerda (fonte 1); c) oscilogramas de tensão e corrente do eletrodo da direita (fonte 2).....	52

Figura 4.9 – Verificação do sincronismo entre as imagens gravadas e os sinais de tensão e corrente de ambos os arcos elétricos: a) seqüência de imagens mostrando a pulsação de corrente em ambos os eletrodos; b) oscilogramas de tensão e corrente do eletrodo da esquerda (fonte 1- mestra) e c- oscilogramas de tensão e corrente do eletrodo da direita (fonte 2- escrava) .....	55
Figura 4.10 – Tela principal do programa “DUPLO ARAME”, desenvolvido para auxiliar os estudos das transferências metálicas e dos arcos elétricos.....	57
<b>Capítulo 5 - ESTUDO DA DEFASAGEM NOS PULSOS DE CORRENTE - TRANSFERÊNCIA METÁLICA</b>	
Figura 5.1- Curvas dos parâmetros de destacamento de gota levantados por Dutra et al. (1996), para arames da classe ER 70s-6 de 1,0 mm de diâmetro.....	61
Figura 5.2- Oscilogramas de corrente em sincronismo com as imagens gravadas pela câmera. O eletrodo posicionado à esquerda é comandado pela fonte mestra (curvas de cor vermelha). O da direita é comandado pela fonte escrava (curvas de cor azul). Parâmetros da corrente pulsada: $I_m = 80$ A; $I_p = 280$ A; $t_p = 3,3$ ms; $I_b = 48$ A; $t_b = 20,5$ ms.....	62
Figura 5.3 - Oscilogramas de corrente que ilustram as três situações de defasagens estudadas: a - Pulsos de corrente defasados. b - Pulsos de corrente em fase. c - Condição de defasagem denominada de meio pulso. $T_d$ – tempo de defasagem entre os pulsos de corrente.....	63
Figura 5.4 - Ângulo “ $\theta$ ” de desvio na trajetória das gotas. Arcos pulsando em fase e corrente média de 80 A. $\theta_e = 30^\circ$ ; $\theta_d = 16^\circ$ .....	66
Figura .5 5 - Desvio “ $\theta$ ” das gotas em função dos fatores corrente média e defasagem de pulsos de corrente. ....	68
Figura 5. 6 a - Foto dos arcos voltaicos. Arco esquerdo está no período de pulso da corrente $I_p = 280$ A e o direito na base $I_b = 50$ A. b - Arco direito está no período de pulso da corrente. c -Ambos estão no período de pulso $I_p = 280$ A. ....	68
Figura 5.7 - Ângulo $\theta = 6^\circ$ de desvio da gota. A Corrente de pulso do eletrodo esquerdo no instante de destacamento é de 280 A. A corrente no eletrodo direito é de 50 A.....	70
Figura 5.8 - Representação esquemática do dispositivo de rotação dos tubos. O desenho mostra que o arco do eletrodo esquerdo está mais propenso à ação do sopro magnético. ....	71
Figura 5.9 - Oscilogramas de tensão dos arcos voltaicos para uma corrente média pulsada de 120 A. a - pulsos de corrente defasados; b - mesmo oscilograma da Figura 5.9 a em escala reduzida de tempo; c - pulsos de corrente em fase; d - mesmo oscilograma da Figura 5.9 c em escala reduzida de tempo; e - condição de meio pulso; f - mesmo oscilograma da Figura 5.9 d em escala reduzida de tempo.....	72
Figura 5.10 a - Deslocamento típico de uma gota no tempo; b - variação da velocidade da gota ao longo da trajetória. Corrente média de soldagem 80 A. ....	74
Figura 5.11 a e b Velocidades das gotas após os destacamentos. Apenas o fator defasagem está sendo variado. c e d. Apenas o fator corrente média de soldagem é variado. ....	75

## Capítulo 6 – ESTUDO DA DEFASAGEM NOS PULSOS DE CORRENTE – ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DAS SOLDAS

Figura 6.1 – Foto ilustrativa da posição e sentido de deslocamento das tochas.....	81
Figura 6.2 - Efeito da defasagem nos pulsos de corrente sobre o índice de convexidade dos cordões.....	84
Figura 6.3 - Efeito da interação corrente média e defasagem sobre o índice de convexidade.....	84
Figura 6.4 - Efeito da corrente sobre a porcentagem de área diluída.....	85
Figura 6.5 - Efeito da corrente média de soldagem sobre a penetração lateral média dos cordões.....	85
Figura 6.6 - Efeito da defasagem sobre a penetração no centro dos cordões.....	86
Figura 6.7 - Efeito da corrente média sobre a penetração no centro dos cordões.....	86
Figura 6.8 - Efeito da corrente média sobre o perfil de penetração das soldas.....	87
Figura 6.9 - Efeito da defasagem dos pulsos de corrente sobre o perfil de penetração das soldas.....	88
Figura 6.10 – Efeito da Interação corrente média e defasagem sobre o perfil de penetração das soldas.....	88
Figura 6.11 – Seções transversais de soldas realizadas com os pulsos de corrente em fase. a) 80 A; b) 120 A e c) 160 A. Escalas em mm.....	89
Figura 6.12 – Gráficos de dispersão dos valores dos desvios-padrão das tensões nos períodos de pulso e de base da corrente. a - Desvio padrão da tensão no período de pulso do arco 1; b -Desvio padrão da tensão no período de base do arco 1; c - Desvio padrão da tensão no período de pulso do arco 2; d - Desvio-padrão da tensão no período de base do arco 2.....	91
Figura 6.13 - Oscilogramas de tensões dos arcos voltaicos para uma corrente média de 120 A/arame. a e b - pulsos de corrente defasados; c e d - pulsos em fase; e e f pulsação aleatória da corrente.....	92
Figura 6.14 – Sequência de imagens mostrando as deflexões dos arcos. Por intermédio do sincronismo dos sinais, visualiza-se efeito da variação da corrente do arco direito sobre a oscilação da tensão do arco esquerdo.....	93
Figura 6.15 a) e b) – Fotos das camadas depositadas na condição de pulsos de corrente defasados. Corrente média de 120 A/arame.....	95
Figura 6.16 a) e b) - Fotos das camadas depositadas na condição de pulsos de corrente em fase. Corrente média de 120 A/arame.....	96
Figura 6.17 a) e b) - Fotos das camadas depositadas na condição de pulsos aleatórios. Corrente média de 120 A/arame.....	97
Figura 6.18 a) e b) – Resultados do ensaio com líquido penetrante feito sobre as chapas soldadas na condição de pulsos defasados.....	98
Figura 6.19 a) e b) - Resultados do ensaio com líquido penetrante feito sobre as chapas soldadas na condição de pulsos em fase.....	99
Figura 6.20 a) e b) - Resultados do ensaio com líquido penetrante feito sobre as chapas soldadas na condição de pulsos aleatórios.....	100
Figura 6.21 a) e b) – Características do perfil de penetração das camadas depositadas na condição de pulsos defasados. Escala em milímetros.....	101
Figura 6.22 a) e b) - Características do perfil de penetração das camadas depositadas na condição de pulsos em fase. Escala em milímetros.....	101
Figura 6.23 a) e b) - Características do perfil de penetração das camadas depositadas na condição de pulsos aleatórios. Escala em milímetros.....	102

## Capítulo 7 – ESTUDO DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO

Figura 7.1 – Distância “da” entre os arames.....	106
Figura 7.2 - Gráfico das penetrações no centro dos cordões em função do ângulo entre as tochas. ....	110
Figura 7.3 - Gráfico da variação dos perfis dos cordões em função do ângulo entre as tochas. ....	110
Figura 7.4 Gráfico das diluições dos cordões em função do ângulo entre as tochas.....	111
Figura 7.5– Gráficos das variações nas larguras e nos reforços dos cordões em função da distância entre arames. ....	111
<b>Capítulo 8 - APLICAÇÃO DO PROCESSO MIG/MAG PULSADO COM DUPLO ARAME E POTENCIAIS ISOLADOS EM OPERAÇÕES DE REVESTIMENTO METÁLICO</b>	
Figura 8.1- Bancada de equipamentos utilizada para realização das soldagens de revestimento. ....	117
Figura 8.2 - Tela principal do programa utilizado para comandar as fontes de soldagem. ....	118
Figura 8.3 - Posição de soldagem na qual foram realizados os ensaios.....	119
Figura 8.4 - Oscilogramas de tensão de ambos os arcos voltaicos para uma aquisição de 5s. $I_m = 120$ A/arame e $V_s = 60$ cm/min.....	121
Figura 8.5 - Os mesmos oscilogramas de tensão da figura anterior em escala reduzida de tempo. ....	121
Figura 8.6 - Aspectos dos cordões de solda executados com o duplo arame. $I_m = 120$ A/arame; $I_p = 320$ A; $t_p = 5,3$ ms; $I_b = 32$ A ; $t_b = 12,1$ ms e diâmetro de gota calculado de 1,62 mm. ....	121
Figura 8.7 - Pulsos térmicos de corrente estão em fase e os pulsos para destacamento de gotas defasados. ....	123
Figura 8.8 – Pulsos térmicos e os pulsos para destacamento de gotas estão em fase.....	123
Figura 8.9 – Pulsos térmicos de corrente defasados.....	123
Figura 8.10 - Aspectos dos cordões de solda realizados na condição de pulsos térmicos em fase e pulsos de destacamento de gotas defasados.....	125
Figura 8.11 - Aspectos dos cordões de solda realizados na condição de pulsos térmicos e pulsos de destacamento de gotas em fase.....	125
Figura 8.12- Soldas realizadas na condição de pulsos térmicos defasados.....	125
Figura 8.13 – Aspectos dos cordões de solda realizados com corrente pulsada, sem a pulsação térmica e com os pulsos de destacamento ocorrendo em fase. $I_m = 120$ A/arame; $I_p = 320$ A; $t_p = 5,3$ ms; $I_b = 32$ A; $t_b = 12,1$ ms; $V_{a\_aj1} = 6,8$ m/min e $V_{a\_aj2} = 6,7$ m/min.....	126
Figura 8.14 - Posicionamento das tochas lado a lado para as soldagens na direção horizontal e em tandem para soldagem na longitudinal.....	127
Figura 8.15– Fotos dos cordões de solda realizados segundo a direção horizontal. Os dois primeiros cordões, de cima para baixo, foram realizados com as tochas posicionadas em tandem, e, os outros dois, com elas posicionadas lado a lado.....	128
Figura 8.16 – Efeito da direção de soldagem sobre o índice de convexidade dos depósitos. ....	129
Figura 8.17 – Efeito da interação entre a posição dos eletrodos e a direção de soldagem sobre o índice de convexidade dos depósitos. ....	130

Figura 8.18 - Foto de uma das chapas submetida ao ensaio com líquido penetrante. Observa-se que não ocorreram defeitos. Condições de soldagem: $I_{mPt} = 140$ A/arame; $DPeB = 0\%$ ; $V_s = 85$ cm/min e $E_{Imp} = 3,3$ A.min/cm.....	134
Figura 8.19 - Superfície que mostra o comportamento da velocidade de arame em função das variáveis corrente média e velocidade de soldagem...	137
Figura 8.20 - Fluxograma do programa proposto. ....	138
Figura 8.21 – Foto das quatro camadas de revestimento confeccionadas com o processo MIG/MAG Pulsado Térmico com Duplo Arame e Potenciais Isolados .....	142

## LISTA DE TABELAS

### Capítulo 1 - INTRODUÇÃO

Tabela 2.1 – Classificação dos modos de transferência metálica pelo IIW (1977).....	12
---	----

### Capítulo 4 – BANCADA DE FILMAGEM E SISTEMA DE SINCRONISMO DE SINAIS

Tabela 4.1– Tabela gerada pelo programa “GERADADOS”. A primeira coluna da tabela traz o tempo de sincronismo. Nas demais colunas são listadas respectivamente: a corrente da fonte 1 – “mestra”, a corrente da fonte 2 – “escrava”, a tensão da fonte 1 – “mestra”, a tensão na fonte 2 – “escrava” e o número da imagem - “Frame”.....	49
---	----

Tabela 4.2 – Exemplo da tabela gerada pelo programa GERADADOS para o sincronismo dos sinais nas soldagens com curto circuito.....	53
---	----

Tabela 4.3 – Exemplo da tabela gerada pelo programa GERADADOS para o sincronismo dos sinais nas soldagens com corrente pulsada.....	56
---	----

### Capítulo 5 - ESTUDO DA DEFASAGEM NOS PULSOS DE CORRENTE - TRANSFERÊNCIA METÁLICA.

Tabela 5.1 - Parâmetros de destacamento de gotas para o duplo arame, obtidos com o auxílio das filmagens. O levantamento foi feito com eletrodos da classe ER 70S-6 de 1,0 mm de diâmetro.....	61
--	----

Tabela 5.2 - Condições de soldagem empregadas nos experimentos.....	64
---	----

Tabela 5.3 - Resultados experimentais obtidos nas filmagens.....	66
--	----

Tabela 5.4 - Correlação entre fatores e as respostas dos experimentos. Coeficientes e níveis de significância (valores entre parêntesis).....	67
---	----

Tabela 5.5 - Diâmetros de gotas medidos e respectivos desvios-padrão.....	73
---	----

### Capítulo 6 – ESTUDO DA DEFASAGEM NOS PULSOS DE CORRENTE – ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DAS SOLDAS

Tabela 6.1 - Condições de soldagem empregadas nos experimentos.....	79
---	----

Tabela 6.2 - Condições de soldagem empregadas nos experimentos.....	82
---	----

Tabela 6.3 - Valores medidos dos perfis geométricos dos cordões.....	82
--	----

Tabela 6.4 - Efeitos dos fatores e interação sobre o índice de convexidade (R/L).....	83
---	----

Tabela 6.5 - Efeitos dos fatores e interação sobre a área diluída das soldas (D%).....	84
--	----

Tabela 6.6 - Efeitos dos fatores e interação sobre a penetração lateral média das soldas (PLM). .....	85
---	----

Tabela 6.7 – Efeitos dos fatores e da interação sobre a penetração no centro das soldas (PC) .....	86
--	----

Tabela 6.8-Efeitos dos fatores e interação sobre o perfil de penetração das soldas (PL/PC).....	87
---	----

Tabela 6.9 – Desvios-padrão das tensões nos períodos de pulso e de base da corrente.	89
--	----

Tabela 6.10 - Efeito do fator defasagem sobre os desvios padrão das tensões nos períodos de pulso e de base da corrente. Nível de significância ( $\alpha$ ).....	90
---	----

### Capítulo 7 – ESTUDO DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO.

Tabela 7.1 - Condições de soldagem em que foram realizados os ensaios..	106
---	-----

Tabela 7.2 - Condições de soldagem em que foram realizados os ensaios..	107
---	-----

Tabela 7.3 – Sequência dos ensaios executados para o arame de 1,0 mm...	108
---	-----

Tabela 7.4 – Sequência dos ensaios executados para o arame de 1,2 mm.	108
Tabela 7.5 – Valores médios das características geométricas medidas nos cordões de solda.	109
Tabela 7.6 - Níveis de significância calculados para os efeitos dos ângulos das tochas sobre as variáveis de respostas.	110
Tabela 7.7 - Características geométricas medidas para os cordões soldados com arames de 1,0 mm.	112
Tabela 7.8 -Características geométricas medidas para os cordões soldados com arames de 1,2 mm.	113
Tabela 7.9 - Correlações entre as variáveis de entrada e as respostas dos experimentos. Coeficientes e níveis de significância (valores entre parênteses).	113
Tabela 7.10 - Coeficientes de correlação parcial entre as variáveis de entrada e as respostas dos experimentos.	114
<b>Capítulo 8 - APLICAÇÃO DO PROCESSO MIG/MAG PULSADO COM DUPLO ARAME E POTENCIAIS ISOLADOS EM OPERAÇÕES DE REVESTIMENTO METÁLICO</b>	
Tabela 8.1 – Composição química dos eletrodos utilizados nas soldagens de revestimento.	118
Tabela 8.2 - Parâmetros e variáveis de destacamento de gotas das duas correntes médias empregadas nas soldagens com pulsação térmica. Tempos de pulso e de base térmica foram de 0,5 s.	124
Tabela 8.3 - Parâmetros e variáveis de destacamento de gotas das duas correntes médias empregadas nas soldagens com pulsação térmica. Tempos de pulso e de base térmica foram de 0,5 se $T_d = 8,8$ ms.	128
Tabela 8.4 Valores medidos para a largura, o reforço e o índice de convexidade dos depósitos.	129
Tabela 8.5 - Níveis de significância ( $\alpha$ ) dos efeitos dos fatores e de suas interações sobre o índice de convexidade dos cordões.	129
Tabela 8.6 - Condições de soldagem em que foram realizados os ensaios experimentais.	132
Tabela 8.7 - Parâmetros e variáveis das correntes pulsadas empregadas nos ensaios.	133
Tabela 8.8 - Valores medidos das larguras e dos reforços dos cordões e os respectivos desvios padrão e índices de convexidade calculados.	133
Tabela 8.9 - Coeficientes de correlação entre as variáveis de entrada e as respostas dos experimentos. São apresentados também os níveis de significância ( $\alpha$ ).	134
Tabela 8.10 – Coeficientes das equações empíricas que relacionam as variáveis ajustáveis e as respostas dos experimentos.	136
Tabela 8.11 – Coeficientes da equação que relaciona a velocidade de arame com as variáveis corrente pulsada média e velocidade de soldagem	137
Tabela 8.12 - Variáveis ajustáveis do programa que foram selecionadas para a realização dos ensaios.	140
Tabela 8.13 - Parâmetros de destacamento de gotas e variáveis de base das correntes pulsadas empregadas nos testes de revestimento.	140
Tabela 8.14 - Valores das velocidades de arames previstas pela equação da tabela 8.11 e os ajustáveis nos dois cabeçotes de alimentação de arame	141

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Alfabeto Latino

A - Ampere  
 AD – Área fundida do metal de base  
 Al – Pulsação aleatória da corrente  
 Ar – Argônio  
 AR – Área do reforço  
 AWS – American Welding Society  
 c – Constante de capilaridade  
 C – Coeficiente de arraste  
 ca – Comprimento do arco  
 CV – Índice de convexidade  
 d – densidade do gás  
 D – Parâmetro de destacamento  
 D(%) - Porcentagem da área diluída  
 da – distância entre arames  
 Df – Pulsos de corrente defasados  
 DF – Variável defasagem entre os pulsos de corrente  
 DPeB - Diferença entre as correntes médias no pulso e na base térmica  
 dpUmb-a1 – desvio padrão da tensão média no período de base do arco1  
 dpUmp-a1 – desvio padrão da tensão média no período de pulso do arco1  
 dpUmb-a2 – desvio padrão da tensão média no período de base do arco2  
 dpUmp-a2 – desvio padrão da tensão média no período de pulso do arco2  
 DBCP – Distância do bico de contato a peça  
 di/dt – Taxa de variação da corrente  
 EEF - Equilíbrio Estático de Forças  
 EImp – Energia imposta  
 f – frequência  
 F – Pulsos de corrente em fase  
 F<sub>d</sub> – Força de arraste aerodinâmico  
 F<sub>elm</sub> – Força eletromagnética  
 F<sub>elmr</sub> – Componente radial da força eletromagnética  
 F<sub>elml</sub> – Componente longitudinal da força eletromagnética  
 F<sub>g</sub> – Força da gravidade  
 F<sub>ts</sub> – Força devido à tensão superficial  
 g – Aceleração da gravidade  
 He – Hélio  
 I – Corrente de soldagem  
 Ib – Corrente de base  
 IbB – Corrente de base no período de base térmica  
 IbP – Corrente de base no período de pulso térmico  
 IEP – Instabilidade como Decorrência do Efeito Pinch  
 IIW- Instituto Internacional de Soldagem  
 Im – Corrente média de soldagem  
 ImB – Corrente média no período de base térmica  
 ImP – Corrente média no período de pulso térmico  
 ImPt – Corrente média no pulsado térmico  
 Ip – Corrente de pulso  
 IP – Parâmetro indicador do perfil de penetração  
 L – largura do cordão de solda

$l_e$  – extensão do eletrodo  
 LL – posicionamento lado a lado dos eletrodos  
 m – massa da gota  
 MVA- Medidor de Velocidade de Arame  
 MIG/MAG – Metal Inert Gas/Metal Active Gas  
 MIG/MAG- DAPI – MIG/MAG com Duplo Arame e Potenciais Isolados.  
 MIG/MAG-PDAPI - MIG/MAG Pulsado com Duplo Arame e Potenciais Isolados.  
 ms - milisegundos  
 MP – Pulsos defasados com intervalo de tempo correspondente à metade do tempo de pulso das correntes.  
 PC - Penetração no centro do cordão  
 PE – Posicionamento dos eletrodos  
 PLM – Penetração Lateral Média  
 Pp – Penetração primária  
 Ps – penetração secundária  
 R – Reforço do cordão  
 $r_a$  – Raio de saída  
 $r_e$  – Raio do eletrodo  
 $r_g$  – raio da gota  
 T – Período de tempo  
 $t_b$  – Tempo de base  
 $t_{bB}$  – Tempo de base no período de base térmica  
 $t_{bP}$  - Tempo de base no período de pulso térmico  
 $T_d$  – Tempo de defasagem  
 TD - Posicionamento em “tandem” dos eletrodos  
 TIG – Tungsten Inert Gas  
 $T_f$  – Taxa de fusão  
 $t_p$  – Tempo de pulso  
 U - Tensão  
 V - Volts  
 $V_g$  – Velocidade do gás  
 $V_a$  – Velocidade de arame  
 $V_{a1}$  – Velocidade de arame do eletrodo 1  
 $V_{a2}$  – Velocidade de arame do eletrodo 2  
 $V_{a\_aj1}$  – Velocidade de arame ajustada no cabeçote 1  
 $V_{a\_aj2}$  - Velocidade de arame ajustada no cabeçote 2  
 $V_s$  – Velocidade de soldagem

### Alfabeto Grego

$\alpha$  - Nível de significância  
 $\delta$  - Tensão Superficial  
 $\phi$  - Ângulo entre as tochas  
 $\mu$  - Permeabilidade magnética  
 $\tau_b$  – Tempo de base térmica  
 $\theta$  - Ângulo de desvio das gotas  
 $\theta_d$  - Ângulo de desvio da gota destacada do eletrodo direito  
 $\theta_e$  - Ângulo de desvio da gota destacada do eletrodo esquerdo  
 $\tau_p$  – Tempo de pulso térmico  
 $\varnothing_{gota}$  – Diâmetro de gota

## RESUMO

O processo de soldagem MIG/MAG PULSADO Com Duplo Arame E Com Potenciais Isolados (MIG/MAG-PDAPI) é uma das ramificações dos sistemas MIG/MAG com duplo arame e já está sendo empregado em algumas indústrias nacionais, principalmente, em aplicações que requerem alta taxa de deposição de material. Os sistemas de duplo arame disponíveis no mercado, no início deste século, são importados e vendidos ao empresário nacional como uma caixa preta, da qual não se tem informações substanciais de seus benefícios e de suas restrições. Neste trabalho foram feitos estudos sobre as principais variáveis do processo em soldagens com eletrodos de aço carbono e de arames tubulares, empregando-se a corrente pulsada para a transferência de material. Foram estudados: o afastamento entre os arames, a corrente média, o posicionamento dos eletrodos em relação ao sentido de deslocamento dos arcos voltaicos, o comprimento dos arcos e a defasagem entre os pulsos de corrente. Os ensaios foram feitos com deposição de material sobre chapas nas posições planas e sobre cabeça. O uso do arame tubular visou a aplicação do processo em operações de revestimento. Foi verificado nesse estudo que essas variáveis influenciam a rigidez dos arcos e conseqüentemente o perfil geométrico dos depósitos. A tecnologia que permite ao duplo arame defasar os pulsos de corrente foi investigada com auxílio de uma câmera de filmagem de alta velocidade, atentando-se para os efeitos que essa tecnologia exercem sobre as transferências metálicas e sobre o comportamento dos arcos voltaicos. Ficou constatado que, para soldagens com corrente pulsada, empregando-se eletrodos de aço carbono maciços, os efeitos dessa variável são mais significativos sobre o perfil de penetração do cordão de solda, do que, sobre a estabilidade dos arcos, para a qual esta proposta tecnológica foi concebida nos atuais sistemas de duplo arame disponíveis. Na etapa referente à aplicação do processo às operações de revestimento, constatou-se que o MIG/MAG-PDAPI pode ser empregado com sucesso, uma vez que foram obtidas altas taxas de deposição de material, conciliadas à formação de cordões largos e planos, condições desejáveis para essas aplicações. No final do trabalho, foi proposto o desenvolvimento de um programa de seleção automática das variáveis de soldagem para essa aplicação específica. As equações paramétricas que integram o programa foram testadas em ensaios de simulação e mostraram-se adequadas para a estimação das variáveis.

## ABSTRACT

The welding process MIG/MAG-P Double Wire and Isolated Potential is one of the ramifications of the MIG/MAG Double Wire and has been used in some Brazilian industries, mainly, in applications that require high melting rate of the electrodes. This work presents a study about the main variables of the MIG/MAG-P Double Wire and Isolated Potential for applications in welding, applying steel and flux cored wires. The main variables studied were: gap between the wires; average current; position of the electrodes related to the welding direction displacement; the length of the arcs and the alternate of the current pulses during welding. The welding position used was flat and overhead with 45° to horizontal. The welding was performed in a laboratory trying to simulate a coating application. It was verified that the variables influence the rigidity of the arcs and consequently the geometric profile of the bead weld. The effects of the alternate current pulses technology on metallic transfer was investigated with the help of a high-speed camera. The results have shown that: the effects of the alternate current pulses technology are more significant on the profile of penetration than on the arcs stability, in welding with steel wire. It was verified that MIG/MAG-P Double Wire and Isolated Potential can be used with success in coating operations, once a high rate of melting was obtained, as well as the formation of flatness welds. These bead weld characteristics are desirable for coating applications. A program of automatic selection of welding variables was proposed for this specific application. The program parametric equations were tested and they were shown appropriate for the estimation of variables.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO E APRESENTAÇÃO DA TESE

### 1.1 Introdução

O processo MIG/MAG com Duplo Arame e Potenciais Isolados (MIG/MAG-DAPI) é uma variação do MIG/MAG com um arame, diferenciando-se desse, basicamente, por empregar dois eletrodos consumíveis que se fundem sobre uma única poça fundida. Os eletrodos são isolados eletricamente um do outro, e, por essa característica, o processo recebe a designação, neste trabalho, de potenciais isolados.

A aplicação do MIG/MAG-DAPI nas indústrias tem aumentado, principalmente, em casos que requerem um baixo aporte de energia sobre as peças. Esse crescimento decorre da característica, inerente ao processo, de proporcionar uma alta taxa de deposição de material, que, por consequência, permite que se imponha uma maior velocidade de deslocamento à soldagem. Michie et al. (1999) apontam essas como sendo as principais vantagens do processo com duplo arame. Eles citam exemplos de aplicações, nos quais ocorreram ganhos de até 100% nessas vantagens em relação ao processo com um arame. Os autores destacam, ainda, que problemas como mordedura, falta de fusão e porosidades, verificados na soldagem com um arame a altas velocidades, são reduzidos com o emprego do duplo arame.

O isolamento elétrico entre os arames confere uma flexibilidade maior ao processo, pois permite que se controle, de forma independente, os dois arcos voltaicos. Essa flexibilidade se traduz, por exemplo, na possibilidade de: i) soldar com formas de transferência metálica, ou, com níveis de energia, distintos entre os arcos; ii) empregar, como eletrodos, dois arames de materiais e/ou de diâmetros diferentes; iii) aplicar a corrente pulsada em ambos os arcos com uma defasagem de tempo entre os pulsos de corrente<sup>1</sup>. Essa tecnologia de defasagem entre os pulsos de corrente é proposta, nos poucos trabalhos encontrados sobre o processo, como uma alternativa para amenizar os efeitos eletromagnéticos entre os arcos voltaicos, que operam próximos um do outro (BROWN, 1983; LASSALINE et al., 1989; HACKL, 1997; MICHIE et al., 1999; VOROPAY & PROTSENKO, 2000; TROMMER, 2002). Segundo os autores desses trabalhos, essa defasagem (Figura 1.1) permite intercalar os períodos em que os arcos estão nos níveis mais altos de corrente, reduzindo o efeito eletromagnético que um exerce sobre o outro.

---

<sup>1</sup> Para facilitar a identificação dos processos neste trabalho, nas aplicações com corrente pulsada foi acrescida a designação “Pulsado” ao nome do processo, o qual, nos próximos capítulos, será denominado MIG/MAG PULSADO com Duplo Arame e Potenciais Isolados (MIG/MAG-PDAPI).

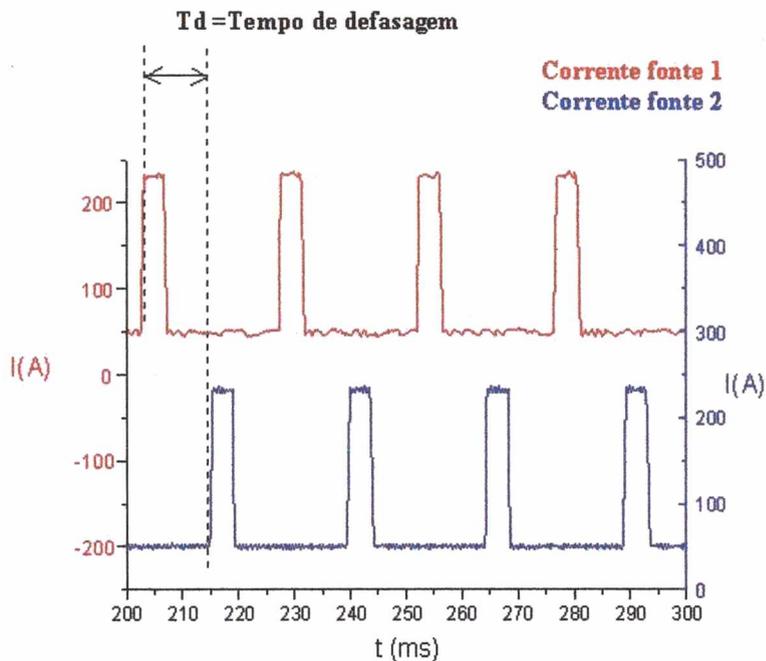


Figura 1.1- Representação esquemática da defasagem dos pulsos de corrente entre os dois arcos voltaicos.

Nos artigos citados anteriormente, os autores ressaltaram apenas as características positivas da tecnologia de defasagem dos pulsos de corrente. Não citaram como esses benefícios foram avaliados ou quantificados. Entretanto, essa tecnologia está inserida nos principais sistemas de duplo arame disponíveis no mercado internacional e é apresentada como a base para o sucesso da soldagem com dois arames de potenciais isolados no processo MIG/MAG, o que praticamente determina a necessidade de se empregar fontes eletrônicas nesses sistemas.

No levantamento bibliográfico feito neste trabalho não foram encontrados artigos que trouxessem informações consistentes sobre os efeitos dessa tecnologia sobre a transferência metálica e/ou sobre o comportamento dos arcos voltaicos.

Uma questão que deve ser abordada está relacionada aos dois princípios básicos que levaram ao desenvolvimento da transferência metálica com corrente pulsada, para o processo MIG/MAG: 1) soldagens em níveis mais baixos de energia, nos quais a transferência metálica normalmente ocorre com curto-circuito ou na forma de grandes glóbulos de material; 2) transferência de uma gota com diâmetro próximo ao do eletrodo, a cada pulso da corrente. Esses princípios, aparentemente, não estão sendo considerados pelos autores e pelos fabricantes de equipamentos, quando eles recomendam a utilização da corrente pulsada em aplicações do duplo arame. Há uma incoerência ao se especificar a utilização da corrente pulsada (indicada para níveis mais baixos de corrente média) em aplicações com o duplo arame que requerem alta taxa de deposição de material (logicamente, níveis mais altos de corrente média de soldagem). Uma questão não respondida nesses trabalhos é se, em níveis

mais altos de corrente média, os efeitos desejados de redução das interferências eletromagnéticas entre os arcos e o de obtenção da transferência de uma gota, a cada pulso da corrente, estão sendo alcançados.

Acrescenta-se, também, a essa discussão a questão da carência de desenvolvimento de uma tecnologia nacional e confiável, a fim de reduzir a dependência do usuário brasileiro com a indústria internacional. Cabe aqui citar o exemplo de uma empresa nacional que adquiriu um sistema importado para soldagem com o duplo arame potenciais isolados. Em uma determinada situação, em que o usuário do processo optou por substituir os arames eletrodos por outros, de fabricação nacional, houve a necessidade de se ajustar novos parâmetros de corrente pulsada nos equipamentos. Nesse caso, com a omissão do fabricante, acrescida à falta de conhecimento e domínio técnico por parte do usuário na seleção desses parâmetros, o processo passou a apresentar instabilidade do tipo excesso de salpicos e extinção dos arcos, o que certamente limitava a produtividade do processo. Exemplos como esse retratam a realidade da indústria de soldagem no Brasil.

Ainda nessa linha de desenvolvimento de tecnologia própria, este trabalho está inserido em um projeto de proporções maiores, intitulado **SISTEMA AUTOMATIZADO PARA RECUPERAÇÃO DE ROTORES DE TURBINAS HIDRÁULICAS DE GRANDE PORTE**. O projeto, que é patrocinado pelo *Ministério da Ciência e Tecnologia*, por intermédio do PADCT III, conta com a participação da UFSC, envolvendo diversos de seus laboratórios e da Companhia Paranaense de Eletricidade (COPEL). O objetivo do projeto é desenvolver e construir um sistema automatizado capaz de realizar *in situ* a recuperação, por soldagem, de superfícies de rotores de turbinas hidráulicas de grande porte erodidas por cavitação. A expectativa é que o duplo arame possa ser empregado, uma vez que cordões mais largos e planos (condição preferível para esse tipo de aplicação) podem ser obtidos com o processo.

Visando-se à aplicação do processo nas operações de revestimento das superfícies de pás de turbinas hidráulicas, desgastadas por cavitação, este trabalho tem por objetivo desenvolver procedimentos de soldagem que estabeleçam combinações de variáveis que possibilitem obter soldas com um grau aceitável de regularidade e porosidade.

O trabalho propõe, como objetivo secundário, estudar os efeitos que a defasagem nos pulsos de corrente exercem sobre a transferência metálica, sobre o comportamento dos arcos voltaicos e sobre o perfil geométrico dos depósitos.

## 1.2 Apresentação da tese

A fim de se fornecer uma visão geral de todo o trabalho desenvolvido, apresenta-se a seguir, de forma sucinta, um resumo de cada capítulo.

No capítulo 1, faz-se uma breve introdução do assunto a ser tratado, apresentando-se a problemática, as justificativas, os objetivos a serem alcançados e a expectativa de aplicação do processo em uma situação prática de soldagem.

No capítulo 2, apresenta-se uma revisão bibliográfica, que trata dos conceitos principais relativos aos assuntos abordados no trabalho. Faz-se inicialmente uma abordagem dos temas relacionados à transferência metálica, à pulsação térmica no processo MIG/MAG, a alguns defeitos e à penetração da solda. Posteriormente, é feita a apresentação do processo MIG/MAG com Duplo Arame, classificando-o segundo as suas vertentes.

No capítulo 3, caracterizam-se os equipamentos e instrumentos que compõem as bancadas de ensaios. São apresentadas as características geométricas dos depósitos e a metodologia adotada para sua medição. Essas características foram utilizadas nos capítulos subsequentes para avaliar os resultados dos ensaios.

No capítulo 4, descreve-se a bancada de equipamentos utilizada para realizar as filmagens da transferência metálica. As filmagens foram feitas no laboratório de soldagem da Universidade Federal de Uberlândia (LAPROSOLDA).

No capítulo 5, relata-se o estudo efetuado com auxílio das filmagens, que foram realizadas com uma câmera de alta velocidade. Nesse estudo analisaram-se os comportamentos dos arcos voltaicos e a transferência metálica, quando situações distintas de defasagem dos pulsos de corrente eram impostas ao processo.

No capítulo 6, prosseguem-se os estudos a respeito da tecnologia de defasagem dos pulsos de corrente. São analisados os seus efeitos sobre o acabamento e sobre o perfil geométrico dos depósitos.

No capítulo 7, apresentam-se os ensaios realizados com o MIG/MAG-PDAPI, que tiveram por objetivo conhecer os efeitos das principais variáveis do processo sobre o perfil geométrico dos cordões.

No capítulo 8, propõe-se a aplicação do processo MIG/MAG-PDAPI às operações de revestimento. A metodologia experimental seguida permitiu sugerir, no final do capítulo, o desenvolvimento de um programa para seleção automática das variáveis de soldagem para essa aplicação específica. Os ensaios foram executados empregando-se eletrodos tubulares.

No capítulo 9, apresentam-se as conclusões do trabalho.

No capítulo 10, indicam-se os trabalhos que podem dar continuidade ao estudo do processo.

## CAPÍTULO 2

### CONCEITOS FUNDAMENTAIS

#### 2.1 Introdução

Em uma análise da bibliografia levantada neste trabalho sobre a soldagem MIG/MAG com dois arames, pôde-se constatar a escassez de trabalhos científicos sobre o processo. Neste capítulo, é apresentada uma revisão da literatura encontrada. Faz-se uma breve revisão dos conceitos de soldagem, dando-se destaques aos tópicos que mais se discutem nos capítulos subseqüentes do trabalho. Temas relacionados ao arco voltaico, à transferência metálica, à formação da poça e a defeitos dos depósitos são abordados. Ao final do capítulo, são apresentadas algumas características do duplo arame aplicados ao processo MIG/MAG.

#### 2.2 Arco Voltaico

Um grande número de processos de soldagem usa o arco elétrico como fonte de calor para fusão, uma vez que ele pode ser concentrado e controlado de forma eficiente. Um arco elétrico consiste de uma descarga de corrente elétrica, relativamente alta, entre dois eletrodos, que é sustentada por um gás ionizado, denominado plasma (AWS 1987). A potência de um arco elétrico pode ser expressa em unidades elétricas pelo produto da corrente que passa pelo arco e a queda de tensão através dele. A queda de tensão ao longo de um arco elétrico não é uniforme. Ela se dá de forma abrupta, nas regiões próximas aos eletrodos (ânodo e cátodo) e em intensidade menor na coluna do arco (Figura 2.1).

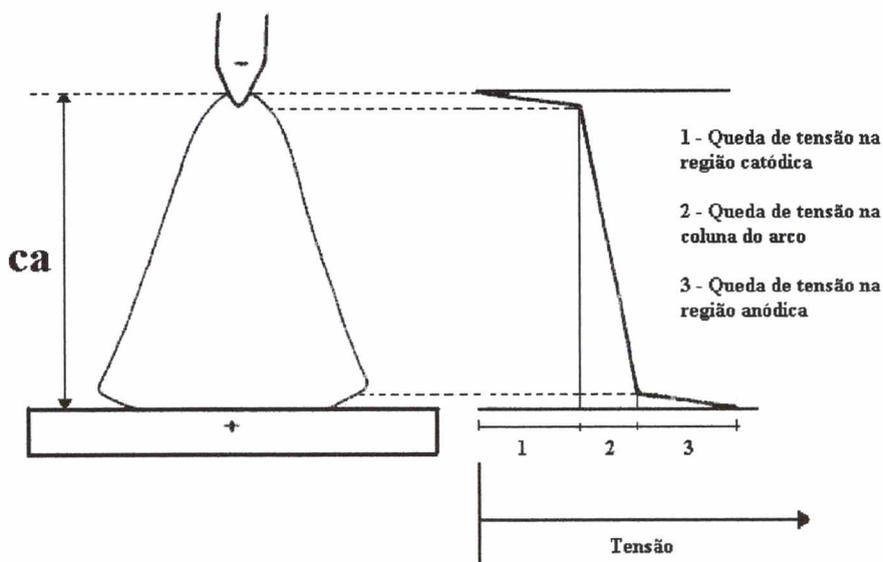


Figura 2.1 - Representação esquemática da queda de tensão ao longo de um arco.

Didaticamente, pode-se admitir que o arco se subdivide em três regiões apresentadas na Figura 2.1: região de queda catódica, coluna de plasma e região de queda anódica.

Não há uma transição bem definida entre essas regiões. Entretanto, considerando-se o volume do arco, este é constituído quase que exclusivamente pela coluna de plasma, que pode ter o comprimento na ordem de alguns milímetros, ao passo que as regiões de queda anódica e catódica têm comprimentos em torno de  $10^{-6}$  m. Nessas regiões diminutas, a queda de tensão é significativa, da ordem de 1 a 15V, o que confere a elas um elevado gradiente de tensão. A queda de tensão na coluna de plasma é aproximadamente proporcional ao comprimento do arco ( $ca$ ) e está associada a vários fatores, em particular, à composição do gás do plasma.

### 2.2.1 Região de queda catódica

Apesar de ser de pequeno volume, a região catódica é de extrema importância para a manutenção do arco voltaico, pois é na superfície do cátodo, próxima a essa região, que é gerada a maior parte dos elétrons que constituem a corrente elétrica que atravessa o arco. Para causar a emissão de elétrons nessas regiões, diversos mecanismos podem estar atuando, destacando-se o de emissão termoiônica, em cátodos de material refratário. Em materiais de pontos de fusão e ebulição mais baixos, os mecanismos de emissão a frio, possivelmente associados com a presença de filmes de óxidos na superfície do cátodo, estarão prevalecendo.

### 2.2.2 Coluna de plasma

A coluna do plasma é constituída de partículas neutras (moléculas e átomos), de íons e de elétrons livres, sendo os últimos os principais responsáveis pela passagem de corrente elétrica entre os eletrodos. Para que se dê a ionização do gás, este deve ser aquecido a altas temperaturas. A agitação térmica do gás promove choques entre os seus constituintes, ocasionando a sua ionização parcial e a conseqüente formação do plasma. Uma vez que a coluna requer que se mantenha uma temperatura suficiente para sustentar o grau de ionização, quanto maior for o potencial de ionização dos constituintes da coluna, maior será a energia necessária para manter o nível de ionização requerida, portanto maior deverá ser a temperatura desse arco. Gases empregados nas soldagens, como He e Ar, apresentam potenciais de ionização de  $2,37 \text{ MJmol}^{-1}$  para o primeiro e de  $1,37 \text{ MJmol}^{-1}$  para o segundo.

A distribuição de temperatura na coluna do arco apresenta valores mais intensos nas regiões próximas ao cátodo e no centro do arco, decaindo na medida em que se afasta em direção ao ânodo e para a periferia do arco. A Figura 2.2 mostra essa distribuição de temperatura através de um arco TIG, de aproximadamente 5 mm de comprimento, operando a 200 A e 12,1 V (AWS 1987).

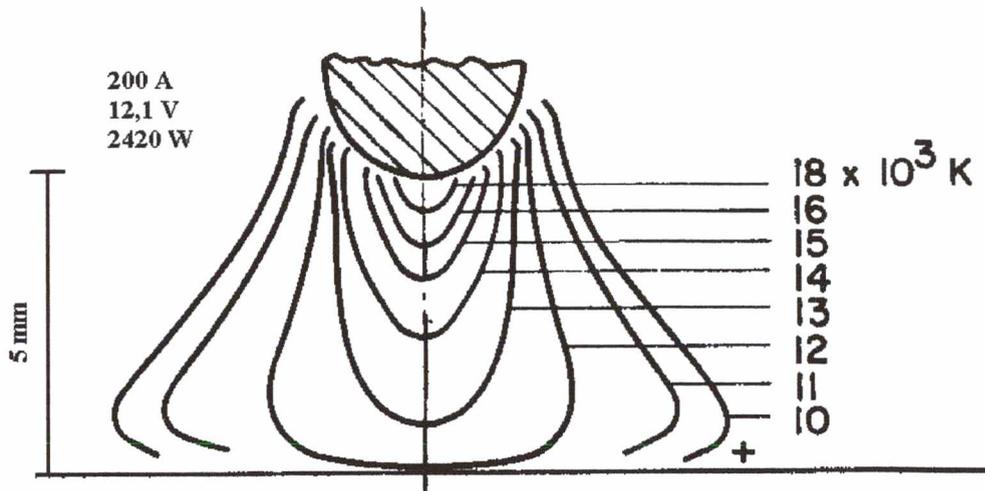


Figura 2.2 - Isotermas de temperatura de um arco TIG em corrente contínua com polaridade direta (CC<sup>+</sup>)

### 2.2.3 Região anódica

Com características similares à região catódica, onde se verifica uma queda acentuada de tensão, a região anódica não tem a mesma importância daquela, por consequência é uma região menos estudada. Como não se pretende estender a abordagem teórica dessas regiões, recomenda-se ao leitor o estudo dos trabalhos de Guile (1984; 1980), Richardson (1989), Matsunawa & Nishigushi (1980).

## 2.3 Influência de campos magnéticos sobre os arcos

O arco elétrico, como todo condutor de corrente, tem associado a ele um campo magnético induzido. Esse campo interage com a corrente que o gerou, produzindo campos de força que podem causar a deflexão do arco; fenômeno conhecido por sopro magnético. Esse fenômeno pode causar instabilidade dos arcos, produzindo respingos, mordeduras, porosidades e comprometer a uniformidade dos depósitos (ECER, 1980).

O sopro magnético ocorre, em geral, quando há uma mudança de direção do fluxo de corrente ao entrar na chapa e se conduzir para o cabo de conexão da corrente. A Figura 2.3-a) mostra esse efeito. A Figura 2.3-b) é um circuito equivalente utilizado para explicar o fenômeno. Pode-se observar que as linhas de força são mais concentradas do lado interno do condutor e rarefeitas do lado externo. Essa diferença de concentração é responsável pelo desvio do arco. O sopro magnético ocorrerá sempre que houver um arranjo assimétrico das linhas de força em torno do arco.

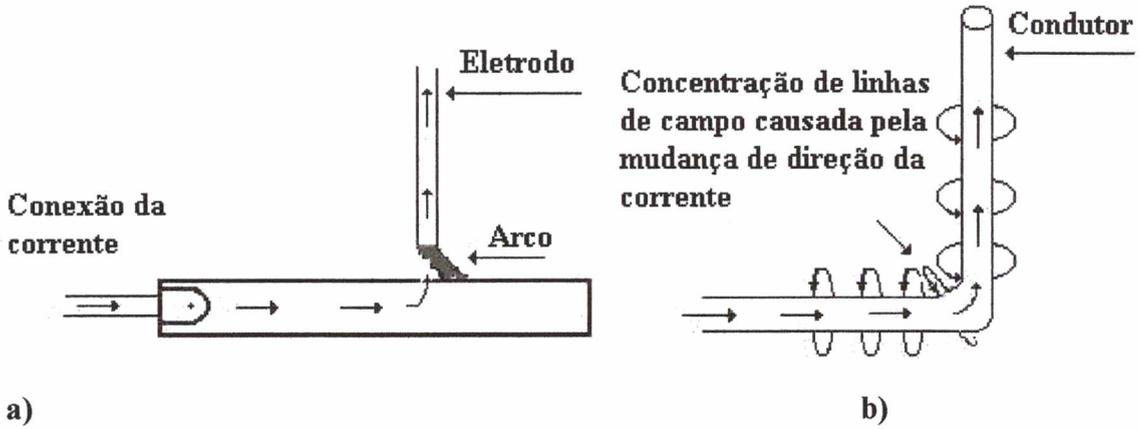


Figura 2.3 - a) Representação esquemática do sopro causado pelo efeito da posição da conexão da corrente; b) circuito equivalente ilustrando a concentração das linhas de força (QUITES & DUTRA, 1979).

Se dois condutores estão posicionados próximos um do outro, os respectivos campos se sobrepõem formando um campo comum. O campo resultante tem o aspecto da Figura 2.4-a) se as correntes que passam pelos condutores têm o mesmo sentido. Entre os condutores, os campos tendem a se neutralizarem e, externamente, a se reforçarem. Se as correntes são de sentidos opostos, o efeito é inverso (Figura 2.4-b)). As forças magnéticas tendem a mover o condutor desde o local de maior intensidade de campo até o de menor intensidade (QUITES & DUTRA, 1979). O arco voltaico, sendo um condutor flexível, sofre os efeitos dessas forças, conseqüentemente, desvios de direção (Figura 2.5-a) e b)).

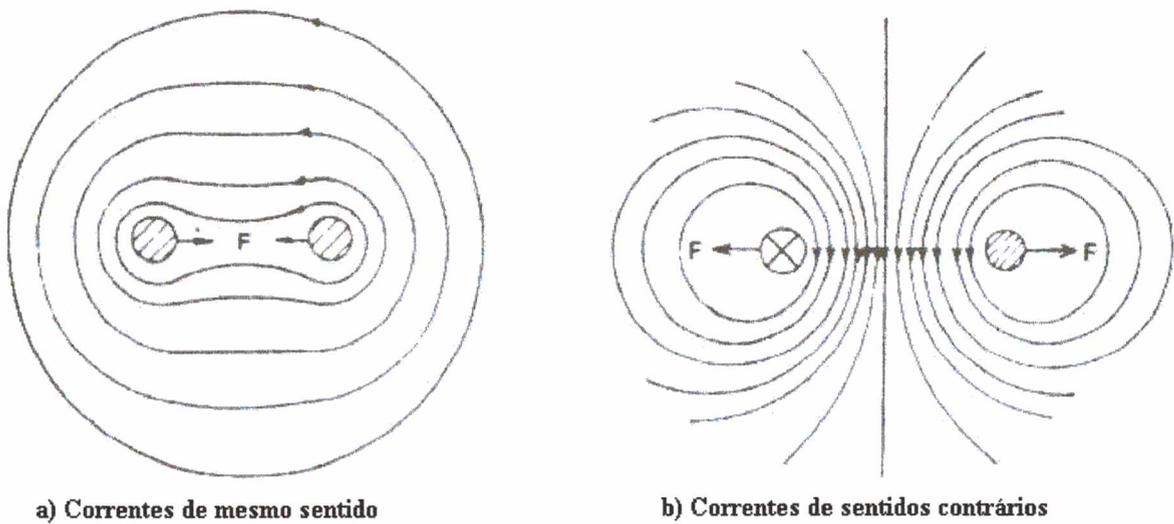
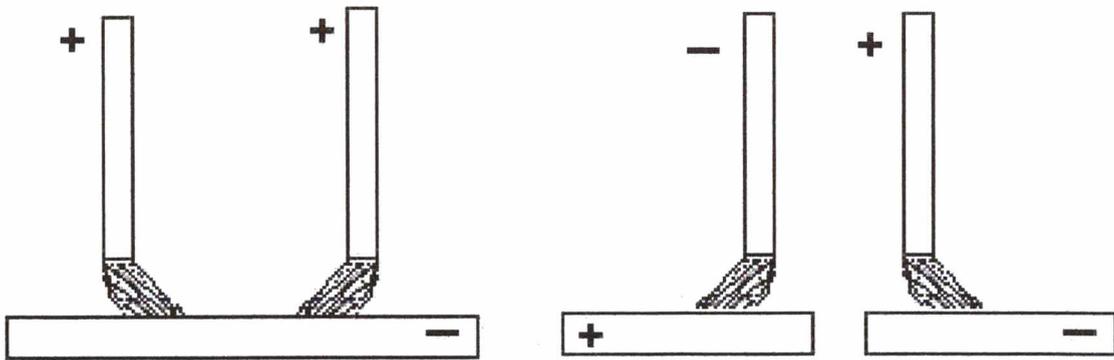


Figura 2.4 – Interação de campos magnéticos entre dois condutores paralelos; a) fluxo de corrente no mesmo sentido em ambos os condutores; b) fluxo em sentidos opostos (QUITES & DUTRA, 1979).



## Correntes de mesmo sentido    Correntes de sentidos opostos

a)

b)

Figura 2.5 - Representação esquemática do sopro magnético causado pela proximidade dos arcos; a) correntes fluem no mesmo sentido; b) correntes fluem em sentidos opostos (QUITES & DUTRA, 1979).

Como foi dito anteriormente, campos magnéticos agindo sobre os arcos podem causar perturbações e resultar em problemas indesejáveis para a soldagem. Quites & Dutra (1979) e Blakeley (1991) apresentam soluções para amenizar o problema do sopro magnético como: inclinação do eletrodo na direção da soldagem; utilização de arcos curtos; mudanças no posicionamento dos cabos terra, quando possível preferir corrente alternada; desmagnetização da peça; entre outras.

Por outro lado, um campo magnético externo pode ser aplicado sobre um arco para desviá-lo, a fim de atender a uma finalidade específica. Nesse caso, o efeito do campo magnético torna-se um recurso benéfico para a soldagem. Cita-se, como exemplo, o trabalho de Essers & Walter (1981). Os autores observaram, para o processo MIG/MAG, que a penetração da solda pode ser regulada por intermédio de um controle da direção de deslocamento das gotas metálicas transferidas. Esse controle era feito por intermédio de um campo magnético alternado, aplicado em uma direção transversal ao arco. Através de mudanças na frequência de oscilação desse campo, os autores conseguiram direcionar as gotas para pontos específicos da poça fundida, e, como consequência, o perfil de penetração podia ser alterado.

### 2.4 Transferência metálica

A transferência de material fundido da ponta do eletrodo para a peça pode ocorrer de formas diferentes e tem influência marcante no desempenho do processo, pois pode afetar a estabilidade dos arcos, gerar salpicos e comprometer a qualidade da solda. Por essas questões, os mecanismos envolvidos nos destacamentos são bastante estudados e há na literatura uma

farta bibliografia sobre o assunto. No entanto, dúvidas e contradições existem na explicação dos fenômenos envolvidos.

Forças de naturezas distintas agem simultaneamente sobre o material aderido ao eletrodo. A resultante delas irá determinar o destacamento da gota. Duas teorias são encontradas na literatura para explicar e modelar o conjunto dessas forças que dão origem ao mecanismo de transferência. São elas: teoria do Equilíbrio Estático de Forças (EEF) e teoria da Instabilidade como Decorrência do Efeito Pinch (IEP). Nesta revisão será abordada a teoria (EEF) devido ao número maior de informações disponíveis. Essa teoria descreve o mecanismo de transferência em vôo livre a partir do balanço das forças atuantes sobre uma gota pendente na extremidade do eletrodo. As forças que agem sobre a gota e tendem a destacá-la são consideradas pelo modelo como positivas e, as que tendem a retê-la, como negativas. As principais forças envolvidas nesse balanço são:

- i) a da gravidade;
- ii) a de arraste aerodinâmico;
- iii) a de origem eletromagnética;
- iv) a de origem relacionada à tensão superficial do material.

#### i) Força da gravidade ( $F_g$ )

A força devido à gravidade é dada pela equação:

$$F_g = m \cdot g, \quad (2.1)$$

sendo “m” a massa da gota e “g” a aceleração da gravidade. Essa força será positiva máxima em soldagens na posição plana e negativa na posição sobrecabeça, com o eixo do arco perpendicular à peça.

#### ii) Força de arraste aerodinâmico ( $F_d$ )

A movimentação do plasma pode induzir uma força sobre a gota, que pode ser estimada ao se considerar a força de arraste sobre uma esfera imersa em um fluido, cuja expressão é:

$$F_d = \frac{\pi \cdot V^2 \cdot d \cdot r_g^2 \cdot C}{2}, \quad (2.2)$$

sendo “V” a velocidade e “d” a densidade do gás, “ $r_g$ ” é o raio da gota e “C”, o coeficiente de arraste.

#### iii) Força devido à tensão superficial ( $F_{ts}$ )

A força devido à tensão superficial pode ser estimada a partir da equação 2.3.

$$F_{ts} = 2.\pi.R_e.\delta.f\left(\frac{R_e}{c}\right), \tag{2.3}$$

sendo R o raio do eletrodo,  $\delta$  a tensão superficial e  $f(R/c)$  é uma função do raio do eletrodo e da constante de capilaridade “c”.

iv) Força de origem eletromagnética ( $F_{elm}$ )

Quando uma corrente flui por um condutor, um campo magnético é induzido ao seu redor. A partir da interação desse campo com a corrente que o induziu, forças de origem eletromagnéticas são geradas e agem perpendicularmente ao condutor (Forças de Lorentz). Foi visto no item 2.3 que essas forças agem sobre o arco, podendo, em determinadas circunstâncias, desviá-lo para os lados. Elas também atuam sobre a gota aderida ao eletrodo e o seu sentido (a favor ou contra o destacamento) depende do fluxo de corrente dentro da gota. Se as linhas de fluxo divergem dentro da gota, as forças eletromagnéticas tendem a destacá-la, caso converjam, elas operam no sentido contrário ao destacamento. A intensidade dessa força eletromagnética pode ser estimada a partir da equação 2.4

$$F_{elm} = \frac{\mu.I^2}{4} \cdot \ln \left| \frac{r_a^2}{R_e} \right|, \tag{2.4}$$

sendo  $\mu$  a permeabilidade magnética do material, I a corrente de soldagem,  $r_a$  o raio de saída da corrente e  $R_e$  é o raio do eletrodo (veja Figura 2.6).

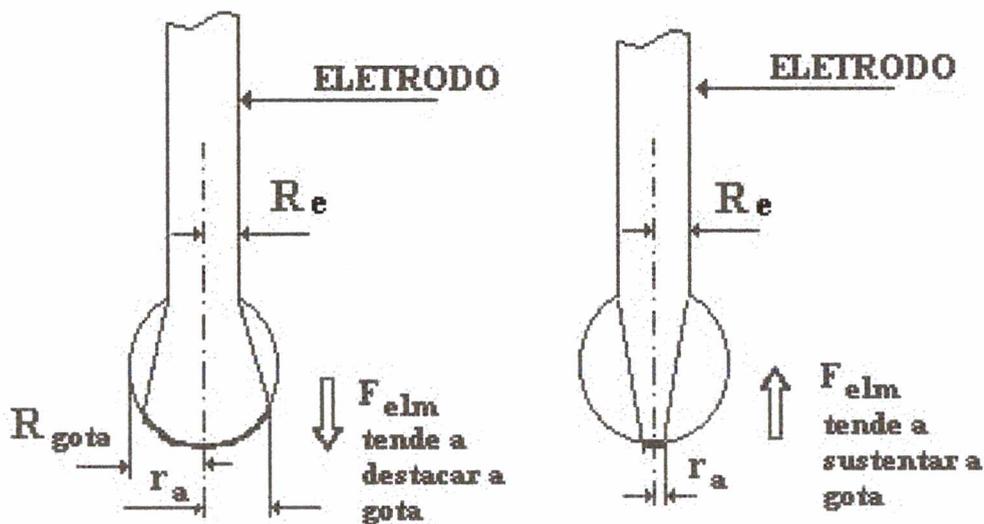


Figura 2.6 - Geometria do fluxo de corrente dentro da gota; a) fluxo divergente, a força eletromagnética age tendendo a destacar a gota; b) fluxo convergente, a força tende a sustentar a gota (NORRISH, 1992).

### 2.4.1 Tipos de transferência metálica

Diversas formas de transferência de material podem ser observadas nos diferentes processos de soldagem. O IIW (Instituto Internacional de Soldagem), baseado nos aspectos fenomenológicos da transferência de metal, propõe um sistema de classificação que pode ser visto na Tabela 2.1. Segundo a classificação do Instituto, as transferências podem ser: 1) em vôo livre; 2) por contato; 3) guiada pela escória.

Tabela 2.1 – Classificação dos modos de transferência metálica pelo IIW (1977).

Modo de transferência metálica	Exemplos de processos de soldagem
1 Transferência em vôo livre	
1.1 Globular	
1.1.1 Gotas	MIG/MAG a baixa corrente
1.1.2 Repelidas	MIG/MAG protegida por CO <sub>2</sub>
1.2 Goticular (“Spray”)	
1.2.1 Projetada	MIG/MAG com corrente intermediária
1.2.2 Fluxo com alongamento (“Streaming Spray”)	MIG/MAG com corrente média
1.2.3 Rotacional	MIG/MAG com corrente alta
1.3 Explosiva	Eletrodos revestidos
2 Transferência por contato	
2.1 Curto-circuito	MIG/MAG com arco curto
2.2 Contato sem interrupção	Soldagem com adição de metal
3 Transferência guiada pela escória	
3.1 Fluxo guiado pela parede	Arco submerso
3.2 Outros modos	Eletrodo revestido, eletrodo tubular, eletroescória

No processo MIG/MAG, as transferências por curto-circuito, por vôo livre na forma globular e por goticular projetado (“spray”) são as mais empregadas em situações usuais de soldagem, e, por isso, despertam nos pesquisadores da área interesses em estudar os mecanismos e os princípios físicos que as regem.

Em uma situação de soldagem, a predominância de uma ou de outra forma de transferência vai depender da seleção dos parâmetros e das variáveis desse processo. Algumas particularidades são discutidas a seguir, buscando-se destacar as aplicações de cada forma de transferência

#### 2.4.1.1 Transferência metálica por curto-circuito

É o tipo de transferência metálica no processo MIG/MAG que ocorre devido ao contato físico entre a gota fundida, ainda aderida à ponta do eletrodo, e a poça líquida. No instante em que se dá o contato, a corrente cresce imediatamente (a uma taxa controlada pela indutância do circuito), fazendo com que as forças de origem eletromagnética pressionem a gota fundida,

estrangulando-a até que se desprenda do eletrodo (efeito “pinch”). Além das forças eletromagnéticas, a tensão superficial (agindo contra o destacamento antes do curto-circuito e a favor após a ocorrência deste) e a gravidade (com menor intensidade) atuam nesse tipo de transferência. Após o curto-circuito, o arco se restabelece, até que ocorra um novo curto. Esse tipo de transferência, que ocorre no processo MIG/MAG em níveis de corrente e de tensão (comprimento do arco) mais baixos, apresenta uma poça fundida de menor dimensão com intensidade de energia mais baixa em relação aos demais modos de transferência. Por essas características, geralmente é indicada para a soldagem fora da posição plana e/ou de chapas finas.

#### 2.4.1.2 Transferência por vôo livre na forma globular

Caracteriza-se pela formação de uma gota metálica fundida com diâmetro maior que o do eletrodo, e que se transfere à poça sem que ocorra o curto-circuito. Essa forma de transferência ocorre para correntes médias de soldagem ligeiramente superiores àquelas nas quais se dá a transferência por contato. No entanto, utilizando-se como gás de proteção misturas gasosas predominantemente ativas, esse tipo de transferência passa a acontecer em toda a faixa usual de corrente.

A força da gravidade (agindo favoravelmente ao desprendimento da gota) e a tensão superficial (atuando em sentido oposto) predominam com maior intensidade nesse tipo de transferência metálica, cujo sucesso é praticamente limitado à posição plana.

#### 2.4.1.3 Transferência por projeção goticular (“spray”)

Utilizando-se misturas gasosas ricas em argônio e níveis de corrente média acima de um valor crítico (corrente de transição), a transferência metálica assume uma característica peculiar; as gotas formadas, com diâmetros próximos ao do eletrodo, são projetadas axialmente através do arco por ação predominante da força eletromagnética.

A corrente de transição, assim designada, representa um nível de corrente que marca a mudança na forma de transferência de metal no processo MIG/MAG. Abaixo desse nível de corrente a transferência se dá sob a forma globular, a uma taxa de algumas gotas por segundo. Acima dele, passa a ocorrer com escoamento goticular axial (mais conhecida como “spray”), a uma taxa de centenas de gotas por segundo. Por não ocorrer um contato entre os eletrodos, a transferência de material é estável e livre de salpicos, resultando em um bom acabamento superficial do cordão de solda. No entanto, como os níveis de corrente e tensão selecionados são mais elevados, o que representa uma maior energia de arco, essa característica

praticamente limita as aplicações do processo às soldagens na posição plana e de chapas mais espessas.

## 2.5 Pressão do arco

A pressão do arco tem influência sobre a transferência metálica, a penetração da solda e o formato do cordão. A seguir, faz-se uma breve discussão sobre a movimentação de gases na coluna do arco, sobre a origem desse fluxo e como ele age sobre a poça fundida.

As forças eletromagnéticas geradas a partir da interação entre corrente e campo magnético já foram discutidas anteriormente e se viu que elas podem atuar sobre o eletrodo, sobre a gota fundida enquanto essa permanecer aderida ao eletrodo e sobre o arco voltaico. Admitindo-se que o formato do arco se aproxima de um cone, as forças eletromagnéticas que agem perpendicularmente a ele podem ser divididas em duas componentes: uma que atua radialmente ao arco voltaico ( $F_{elm r}$ ) e a outra na direção longitudinal ( $F_{elm l}$ ) (Figura 2.7).

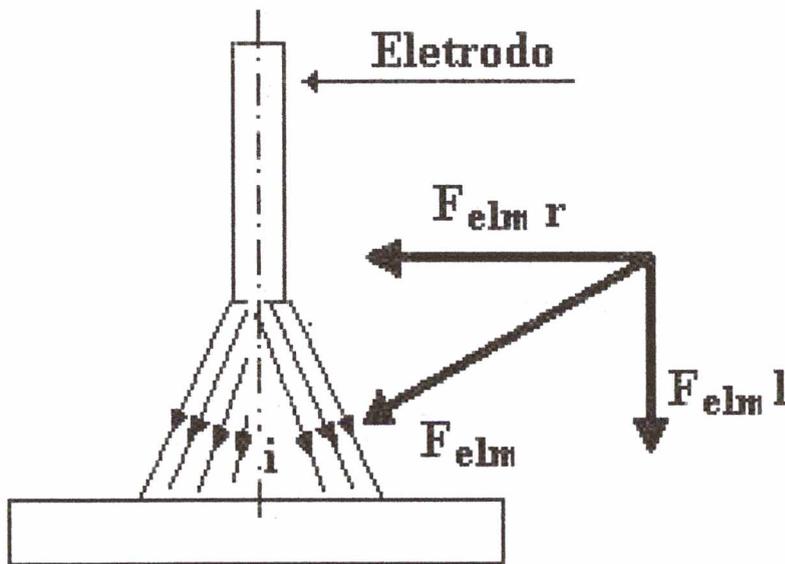


Figura 2.7 - Representação esquemática da força eletromagnética ( $F_{elm}$ ) e de suas componentes radial ( $F_{elm r}$ ) e longitudinal ( $F_{elm l}$ ).  $i$  representa as linhas de corrente.

A ação da componente radial ao longo do comprimento do arco cria uma diferença de pressão entre a região próxima ao eletrodo (região de maior pressão devido à menor área de passagem da corrente) e a que está próxima à peça, que apresenta uma menor densidade de corrente. Essa diferença de pressão dá origem a um fluxo de gás de plasma da região de maior pressão para a de menor. Esse fluxo irá exercer uma pressão dinâmica sobre a poça

fundida, bem como a própria componente axial da força eletromagnética, que exerce uma pressão, porém, estática. Alguns autores defendem que a inércia das gotas que se chocam sobre a superfície fundida também contribui com o aumento dessa pressão do arco e influi diretamente na penetração das soldas MIG/MAG (LANCASTER, 1986, ESSERS & WALTER, 1981).

Na literatura consultada não foi encontrado qualquer trabalho que propusesse um modelo de equilíbrio de forças para os destacamentos de gotas nas soldagens com mais de um arame. Cabe-se mencionar que devido à proximidade dos arcos, os campos induzidos em ambos se sobrepõem, originando uma nova configuração que causa os desvios deles, e, por consequência, das gotas destacadas.

## 2.6 Penetração em soldagem

A penetração de uma solda no processo MIG/MAG está diretamente relacionada à pressão que o arco exerce sobre a poça fundida, pois ele comprime a superfície líquida, abrindo um canal que permite ao calor fluir para o metal de base. Como foi dito no item anterior, essa pressão é composta pelo jato de gás de plasma, pela componente axial da força de Lorentz e pela inércia das gotas metálicas que se chocam com a poça metálica. Matsuwana & Nishiguchi (1979) atribuem a essa pressão a responsabilidade pela penetração máxima dos depósitos (penetração primária ou em forma de dedo “finger shape”). O calor acumulado no metal fundido, que com o tempo se transfere ao metal de base, predominantemente por condução, é apontado por Ishizaki (1980) como sendo responsável pela penetração secundária, que se forma nas proximidades da penetração primária. A Figura 2.9 mostra essas duas formas de penetração.

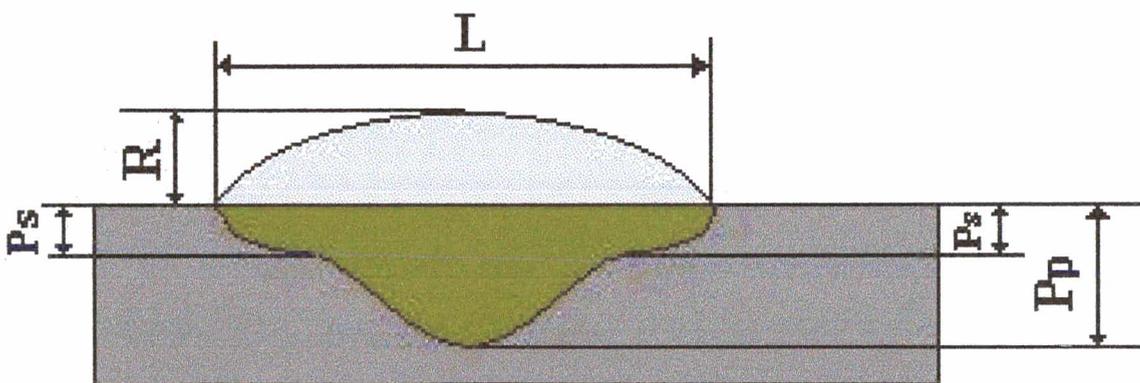


Figura 2.8 - Representação esquemática do perfil geométrico de um cordão de solda. L – largura; R – reforço Pp - penetração primária; Ps – penetração secundária.

Gurev & Stout (1963) verificaram que a penetração primária variou proporcionalmente com a corrente e inversamente com a tensão e com a velocidade de soldagem ( $V_s$ ). Por outro lado, a secundária se relacionou diretamente com a tensão e não apresentou variações significativas com a corrente, no entanto, com aumentos da velocidade de soldagem, os autores verificaram comportamentos distintos para essa penetração, em função do tipo de transferência. Na transferência por curto-circuito, penetração secundária e velocidade variaram no mesmo sentido e, na globular, aumentos na velocidade resultaram em reduções nessa penetração. Os autores verificaram que a largura dos cordões aumentou com o aporte de energia.

## 2.7 Efeitos da velocidade de soldagem sobre os depósitos

O aparecimento de defeitos nos depósitos está relacionado com o intervalo de tempo decorrido entre goivagem do canal na superfície do metal de base e o seu preenchimento com o metal fundido. Caso as condições de resfriamento venham a promover a solidificação do metal fundido antes que se complete o preenchimento deste canal, as falhas que surgirão poderão ser caracterizar como defeitos (BAIXO, 1998). Aumentos progressivos na velocidade de soldagem, acima de certos limites, causam a deterioração dos depósitos, originando defeitos como “humping”<sup>1</sup> e mordeduras.

Paton et al. (1971) ao analisarem a formação de “humping”, a altas velocidades de soldagem, propuseram que depósitos com características aceitáveis são obtidos enquanto existir uma condição de equilíbrio dinâmico entre a pressão do arco e a da poça (pressão contrária à do arco), a qual está associada à tensão superficial e à espessura da camada de metal fundido no fundo da cratera. Se a pressão do arco superar a da poça, cresce a possibilidade de ocorrência de “humping”. Esse desequilíbrio é promovido por aumentos na velocidade de soldagem, pois, para uma corrente constante, o crescimento de “ $V_s$ ” causa uma redução na espessura da camada de metal fundido no fundo da cratera, conseqüentemente, da pressão da poça. Como a pressão do arco praticamente não se altera, ela supera à da poça, originando o defeito. Existirá uma condição limite, acima da qual, aumentos na velocidade de soldagem acarretarão o surgimento de defeitos.

A mordedura se caracteriza pelo surgimento de cavidades longitudinais nas laterais dos depósitos. Esses defeitos decorrem do não-preenchimento do canal aberto pelo arco com metal fundido. De forma semelhante ao “humping”, a mordedura pode também ser associada à velocidade de soldagem.

---

<sup>1</sup> Humping pode ser definido como um defeito que apresenta uma superfície de contorno irregular, consistindo de uma seqüência de saliências intercaladas por depósitos de contornos relativamente uniformes (SAVAGE et al., 1979).

Conforme Paton et al. (1971), na soldagem com mais de um arco operando sobre uma mesma poça fundida, é possível aumentar consideravelmente a velocidade de soldagem antes que defeitos como os citados anteriormente venham a ocorrer. Essas características conferem aos processos MIG/MAG duplo arame vantagens que os habilitam para aplicações em soldagens de chapas finas, por promoverem aumentos substanciais na produtividade, sem ocasionar a perfuração das chapas.

A vantagem de se poder aumentar as velocidades de soldagem nos processos com mais de um arame, sem que ocorram defeitos, é explicada, por Paton et al. (1971), pela mudança no equilíbrio dinâmico sobre o metal fundido. Segundo os autores, quando dois arcos operam sobre uma mesma poça, com uma potência individual efetiva igual ou próxima a potência de um arco único, a pressão que ambos exercem sobre a superfície líquida fundida é menor ou igual à pressão exercida por um único arco. Isso decorre das diferenças de áreas catódicas nas quais os arcos exercem pressão. A área catódica pressionada pelos arcos duplos seria de dimensões maiores que a área de ação de um só arco. Uma vez que na poça de fusão, o equilíbrio dinâmico depende também da espessura da camada de material fundido no fundo da cratera, o fato de se utilizar mais de um eletrodo simultaneamente, contribui para aumentar a espessura dessa camada. Diante dessa nova condição de equilíbrio de forças, os autores consideram que a velocidade de soldagem limite que ocasiona o aparecimento de defeito é consideravelmente aumentada para os processos com mais de um arame.

## **2.8 Corrente Pulsada no Processo MIG/MAG**

A soldagem com corrente pulsada tem por objetivo obter uma transferência de material fundido de forma semelhante à transferência goticular projetada (spray), porém, com valores de corrente média nos níveis aplicáveis às transferências por curto-circuito. Devido à redução na energia média do arco e na taxa de fusão ela é indicada para soldagens de chapas mais finas e, ainda, para soldagens fora da posição plana.

Os benefícios que a corrente pulsada proporciona ao processo MIG/MAG já foram apontados em trabalhos como os de Quintino (1985); de Norrish (1992); de Warsz (1993); de Pereira et al. (1995); de De Paula & Dutra (1996) e outros. Essas vantagens se resumem em: redução dos salpicos em relação à transferência por curto-circuito; melhoria no controle da transferência metálica, uma vez que, o tamanho da gota e a sua frequência de destacamento são comandados pela pulsação da corrente; obtenção de uma transferência com características similares à goticular projetada, com um arco estável, porém, em níveis baixos de aporte térmico (em correntes médias abaixo da corrente de transição).

A Figura 2.9 mostra uma onda de corrente retangular empregada no processo MIG/MAG pulsado. Pode ser visto que a corrente oscila periodicamente entre dois níveis. No mais baixo, denominado de corrente de base ( $I_b$ ), a energia do arco é suficiente para mantê-lo aceso durante um certo tempo ( $t_b$  – tempo de base) sem que ocorra a transferência de metal da ponta do eletrodo para a poça. No segundo nível, uma corrente ( $I_p$  – corrente de pulso) de intensidade superior ao valor da corrente de transição é sobreposta à corrente de base, por um intervalo de tempo ( $t_p$  – tempo de pulso), com o objetivo de destacar uma gota metálica. A magnitude desses pulsos e a frequência de ocorrência dos mesmos controlam o nível de energia do arco e, portanto, a taxa de fusão do arame.

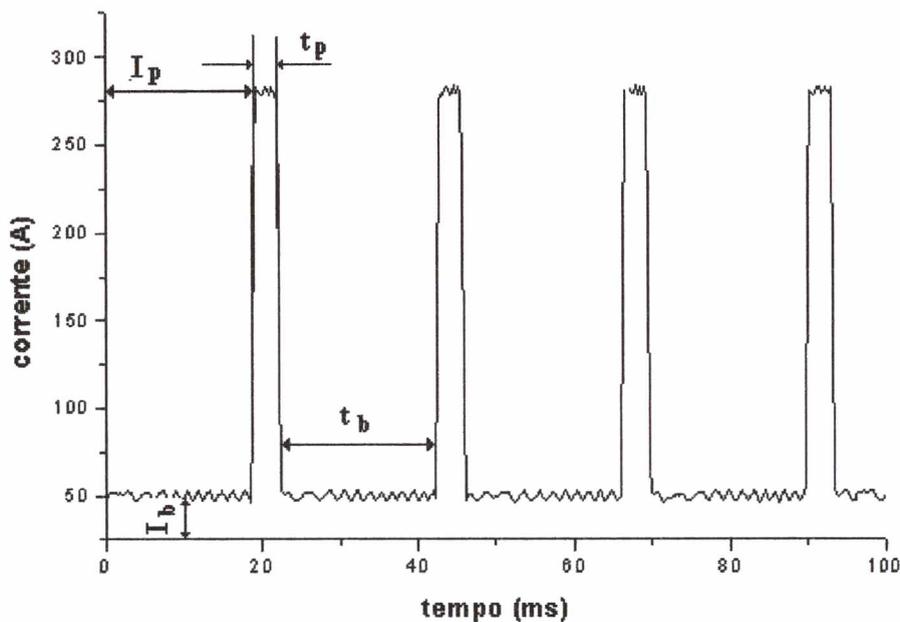


Figura 2.9 - Oscilograma de corrente pulsada.  $I_p = 300$  A;  $t_p = 3,9$  ms;  $I_b = 50$  A;  $t_b = 23$  ms.

### 2.8.1 Determinação dos parâmetros de destacamento de gotas

Amin (1983a, 1983b) descreve em seus trabalhos que a previsão dos parâmetros de pulso é baseada em três requisitos essenciais da corrente pulsada: 1). O tipo de transferência metálica deve ser similar ao goticular (“spray”), porém, em baixas velocidades de alimentação de arame. Velocidades que, em soldagem com corrente contínua constante, resultariam em transferência do tipo globular. 2) A velocidade de arame deve ser balanceada com a taxa de fusão, de tal forma que, o comprimento de arco seja mantido constante. 3) A corrente de base deve exceder um valor mínimo para que se obtenha um arco estável. Abaixo desse valor, o arco tende a se extinguir.

2.8.1.1 Requisito 1 – Características da transferência de material

Para se atender a primeira requisição proposta por Amin (1983a; 1983b), uma corrente de pulso deve ser aplicada ao arame por um determinado tempo para promover o destacamento de uma gota. Os parâmetros de base ( $I_b$  e  $t_b$ ), e, portanto, a corrente média de soldagem ( $I_m$ ), têm pouca influência sobre o destacamento na soldagem com corrente pulsada (ALLUM, 1983).

Diversos autores admitem que um melhor controle da transferência é obtida com o destacamento de uma gota, com diâmetro próximo ao do eletrodo, a cada pulso da corrente (NIXON & NORRISH, 1988; LARSEN, 1990 *apud* SCOTTI, 1991; DUTRA, 1989b) Allum (1983) e Amin (1981) verificaram que uma gota é destacada a cada pulso de corrente, se:

$$I_p^n \cdot t_p = D, \tag{2.5}$$

sendo “n” um valor próximo de 2 e, “D” é uma constante denominada de parâmetro de destacamento para um diâmetro de gota específico. Essa relação entre  $I_p$  e  $t_p$  é determinada experimentalmente e tem a forma das curvas da Figura 2.10.

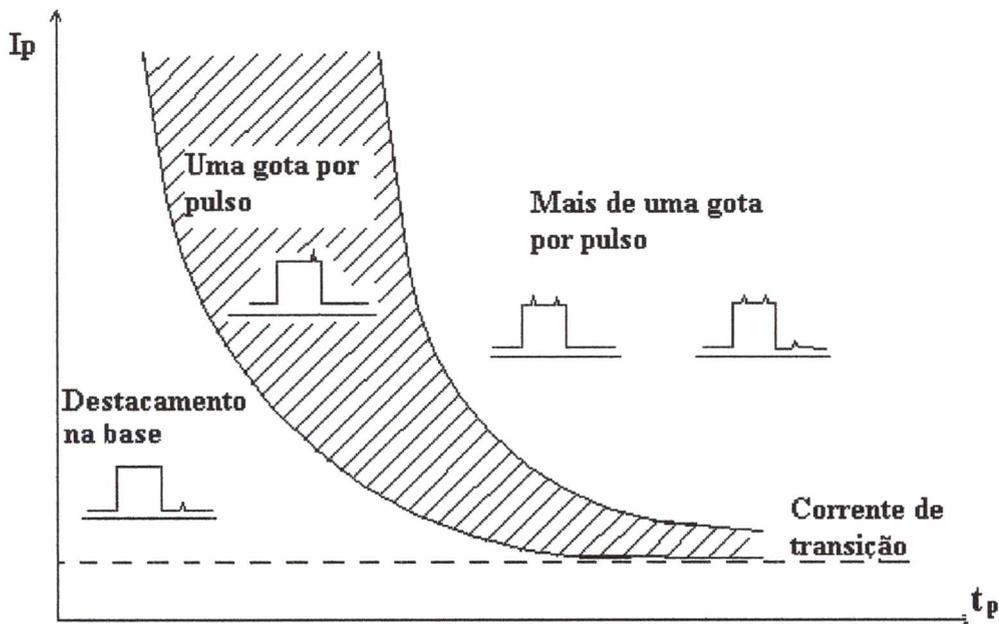


Figura 2.10 - Regiões de relacionamento entre corrente e tempo de pulso e as respectivas condições de transferência metálica (ALLUM, 1985).

Para se garantir a condição de uma gota destacada por pulso de corrente, a seleção dos parâmetros  $I_p$  e  $t_p$  deverá resultar em uma combinação que caia dentro da faixa listrada da Figura 2.10. Allum (1985), *apud* Balsamo (2000), ressalta que essa condição de uma gota por pulso parece ser arbitrária, mas destaca que o desprendimento de mais de uma gota no período de pulso torna o processo menos controlável, podendo resultar em respingos. Segundo o

autor, a condição preferida é o destacamento no final do pulso, pois o deslocamento da gota através do arco se dá durante o período de base da corrente, o que resulta em minimização dos respingos. Se o destacamento ocorre no meio do pulso, uma forte aceleração e aquecimento da gota ocorrem durante a sua transição pelo arco, podendo aumentar a penetração e os respingos. Subramanian et al. (1998) confirmam essa constatação e ressaltam que o destacamento no meio do pulso pode ser preferível para soldagens em seções mais espessas que requerem uma maior penetração.

### 2.8.1.2 Requisito 2 – Características de fusão de material

Uma transferência metálica estável é obtida quando gotas de dimensões próximas à do eletrodo são projetadas a uma frequência constante da ponta do eletrodo para a peça. Para que essa condição seja atendida, é necessário que haja um equilíbrio entre a velocidade de avanço do arame e a sua taxa de fusão, garantido um comprimento de arco praticamente constante. A taxa de fusão (TF) é usualmente expressa na forma (LESNEWICH, 1958):

$$TF = \alpha \cdot I + \beta \cdot l_e \cdot I^2, \quad (2.6)$$

sendo I a corrente de soldagem,  $l_e$  a extensão do eletrodo,  $\alpha$  a área da seção transversal do arame,  $\beta$  e  $\alpha$  são constantes de proporcionalidade que dependem do material e dimensões do eletrodo e do gás de proteção. Essa equação é válida para o MIG corrente contínua constante, sem a pulsação da corrente. No MIG pulsado, a corrente varia periodicamente entre dois níveis e o que se espera é que a taxa de fusão também oscile. Dessa forma, a equação 2.6 já não representa corretamente a taxa de fusão. Nesse caso, há de se considerar a fusão do arame em todo o ciclo da corrente pulsada. Considerando-se uma forma de onda retangular e assumindo que o aquecimento ôhmico durante o período de base é desprezível em relação ao de pulso da corrente, a equação da taxa de fusão para corrente pulsada é da forma (DUTRA, 1989):

$$TF = \alpha \cdot I_m + \beta \cdot l_e \cdot \frac{I_p^2 \cdot t_p}{T}, \quad (2.7)$$

O período de tempo T da onda retangular de uma corrente, que causará o destacamento de uma gota, de volume constante, a cada pulso da corrente, pode ser estimado a partir de uma relação geométrica, que considera o volume de arame que avança durante esse período e o volume da gota que será formada. Esse relacionamento pode ser demonstrado e a equação é da seguinte forma:

$$T = \frac{40 \cdot d_g^3}{Va \cdot d_e^2}, \quad (2.8)$$

sendo “ $d_g$ ” o diâmetro da gota (em mm), “ $Va$ ” a velocidade do arame (em m/min), “ $d_e$ ” o diâmetro do eletrodo (em mm) e “ $T$ ” o período (em ms). Considerando que a taxa de fusão é em média igual à velocidade do arame e substituindo a equação 2.8 na 2.7, obtém-se a seguinte relação entre velocidade do arame e corrente média:

$$Va = \frac{\alpha \cdot Im \cdot d_g^3}{d_g^3 - \beta \cdot l_e \cdot D \cdot 40 \cdot d_e^2}, \quad (2.9)$$

Como  $\alpha, \beta, l_e, d_e, d_g$  e  $D$  são constantes, pode-se admitir que a relação de  $Va$  com  $Im$  é linear, na forma:

$$Va = cte \cdot Im, \quad (2.10)$$

Entretanto, considerar linear a relação entre a corrente média e a velocidade de arame (ou taxa de fusão), ou seja, simplificar a parcela referente aos parâmetros de base da corrente, pode levar o modelo da equação anterior a não representar corretamente a relação. Norrish (1992) mostra resultados de aumentos na taxa de fusão do arame quando a diferença entre os valores de  $I_p$  e  $I_b$  ( $I_p - I_b$ ) aumenta, para uma mesma corrente média de soldagem. O autor afirma que a taxa de variação da corrente, também, influencia na fusão do eletrodo (taxas maiores de variação da corrente resultaram em taxas de fusão do eletrodo também superiores). Considerando esses fatores para uma corrente pulsada trapezoidal, Norrish apresenta a equação 2.11 para a taxa de fusão ou velocidade de arame.

$$Va = \alpha \cdot Im + \beta \cdot l \left[ Im^2 + \frac{(I_p - I_b)^2 \cdot tp \cdot tb}{(tp + tb)^2} - \frac{(I_p - I_b)^3}{3 \cdot \frac{di}{dt} (tp - tb)} \right], \quad (2.11)$$

sendo  $di/dt$  a taxa de variação da corrente.

Richardson (1994), em seu estudo sobre a influência das características dinâmicas das fontes sobre a taxa de fusão, apresenta a mesma equação de Norrish e conclui que essa influência é mais significativa (tendendo a aumentar a taxa de fusão) para arames mais resistivos, ou seja, de menor diâmetro ou de aço inoxidável. Subramanian (1998) também menciona a necessidade de se considerar os parâmetros de base nas equações clássicas da corrente pulsada. O autor determina uma equação empírica entre  $I_p \cdot tp$ , inserindo nessa relação os efeitos das condições de base da corrente. Balsamo (2000), com o objetivo de

desenvolver uma nova concepção de um sistema sinérgico não linear considerou em seu estudo três modelos distintos para o formato de onda da corrente pulsada (idealizado retangular, exponencial e trapezoidal). O autor concluiu que o modelo de onda trapezoidal é o que melhor representa o formato real da onda e, que no cálculo da velocidade de alimentação de arame, utilizando-se um modelo não-linear, os erros nos comprimentos de arcos verificadas durante a soldagem eram menores que as obtidas com o emprego de um modelo linear.

### 2.8.1.3 Requisito 3 – Critério de estabilidade do arco no período de base

Uma condição estável de soldagem com corrente pulsada requer que a corrente de base esteja acima de um valor mínimo, para que o arco se mantenha aceso. Em aplicações práticas de soldagem, Amin (1983) recomenda uma corrente de 15 A para esse valor mínimo.

### 2.8.2 Técnicas de identificação da transferência por projétil para determinação dos parâmetros de destacamento de gota

A determinação dos parâmetros de destacamento ( $I_p$  e  $t_p$ ) é fundamentada na transferência metálica por projétil (spray). As técnicas utilizadas habitualmente para identificação dos destacamentos de gotas são:

#### 1) Análise dos oscilogramas de tensão.

Por intermédio dos oscilogramas de tensão obtidos do arco voltaico, em soldagens com corrente contínua constante, detectam-se os instantes entre os destacamentos de gotas. Esses instantes são identificados por pequenos aumentos no sinal de tensão (de intensidade variando entre 0,5 e 2V), conseqüentes do desprendimento da gota aderida à ponta do eletrodo. Aquele instante que ocorre com uma maior frequência, determinado estatisticamente, representará o tempo modal de destacamento de gota<sup>2</sup>. Uma vez que se conhece a velocidade de soldagem é possível determinar o diâmetro modal de gota modal. Essa dimensão de gota é assumida como sendo um parâmetro constante de destacamento para a corrente pulsada, cuja intensidade da corrente no pulso deverá ser a mesma da corrente constante e permanecerá nesse patamar por um período de tempo igual ao do tempo modal. É uma técnica bastante utilizada em trabalhos científicos nos quais se estudam as transferências metálicas. A incerteza da técnica está relacionada às variações nos sinais de tensão, que são ocasionadas, não pelo destacamento de

---

<sup>2</sup> A detecção dos instantes de destacamento de gotas só é possível se a fonte de energia empregada não produzir ruídos no sinal de tensão, com a mesma intensidade verificada em um destacamento. Essas variações podem ocorrer devido a própria forma de controle da corrente, ou seja pelo próprio chaveamento da fonte.

gotas, mas por ruídos ou perturbações nos arcos voltaicos. Dutra (1989) utilizou uma fonte transistorizada analógica, que proporciona um sinal praticamente isento de ruídos, para realizar o procedimento de determinação dos parâmetros de destacamento de gotas. O autor verificou que, para arames de aço carbono de 1,0 mm de espessura, uma gota com o diâmetro 20% maior que o do eletrodo proporcionava uma condição mais estável. Ele utilizou como critério de estabilidade a repetitividade dos oscilogramas, com os picos de tensão, indicativos dos destacamentos de gotas, ocorrendo no final da fase de pulso.

## 2) Uso de filmagens a altas velocidades.

Uma câmera capaz de capturar uma grande quantidade de imagens em um espaço de tempo curto é utilizada para filmar o eletrodo, a gota em transferência e a poça fundida (câmeras com capacidade de medição de 1000 a 10000 quadros por segundos são empregadas para realizar essas filmagens). Para permitir a filmagem das gotas é empregada a técnica conhecida por “Back light” que consiste em projetar a sombra dos elementos que se pretende filmar sobre um anteparo ou sobre a própria lente da câmera<sup>3</sup>.

A partir das imagens obtidas nas filmagens e da velocidade da câmera, é possível medir-se tanto o diâmetro das gotas quanto a frequência de destacamento delas. Por intermédio de uma sincronização dos sinais de tensão e corrente com as imagens gravadas da câmera, Johnson et al (1991); Scotti et al. (1998); Balsamo et al (2000), determinaram, nos oscilogramas, os instantes de destacamentos de gotas.

### 2.8.3 Procedimento para determinação dos parâmetros e das variáveis da corrente pulsada.

Nos trabalhos consultados nesta pesquisa bibliográfica, as etapas para a determinação dos parâmetros e variáveis da corrente pulsada, para uma determinada corrente média de soldagem, seguem uma seqüência comum, que pode ser resumida pelo procedimento abaixo:

- selecione uma corrente de pulso acima da corrente de transição;
- determine o tempo de pulso a partir da relação  $I_p^2 t_p = D$ ;
- use a equação ou gráfico que relaciona  $V_a$  e  $I_m$  para determinar a velocidade de arame;
- calcule o período de onda da corrente pulsada, a partir da relação entre período e velocidade de arame (equação 2.8), ou de frequência ( $f = 1/T$ ) e velocidade de arame;
- determine o tempo de base da relação  $t_b = T - t_p$ ;

<sup>3</sup> Maiores detalhes sobre a técnica do Back light ou shadowgrafia a laser são dadas no Capítulo 5.

- calcule a última variável  $I_b$  a partir da equação da corrente média para uma onda de formato retangular (Equação 2.11 apresentada a seguir).

A equação da corrente média pulsada, para um formato de onda retangular, é da seguinte forma:

$$I_m = \frac{I_p \cdot t_p + I_b \cdot t_b}{T}, \quad (2.11)$$

Esse procedimento descrito pode ser empregado para determinar as variáveis da corrente pulsada em toda a faixa de corrente média, recomendada para um determinado arame.

## 2.9 Corrente pulsada com pulsação térmica

A corrente pulsada com pulsação térmica surgiu da união das características de pulsação do processo MIG/MAG com as do processo TIG. A oscilação da corrente de soldagem a uma baixa frequência, no processo TIG, promove um melhor controle da poça fundida pois, ao se alternar a energia de soldagem entre dois níveis, ocorrerá, no mais alto, a fusão dos metais de base e de adição, e, no mais baixo, um resfriamento da poça. Esta oscilação de energia confere à poça condições mais favoráveis de tensão superficial e viscosidade que promovem o seu melhor controle.

Dutra et al. (1995) associaram as características da pulsação térmica do processo TIG ao processo MIG/MAG pulsado. À pulsação de corrente com frequência adequada para promover a transferência metálica no processo MIG/MAG, os autores incorporaram uma segunda frequência de pulsos da corrente média de soldagem, conferindo os efeitos desejados de controle à poça metálica.

Essa forma de oscilação da corrente pode ser obtida através da variação cíclica da corrente de base e seu respectivo tempo de duração. A Figura 2.11 ilustra o formato de onda resultante da associação das duas formas de pulsação.

Como pode ser visto, os parâmetros de destacamento de gotas ( $I_p$  e  $t_p$ ) não mudam nas duas frequências de pulsação da corrente. O período de maior frequência dos pulsos de corrente, identificado na figura por “ $\tau_p$ ”, corresponde ao nível de maior energia da pulsação térmica (Pulso térmico). A corrente nesse período é denominada de corrente média no pulso térmico ( $I_{mP}$ ) e pode ser calculada a partir da equação 2.11. A corrente e o tempo de base empregados para o cálculo de  $I_{mP}$  são identificados na figura por  $I_{bP}$  e  $t_{bP}$  (corrente e tempo de base no período de pulso térmico). O período de menor frequência “ $\tau_b$ ” corresponde ao nível de menor energia da pulsação térmica (Base térmica). A corrente média nesse período ( $I_{mB}$ ) também pode ser calculada pela equação 2.11. A corrente e o tempo de base nesse

período, necessários para o cálculo, são  $I_{bB}$  e  $t_{bB}$  respectivamente (corrente e tempo de base no período de base térmica).

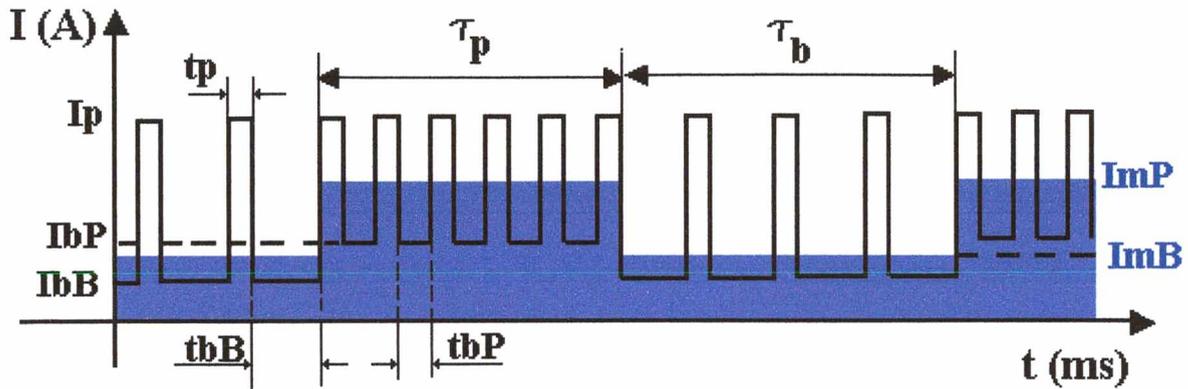


Figura 2.11 - Oscilograma de corrente pulsada com pulsação térmica.  $I_p$  - corrente de pulso;  $t_p$  - tempo de pulso;  $I_{bP}$  - corrente de base no período de pulso térmico;  $I_{bB}$  - corrente de base no período de base térmica;  $t_{bP}$  - tempo de base no período de pulso térmico;  $t_{bB}$  - tempo de base na base térmica;  $\tau_p$  - tempo de pulso térmico;  $\tau_b$  - tempo de base térmica.

## 2.10 O Processo MIG/MAG com Dois Arames

A soldagem MIG/MAG com dois arames é uma variante do processo MIG/MAG convencional e caracteriza-se pela abertura de um par de arcos elétricos entre uma única poça metálica e dois eletrodos consumíveis. Os arcos e a poça fundida são protegidos por um gás que, em conjunto com os eletrodos, é definido pelo tipo de metal de base.

O processo não é recente. Algumas tentativas de se empregar a técnica do duplo arame com a soldagem MIG/MAG foram feitas na década de 50 (VOLODIN & SLUCHANKO, 1955). Porém, foi nas últimas décadas do Século XX, utilizando-se fontes controladas eletronicamente, que o processo ganhou novo impulso. Essas fontes permitiram controlar melhor a estabilidade dos arcos, aumentando a eficiência do processo.

Comparado ao MIG/MAG convencional, além de proporcionar um crescimento da produtividade através dos aumentos na taxa de deposição ou na velocidade de soldagem, outra vantagem operacional creditada ao duplo arame é o baixo aporte térmico. Por permitir soldagens com velocidades de deslocamento mais altas, é possível diminuir-se o aporte de calor sobre a peça soldada, e conseqüentemente, reduzir distorções, o que favorece a soldagem de chapas finas.

### 2.10.1 Classificação

Na literatura investigada até o presente momento, não se identificou uma classificação dos sistemas MIG/MAG com dois arames. O que se pôde observar foi uma separação dos

diferentes sistemas, conforme a conexão dos eletrodos com a(s) fonte(s), o que permite classificar o processo em:

➤ MIG/MAG Duplo Arame com Potencial Único

Nesses sistemas, de um modo geral, os eletrodos são fornecidos por alimentadores de arames independentes e estão em contato elétrico no bico da tocha. Por consequência, estão submetidos ao mesmo potencial elétrico. Na outra extremidade, podem estar conectados aos bornes de uma ou de duas fontes de energia. No caso dos sistemas que empregam uma única fonte de potência (Figura 2.12), esta deverá fornecer as correntes de soldagem com intensidades suficientes para atender às altas taxas de fusão e deposição de material requeridas do processo. Uma vantagem desses sistemas em relação aos demais é o menor custo operacional, uma vez que o número de equipamentos e acessórios necessários para a soldagem por esse processo é, em geral, inferior em relação aos sistemas com potenciais isolados, que serão caracterizados no próximo item.

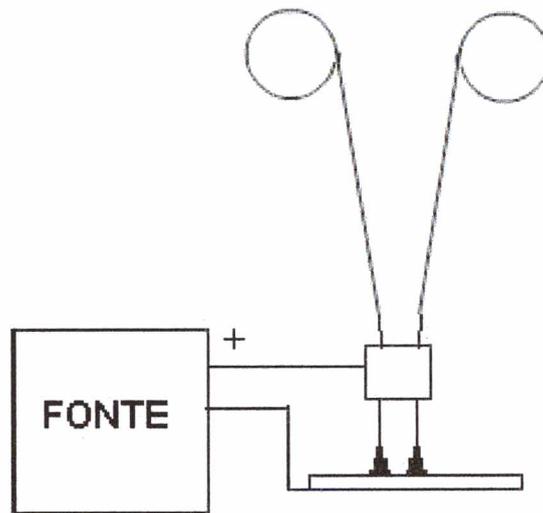


Figura 2.12 - Representação do sistema com potencial único

Os primeiros trabalhos com a soldagem MIG/MAG empregando dois arames utilizavam uma única fonte de potência. Segundo Michie (1999), o processo apresentava instabilidade nas soldagens com transferência metálica por curto-circuito. Isso se dava porque, quando um dos arames tocava a poça metálica, toda a corrente era forçada a passar por ele, causando o seu rompimento de forma abrupta. Problemas ocorriam também na transferência por escoamento goticular projetado (spray). Aumentos nos comprimentos dos arcos levavam a uma maior interação entre estes (sopro magnético), reduzindo a eficiência do processo. Esses fatores teriam contribuído para a aplicação da corrente pulsada nas soldagens com duplo

arame, condição essencial aos sistemas com potencial único para se controlar as transferências de metal de ambos os eletrodos.

Ramirez (1999), em seu estudo comparativo entre os processos MIG/MAG duplo arame com potencial único e o MIG/MAG com um arame, verificou que o primeiro processo apresentava vantagens expressivas sobre o segundo em várias aplicações. Por exemplo: na soldagem de juntas em ângulo na posição plana, ele obteve ganhos significativos na velocidade de soldagem (130% na transferência por projeção goticular – “spray”) para uma mesma geometria do cordão. Também nessa mesma aplicação, o autor verificou que a energia de soldagem liberada por comprimento de solda, no processo com um arame, era 15% superior em relação ao duplo arame.

Em soldagens realizadas por simples deposição sobre chapas e com transferência metálica por curto-circuito, apesar de o autor não atingir taxas de fusão de material superiores às obtidas com o processo MIG/MAG com um arame, ele obteve bons resultados relativos à qualidade (considerando-se o acabamento superficial e o índice de respingos) e à geometria dos depósitos.

A configuração da Figura 2.13, uma evolução da anterior, é um sistema de potencial único projetado para que se obtenha uma maior produtividade e se opere preferencialmente com transferência por corrente pulsada (LAHNSTEINER, 1994; PLATZ, 1996). As fontes devem ser sincronizadas de tal forma que os pulsos de corrente de ambas ocorram simultaneamente (Figura. 2.14).

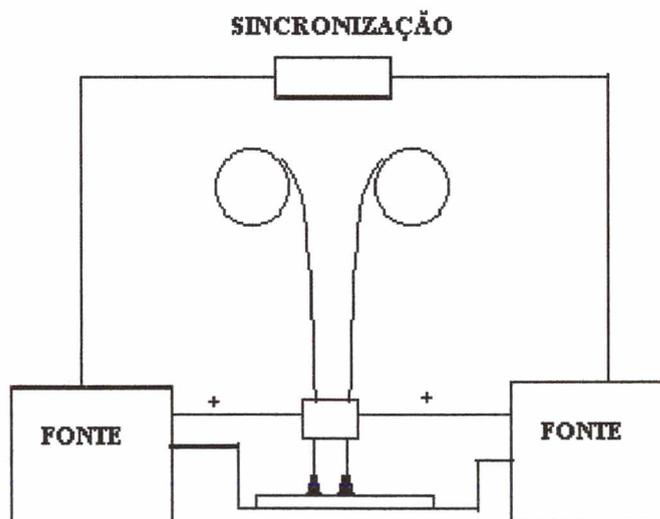


Figura 2.13 - Representação do sistema com potencial único empregando duas fontes de potência.

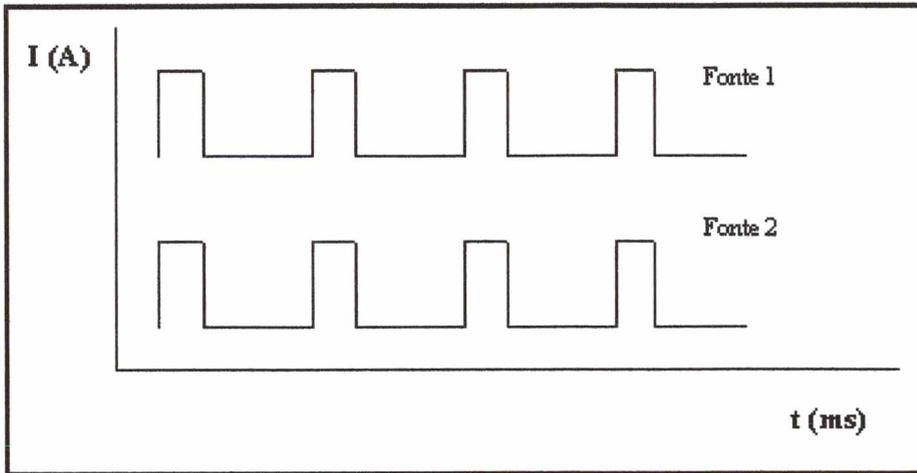


Figura 2.14 - Representação de oscilograma de corrente, retratando o sincronismo na pulsação das fontes (pulsos ocorrendo simultaneamente).

No entanto, mesmo trabalhando com corrente pulsada, os sistemas com potencial único eram suscetíveis às interferências eletromagnéticas entre os arcos. Esse fator foi fundamental para o surgimento dos sistemas com potenciais isolados

➤ MIG/MAG Duplo Arame com Potenciais Isolados (MIG/MAG-DAPI).

O isolamento elétrico entre os eletrodos e a manutenção dos arcos por fontes de soldagem separadas são as características que identificam esse processo. De forma semelhante ao potencial único, os arames são fornecidos por dois alimentadores de arames independentes (Figura 2.15).

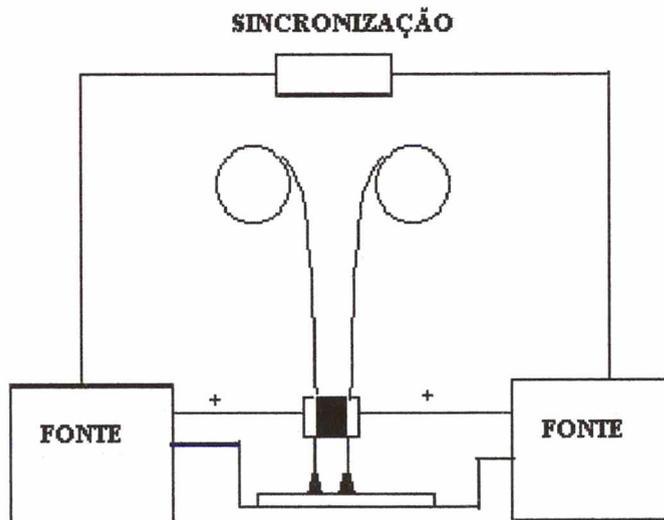


Figura 2.15 - Representação esquemática dos sistemas com duplo arame com potenciais isolados.

A vantagem dessa configuração é a possibilidade de se controlar separadamente os dois arcos elétricos. É possível conferir funções diferentes a cada um deles, selecionando-se parâmetros de soldagem distintos em ambas as fontes.

Conforme já foi descrita no último parágrafo do item anterior, a transferência metálica com corrente pulsada é apontada na literatura como uma alternativa para solucionar problemas com a instabilidade dos arcos apresentada nas transferências por curto-circuito. Mesmo assim, os sistemas com potencial único estão sujeitos a apresentar problemas com sopro magnético. Uma forma proposta na literatura para amenizar tais problemas é utilizar-se a corrente pulsada em ambas as fontes que compõem o sistema com potenciais isolados, mas com os pulsos de corrente ocorrendo com defasagem, conforme ilustração da Figura 1.1 (BROWN, 1975; DISTCHUN, 1988). LASSALINE (1989) propõe um sistema no qual as duas fontes são interligadas e operam em sincronismo na pulsação de corrente. Em uma das fontes (denominada “escrava”), os pulsos de corrente são ativados pelos pulsos da fonte principal (denominada “mestra”) após um intervalo de tempo programado (“Td” na Figura 1.1).

A maioria dos trabalhos encontrados na literatura apresenta aplicações do MIG/MAG-PDAPI empregando essa tecnologia para soldagens, principalmente, de chapas finas e de alumínio (MICHIE, 1999; HACKL, 1997; TROMMER, 2002). São soldagens executadas com velocidades de deslocamento elevadas e a uma alta taxa de fusão de material. Motta (2001), operando com MIG/MAG-PDAPI no modo convencional (ambas as fontes ajustadas para soldagens com tensão constante), obteve resultados satisfatórios na soldagem de vasos de pressão de 3 mm de espessura. O autor obteve uma taxa de fusão de material de 10,6 kg/h e velocidades de soldagem de 300 cm/min. Ele alega que, nos níveis de energia em que realizou os ensaios, os resultados alcançados no modo convencional foram aceitáveis, apresentaram baixo índice de salpicos ausência defeitos nas soldas. O autor argumentou que, em aplicações como as que ele analisou em seu trabalho, a pulsação da corrente não foi uma condição essencial para um melhor desempenho do processo.

### **2.11 Alinhamento dos eletrodos em relação à direção de deslocamento das tochas**

Conforme a aplicação, os sistemas com dois arames permitem ao usuário do processo alterar a disposição dos eletrodos em relação à direção de deslocamento da(s) tocha(s). São duas as principais possibilidades de arranjo verificadas nas aplicações do processo:

➤ Eletrodos em posição longitudinal ou “tandem”

Nesse arranjo, os eletrodos são dispostos na posição longitudinal (um em frente ao outro) em relação à direção da velocidade de soldagem.

Tem-se por prática ajustar uma maior potência no arco da frente — responsável pela formação da cratera no metal de base — com o objetivo de elevar a penetração. O segundo arco, com um nível de energia mais baixo, tem a função de completar o preenchimento da cratera aberta, sendo responsável pela formação de cordões com geometria mais favorável e pela redução na quantidade de defeitos (UTRACHI, 1989; HACKL, 1997).

➤ Eletrodos em posição transversal ou “lado a lado”

Nessa configuração, os eletrodos são posicionados lado a lado em relação à direção do deslocamento da soldagem (Figura 2.16).

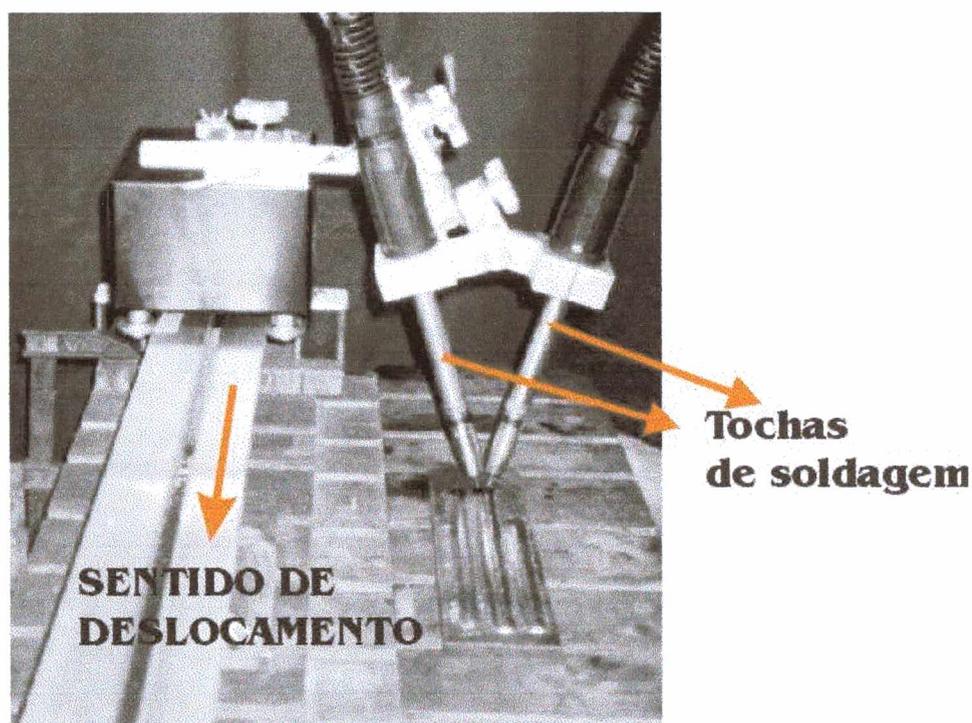


Figura 2.16 - Foto de duas tochas montadas para realizar soldagem automatizada com o processo MIG/MAG duplo arame. Eletrodos posicionados lado a lado.

A literatura indica essa disposição de eletrodos para a soldagem de juntas de topo mal ajustadas ou com grande abertura de raiz. Pois, direcionando-se cada eletrodo para as faces das juntas, pode-se obter uma melhor fusão delas, reduzindo-se a possibilidade de surgimento de defeitos por falta de fusão. Uma outra aplicação dessa configuração é a operação de revestimento, que requer cordões mais largos, menos convexas e penetração mais baixa.

## 2.12 Efeitos das variáveis do processo sobre o perfil do cordão

São poucos os trabalhos encontrados que apresentam estudos relacionados com as variáveis do processo e os efeitos que elas exercem sobre as soldas realizadas. Brown (1983), ao estudar o processo MIG/MAG Pulsado com Duplo Arame e com Potenciais Isolados, avaliou os efeitos que as variáveis: distância entre eletrodos, corrente de soldagem e orientação dos eletrodos (“tandem” e “lado a lado”) exercem sobre o perfil de penetração dos cordões. Ele verificou que: 1) para uma corrente constante e eletrodos posicionados lado a lado, afastamentos maiores entre eletrodos reduziram a penetração no centro dos cordões e os perfis de penetração apresentaram aspectos de dupla penetração (“double finger”<sup>4</sup>); 2) ao fixar a distância entre os eletrodos e, operando na posição lado a lado, reduções na corrente causaram o mesmo efeito descrito no item 1; 3) ao mudar a posição dos eletrodos da condição “lado a lado” para “tandem”, os perfis passaram a apresentar características de penetração única ou “finger shape”. O autor comparou os perfis obtidos com essa configuração com os do processo MIG/MAG com um arame, mantendo a mesma taxa de deposição de material para os dois processos. Ele verificou que, nas soldagens com dois arames, as gotas ao incidirem sobre a poça em duas posições distintas promoviam uma maior agitação dessa poça, o que favorecia a eliminação de porosidades.

Voropay & Protsenko (2000) verificaram que o aumento na velocidade de soldagem causa, inicialmente, um crescimento da penetração e posteriormente um declínio. Segundo os autores, esse comportamento é explicado pela formação de uma camada de material fundido sob o arco, a baixas velocidades de soldagem, que impedem uma transferência mais efetiva do calor do arco para o metal de base. Com aumentos da velocidade de soldagem acima de 40 m/h, os arcos tendem a se defletirem para trás, expulsando o metal fundido para a parte posterior da poça e, com isso, reduzindo a espessura da camada de material fundido. Isso resultaria em uma melhora nas condições de transferência de calor do arco para o metal base e, conseqüentemente, em um aumento da penetração. Os autores mostraram que os aumentos na velocidade de soldagem acarretaram reduções nas larguras dos depósitos. Quanto à corrente de soldagem, eles verificaram que o seu crescimento causa aumentos na penetração e na largura dos cordões, para uma velocidade de soldagem constante. Os autores evidenciaram, também, que, a uma corrente constante, aumentando-se o afastamento dos eletrodos, para um posicionamento em “tandem”, a penetração tende a aumentar e, posteriormente, a cair (inversão ocorreu para afastamentos superiores a 6 mm). Para esse mesmo posicionamento (“tandem”), uma tendência oposta foi verificada para a largura dos depósitos. Ela diminuiu

---

<sup>4</sup> Double Finger é a designação dada ao perfil de penetração das soldas que apresenta duas penetrações mais profundas próximas às bordas do cordão e uma penetração menor na região central.

com o aumento dos afastamentos dos eletrodos. Já para um posicionamento “lado a lado”, o aumento no afastamento dos arames causou reduções nas penetrações e aumentos na largura.

## CAPÍTULO 3

# SISTEMAS DE MEDIÇÃO, EQUIPAMENTOS DE SOLDAGEM E DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE RESPOSTA DO PROCESSO

### 3.1 Introdução

Três bancadas de ensaios foram montadas para a realização dos experimentos. Elas são apresentadas nos Capítulos quatro, seis e oito. Neste, descrevem-se, apenas, as características operacionais dos sistemas de medição e dos equipamentos que as integram. Alguns equipamentos que fazem parte da bancada utilizada para as filmagens serão caracterizados no Capítulo quatro, que trata da apresentação e avaliação da bancada.

As características geométricas dos cordões de solda (largura, reforço e perfil de penetração), que serão utilizadas como variáveis de resposta na análise dos resultados, são também apresentadas.

### 3.2 Sistemas de medição

#### 3.2.1 Sistema de medição das tensões e correntes de soldagem

Para medir as grandezas tensão e corrente de soldagem (média ou eficaz), de ambos os arcos voltaicos, foram utilizados dois instrumentos fabricados no LABSOLDA-UFSC denominados TC-1 (Figura 3.1), cujas características operacionais são apresentadas a seguir:

- faixa de indicação para a corrente de 5 a 500 A (valores médios e eficazes);
- faixa de indicação para a tensão de 3 a 60 V (valores médios e eficazes);
- resolução de 1 A para a corrente e de 0,1 V para a tensão;
- incerteza máxima para a corrente: 1% do valor lido;
- incerteza máxima para a tensão: 0,6% do valor lido.



Figura 3.1 - Medidor de tensão e corrente.

Os sinais de tensão foram capturados nas duas tochas de soldagem em pontos próximos aos bicos de contato, com o intuito de reduzir os ruídos sobre o sinal a ser medido. Os sinais

de corrente foram medidos com auxílio de dois transdutores do tipo “Hall”, ligados aos dois TC1 (Figura 3.2). Esses transdutores geram sinais de tensão para os TC1, proporcionais ao valor da corrente a ser medida. As especificações deles são:

- corrente nominal: 500 A;
- incerteza máxima: 1% da corrente nominal a 23 °C;
- faixa de frequência: 0 a 25 kHz.

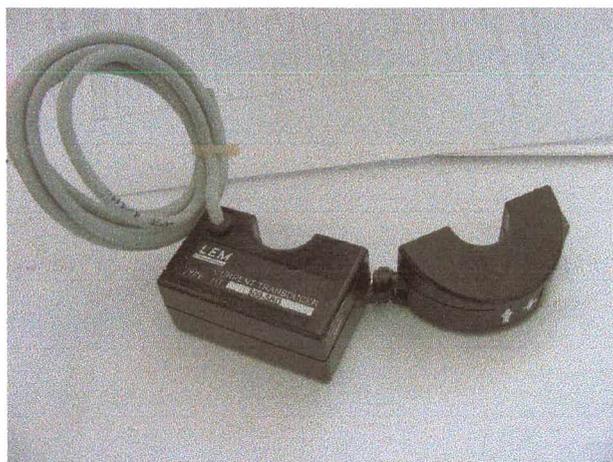


Figura 3.2 - Transdutor de corrente do tipo “Hall”

### 3.2.2 Sistema de medição das velocidades de arames (MVA)

Foram utilizados dois medidores de velocidades de arames, um para cada cabeçote alimentador (Figura 3.3). Esses instrumentos permitem medir, além da velocidade, o tempo de soldagem e o comprimento de arame consumido. Eles possuem o recurso de fornecer sinais de saída analógicos ou digitais, o que permite a utilização dos aparelhos acoplados a um sistema de aquisição de dados. As características do medidor de velocidade de arame são:

- faixa de medição:
  - velocidade: de 0 a 20 m/min;
  - comprimento de arame: de 100 a 1000 m;
  - tempo de soldagem: 100 min;
- saída analógica: 10 V a 20 m/min
- saída digital: nível TTL (5V); 166,7 Hz a 20 m/min;
- incerteza máxima: 1,5 % do valor lido.

O transdutor óptico apontado na Figura 3.3 também integra o sistema de medição das velocidades de arame. Ele tem a função de converter a velocidade do arame em um sinal elétrico, que será enviado ao MVA e posteriormente ao sistema de aquisição de dados. O transdutor é um sensor óptico emissor e receptor infravermelho. Ele emite luz sobre um disco ranhurado, que gira acionado pela velocidade de arame. O número de ranhuras e a velocidade

de rotação da roda determinam uma frequência de pulsação da luz, correspondente à velocidade de arame (a cada pulso de luz é gerado um pulso de tensão que é lido pelo MVA). Esse transdutor mede apenas as velocidades médias dos arames. Suas características operacionais são:

- disco ranhurado com 50 ranhuras por volta;
- faixa de medição: 1 a 20 m/min;
- incerteza de medição: 3% do valor lido nas velocidades utilizadas neste trabalho.

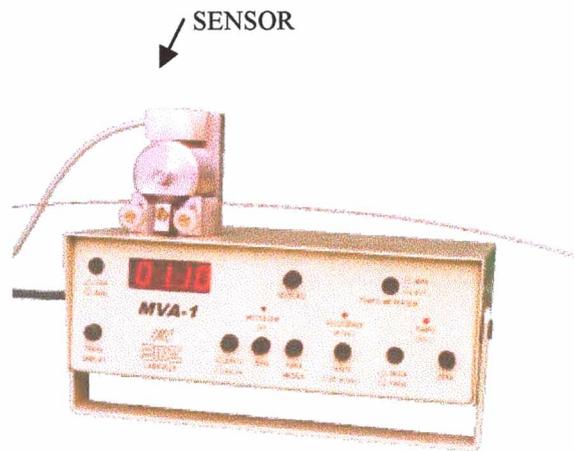


Figura 3.3 - MVA e o transdutor óptico usado para medir velocidade de arame.

### 3.2.3 Sistema de aquisição de dados

Esse sistema é composto por um microcomputador e por uma placa de aquisição de dados, denominada INTERDATA (Figura 3.4). A placa possui: 1) um conversor A/D de 16 canais, com 14 canais disponíveis para efetuar a aquisição de dados; 2) um conversor D/A de 8 canais, que é utilizado para o controle de equipamentos; 3) uma porta digital com 8 entradas e 8 saídas utilizadas para ativar e desativar equipamentos, ou realizar comunicação digital de dados. Neste trabalho, ela foi conectada ao barramento de um microcomputador Pentium de 166 MHz, para realizar aquisições dos sinais provenientes, apenas, dos sistemas de medição das correntes e das tensões de soldagem (dos dois TC1). Assim, foram habilitados quatro canais da placa para realizarem as leituras dos sinais em 12 bit, a uma frequência de 4 kHz por canal. O monitoramento das grandezas foi feito com auxílio de um programa, desenvolvido exclusivamente para a aquisição dos quatro sinais. Esse programa, denominado “OSCDUPLO”, gera oscilogramas de tensão e de corrente e os amostram em tempo real no monitor.

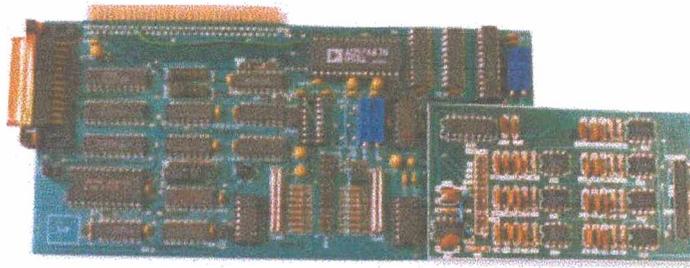


Figura 3.4 – Placa de aquisição de sinais utilizada (INTERDATA).

#### 3.2.4 Sistema de comando das fontes

Esse sistema é constituído de duas placas INTERDATA, com características similares às descritas no item anterior, conectadas a um segundo microcomputador PC 486, de 100 MHz. Essa configuração foi utilizada em alguns ensaios deste trabalho para comandar as fontes de soldagem via computador (uma placa para cada fonte).

### 3.3 Equipamentos e acessórios de soldagem

#### 3.3.1 Sistema de deslocamento das tochas de soldagem

Nos ensaios executados na posição plana, foi utilizado um sistema de deslocamento das tochas (Figura 3.5), construído no LABSOLDA, cujas características operacionais são citadas a seguir:

- faixa de operação: 5 a 60 cm/min;
- resolução da velocidade de deslocamento: 0,2 cm/min;
- resolução de posicionamento: 1 mm.

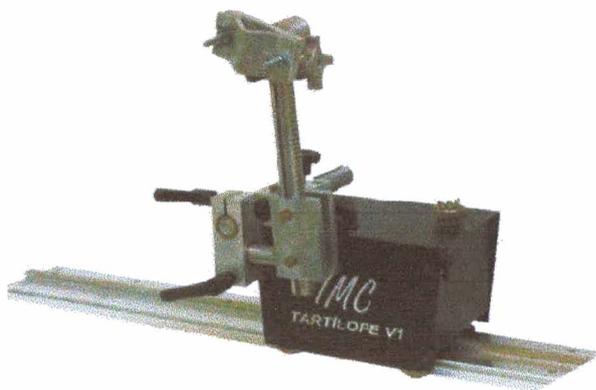


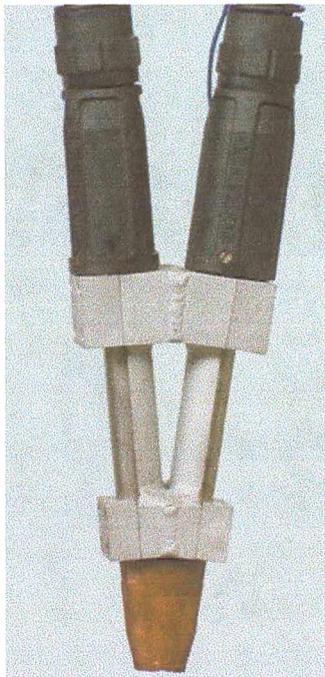
Figura 3.5 - Sistema de deslocamento das soldagens.

#### 3.3.2 Tochas de soldagem e suportes de fixação

Dois suportes de fixação para tochas Robô 240 da BINZEL com capacidade de corrente máxima de 230A por tocha (fator de serviço 100%) foram empregadas nos ensaios deste trabalho. Dois suportes

com características construtivas distintas foram utilizados nas soldagens para fixação da tochas . Os conjuntos suportes e tochas montados podem ser vistos na Figura 3.6.

**Suporte 1**



- ângulo “ $\phi$ ” entre tochas: 13°

**Suporte 2**



- ângulo “ $\phi$ ” entre tochas: 30°

Figura 3.6 - Suportes de fixação e tochas de soldagem utilizados nos ensaios experimentais deste trabalho.

### 3.3.3 Robô industrial

Nas soldagens realizadas na posição sobrecabeça, empregou-se um robô cujas características operacionais são apresentadas a seguir:

- capacidade de manipulação de cargas de até 3 kg;
- eixos livres de interpolação: 6;
- graus de liberdade: 6;
- raio de alcance: 677 mm;
- incerteza de posicionamento: 0,03 mm;
- velocidade máxima em interpolações lineares: 1,5 m/s.

### 3.3.4 Fontes de soldagem MTE DIGITEC 450

Para compor o sistema de duplo arame foram empregadas duas fontes de soldagem microcontroladas, chaveadas no secundário, e que utilizam transistores do tipo IGBT (Figura 3.7). Elas podem ser operadas em processos distintos, como o MIG/MAG, o TIG e o Eletrodo Revestido e, por essa característica, são denominadas de multiprocesso. Essas máquinas

podem ser comandadas por “softwares”, o que as tornam mais flexíveis às implementações de novas tecnologias. As informações técnicas dessas fontes são:

- tensão de alimentação: 220, 380 ou 440 V trifásica;
- tensão em vazio: 64 V;
- corrente a 100% de fator de carga: 280 A;
- potência máxima fornecida: 10 kVA;
- fator de potência: 0,94;
- corrente máxima: 450 A.

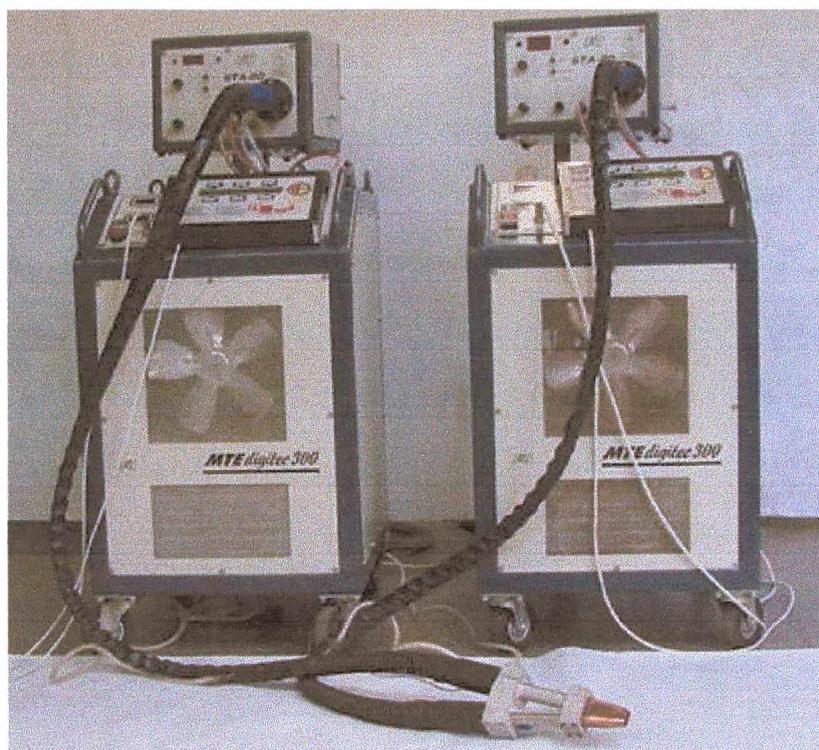
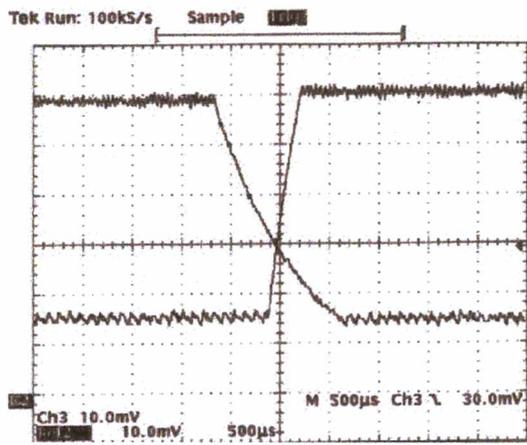


Figura 3.7 - Fotos das fontes que compõem o sistema MIG/MAG Duplo Arame Com Potenciais Isolados.

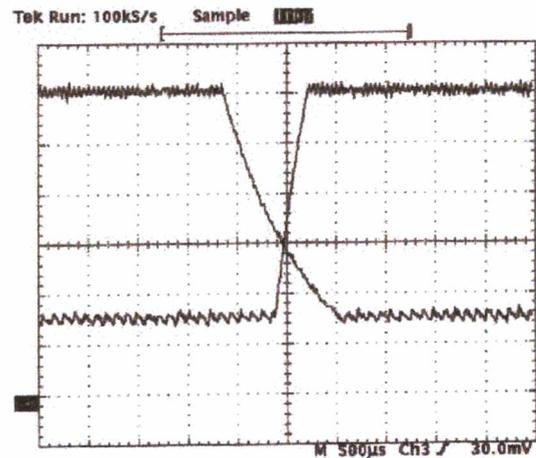
### 3.4 Características dinâmicas das fontes de soldagem

Para avaliar as respostas dinâmicas das correntes fornecidas pelas duas fontes utilizadas neste trabalho, quando elas são programadas para operarem com as mesmas condições de soldagem, utilizou-se uma resistência constante. Essa avaliação se justifica porque equipamentos com características construtivas semelhantes podem apresentar taxas de variação das correntes diferentes e, com isso, influenciar de forma distinta, por exemplo, a taxa de fusão dos eletrodos. Para realizar o ensaio, ajustaram-se as duas fontes no modo de soldagem corrente pulsada, com uma diferença de 220 A entre as correntes nos períodos de pulso e de base. Durante o ensaio, as variações das correntes do período de base para o de

pulso e, vice-versa, foram gravadas em um osciloscópio a uma frequência de amostragem das leituras de 100 kS/s. No gráficos das Figura 3.8-a) e 3.8 – b) estão plotadas as taxas de subida e de descida das correntes de ambas as fontes. Essas curvas foram sobrepostas em um mesmo gráfico para permitirem a comparação entre as taxas de subida e de descida (Figura 3.9). Percebe-se que ambas as fontes apresentaram comportamentos bastante semelhantes para as variações das correntes, quando foram submetidas ao mesmo circuito indutivo-resistivo. A taxa média de subida foi de aproximadamente 660 A/ms e a de descida de 190 A/ms. Deve-se ressaltar que essas taxas podem variar e dependem de fatores como a diferença de tensão entre pulso e base, a resistência do arame e a do arco voltaico, sendo que essa última está associada ao comprimento do arco e ao gás de proteção.



a) Fonte 1



b) Fonte 2

Figura 3.8 Taxas de variação da corrente na subida e na descida dos pulsos

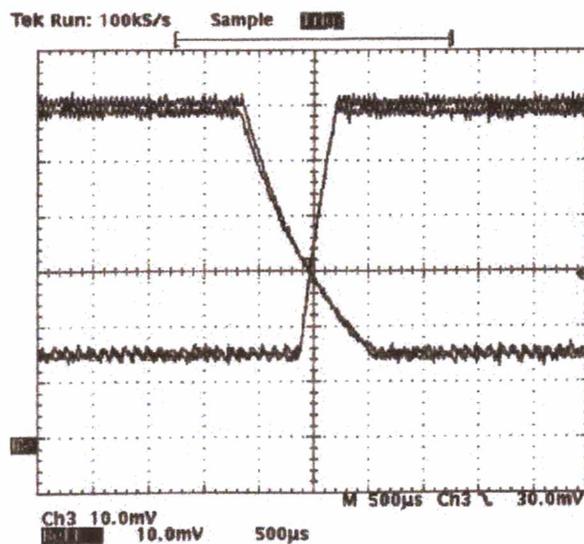


Figura 3.9 - Sobreposição das curvas da Figura 3.8 para comparação das taxas de subida e de descida das correntes de ambas as fontes de soldagem.

### 3.5 Implementação da tecnologia de defasagem dos pulsos de corrente

Para que fosse possível efetuar o estudo sobre a tecnologia de defasagem entre os pulsos de corrente de corrente, foi necessário implementar nas fontes de soldagem um circuito eletrônico, para promover o controle dos instantes de pulsação de cada fonte. Por intermédio desse circuito, o início da pulsação de corrente de uma das fontes (fonte escrava) é comandado pela outra (fonte mestre). O tempo de defasagem entre os pulsos de corrente é especificado pelo usuário e corresponde ao tempo que a fonte escrava deverá retardar o início de sua pulsação em relação ao início dos pulsos da fonte mestra. As Figuras 3.10 e 3.11 mostram dois oscilogramas nos quais as defasagens foram ajustadas com um tempo de 10,2 ms, no primeiro, e 0,01 ms, no segundo (menor tempo disponível de ajuste para a defasagem). As figuras foram obtidas da tela do programa (“OSCDUPLO”) que integra o sistema de aquisição de dados, descrito no subitem 3.2.3. O programa permite ao usuário medir no próprio oscilograma os valores das correntes e dos tempos ajustados.

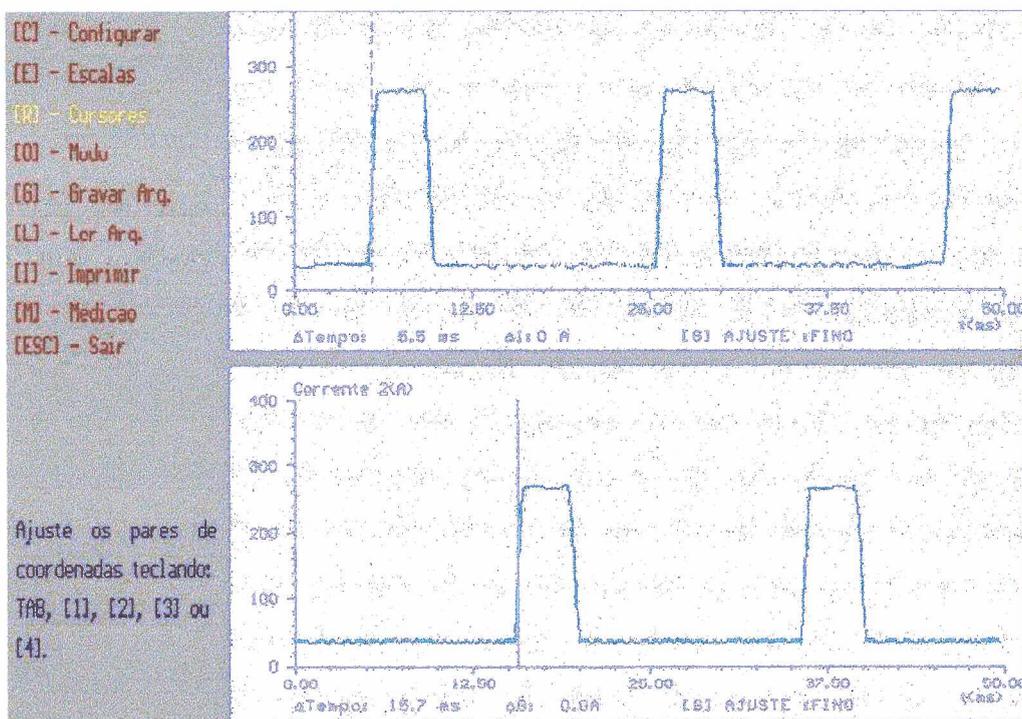


Figura 3.10 - Defasagem de tempo entre os pulsos de corrente das fontes. A diferença entre os tempos “ $\Delta$ tempo”, na parte inferior dos oscilogramas, corresponde ao tempo de defasagem “ $T_d$ ”(15,7-5,5 = 10,2 ms).

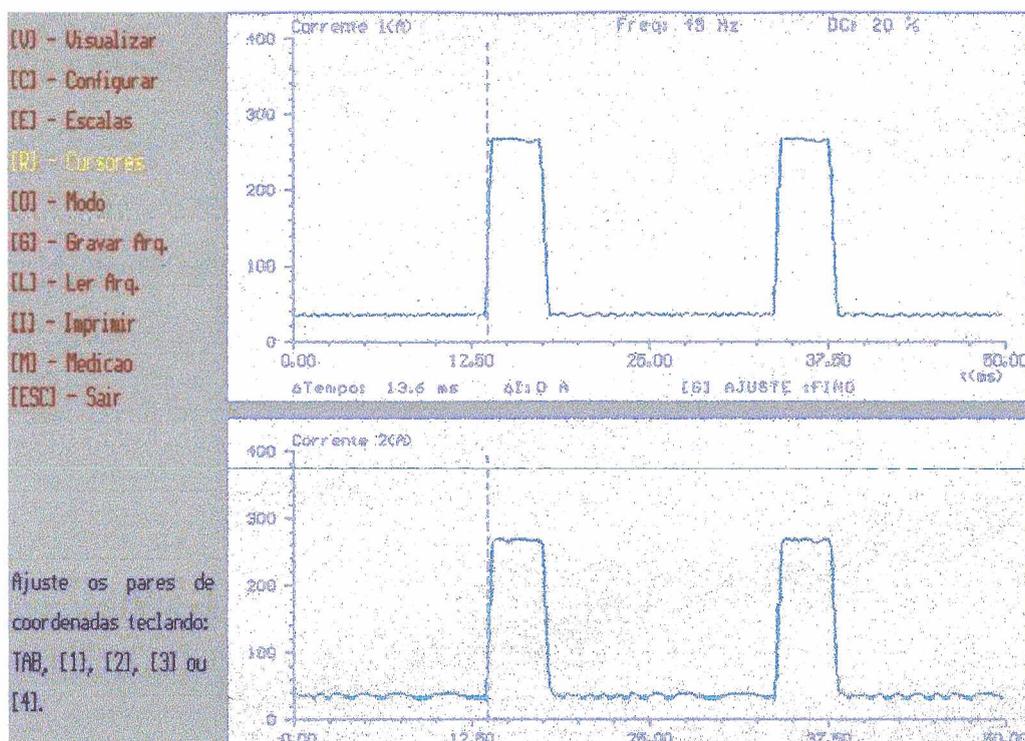


Figura 3.11 - Pulsos de corrente em fase de destacamento de gotas ( $T_d = 0,01$  ms).

### 3.6 Definição das variáveis de resposta dos experimentos

As dimensões geométricas das seções transversais dos cordões de solda foram definidas como características geométricas dos depósitos. Parte das discussões dos resultados deste trabalho foi realizada tomando os valores destas dimensões como referência nas comparações das diversas condições distintas de soldagem. Essas podem ser visualizadas nas representações esquemáticas da Figura 3.12.

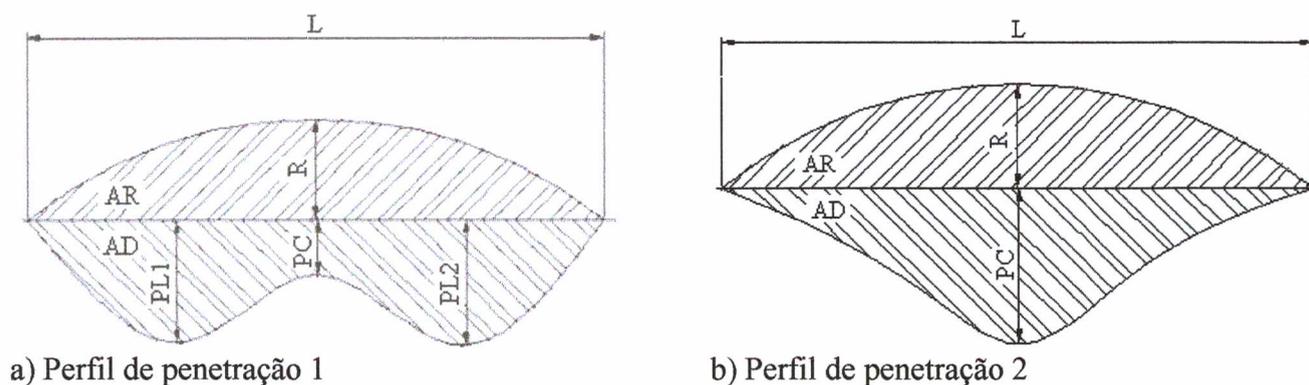


Figura 3.12 - Representação esquemática das dimensões geométricas das seções transversais dos cordões de solda.

- PLM  $\Rightarrow$  Penetração Lateral Média das duas penetrações, medidas a aproximadamente 1/4 de distância das bordas dos cordões  $(PL1+PL2)/2$ ;
- PC  $\Rightarrow$  Penetração medida aproximadamente no centro do cordão;

- IP ⇒ Parâmetro indicador do perfil de penetração (PLM/PC);
- L ⇒ largura do cordão;
- R ⇒ Reforço do cordão;
- CV ⇒ Índice de convexidade (R/L);
- AR ⇒ Área do reforço
- AD ⇒ Área fundida do metal de base

### **3.7 Metodologia de medição das características geométricas dos depósitos**

Para realizar as medições das características geométricas das seções transversais das soldas, os cordões foram cortados, lixados, polidos e atacados para revelação dos perfis do reforço e da penetração. As seções transversais das amostras foram projetadas com um projetor de perfis sobre folhas de papel milimetrado (aumento de 5 X). As características geométricas foram então medidas nessas folhas e, posteriormente, com o auxílio de uma balança de alta resolução (0,1 mg), calcularam-se as diluições pela relação entre as massas das folhas cortadas referentes às áreas diluídas (AD) e às áreas dos perfis dos cordões (AR+ AD).

### **3.8 Considerações finais**

O comportamento similar das fontes utilizadas neste trabalho, que apresentaram taxas semelhantes de variação das correntes (Figura 3.9), quando foram submetidas à mesma carga resistiva, mostra a adequação delas para a condução dos ensaios. Esse resultado dá evidências de que ambas deverão reagir ou se comportar de forma parecida quando forem submetidas às condições dos ensaios, não comprometendo de forma considerável os resultados.

## CAPÍTULO 4

### BANCADA DE FILMAGEM E SISTEMA DE SINCRONISMO DE SINAIS

#### 4.1 Introdução

Uma das variáveis do processo MIG/MAG PULSADO com Duplo Arame e Potenciais Isolados é a defasagem de tempo dos pulsos de corrente entre os arcos voltaicos. No capítulo introdutório desse trabalho foi destacada a importância de se realizar um estudo mais específico sobre essa variável e como ela influencia no desempenho do processo. Esse estudo se subdivide em duas etapas: 1) filmagens dos arcos voltaicos e da transferência metálica do processo (Capítulo 5); 2) realização de soldagens sobre chapas nas posições planas e sobre-cabeça (Capítulo 6).

Nesse capítulo, os equipamentos que compõem a bancada experimental utilizada nas filmagens foram caracterizados. O sistema de sincronismo das imagens com os sinais de tensão e corrente dos arcos foi apresentado e avaliado.

As filmagens foram realizadas no laboratório de soldagem da Universidade Federal de Uberlândia (LAPROSOLDA), utilizando-se uma câmera de alta velocidade. Os equipamentos e acessórios de soldagem que compõem a bancada são os mesmos descritos no Capítulo 3 e foram transportados para o citado laboratório (fontes de soldagem, dois TC1, sensores Hall e sistema de aquisição de dados).

#### 4.2 Filmagens com a câmera de alta velocidade

##### 4.2.1 Bancada de Filmagem

A bancada montada para realizar as filmagens dos arcos voltaicos era constituída por:

- i) equipamentos e acessórios de soldagem;
- ii) um dispositivo para rotação de tubos;
- iii) um sistema laser/óptico e equipamentos para geração e gravação das imagens;
- iv) um sistema de aquisição/sincronismo de sinais de soldagem.

A seguir faz-se uma descrição de cada componente dessa bancada, cuja representação esquemática pode ser vista na Figura 4.1.

- i) Equipamentos de soldagem.

As fontes de soldagem utilizadas nessa bancada foram apresentadas e caracterizadas no item 3.3 (Equipamentos e acessórios de soldagem).

ii) Dispositivo para rotação de tubos.

Para possibilitar uma melhor visualização dos arcos voltaicos nas filmagens, optou-se por realizar as soldagens na posição plana e sobre tubos de aço carbono. As tochas de soldagem foram afixadas na posição vertical, e um dispositivo aplicava uma velocidade de rotação constante aos tubos (o sistema permitia selecionar velocidades que variavam na faixa de 1 – 10 rpm).

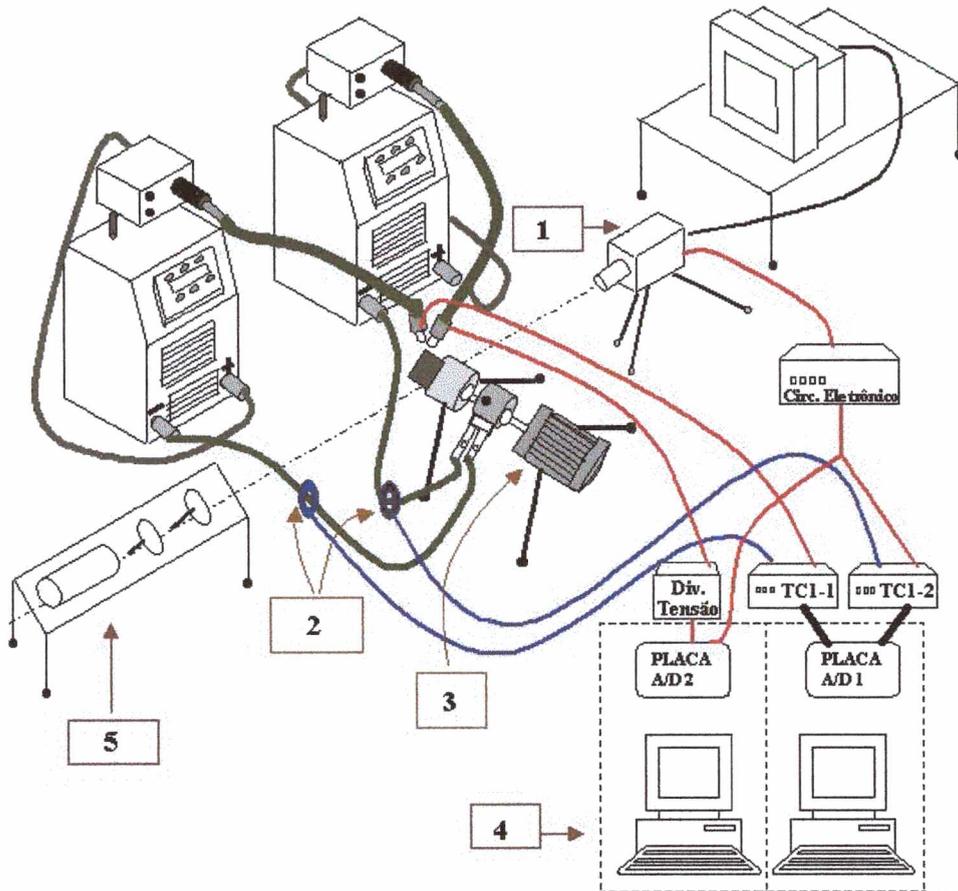


Figura 4.1 - Representação esquemática da bancada montada para executar as filmagens. Os principais componentes são: 1- câmera de filmagem; 2 – sensores de corrente; 3 – dispositivo de rotação dos tubos; 4 – sistemas de aquisição de dados e 5 – sistema laser/óptico.

iii) Sistema laser/óptico e equipamentos para geração e gravação das imagens.

A Figura 4.2 ilustra esquematicamente o sistema laser/óptico utilizado para gerar as imagens da transferência metálica. Esse sistema é constituído por uma fonte de laser He-Ne, de 20 mW, que produz um feixe de luz de 1,2 mm de diâmetro. O feixe gerado passava inicialmente através de filtros neutros para ajustes de intensidade de luz, em seguida, incidia sobre uma lente divergente (distância focal de 12,5 mm), onde se expandia. Na seqüência, o feixe atravessava uma lente convergente de distância focal de 500 mm, saindo com um diâmetro de 48 mm e direcionado aos objetos que seriam filmados (arames-eletrodos, arcos elétricos e gotas transferidas). As sombras produzidas pelos objetos eram projetadas em um

anteparo para que fossem filmadas. Nessas filmagens, a própria lente da câmera serviu como anteparo. Um filtro interferométrico foi posicionado na entrada da câmera para filtrar a intensidade de luz produzida pelos arcos elétricos, o que permitia a visualização e a filmagem das sombras projetadas. Essa técnica de filmagem da sombra projetada dos elementos da região de soldagem é referenciada na literatura como “Shadowgrafia” ou técnica “Back-lighting” (WASZINK E PIENA,1986; SUBRAMANIAM, 1998; BALSAMO et al.,2000).

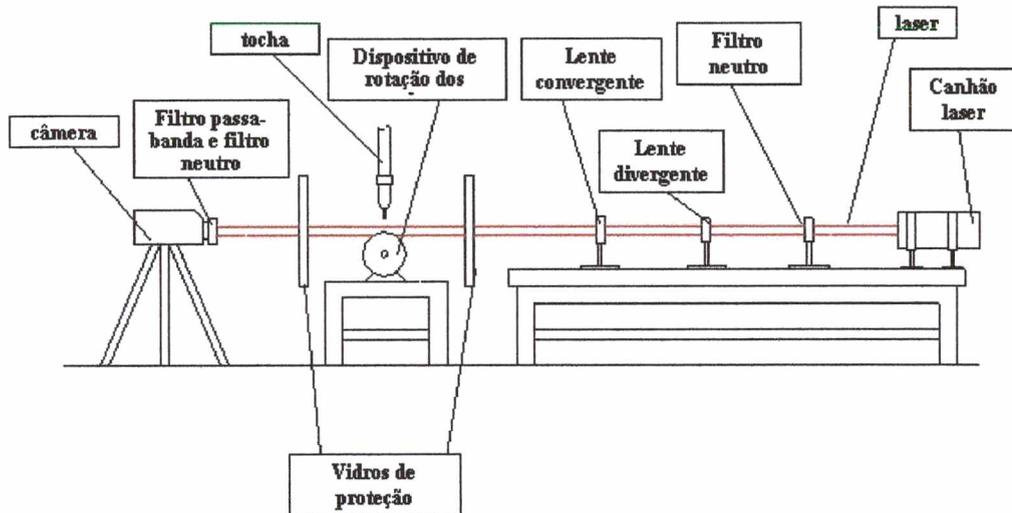


Figura 4.2 - Representação esquemática do sistema laser/óptico

A câmera utilizada para a filmagem das transferências foi uma MEMRECAMci, modelo ST-569-U, da NAC Image Technology, que permitia obter até 2000 quadros/segundo. As imagens obtidas foram gravadas simultaneamente em fitas para vídeo cassete S-VHS e em um sistema de armazenamento (Jaz Drive da IOMEGA, com discos rígidos removíveis de 2 Gigabytes). Para serem visualizadas no computador, as imagens eram convertidas para o formato TIFF (Tagged Image File Format) utilizando o software “Format Convert”, também da NAC.

#### iv) Sistemas de aquisição/sincronismo de sinais.

O sistema de aquisição de dados caracterizado no item 3.2 foi também utilizado nesses ensaios e referenciado nesse capítulo como “Sistema de Aquisição 1”. Um dos 4 canais da placa habilitados para fazer aquisição de sinais foi utilizado para receber o sinal proveniente da câmera. Sendo assim, em cada aquisição foram obtidos, simultaneamente, no “Sistema de Aquisição 1”, os sinais de corrente de ambas as fontes, o sinal de tensão de um dos arcos e o sinal da câmera, a uma frequência de 4 kHz/canal. Para fazer aquisição do sinal de tensão do outro arco voltaico foi aproveitado um segundo sistema de aquisição de dados disponível no

LAPROSOLDA/UFU (Sistema de Aquisição 2). Esse sistema foi preparado para adquirir sinais elétricos em dois canais a uma frequência de 10 kHz por canal. Foram captados nesse sistema os sinais de tensão do segundo arco e o da câmera, sincronizados com as imagens filmadas. A Figura 4.3 apresenta de forma esquemática o sistema de aquisição e sincronismos dos sinais.

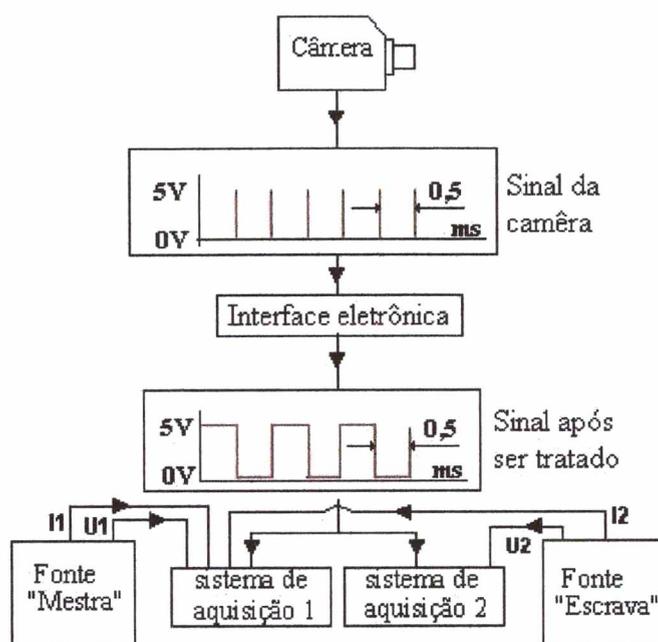


Figura 4.3 - Representação esquemática do sistema de aquisição e sincronismos dos sinais. U1 – sinal de tensão do arco 1; U2 – sinal de tensão do arco 2; I1 – sinal da corrente que passa pelo arco 1 e I2 – sinal da corrente que passa pelo arco 2.

Para que fosse possível sincronizar as imagens geradas na filmagem com os respectivos sinais elétricos de tensão e de corrente dos arcos voltaicos, era necessário que a câmera enviasse ao sistema de aquisição de dados um sinal com características que permitissem a sua leitura. Para isso, foi aproveitado o sinal de “strobe” da câmera, que gerava um pulso de tensão (de 5 V para 0 V, com uma duração de  $1\mu\text{s}$ ) a cada novo quadro de imagem obtido. Como o tempo de duração desse sinal era muito reduzido para ser adquirido pelo sistema, foi projetada uma interface eletrônica que transformava esses pulsos em um sinal de tensão com forma de onda quadrada, conforme está representado esquematicamente na Figura 4.4. A interface projetada, ao receber um sinal (“trigger” - acionado de forma remota), automaticamente iniciava a inversão dos níveis de saída da onda quadrada, a cada pulso de tensão do “strobe”. A duração de tempo em cada patamar correspondia ao intervalo entre pulsos (0,5 ms a uma taxa de aquisição de 2000 quadros por segundo). Dessa forma, sempre que o sinal de sincronismo mudava de um nível de tensão para outro, a câmera iniciava a

gravação de uma nova imagem. Um comando de “reset” podia ainda ser enviado à interface, fazendo com que o sinal de sincronização se tornasse contínuo, até que um novo sinal de “trigger” fosse acionado<sup>1</sup>.

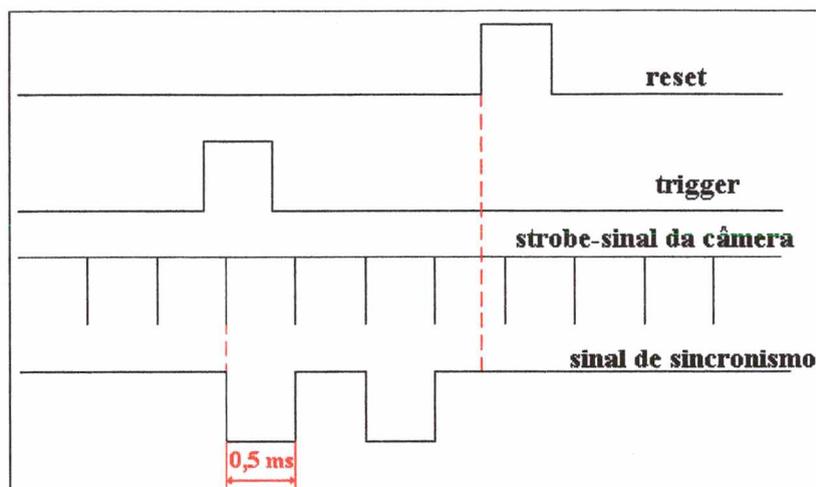


Figura 4.4 - Representação esquemática da transformação do sinal da câmera

#### 4.2.2 Incerteza associada ao sincronismo das imagens com os sinais elétricos de soldagem

A incerteza associada a esse sistema de aquisição/sincronismo de sinais estava relacionada à frequência de aquisição de dados do sistema 1 e ao tempo de abertura e exposição da câmera para a captura da imagem - “Shutter” (o ajuste do “shutter” é importante para a qualidade da imagem obtida). Em todas as filmagens realizadas, esse tempo foi ajustado em  $1/24000$  s. Isso significava que, apenas  $1/24000$  s = 0,042 ms dos  $1/2000 = 0,5$  ms era utilizado para a captura da imagem.

As Figuras 4.5 e 4.6 são representações esquemáticas criadas para auxiliar a visualização das incertezas máximas dos tempos de sincronismo dos sinais. O sinal da câmera, já modificado pela interface, é representado nas figuras pela forma de onda retangular. A seqüência de setas da figura representa os instantes de aquisição dos canais de leitura da placa. O sinal da câmera é lido, sempre, pelo Canal 4, representado nas figuras pelas setas maiores (C4). As menores apontam os instantes de aquisição dos demais canais<sup>2</sup>. Devido à multiplexação<sup>3</sup> na leitura dos canais da placa, uma frequência de aquisição de 4 kHz do sistema 1 resulta em um atraso de 0,25 ms entre duas aquisições sucessivas de um mesmo

<sup>1</sup> O trabalho de Balsamo S. S. P. et al. (2000), membros da equipe LAPORSOLDA/UFU, apresenta com mais detalhes esse sistema de sincronismo.

<sup>2</sup> Canal 1 (C1)- corrente da fonte 1. Canal 2 (C2)- tensão da fonte 1 e Canal3 (C3)- corrente da fonte 2.

<sup>3</sup> A multiplexação é a leitura seqüencial dos sinais realizada pelos canais de aquisição da placa. Devido a ela, há um atraso de tempo entre os instantes de aquisição dos sinais elétricos capturados nos quatro canais.

canal. As áreas hachuradas nas figuras representam o tempo de ajuste do “SHUTTER” da máquina.

Duas situações-limite são analisadas. Na primeira, (Figura 4.5), a leitura do sinal da câmera ocorre em um instante imediatamente após a inversão no nível de tensão desse sinal, ou seja, após o início de captura de uma nova imagem (imagem 1). Nesse caso, a incerteza de sincronismo entre os instantes de aquisição dos sinais elétricos e o da nova imagem capturada é máxima para o Canal 1 (canal de aquisição do sinal de corrente que passa pelo arco 1). O valor desse tempo é de 0,229 ms ( $3/4 \cdot 0,25 + \text{tempo do “SHUTTER”}$ ). Na segunda situação, ilustrada na Figura 5.6, a incerteza máxima ocorre, dessa vez, para o Canal 3 (onde se dá a leitura do sinal de tensão do arco 1), e é igual a 0,145 ms ( $3/4 \cdot 0,25 - \text{tempo do “SHUTTER”}$ ).

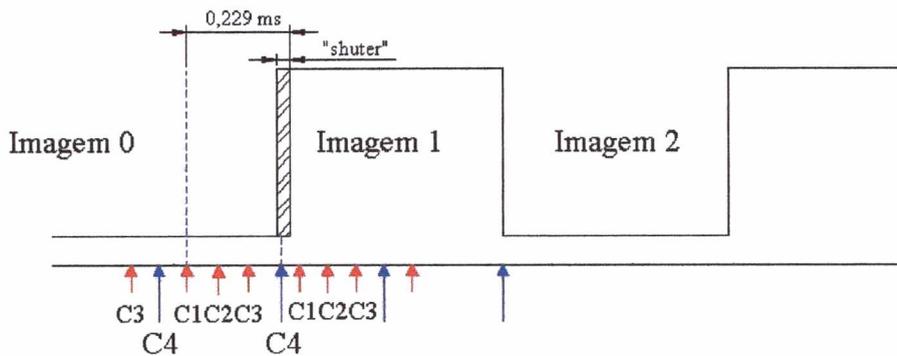


Figura 4.5 - Ilustração esquemática da incerteza máxima no sincronismo entre o instante de gravação da imagem e o sinal adquirido no Canal 1 (canal de aquisição de corrente que passa pelo arco 1).

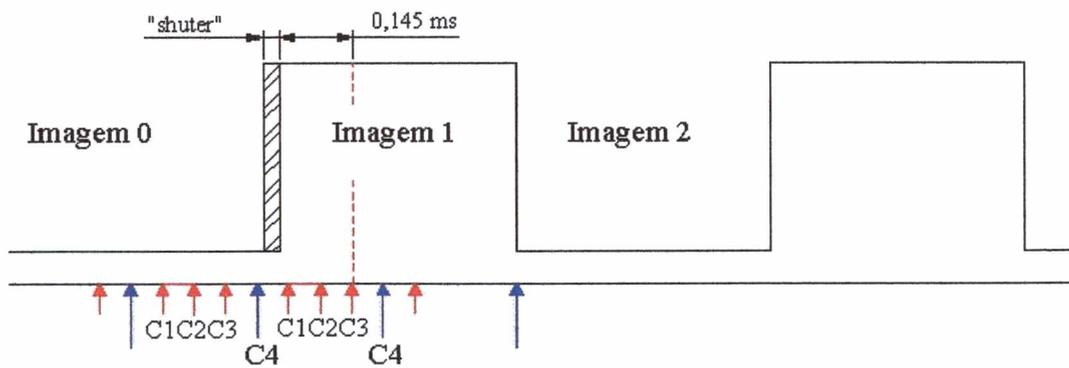


Figura 4.6 – Ilustração esquemática da incerteza máxima no sincronismo entre o instante de gravação da imagem e o sinal adquirido no Canal 3 (canal de aquisição de tensão do arco 1).

#### 4.2.2.1 Incerteza máxima no sincronismo das imagens com o sinal da corrente de soldagem.

Os valores apresentados nas duas situações descritas no tópico anterior eram as incertezas máximas no tempo de sincronismo entre os sinais elétricos dos arcos e a imagem gravada pela câmera. Entretanto, nesse trabalho, a análise da transferência metálica e do

comportamento dos arcos voltaicos foi feita baseando-se principalmente no sincronismo dos valores de corrente dos arcos com as imagens da câmera. Para se ter uma idéia da incerteza máxima associada ao sincronismo entre o valor de corrente de um dos arcos e a correspondente imagem captada, basta multiplicar, como exemplo de cálculo, a incerteza máxima determinada na situação 1, descrita no subitem anterior, pela taxa de variação da corrente calculada no Capítulo 3 (660 A/ms para a taxa de subida). O resultado desse produto (173,6 A) representa o erro máximo entre o valor da corrente lida no Canal 1 (que foi associado à imagem capturada) e o seu valor no instante em que o sinal da imagem é lido no Canal 4.

#### 4.2.3 Programas para tratamento dos sinais e análise da transferência metálica

Uma vez que os sinais elétricos de cada arco voltaico, sincronizados com o sinal da câmera, foram adquiridos em dois sistemas de aquisição de dados separados, houve a necessidade de se desenvolver um programa que estabelecesse, dessa vez, o sincronismo entre os sinais dos dois sistemas de aquisição. Vale lembrar que os sinais foram adquiridos com frequências distintas pelos dois sistemas (4 e 10 kHz). O programa desenvolvido foi denominado “GERADADOS” e lia os arquivos de dados adquiridos pelos dois sistemas, ajustava os sinais para uma base de tempo comum, efetuava o sincronismo e fornecia como saída uma tabela com os valores instantâneos de corrente e de tensão de cada arco elétrico e o respectivo quadro gravado (Tabela 4.1). A Figura 4.7 traz o fluxograma da lógica do programa desenvolvido. Devido à frequência de gravação das imagens pela câmera ser a metade da de aquisição de sinais, o programa gerava duas seqüências de dados para cada quadro gravado. Na análise das filmagens foi considerada sempre a primeira seqüência de dados, por essa apresentar uma menor incerteza de sincronismo descrita no subitem anterior.

Tabela 4.1– Exemplo da tabela gerada pelo programa “GERADADOS”. A primeira coluna da tabela traz o tempo de sincronismo. Nas demais colunas são listadas respectivamente: a corrente da fonte 1 – “mestra”, a corrente da fonte 2 – “escrava”, a tensão da fonte 1 – “mestra”, a tensão na fonte 2 – “escrava” e o número da imagem - “Frame”

tempo (ms)	I1_(A)	I2_(A)	U1_(V)	U2_(V)	frame
0,00	110,80	100,40	21,80	21,20	0000.tif
0,25	111,20	105,40	21,78	21,10	0000.tif
0,50	111,70	106,60	20,90	20,50	0001.tif
0,75	112,60	106,30	22,81	19,80	0001.tif
1,00	113,10	105,40	20,37	20,80	0002.tif
1,25	113,50	107,60	20,64	19,90	0002.tif
1,50	112,60	103,00	20,77	21,20	0003.tif
1,75	115,80	105,30	20,77	21,50	0003.tif
2,00	110,00	107,20	20,10	22,10	0004.tif

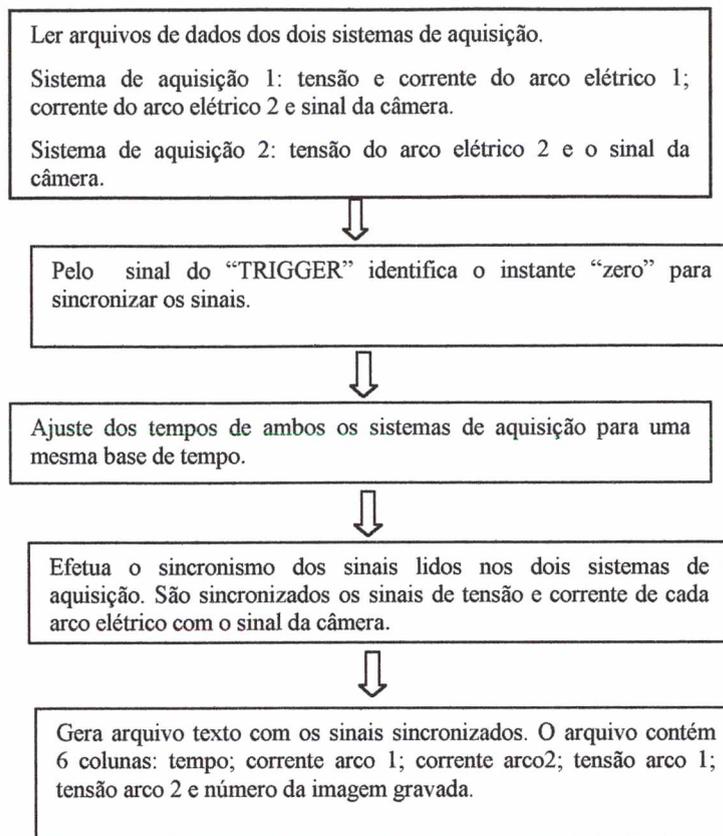


Figura 4.7 - Fluxograma da lógica do programa GERADADOS

#### 4.2.4 Avaliação dos sistemas utilizados para realizar o sincronismo dos sinais

Para avaliar a capacidade do sistema em realizar o sincronismo dos sinais de soldagem dos arcos elétricos com as imagens capturadas pela câmera, algumas soldagens com características conhecidas foram executadas (soldagens com transferência por curto-circuito e com corrente pulsada). Nesses ensaios, o filtro interferométrico, responsável pela filtragem da luz dos arcos, foi substituído por um neutro, que filtrava parcialmente a luz emitida. Assim, foi possível identificar os instantes de mudança nos comportamentos dos arcos pela alteração na intensidade de luz emitida pelos mesmos.

##### 4.2.4.1 Soldagem com o Duplo Arame no modo de transferência por curto-circuito.

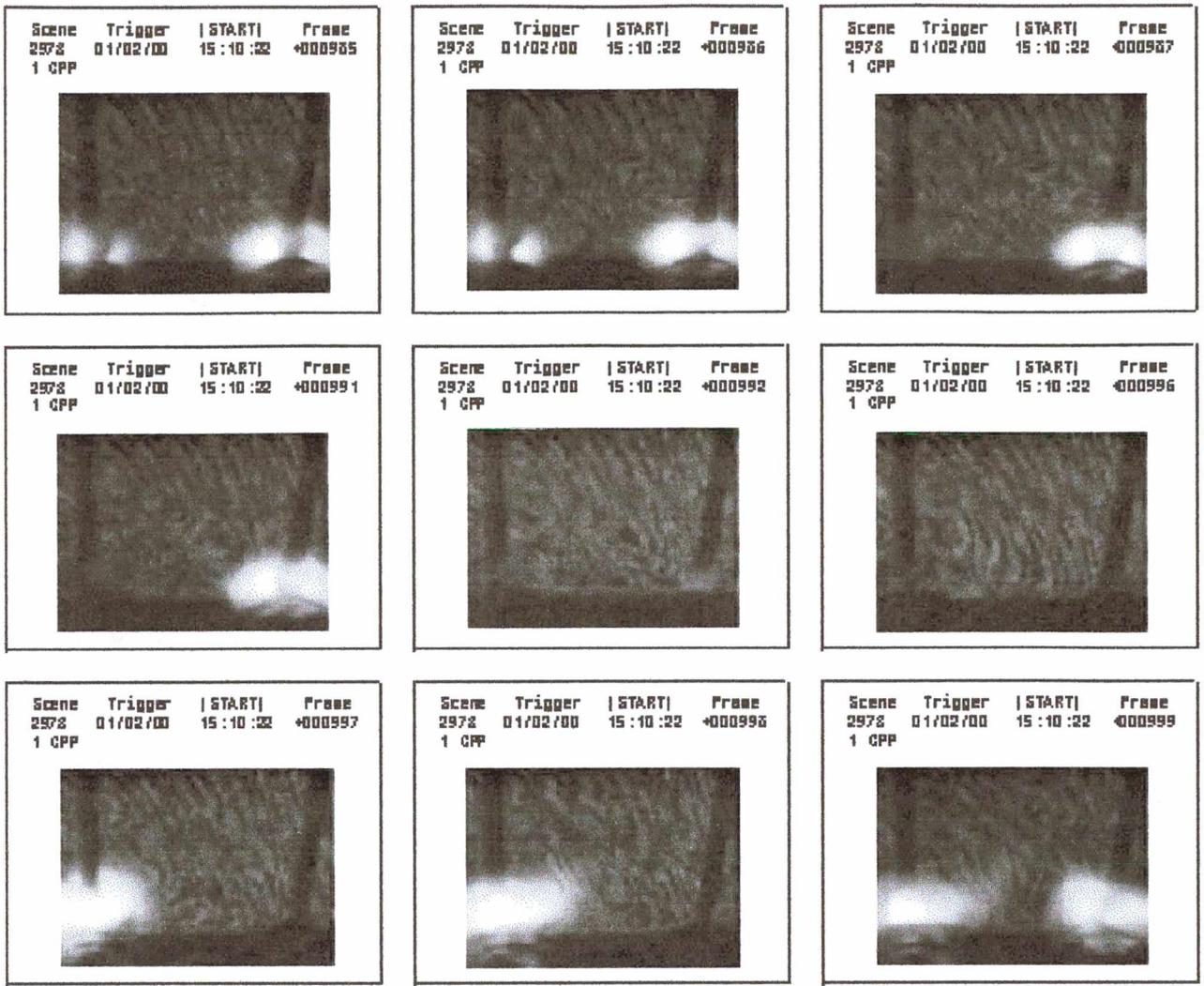
As características dos sinais de tensão e corrente do arco na transferência por curto-circuito já são conhecidas. A gota metálica aderida à ponta do eletrodo ao tocar a poça fundida causa o curto-circuito. Nesse instante, o arco de soldagem se extingue momentaneamente (momento identificado nas filmagens pela ausência de luz), a tensão cai a valores próximos de zero e a corrente tende a um valor máximo permitido pela fonte.

Nesses ensaios, foram utilizados arames de 1,0 mm de diâmetro, da classe ER 70S-6, para soldagem de aço carbono. Uma tensão de referência de 19 V com uma velocidade de arame ajustada de 5,0 m/min em cada arame, resultaram em corrente média de 140 A/arame.

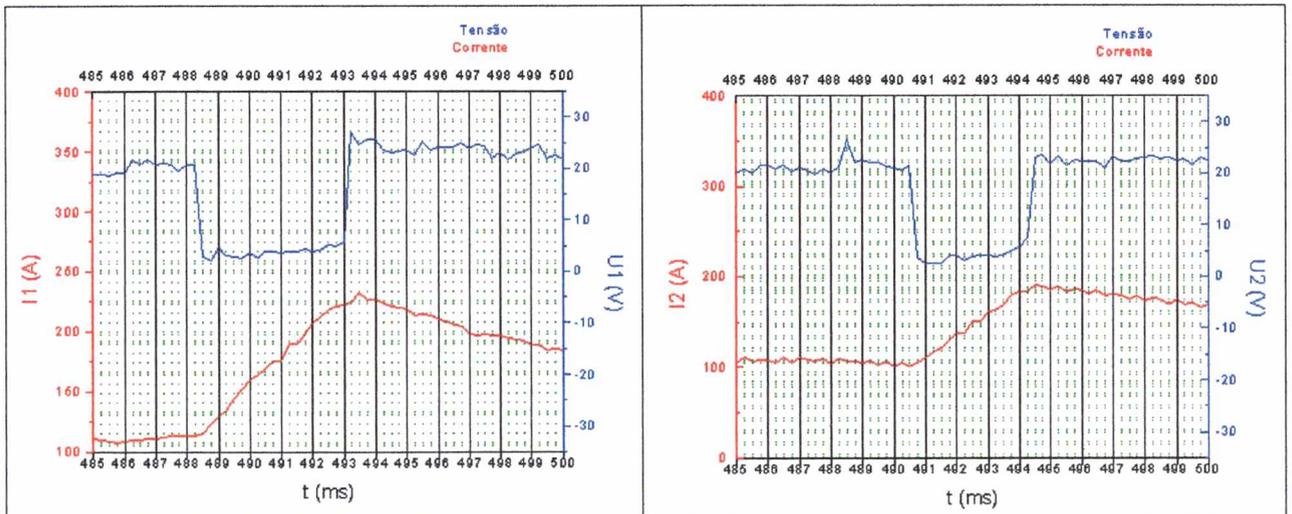
A distância do bico de contato a peça (DBCP) adotada foi de 15 mm e o gás de proteção empregado foi o Ar + 4% CO<sub>2</sub> a uma vazão de 17 l/min.

Para ilustrar o sincronismo é selecionada uma seqüência de imagens (Figura 4.8 a) na qual pode ser vista a ocorrência de curtos circuitos em ambos os eletrodos. A Tabela 4.2, gerada pelo programa “GERADADOS”, apresenta os respectivos valores das tensões e correntes dos arcos e o número da imagem gravada, o qual pode ser conferido na parte superior direita de cada foto.

Os oscilogramas das Figuras 4.8 b e c possibilitam verificar o sincronismo. Na imagem de número 0987 pode ser vista a extinção do arco esquerdo (comandado pela fonte mestra), o que caracteriza a ocorrência do curto-circuito. Nesse instante, a tensão cai a valores mínimos e a corrente começa a crescer ( $t = 488,50$  ms na Figura 4.8 b e na Tabela 4.2). Ao final do curto-circuito, o arco reacende (imagem 0997). Nesse instante ( $t = 493,50$  ms), a tensão retorna ao nível anterior e a corrente volta a cair a uma taxa definida pela indutância da fonte. O mesmo comportamento é verificado com o arco da direita (comandado pela fonte escrava) e pode ser visualizado por intermédio das imagens 0992 e 0999. Da mesma forma, o sincronismo pode ser conferido por intermédio dos oscilogramas da Figura 4.8 c.



a)



b)

c)

Figura 4.8 – Verificação do sincronismo entre as imagens gravadas e os sinais de tensão e corrente de ambos os arcos elétricos. a - Sequência de imagens de curtos em ambos os eletrodos; b - Oscilogramas de tensão e de corrente do eletrodo da esquerda (fonte 1); c - Oscilogramas de tensão e de corrente do eletrodo da direita (fonte 2).

Tabela 4.2 – Exemplo da tabela gerada pelo programa GERADADOS para o sincronismo dos sinais nas soldagens com curto-circuito

tempo (ms)	I1 (A)	I2 (A)	U1 (V)	U2 (V)	frame
486,75	110,80	105,40	21,84	20,20	0983.tif
487,00	111,20	110,40	20,78	21,10	0984.tif
487,25	111,70	108,10	20,90	20,50	0984.tif
487,50	112,60	106,30	20,81	19,80	0985.tif
487,75	113,10	110,00	19,37	20,80	0985.tif
488,00	113,50	104,10	20,64	19,90	0986.tif
488,25	112,60	109,10	20,77	21,20	0986.tif
488,50	115,80	105,90	2,77	26,50	0987.tif
488,75	122,60	107,20	2,10	22,10	0987.tif
489,00	129,40	105,40	4,72	22,50	0988.tif
489,25	134,90	105,90	3,04	22,10	0988.tif
489,50	144,90	101,80	2,92	21,90	0989.tif
489,75	151,80	106,30	2,45	21,20	0989.tif
490,00	160,00	100,40	3,54	20,90	0990.tif
490,25	164,10	105,40	2,66	20,50	0990.tif
490,50	169,10	100,40	3,86	21,60	0991.tif
490,75	175,00	105,40	4,01	3,50	0991.tif
491,00	175,90	111,30	3,51	2,50	0992.tif
491,25	189,60	116,30	3,80	2,70	0992.tif
491,50	189,60	121,30	3,78	2,70	0993.tif
491,75	199,10	129,50	4,51	4,10	0993.tif
492,00	206,00	137,60	3,89	4,10	0994.tif
492,25	211,90	138,10	4,13	3,10	0994.tif
492,50	217,40	150,80	5,13	4,00	0995.tif
492,75	221,50	150,80	4,92	4,20	0995.tif
493,00	222,40	160,80	5,69	4,20	0996.tif
493,25	224,70	162,10	27,08	4,00	0996.tif
493,50	231,90	168,00	24,53	4,10	0997.tif
493,75	226,50	179,40	25,68	4,80	0997.tif
494,00	226,50	183,00	25,71	5,60	0998.tif
494,25	223,80	183,00	23,61	7,40	0998.tif
494,50	221,50	190,70	23,14	23,00	0999.tif
494,75	220,10	190,30	23,23	23,50	0999.tif
495,00	218,70	184,80	23,67	21,80	1000.tif
495,25	213,70	189,40	22,49	23,40	1000.tif
495,50	214,60	183,50	25,06	21,60	1001.tif
495,75	212,80	186,20	23,61	22,60	1001.tif
496,00	210,10	185,30	24,17	22,30	1002.tif

#### 4.2.4.2 Soldagem com o Duplo Arame no modo corrente pulsada.

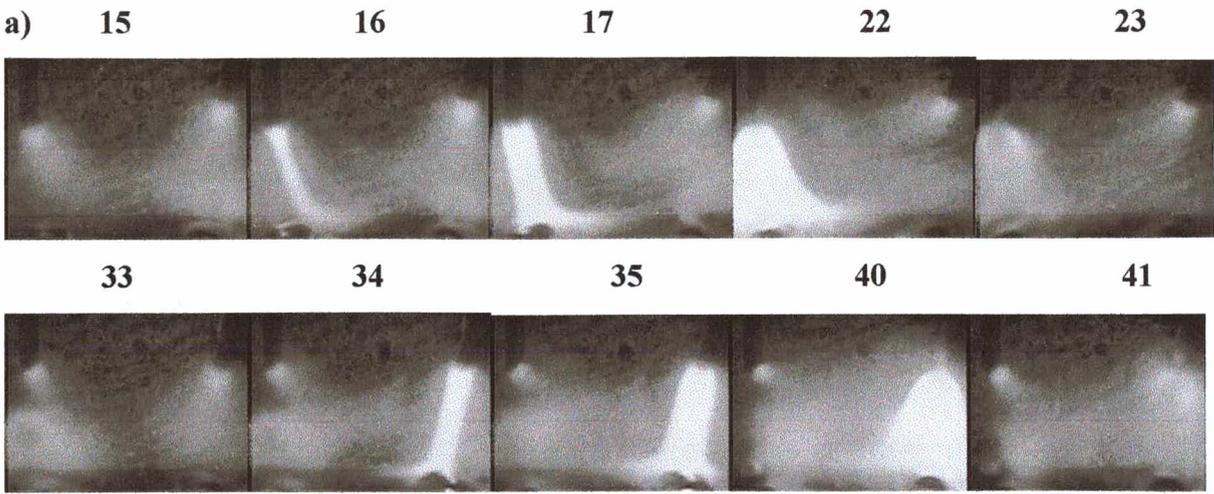
Nesses ensaios, as fontes de soldagem foram programadas para operar com corrente pulsada e defasagem total nos pulsos de corrente. Empregando-se a mesma montagem experimental do ensaio anterior, é possível observar a mudança na intensidade de luz do arco elétrico sempre que a corrente de soldagem variava sua intensidade, ou seja, que ocorria a pulsação. Sendo assim, uma intensidade de luz maior indicava que o arco elétrico estava no

período de pulso de corrente, enquanto uma mais fraca significava que o período era o de base.

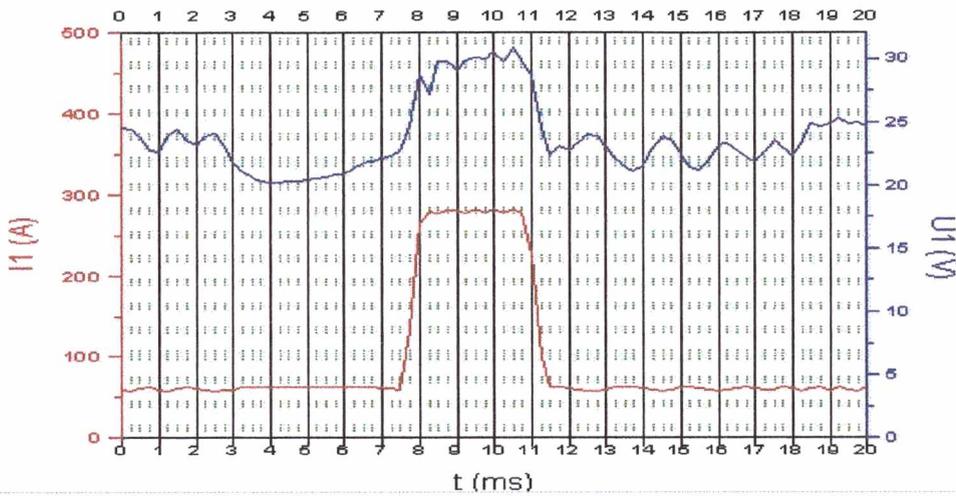
As condições de realização dos ensaios são as seguintes:

- Eletrodo: ER 70S-6 de 1,0 mm de diâmetro;
- Gás de proteção: Ar + 4% CO<sub>2</sub> a uma vazão de 17 l/min;
- Distância bico de contato peça: 15 mm;
- Parâmetros de pulso:  $I_p = 280 \text{ A}$ ,  $t_p = 3,3 \text{ ms}$ ;
- Parâmetros de base:  $I_b = 59 \text{ A}$ ,  $t_b = 14,4 \text{ ms}$ ;
- Corrente média: 100 A

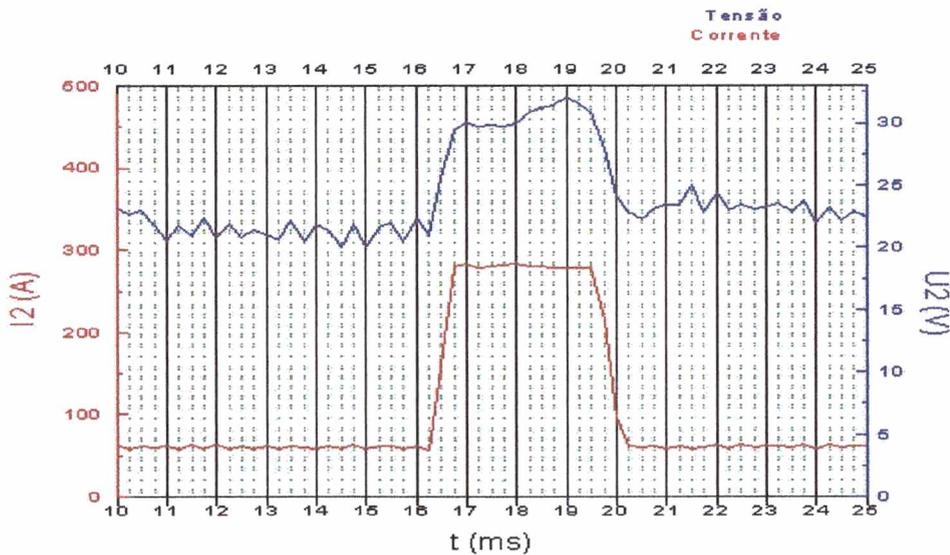
Analisando a seqüência de imagens da Figura 4.9 a, juntamente com os oscilogramas das Figuras 4.9 b e c, podem ser observados acréscimos na intensidade de luz dos arcos. Primeiro, o da esquerda, a partir do quadro 0016, e depois o da direita, após o quadro 0034. Nesses instantes, podem ser verificados nas Figuras 4.9 b e c que a corrente e a tensão dos arcos começam a subir (a partir dos instantes  $t = 7,75$  e  $16,50 \text{ ms}$  para o arco da esquerda e da direita, respectivamente). O final da pulsação em cada arco elétrico é marcado pela redução na intensidade de luz, o que pode ser conferido nas imagens 0023 e 0041. Esses instantes podem ser checados nos oscilogramas pela queda nos valores de tensão ( $t = 11,25 \text{ ms}$  na Figura 4.9 b e  $t = 20,25 \text{ ms}$  na Figura 4.9 c, e também na Tabela 4.3. Os resultados desses dois ensaios atestam o funcionamento do sistema de sincronismo dos sinais desenvolvido para esse trabalho.



b)



c)



Figuras 4.9 – Verificação do sincronismo entre as imagens gravadas e os sinais de tensão e corrente de ambos os arcos elétricos: **a** – Sequência de imagens mostrando a pulsação de corrente em ambos os eletrodos; **b** – Oscilogramas de tensão e corrente do eletrodo da esquerda (fonte 1-mestra) e **c** - Oscilogramas de tensão e corrente do eletrodo da direita (fonte 2 - escrava).

Tabela 4.3 – Exemplo da tabela gerada pelo programa GERADADOS para o sincronismo dos sinais nas soldagens com corrente pulsada.

tempo (ms)	I1 (A)	I2 (A)	U1 (V)	U2(V)	frame
6,75	62,50	57,80	21,85	21,80	0014.tif
7,00	61,10	62,80	22,03	24,00	0014.tif
7,25	60,70	58,20	22,25	22,00	0015.tif
7,50	59,80	61,90	22,61	24,10	0015.tif
7,75	133,60	61,40	24,67	23,20	0016.tif
8,00	264,80	58,70	28,79	21,50	0016.tif
8,25	280,20	62,30	27,22	22,00	0017.tif
8,50	278,00	58,20	29,70	22,80	0017.tif
8,75	281,60	62,80	29,76	21,90	0018.tif
9,00	280,70	57,80	29,05	22,80	0018.tif
9,25	278,40	61,00	29,82	22,50	0019.tif
9,50	283,00	61,90	30,08	22,70	0019.tif
9,75	278,00	57,30	29,94	23,10	0020.tif
10,00	282,50	62,80	30,52	23,20	0020.tif
10,25	278,40	58,20	29,70	22,60	0021.tif
10,50	282,50	61,40	30,88	23,00	0021.tif
10,75	278,40	59,10	29,79	21,70	0022.tif
11,00	227,90	61,90	28,61	20,60	0022.tif
11,25	98,50	57,80	24,56	21,70	0023.tif
11,50	62,50	63,20	22,43	20,90	0023.tif
11,75	62,90	58,20	23,10	22,40	0024.tif
12,00	61,60	62,80	22,77	20,80	0024.tif
12,25	60,20	57,30	23,29	21,80	0025.tif
12,50	57,90	62,30	23,96	20,80	0025.tif
12,75	58,40	57,30	23,88	21,40	0026.tif
13,00	58,80	62,30	23,06	21,10	0026.tif
13,25	62,00	57,80	22,10	20,60	0027.tif
13,50	62,90	61,00	21,46	22,20	0027.tif
13,75	62,90	60,50	21,07	20,50	0028.tif
14,00	60,70	58,70	21,56	21,80	0028.tif
14,25	58,80	61,90	22,92	21,40	0029.tif
14,50	57,90	57,30	23,85	20,00	0029.tif
14,75	59,30	62,80	23,57	21,80	0030.tif
15,00	62,50	58,20	22,36	20,00	0030.tif
15,25	62,90	61,40	21,46	21,60	0031.tif
15,50	61,60	61,00	21,21	21,90	0031.tif
15,75	60,20	58,20	21,99	20,50	0032.tif
16,00	57,50	61,90	23,17	22,30	0032.tif
16,25	58,80	56,90	23,29	21,00	0033.tif
16,50	61,10	159,00	22,75	25,60	0033.tif
16,75	62,90	279,70	22,18	29,40	0034.tif
17,00	61,10	283,70	21,88	30,10	0034.tif
17,25	58,80	277,80	22,67	29,70	0035.tif
17,50	58,80	279,20	23,56	29,80	0035.tif
17,75	62,90	281,50	22,91	29,70	0036.tif
18,00	61,60	283,70	22,24	29,90	0036.tif
18,25	57,90	280,60	23,46	30,80	0037.tif
18,50	61,60	279,20	24,80	31,20	0037.tif
18,75	62,00	278,30	24,62	31,40	0038.tif
19,00	57,90	277,80	24,90	32,10	0038.tif
19,25	62,90	278,80	25,33	31,50	0039.tif
19,50	60,20	278,30	24,81	30,90	0039.tif
19,75	58,40	215,20	24,93	27,90	0040.tif
20,00	62,00	95,40	24,63	24,10	0040.tif
20,25	62,90	61,40	23,10	22,90	0041.tif

#### 4.2.5 “Software” para estudo da transferência metálica

Um novo “software” foi desenvolvido para facilitar o estudo da transferência metálica. O programa, denominado de “DUPLO ARAME”, foi desenvolvido empregando-se a linguagem “C ++ Builder”. Ele permite ao usuário visualizar as imagens gravadas pela câmera em sincronismo com os respectivos valores de tensão e corrente de cada arco. Era possível também emular um vídeo com a velocidade de exibição desejada. O “software” foi uma ferramenta útil para o estudo da transferência metálica do processo, conferindo uma maior rapidez e confiabilidade nas análises. A foto da Figura 4.10 apresenta a tela principal do programa, onde podem ser vistos, no centro da tela, os quadros filmados, e na parte superior, os oscilogramas de corrente e na inferior, os oscilogramas de tensão. São amostrados os valores instantâneos de corrente e de tensão de cada um dos arcos.

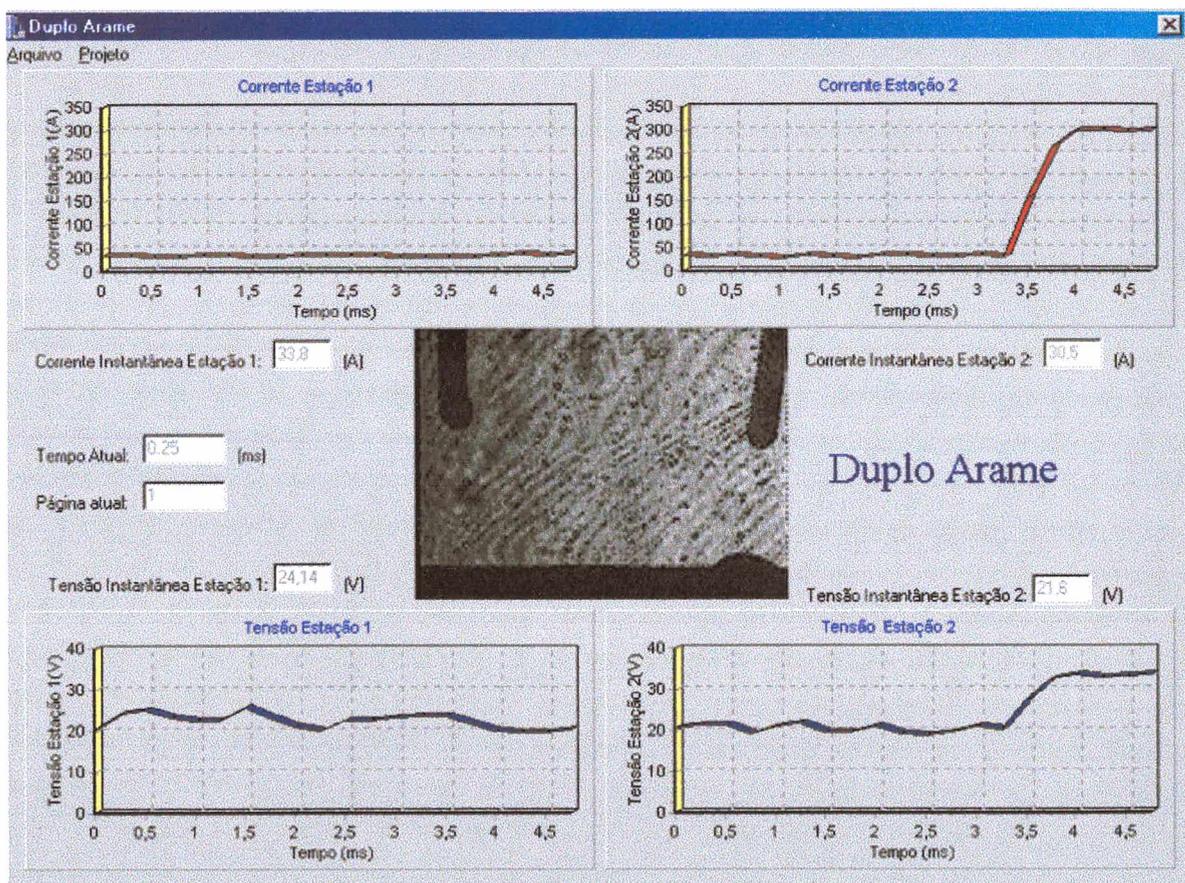


Figura 4.10 – Tela principal do programa “DUPLO ARAME”, desenvolvido para auxiliar os estudos da transferência metálica e dos arcos elétricos

### 4.3 Considerações finais

Os ensaios realizados para avaliar o sincronismo dos sinais dos arcos com as imagens filmadas mostraram que o sistema é adequado para o estudo da transferência metálica e do comportamento dos arcos voltaicos. A incerteza do sistema de sincronismo está associada à menor frequência de aquisição dos sinais de um dos sistemas utilizado (4 kHz por canal utilizado no sistema de aquisição 1).

O “software” denominado “DUPLO ARAME”, que permite visualizar em uma mesma tela os sinais dos arcos elétricos e a respectiva imagem sincronizada, facilitou o estudo da transferência metálica e dos comportamentos dos arcos voltaicos. O programa proporcionou ganhos de tempo e maior confiabilidade nos resultados das análises feitas.

## **CAPÍTULO 5**

### **ESTUDO DA DEFASAGEM NOS PULSOS DE CORRENTE - TRANSFERÊNCIA METÁLICA.**

#### **5.1 Introdução**

No processo MIG/MAG-PDAPI, os efeitos que a tecnologia da defasagem dos pulsos de corrente exerce sobre a estabilidade dos arcos e os cordões de solda não são ainda conhecidos. Essa tecnologia está incluída em praticamente todos os equipamentos de duplo arame disponíveis no mercado, no entanto, não se pode afirmar que ela é essencial para o desempenho do processo. Na literatura disponível atualmente, poucos trabalhos tratam do assunto, e por isso as informações são escassas.

Nesse capítulo, são analisadas as influências que a mudança na defasagem dos pulsos exerce sobre: a deflexão dos arcos voltaicos, os desvios das trajetórias das gotas e as velocidades alcançadas após os seus destacamentos dos eletrodos. Todas as soldagens executadas foram filmadas para uma posterior análise da transferência metálica e do comportamento dos arcos elétricos.

#### **5.2 Metodologia experimental**

A primeira etapa da metodologia consistiu em determinar os parâmetros de destacamento que resultassem na condição de uma gota destacada por pulso de corrente, em ambos os eletrodos. Na seqüência, foram selecionados os fatores de entrada (variáveis independentes) e seus níveis de variação. Foram definidas também as respostas (variáveis dependentes) dos experimentos. As soldagens foram executadas seguindo um planejamento experimental, elaborado conforme o número de fatores e níveis pré-definidos. O último passo consistiu da análise dos resultados. Os itens seguintes trazem mais detalhes dessa metodologia seguida.

##### **5.2.1 Bancada de equipamentos e materiais utilizados**

A bancada apresentada no Capítulo 4 (ver Figura 4.1), foi empregada para a realização dos ensaios experimentais.

Para possibilitar a visualização e filmagem de ambos os arcos voltaicos, as soldagens foram executadas com um eletrodo posicionado ao lado do outro em relação ao sentido de deslocamento da solda (posicionamento lado a lado – “LL”). A soldagem foi por simples

deposição de material sobre um tubo em rotação. O intuito era o de evitar que parte dos arcos voltaicos fosse encoberta pela poça metálica durante a gravação das imagens. Tubos de aço carbono de 90 mm de diâmetro externo por 150 mm de comprimento e paredes de 4 mm de espessura foram torneados para adaptação no dispositivo de rotação dos tubos.

Os arames eletrodos usados eram da classe ER70S-6 com diâmetro de 1,0 mm de espessura. Como gás de proteção foi empregada uma mistura com 96% de Ar e 4% de CO<sub>2</sub>, a uma vazão de 18 l/min. A distância do bico de contato à peça (DBCP) adotada foi de 17 mm.

### 5.2.2 Definição dos parâmetros de destacamento de gotas

A primeira etapa dos ensaios consistiu em determinar os parâmetros de pulso de corrente que resultassem na condição de destacamento de uma gota metálica por pulso de corrente, durante o período de pulso. Filmagens das transferências foram feitas para conferir se a condição desejada estava sendo contemplada.

Nesse procedimento foram seguidas as etapas descritas no subitem 2.8.3. Para facilitar o procedimento de determinação dos parâmetros, considerou-se, em uma primeira aproximação de cálculos, que a relação entre velocidade de arame e corrente média era linear, na forma da equação 2.10 ( $Va = cte * Im$ ). Para uma distância bico de contato peça de 15 mm, Dutra et al. (1996) encontraram experimentalmente o valor 0,034 para a constante *cte*, soldando com arames da classe ER70S-6 de 1,0 mm de diâmetro.

Os parâmetros “*I<sub>p</sub>*” e “*t<sub>p</sub>*” foram variados sempre dentro da faixa limitada pelas curvas da Figura 5.1, encontradas experimentalmente por Dutra et al. (1996). Conforme já descrito no item 2.8, classicamente acredita-se que, nessa região, uma combinação desses parâmetros resulta na condição de uma gota por pulso, com os destacamentos ocorrendo durante a fase de pulso.

Para encontrar os demais parâmetros “*I<sub>b</sub>*” e “*t<sub>b</sub>*”, a uma determinada corrente média (100 A), era necessário conhecer o período da forma de onda que resultasse no destacamento de uma única gota com diâmetro pré-determinado. Adotou-se o mesmo diâmetro de gota (1,2 mm) encontrado por Dutra (1989a) para arames de 1,0 mm, que, segundo o autor, resultava em uma condição mais estável de soldagem. Os cálculos do período de onda “*T*” e das variáveis de base foram feitos utilizando-se as equações e o procedimento descrito no item 2.8.

Com essa metodologia seguida foram determinadas duas constantes de destacamento de gotas que resultavam na condição de uma gota destacada no final do pulso da corrente. Os parâmetros de destacamento estão apresentados na Tabela 5.1.

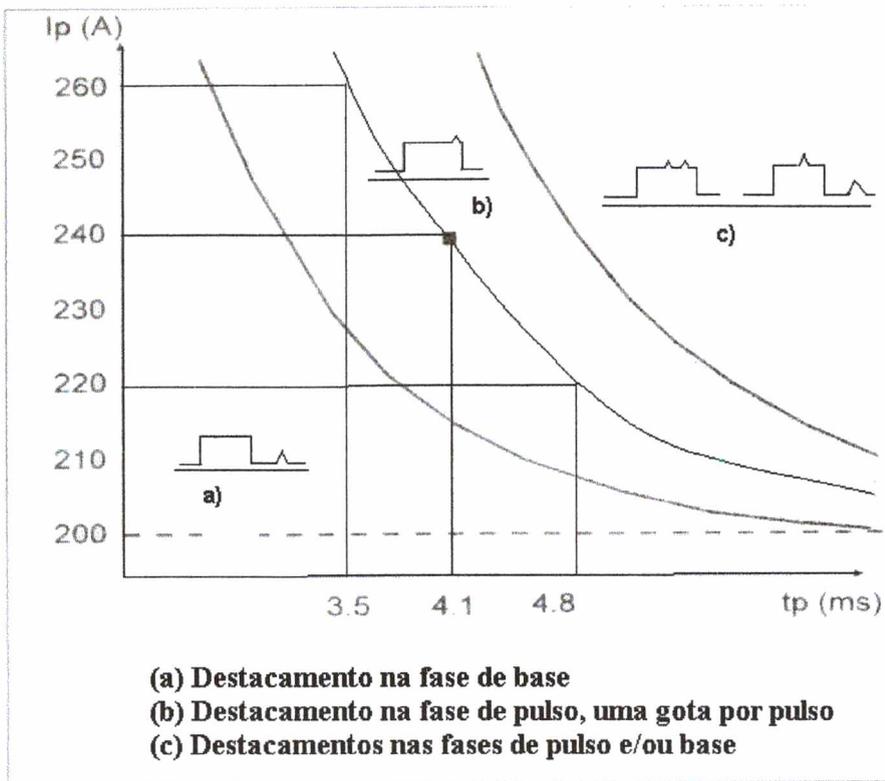


Figura 5.1- Curvas dos parâmetros de destacamento de gota levantados por Dutra et al. (1996), para arames da classe ER 70s-6 de 1,0 mm de diâmetro.

Tabela 5.1 - Parâmetros de destacamento de gotas para o duplo arame, obtidos com o auxílio das filmagens. O levantamento foi feito com eletrodos da classe ER70S-6 de 1,0 mm de diâmetro.

$I_p$ (A)	$t_p$ (ms)	$\varnothing_{gota}$ (mm)	D ( $A^2ms$ )
280	3,3	1,2	258720
270	3,9	1,2	284310

**$I_p$**  - corrente de pulso;  **$t_p$**  - tempo de pulso;  **$\varnothing_{gota}$**  - diâmetro de gota; **D** - constante de destacamento de gota.

A Figura 5.2 ilustra uma seqüência de imagens em sincronismo com os sinais de tensão e de corrente. Os números correspondentes de cada quadro podem ser vistos sobre os oscilogramas. Pode-se observar que os parâmetros encontrados resultaram em ocorrências de destacamentos de gotas no final do pulso de corrente, ou, em alguns casos esses destacamentos ocorreram já na descida da corrente.

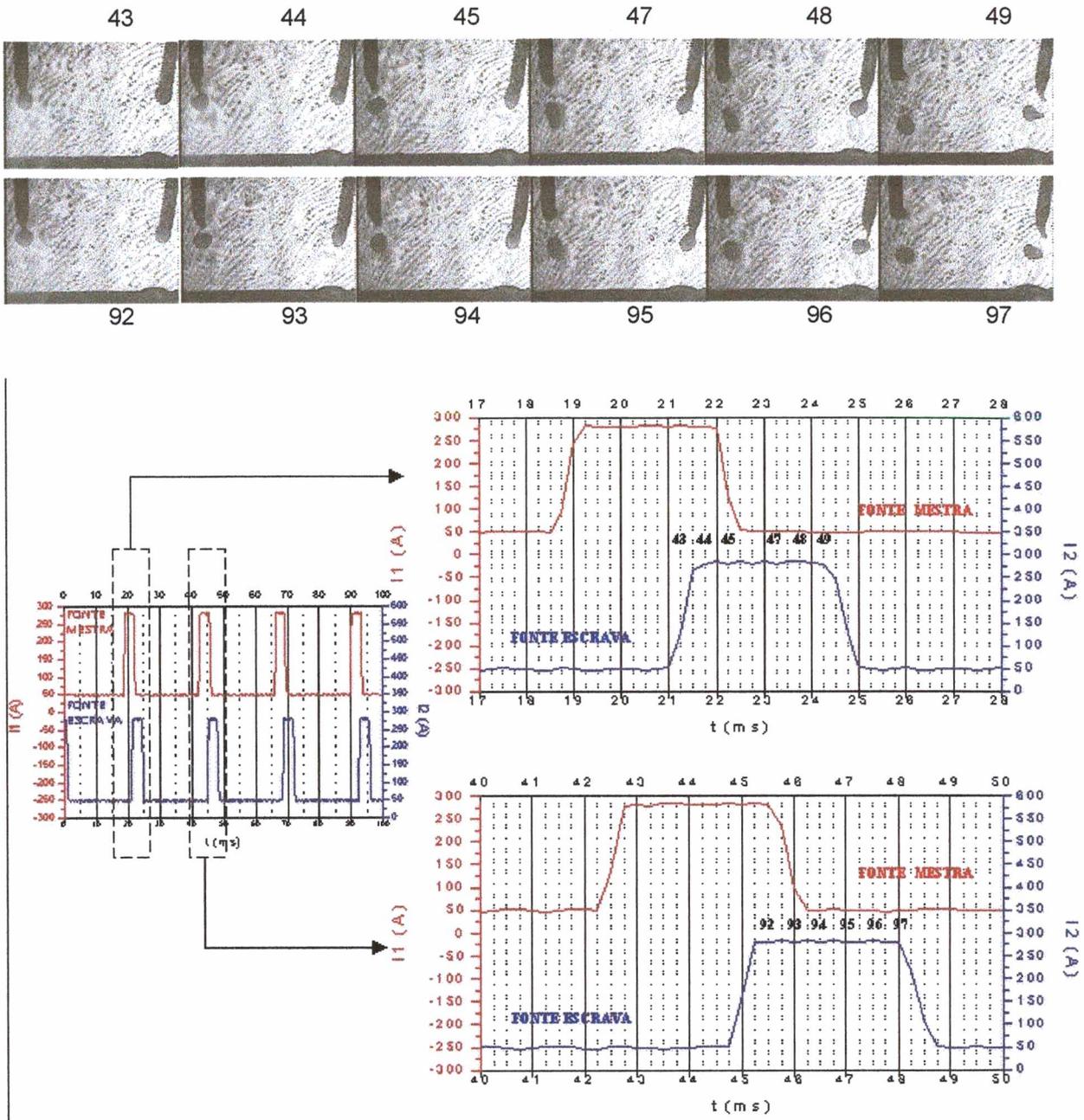


Figura 5.2 - Oscilogramas de corrente em sincronismo com as imagens gravadas pela câmera. O eletrodo posicionado à esquerda é comandado pela fonte mestra (curvas de cor vermelha). O da direita é comandado pela fonte escrava (curvas de cor azul). Parâmetros da corrente pulsada:  $I_m = 80$  A;  $I_p = 280$  A;  $t_p = 3,3$  ms;  $I_b = 48$  A;  $t_b = 20,5$  ms e  $T_d = 2,5$  ms..

### 5.2.3 Definição dos fatores de entrada (variáveis independentes)

A defasagem entre os pulsos de corrente foi uma das variáveis independentes selecionadas (DF). Os níveis foram escolhidos visando-se abranger toda a faixa operacional dessa variável:

- Nível 1 - (Df.) pulsos defasados (Figura 5.3 a).
- Nível 2 - (F) pulsos em fase. As pulsações de corrente de ambas as fontes ocorriam praticamente no mesmo instante (Figura 5.3 b).

- Nível 3 - (MP) situação denominada aqui de meio pulso. O início de cada pulso em ambas as fontes era defasado de um tempo inferior ao de duração do destacamento “ $t_p$ ” (Figura 5.3 c).

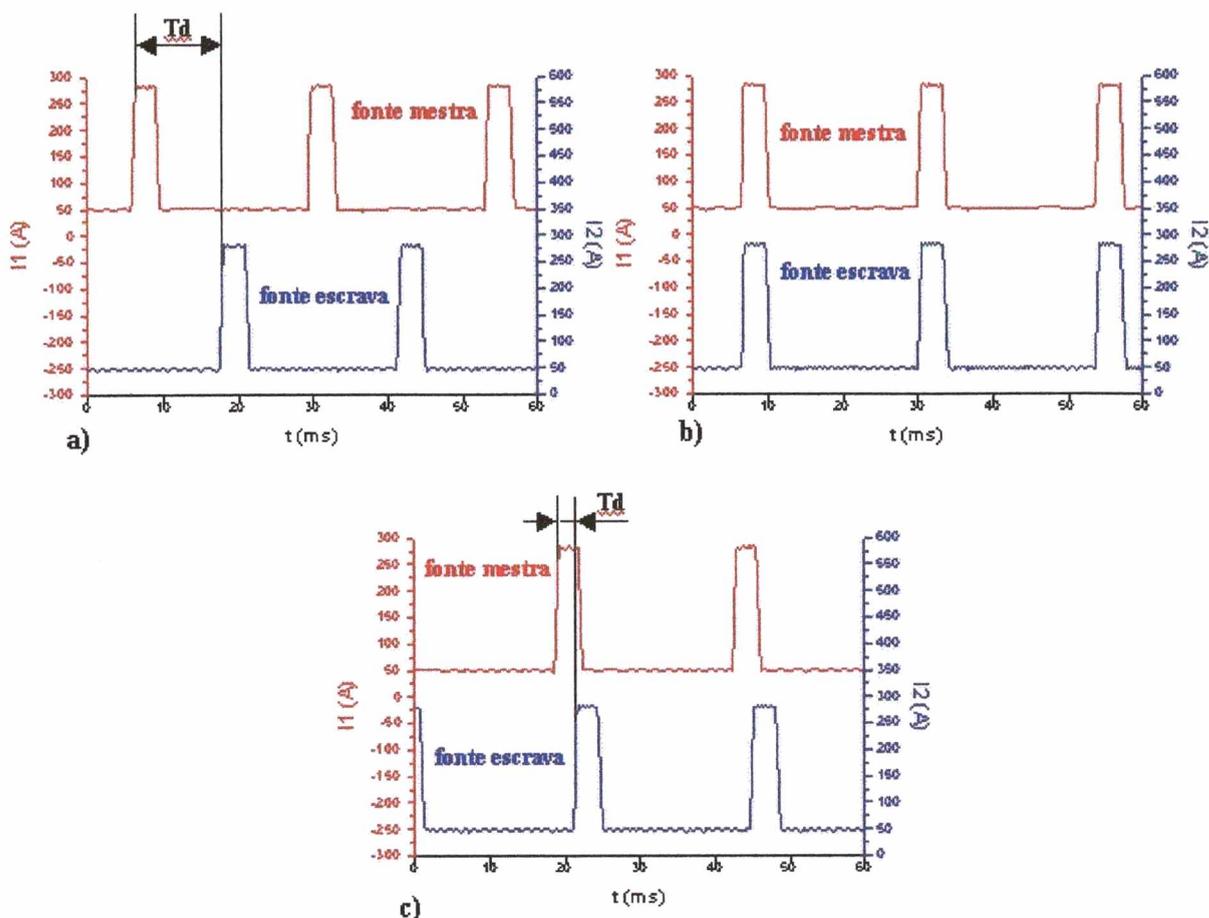


Figura 5.3 - Oscilogramas de corrente que ilustram as três situações de defasagens estudadas: **a** - Pulsos de corrente defasados. **b** - Pulsos de corrente em fase. **c** - Condição de defasagem denominada de meio pulso.  $T_d$  – tempo de defasagem entre os pulsos de corrente.

A outra variável definida era a corrente média de soldagem, cujos níveis foram selecionados para atender toda a faixa de corrente recomendada para a soldagem MAG pulsada, empregando arames de 1,0 mm de diâmetro. Foram definidos também três níveis para facilitar o planejamento fatorial  $2^3$ . (80 A; 120 A e 160 A).

#### 5.2.4 Definição da variável de resposta

Os critérios adotados para definir as variáveis dependentes basearam-se nas seguintes questões: A defasagem dos pulsos de corrente exerce influência sobre o comportamento dos arcos voltaicos? Essa tecnologia afeta a transferência de material dos eletrodos para a peça?

Para verificar as possíveis mudanças na transferência metálica, como consequência da alteração do sentido e intensidade da força resultante que age sobre as gotas metálicas, foram medidos os desvios de suas trajetórias nas diferentes condições de soldagem.

Foi feita também uma análise da velocidade da gota após o destacamento e ao longo da sua trajetória até a poça fundida. O intuito era de verificar se a velocidade da gota, em módulo, era influenciada pelos fatores do experimento.

### 5.2.5 Procedimento experimental

O procedimento experimental foi baseado num projeto fatorial de dois fatores a três níveis, totalizando 9 ensaios.

Os fatores com os respectivos níveis, bem como as respostas dos experimentos, foram descritos no item anterior. A Tabela 5.2 apresenta o planejamento do experimento. Pode ser observado nas colunas 4 e 5 que, para manter os comprimentos dos arcos em aproximadamente 5 mm, as velocidades dos arames ajustadas nos cabeçotes foram distintas.

Tabela 5.2 - Condições de soldagem empregadas nos experimentos

Im/ar.(A)	Ip (A)	tp (ms)	Ib (A)	tb (ms)	DF/ Td (ms)	ca (mm)	Vs (cm/min)	Va (m/min)	
								arame 1	arame 2
80	280	3,3	48	20,5	Df / 10,2	≈ 5	17,0	3,0	2,8
80	280	3,3	48	20,5	MP / 2,0	≈ 5	17,0	3,0	2,8
80	280	3,3	48	20,5	F / 0,01	≈ 5	17,0	3,0	2,8
120	280	3,3	77	12,4	Df / 7,8	≈ 5	20,0	4,5	4,25
120	280	3,3	77	12,4	MP / 2,0	≈ 5	20,0	4,5	4,25
120	280	3,3	77	12,4	F / 0,01	≈ 5	20,0	4,5	4,25
160	280	3,3	109	6,3	Df / 5,5	≈ 5	22,6	6,4	6,1
160	280	3,3	109	6,3	MP / 2,0	≈ 5	22,6	6,4	6,1
160	280	3,3	109	6,3	F / 0,01	≈ 5	22,6	6,4	6,1

**Vs – velocidade de soldagem; Va – velocidade de arame, ca – comprimentos do arcos**

Esse comportamento deu indícios de que os arames eletrodos apresentavam taxas diferenciadas de fusão quando submetidos às mesmas condições de soldagem (mesmos parâmetros selecionados de corrente de soldagem). O eletrodo 1 (posicionado à esquerda do leitor - ver Figura 5.2) apresentou uma taxa de fusão maior, de aproximadamente 5 pontos percentuais. Essa diferença entre as taxas de fusão dos dois eletrodos foi verificada em praticamente todos os testes efetuados neste trabalho com arames da classe ER70S6 de 1,0 mm de diâmetro. Levantou-se a hipótese de que esse comportamento estava relacionado com uma pequena diferença no diâmetro nominal dos eletrodos, o que resultava em resistências elétricas também diferentes. A suspeita procedia, pois alguns testes preliminares às filmagens foram realizados com os eletrodos, permutando-os entre as duas fontes, e, constatou-se que, a diferença de fusão mantinha-se constante entre eles. Um dos arames sempre apresentava uma taxa de fusão superior ao outro.

Apesar de não ter sido previsto no planejamento experimental, após as filmagens, um trabalho foi realizado no LABSOLDA/UFSC com o intuito de identificar a causa desse comportamento distinto de fusão dos arames (ORCIOLLI NETO, A. et al., 2002). Apesar de estar fora do contexto abordado neste capítulo, faz-se a seguir um pequeno resumo do trabalho desenvolvido, no qual se verificou que pequenas variações nas características construtivas dos arames afetam as suas taxas de fusão. Para realização do trabalho, duas bobinas de arames do tipo ER70S-6, com os diâmetros nominais de 1,0 mm e fornecidas pelo mesmo fabricante, foram selecionadas para os ensaios. Inicialmente, os diâmetros e as resistências elétricas foram medidas e a resistividade elétrica de cada arame foi calculada segundo as especificações da norma ASTM B193 (ASTM, 1978). Algumas amostras desses arames foram encaminhadas para análises de composição química. O trabalho foi finalizado com a realização de ensaios de soldagem para determinar a taxa de fusão de material de cada arame. Os resultados encontrados mostraram que as médias obtidas nas medições de diâmetro e resistência elétrica dos arames divergiam. A análise da composição apontou que as amostras possuíam aproximadamente a mesma composição química. No entanto, nos ensaios realizados em laboratório, foi constatado que os arames apresentavam taxas distintas de fusão quando submetidos às mesmas condições de soldagem. O arame de menor diâmetro (diferença entre os diâmetros de aproximadamente 3,5%) apresentou uma taxa de fusão superior (aproximadamente 4%).

#### 5.2.5.1 Metodologia de medição das trajetórias das gotas

Na análise das filmagens realizadas, pôde-se observar que as trajetórias seguidas pelas gotas, após se destacarem dos eletrodos, mudavam devido às alterações na defasagem dos pulsos de corrente entre as fontes. Para quantificar esse comportamento, foram medidas as direções de deslocamentos das gotas. Utilizou-se o programa AUTOCAD para capturar algumas seqüências de imagens, sobre as quais, as gotas foram desenhadas em suas respectivas posições. A trajetória medida era definida pelo deslocamento do centro geométrico da gota desde o destacamento na ponta do eletrodo até atingir a poça fundida. A Figura 5.4 ilustra uma seqüência de imagens do deslocamento de uma gota. A variação de sua trajetória é dada pelo ângulo “ $\theta$ ” desenhado na figura. De cada um dos nove ensaios realizados foram medidas cinco trajetórias de gotas distintas, totalizando 45 medições para cada eletrodo.

#### 5.2.6 Resultados experimentais e análise estatística

Os resultados obtidos nos ensaios podem ser visualizados na Tabela 5.3. Os desvios-padrão das medidas do ângulo “ $\theta$ ” foram incluídos para dar uma visão da variabilidade

dessa variável. Para facilitar a identificação das gotas em todos os testes realizados nessas filmagens, o eletrodo da esquerda foi comandado sempre pela fonte mestra. Portanto, as letras “e” e “d” que aparecem à frente dos símbolos que identificam as variáveis devem ser associadas às fontes mestra e escrava respectivamente.

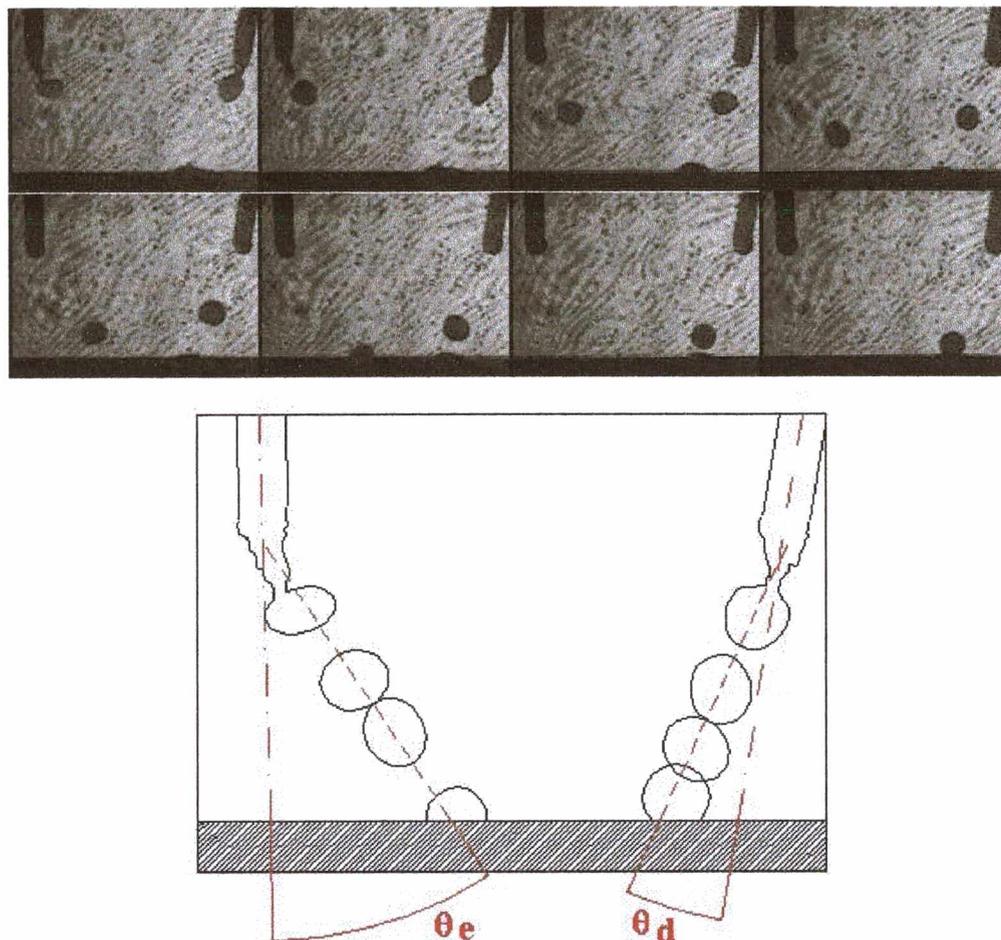


Figura 5.4 - Ângulo “ $\theta$ ” de desvio na trajetória das gotas. Arcos pulsando em fase e corrente média de 80 A.  $\theta_e = 30^\circ$  ;  $\theta_d = 16^\circ$

Tabela 5.3 - Resultados experimentais obtidos nas filmagens.

Im (A)	DF.	$\theta_e$ (°)	$\theta_d$ (°)
80	Df.	$8,54 \pm 1,13$	$2,10 \pm 2,40$
80	MP.	$13,08 \pm 4,23$	$6,56 \pm 1,65$
80	F	$31,60 \pm 1,64$	$16,36 \pm 1,19$
120	Df.	$14,66 \pm 2,57$	$2,16 \pm 1,75$
120	MP.	$18,86 \pm 3,93$	$5,96 \pm 2,23$
120	F	$29,42 \pm 2,41$	$10,18 \pm 3,46$
160	Df.	$10,06 \pm 1,54$	$4,64 \pm 2,14$
160	MP.	$18,92 \pm 3,00$	$16,7 \pm 3,32$
160	F	$20,44 \pm 2,23$	$13,08 \pm 3,57$

Obs.  $\theta_e$ : ângulo de desvio da gota destacada do eletrodo esquerdo;  $\theta_d$ : ângulo de desvio da gota destacada do eletrodo direito.

### 5.2.6.1 Análise de correlação

Uma análise de correlação foi feita com o intuito de determinar o grau de associação entre os fatores e as respostas do experimento. A Tabela 5.4 apresenta os coeficientes de correlação e os respectivos níveis de significância encontrados. Níveis de significância menores que 0,05 indicam “correlação não-zero”, ou seja, estatisticamente (probabilidade de erro de 5%), as variáveis são correlacionadas de forma significativa. Uma correlação positiva significa que as variáveis se alteram na mesma direção. Na Tabela 5.4, os índices em azul e sublinhados marcam as variáveis significativamente correlacionadas.

Tabela 5.4 - Correlação entre fatores e as respostas dos experimentos. Coeficientes e níveis de significância (valores entre parênteses).

Variáveis	$\theta_e$ (°)	$\theta_d$ (°)
Im	-0,050 (0,898)	-0,028 (0,943)
DF	<u>0,861</u> (0,003)	<u>0,920</u> (0,000)

Os coeficientes apresentados na Tabela 5.4 mostram uma correlação pequena entre corrente média e os ângulos  $\theta_e$  e  $\theta_d$  e uma forte correlação entre a variável defasagem dos pulsos de corrente e os mesmos ângulos. Isso significa que com uma mudança da condição de pulsos defasados de corrente para a de pulsos em fase, o ângulo “ $\theta$ ” de desvios das trajetórias das gotas tende a aumentar.

## 5.2.7 Discussão dos resultados

### 5.2.7.1 Efeitos dos fatores sobre os desvios nas trajetórias das gotas (“ $\theta_e$ ” e “ $\theta_d$ ”)

Os gráficos da Figura 5.5 permitem visualizar melhor os resultados apresentados pela Tabela 5.4. Percebe-se nesses gráficos que a mudança da condição de defasagem total dos pulsos de corrente para a pulsação em fase causa um aumento na intensidade dos ângulos “ $\theta_e$ ” e “ $\theta_d$ ”. Os gráficos mostram também a influência pequena da corrente média sobre a variação dos ângulos.

Os desvios nas trajetórias das gotas, como consequência da defasagem entre os pulsos de corrente, são explicados pela ação de forças eletromagnéticas sobre os arcos voltaicos. Essas forças são geradas devido à proximidade de dois condutores de corrente elétrica (arcos voltaicos) e dependem: da intensidade do campo magnético induzido em torno desses

condutores e das correntes elétricas que passam por eles (ver item 2.3 Influência de campos magnéticos sobre os arcos). Essas forças atuam perpendicularmente aos condutores e causam suas deflexões. Qualquer alteração na intensidade dessas forças, seja por variações das correntes elétricas que passam nos arcos voltaicos, ou, seja por modificações no campo magnético induzido, resulta em mudanças no grau de desvio desses condutores.

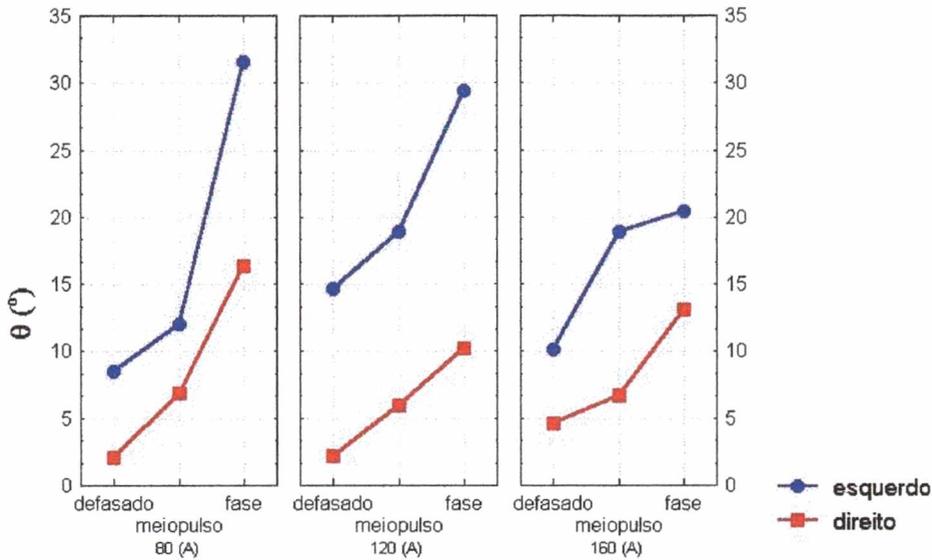


Figura 5.5 - Desvio “ $\theta$ ” das gotas em função dos fatores corrente média e defasagem de pulsos de corrente.

As fotos apresentadas a seguir ajudam a visualizar esse comportamento.

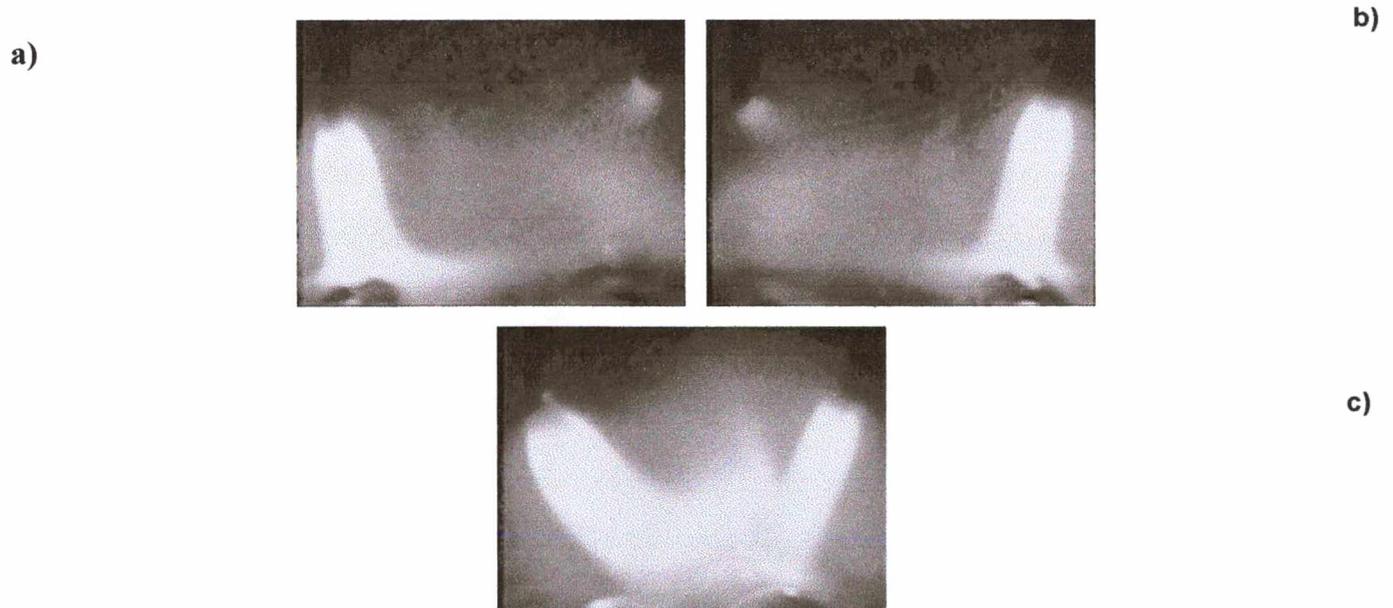


Figura 5.6 a - Foto dos arcos voltaicos. Arco esquerdo está no período de pulso da corrente  $I_p = 280$  A e o direito na base  $I_b = 50$  A. b - Arco direito está no período de pulso da corrente. c - Ambos estão no período de pulso  $I_p = 280$  A.

Nas Figuras 5.6 **a**, **b** e **c** podem ser vistas as imagens dos arcos voltaicos. Na Figura 5.6 **a**, o arco da esquerda está no período de pulso da corrente, portanto, apresenta uma intensidade de luz mais forte que o da direita, que por sua vez, no mesmo instante, está no período de base. Na Figura 5.6 **b**, o arco da direita é que está no pulso, enquanto o da esquerda permanece no período de base. Na Figura 5.6 **c**, ambos os arcos voltaicos estão nos períodos de pulsos. Comparando as imagens, pode-se observar que os arcos da Figura 5.6 **c** sofrem deflexões maiores que o arco esquerdo da Figura 5.6 **a** e o direito da 5.6 **b**.

Baseando-se nestes resultados, pode-se constatar que o grau de desvio de um dos arcos voltaicos depende diretamente da intensidade da corrente instantânea que passa pelo outro arco. A amplificação das correntes que passam pelos arcos voltaicos causa uma intensificação do campo magnético em torno deles e conseqüentemente das forças eletromagnéticas de interação que agem sobre esses arcos.

Os efeitos dessas deflexões diferenciadas refletem nos desvios das gotas nos instantes dos destacamentos e, conseqüentemente, sobre as trajetórias após os desprendimentos. Enquanto a gota se encontra aderida ao eletrodo, está conduzindo corrente e, portanto, ainda sujeita à ação de uma força similar àquela que age sobre o arco voltaico, o que causa o seu desvio em relação ao eixo do eletrodo. As fotos das Figuras 5.4 e 5.7 ilustram esses desvios<sup>1</sup>. Na Figura 5.7, os pulsos de corrente estão defasados. A gota que está se desprendendo do eletrodo esquerdo já está desviada em relação ao eixo do eletrodo e direcionada segundo a trajetória a ser seguida. Esse desvio é menor em relação àqueles observados nas duas gotas que estão prestes a se destacarem dos eletrodos da Figura 5.4, em que ambos os arcos voltaicos estão pulsando em fase. As imagens mostram que as resultantes das forças que agem sobre as gotas metálicas são alteradas com a mudança na defasagem dos pulsos de corrente, causando desvios distintos dessas gotas em relação aos eixos dos eletrodos.

Uma análise das imagens das Figuras 5.4, 5.6 e 5.7 leva a pressupor que a trajetória de uma gota será definida pela intensidade da deflexão do arco voltaico. Arcos voltaicos pulsando em fase apresentaram uma maior deflexão. Nessa mesma condição de pulso, o ângulo de desvio das gotas também foi superior.

Análise semelhante a essa foi feita por Essers e Walter (1981) ao trabalharem com o processo MIG/MAG com um arame. Os autores submeteram o arco voltaico a um campo magnético alternado e transversal e verificaram que a deflexão do arco é proporcional à corrente que passa por ele e à intensidade do campo. Observaram que as gotas destacadas seguiam uma trajetória na mesma direção do arco defletido.

---

<sup>1</sup> As variáveis de pulsação da corrente são as mesmas da Figura 5.6.

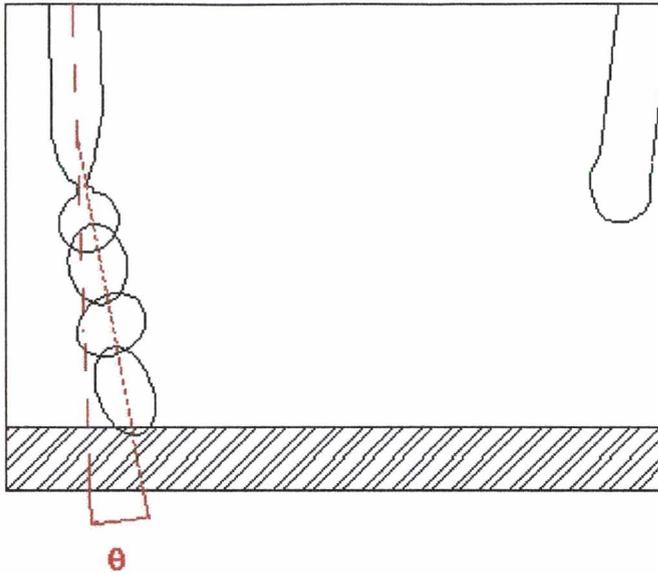
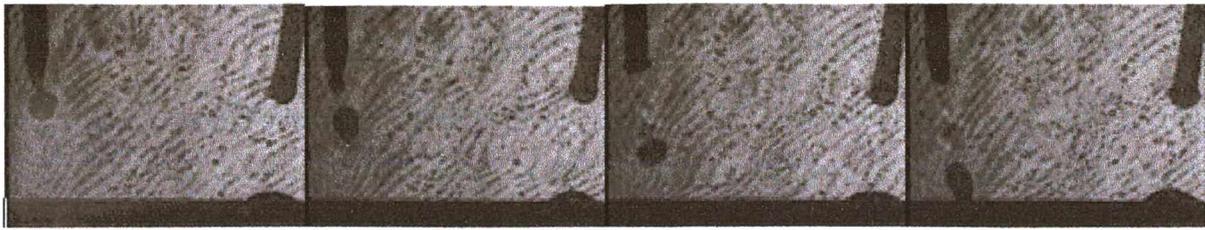


Figura 5.7 - Ângulo  $\theta = 6^\circ$  de desvio da gota. A Corrente de pulso do eletrodo esquerdo no instante de destacamento é de 280 A. A corrente no eletrodo direito é de 50 A.

Os resultados obtidos explicam também a pequena correlação encontrada para a corrente média e o ângulo de desvio das gotas. A deflexão de um arco no instante de destacamento e, conseqüentemente, a direção da trajetória seguida pela gota, estão relacionadas com as correntes instantâneas que passam pelos arcos e não com a corrente média.

Outro aspecto que deve ser analisado é a maior deflexão sofrida pelo arco esquerdo (comandado pela fonte mestra) em relação ao direito. Como conseqüência, os desvios das gotas destacadas desse eletrodo eram mais acentuados. Os gráficos da Figura 5.5 mostram essa tendência. Como as condições de soldagem foram similares para ambos os arcos, suspeita-se que uma maior interferência eletromagnética, devido às posições dos cabos-terra, tenha influenciado de forma mais intensa a resultante das forças que agem sobre as gotas destacadas do eletrodo esquerdo. A Figura 5.8 é uma representação esquemática do dispositivo utilizado nas filmagens para girar os tubos. Um reservatório de mercúrio serviu para permitir a passagem de corrente e fechar o circuito elétrico. O detalhe em destaque mostra o arranjo dos eletrodos e o fluxo de corrente. Devido à mudança mais acentuada de direção do fluxo de corrente do arco esquerdo, esse arco e a gota aderida ao eletrodo esquerdo sofrem um efeito mais intenso das forças eletromagnéticas, do que o arco e a gota aderida ao

eletrodo direito, conseqüentemente, eles (arco esquerdo e gota aderida ao eletrodo) tendem a se desviarem mais intensamente para a região central entre os arcos.

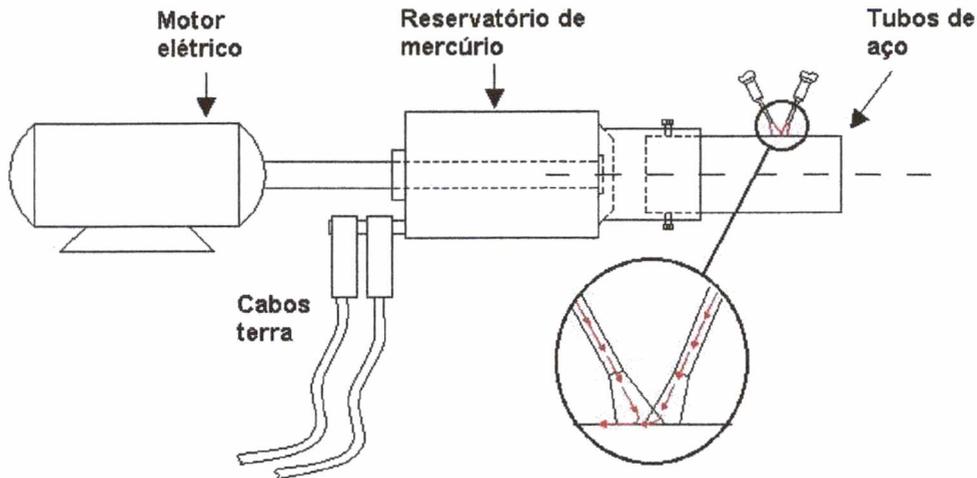


Figura 5.8 - Representação esquemática do dispositivo de rotação dos tubos. O desenho mostra que o arco do eletrodo esquerdo está mais propenso à ação do sopro magnético.

Essa maior deflexão refletiu também nos sinais de tensão. Os gráficos da Figura 5.9 são oscilogramas de tensão de aquisições de sinais realizadas nas filmagens para uma corrente média de 120 A. A uniformidade dos oscilogramas e a repetitividade nas características dos sinais retratam o comportamento estável dos arcos voltaicos durante os ensaios. Na Figura 5.9 a são mostradas as curvas de tensões de ambos os arcos, que estão com os pulsos de corrente defasados, a uma corrente média de 120 A em cada arame. Na Figura 5.9 b, em uma escala reduzida, é apresentada parte do mesmo oscilograma. As Figuras 5.9 c, 5.9 d, 5.9 e e 5.9 f são curvas obtidas dos arcos sobre as mesmas condições de soldagem, porém com pulsos em fase e na condição de meio pulso respectivamente. Nesses gráficos pode ser visto que o sinal de tensão do arco comandado pela fonte mestra (curvas em vermelho) apresenta flutuações mais intensas (mais evidentes nos períodos de base da corrente), como conseqüência dos maiores desvios sofridos por ele.

#### 5.2.7.2 - Efeitos sobre o módulo da velocidade da gota metálica

Foi discutido anteriormente que as deflexões dos arcos voltaicos estão relacionadas com as forças de interação eletromagnéticas entre eles, e essas forças mudam de direção e intensidade com a defasagem nos pulsos de corrente. Da mesma forma, as forças resultantes que agem sobre as gotas no destacamento também se alteram. Assim, espera-se que as acelerações das gotas também sejam distintas e que as velocidades variem. O efeito dessas forças causando a mudança de direção nas trajetórias das gotas já foi discutido nos subitens anteriores.

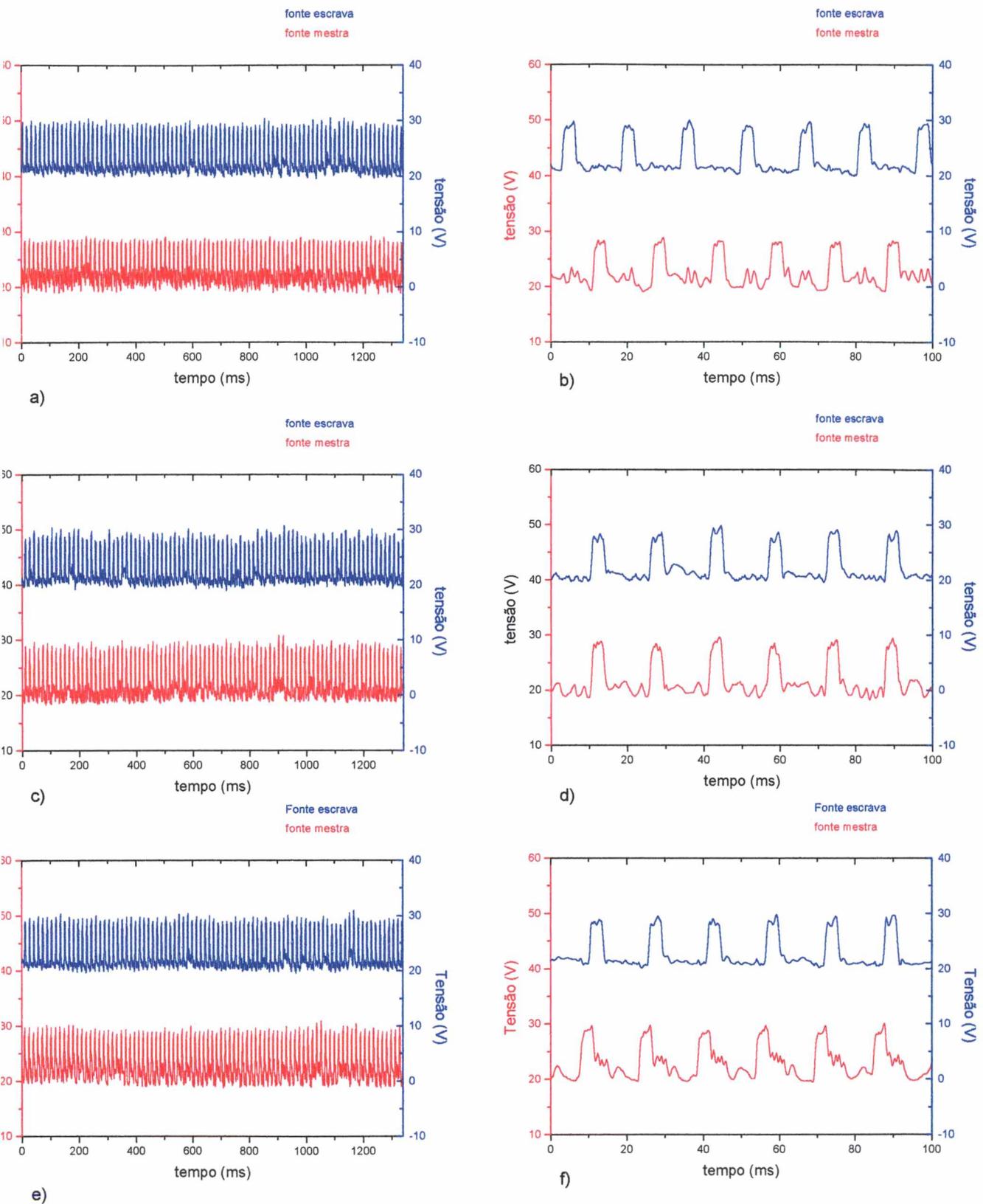


Figura 5.9 - Oscilogramas de tensão dos arcos voltaicos para uma corrente média pulsada de 120 A. **a** - pulsos de corrente defasados; **b** - mesmo oscilograma da Figura 5.9 **a** em escala reduzida de tempo; **c** - pulsos de corrente em fase; **d** - mesmo oscilograma da Figura 5.9 **c** em escala reduzida de tempo; **e** - condição de meio pulso; **f** - mesmo oscilograma da Figura 5.9 **d** em escala reduzida de tempo.

A seguir, faz-se uma análise para verificar uma possível influência dos fatores do experimento sobre as alterações em módulo das velocidades.

O primeiro passo consistiu em medir os diâmetros das gotas desenhadas no subitem 5.2.5.1, com a finalidade de verificar se as massas dessas gotas divergiam significativamente. Os valores medidos são apresentados na Tabela 5.6. Cada valor representa a média das medidas de uma mesma gota em diferentes posições ao longo da sua trajetória. Os resultados mostram que as massas das gotas analisadas eram aproximadamente iguais.

Tabela 5.5 - Diâmetros de gotas medidos e respectivos desvios-padrão.

Im (A)	DF.	$\phi_{\text{gota-e}}$ (mm)	$dp\phi_{\text{gota-e}}$ (mm)	$\phi_{\text{gota-d}}$ (mm)	$dp\phi_{\text{gota-d}}$ (mm)
80	Df	1,3	$\pm 0,12$	1,3	$\pm 0,23$
80	MP	1,2	$\pm 0,25$	1,3	$\pm 0,26$
80	F	1,3	$\pm 0,18$	1,3	$\pm 0,07$
120	Df	1,3	$\pm 0,1$	1,3	$\pm 0,09$
120	MP	1,3	$\pm 0,14$	1,3	$\pm 0,11$
120	F	1,4	$\pm 0,15$	1,3	$\pm 0,08$
160	Df	1,3	$\pm 0,08$	1,3	$\pm 0,05$
160	MP	1,3	$\pm 0,06$	1,4	$\pm 0,1$
160	F	1,3	$\pm 0,15$	1,3	$\pm 0,12$

$\phi_{\text{gota-e}}$  - diâmetro médio da gota destacada do eletrodo esquerdo;  $dp\phi_{\text{gota-e}}$  - desvio padrão do diâmetro medido da gota destacada do eletrodo esquerdo.  $\phi_{\text{gota-d}}$  - diâmetro médio da gota destacada do eletrodo direito;  $dp\phi_{\text{gota-d}}$  - desvio padrão do diâmetro medido da gota destacada do eletrodo direito.

A etapa seguinte consistiu em equacionar as trajetórias das gotas. Rhee & Asibu (1992) e também Waszink & Piena (1986) verificaram que a curva que representa o deslocamento da gota pode ser representada por uma parábola, e que a velocidade cresce praticamente de forma linear com o tempo. Os gráficos das Figuras 5.10 a e 5.10 b representam o deslocamento e a velocidade de uma gota, medidos de um dos ensaios. O comportamento foi semelhante ao encontrado pelos autores citados. Polinômios de grau dois foram então interpolados aos dados experimentais. Essas equações foram derivadas para realizar os cálculos das velocidades das gotas ao longo de suas trajetórias. O último ponto sobre a curva 5.10 b marca a velocidade e o instante de chegada da gota à poça metálica.

Como nesse item o objetivo não é determinar a velocidade real da gota ao longo da sua trajetória, mas como o valor em módulo dessa se altera em função dos fatores corrente média e defasagem dos pulsos de corrente, considerou-se, para simplificação dos cálculos, a velocidade inicial antes do destacamento igual a zero. No entanto, as faixas de velocidades encontradas nos cálculos estão próximas das obtidas nos trabalhos de Rhee & Asibu (1992) e Waszink & Piena (1986), para arames de 1,0 mm de diâmetro.

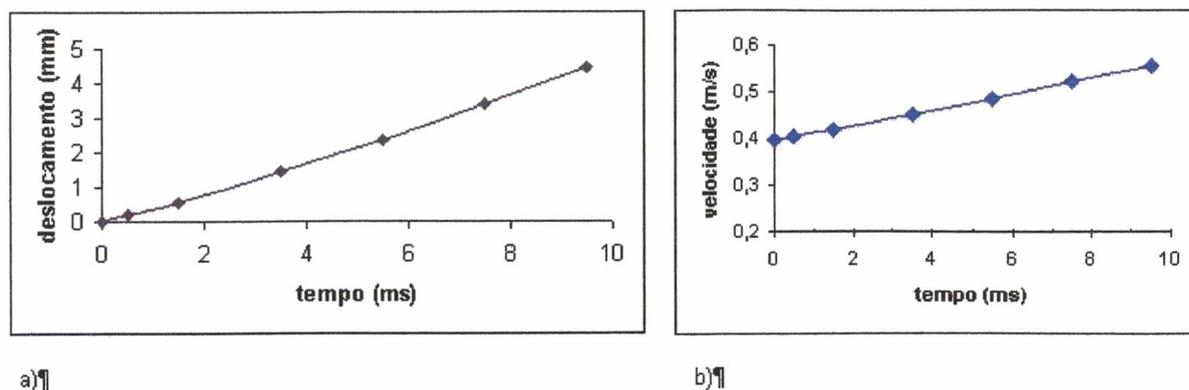


Figura 5.10 **a** - Deslocamento típico de uma gota no tempo; **b** - variação da velocidade da gota ao longo da trajetória. Corrente média de soldagem 80 A.

Nos resultados obtidos não se verificou uma correlação definida entre os fatores corrente média de soldagem e defasagem nos pulsos de corrente com o valor em módulo da velocidade alcançada pela gota após o destacamento. Entretanto, foi observado que esse valor estava relacionado diretamente com a intensidade da corrente que passava pela gota no instante de destacamento. As curvas de velocidades apresentadas a seguir ajudam a visualizar essa relação. As Figuras 5.11 **a** e 5.11 **b** mostram as variações das velocidades das gotas em soldagens com corrente média constante de 80 A e 160 A respectivamente. Apenas o efeito da defasagem dos pulsos de corrente está sendo considerado nesses gráficos. Nas Figuras 5.11 **c** e 5.11 **d**, o fator defasagem foi mantido constante e apenas o efeito da corrente média é analisado.

O código que identifica cada curva informa a corrente média de soldagem, a defasagem entre os pulsos de corrente e o instante de destacamento da gota. Por exemplo:

- i) I80faspul. - Corrente média de soldagem de 80 A. Pulsos de corrente de ambas as fontes ocorrendo em fase e o destacamento da gota ocorrendo durante o período de pulso.
- ii) I80defbas. - Corrente média de soldagem de 80 A. Pulsos de corrente de ambas as fontes ocorrendo defasados e o destacamento da gota ocorrendo no início do período de base.

As curvas da Figura 5.11 **a** mostram que as gotas que se destacaram durante o período de pulso da corrente adquiriram velocidades maiores que aquelas que se destacaram no período de base, independentemente da defasagem entre os pulso de corrente. Resultado semelhante foi verificado para as gotas destacadas com uma corrente média de 160 A (Figura 5.11 **b**).

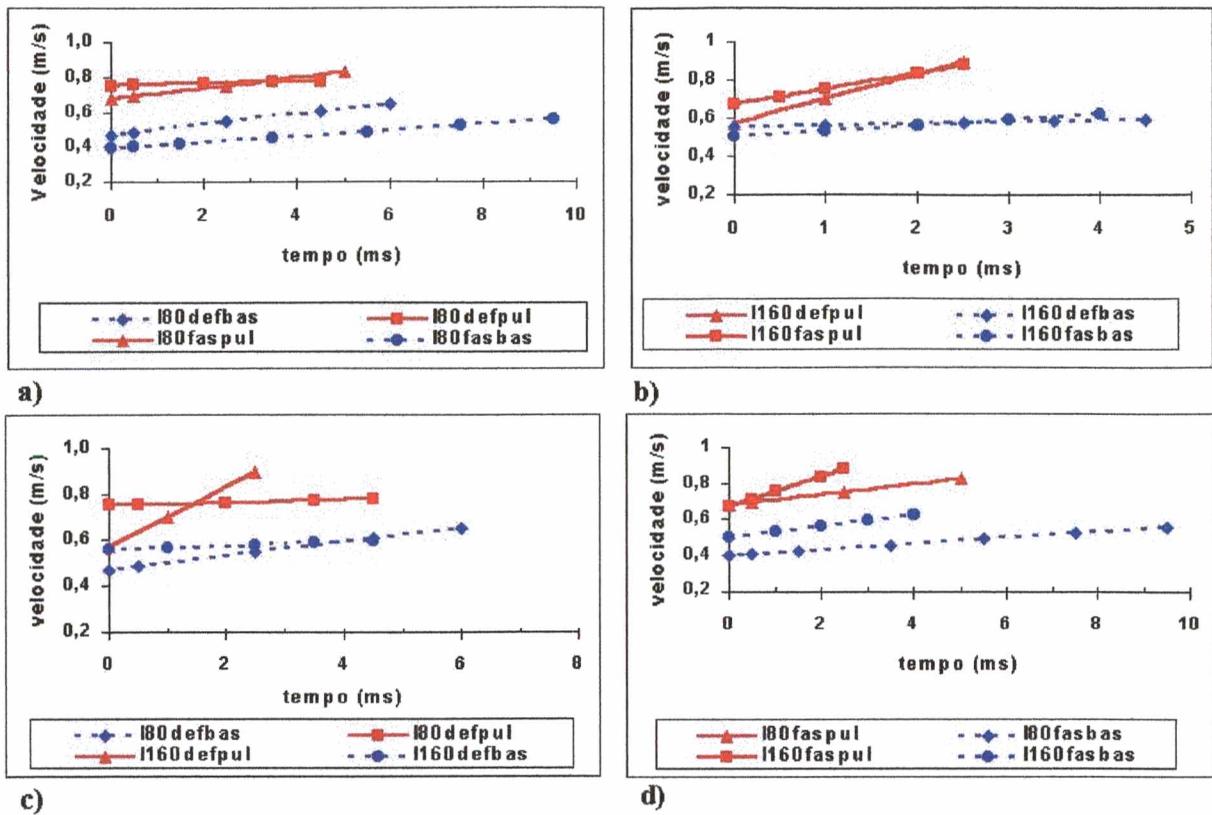


Figura 5.11 a e b - Velocidades das gotas após os destacamentos. Apenas o fator defasagem está sendo variado. c e d. Apenas o fator corrente média de soldagem é variado.

O mesmo comportamento foi observado nos gráficos das Figuras 5.11 c e 5.11 d. As gotas que apresentaram maior velocidade destacaram-se no período de pulso da corrente, independentemente da corrente média de soldagem.

Esses resultados mostram que a velocidade atingida pela gota está relacionada com o valor instantâneo da corrente que passa por ela no momento anterior ao destacamento. As curvas em azul e tracejadas representam os destacamentos de gotas que ocorreram no período de base, portanto com velocidades inferiores às gotas que se destacaram no período de pulso (representadas pelas curvas cheias e em vermelho). Jacobsen (1992) em seu trabalho de investigação do processo de destacamento de gotas na soldagem MIG Pulsada, verificou o mesmo comportamento. O autor observou que a velocidade da gota após o destacamento é máxima quando esse destacamento ocorre ainda dentro do pulso da corrente.

Deve-se destacar que as curvas encontradas devem ser interpretadas como uma representação para a tendência no comportamento das velocidades das gotas. Há erros nesses levantamentos que se devem às simplificações nos cálculos e às incertezas do método de medição das trajetórias das gotas utilizado no trabalho. Como as trajetórias foram traçadas considerando-se o deslocamento do centro geométrico de cada gota desenhada, a definição exata desse centro foi dificultada pelo formato assumido pela gota após o destacamento. Essa

indefinição foi mais crítica para os destacamentos que ocorreram durante o período de pulso da corrente, conforme pode ser visto na imagem da Figura 5.7. Uma outra fonte de incerteza sobre os resultados está associada ao sistema de aquisição e sincronismo dos sinais. A determinação exata do valor da corrente no instante do destacamento foi limitada pela incerteza do sistema (veja item 4.2).

Devido a essas incertezas, o estudo e o levantamento das acelerações ficaram limitadas. As diferenças nas inclinações das curvas das Figuras 5.11 e a dispersão nos valores de velocidades encontradas (após o destacamento e antes de atingir a poça fundida) retratam essas incertezas.

### 5.3. Considerações finais

A análise dos resultados obtidos das filmagens permitiu verificar que o desvio da trajetória das gotas destacadas dos eletrodos variou com a defasagem dos pulsos de corrente. A condição de pulsos de corrente em fase apresentou uma maior deflexão dos arcos e maior desvio das gotas. O grau de desvio da trajetória de uma gota metálica, que se destaca de um eletrodo, está diretamente relacionado com a intensidade da corrente que passa pelo outro arco voltaico no instante do destacamento.

A velocidade alcançada por uma gota está diretamente relacionada com a intensidade da corrente que passa por ela no instante de seu destacamento. Os fatores corrente média de soldagem e defasagem nos pulsos de corrente não afetaram diretamente os valores em módulo dessas velocidades. Gotas que se destacaram durante o período de pulso da corrente atingiram a poça fundida a uma velocidade superior.

Dentre os resultados encontrados, deve-se ressaltar o efeito que a variável defasagem dos pulsos de corrente exerce sobre a trajetória das gotas. Essers & Walter (1981) ao submeterem um arco voltaico MIG/MAG (um arame) a um campo magnético transversal e alternado, mostraram que o perfil de penetração da solda pode ser alterado com a mudança na direção de deslocamento das gotas, pois a penetração depende também do local em que essas gotas atingem a poça metálica. Dessa forma, em algumas aplicações da soldagem MIG/MAG-PDAPI, a defasagem nos pulsos de corrente, antes de ser uma condição essencial para uma maior estabilidade do processo (o que não ficou evidente nos resultados aqui encontrados), torna-se uma variável relevante para o processo. Por intermédio dela é possível alterar as trajetórias das gotas, e de forma semelhante aos resultados obtidos pelos autores, obter cordões com perfis de penetração distintos. O estudo sobre a defasagem dos pulsos de corrente se encerra no próximo capítulo, em que se investiga as possíveis mudanças nas características geométricas da solda com a defasagem nos pulsos de corrente.

## CAPÍTULO 6

### ESTUDO DA DEFASAGEM NOS PULSOS DE CORRENTE – ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DAS SOLDAS

#### 6.1 Introdução

Os efeitos que a defasagem nos pulsos de corrente exerce sobre as características geométricas das soldas são estudados neste capítulo. Para tanto, são analisadas as variações nos perfis geométricos dos cordões (largura, reforço e penetração), executados nas mesmas condições de soldagem do capítulo anterior. Numa segunda série de ensaios, uma análise comparativa é feita entre as soldagens realizadas com e sem a defasagem dos pulsos de corrente. Essa última condição é identificada no capítulo como pulsação de corrente “aleatória” entre os arcos, que assim se caracteriza por não ocorrer comunicação entre as fontes, portanto, por não haver o controle dos instantes de pulsação das correntes. Os ensaios de soldagem nessa etapa foram executados na posição sobrecabeça, simulando operações de revestimentos em chapas. As comparações entre as soldagens foram feitas por intermédio de análises nos oscilogramas de tensão dos arcos voltaicos e por inspeção visual das camadas de solda executadas.

#### 6.2 Metodologia experimental

Dividiu-se o estudo em duas etapas. Na primeira, repetiram-se os ensaios realizados no Capítulo 5 com o objetivo de avaliar o perfil geométrico dos cordões. Adotaram-se os mesmos fatores de entrada (variáveis independentes) e níveis de variação descritos no subitem 5.2.3. As variáveis de resposta foram definidas conforme as características geométricas dos cordões. Na segunda etapa – soldagem por simples deposição sobre chapas na posição sobrecabeça – o estudo teve por objetivo comparar soldagens realizadas com a utilização da defasagem nos pulsos de corrente e uma condição sem defasagem. Foram definidos os fatores com os respectivos níveis de variação, bem como as respostas dos experimentos para serem analisadas. Conduziram-se os ensaios seguindo planejamentos experimentais, elaborados conforme o número de fatores e níveis pré-definidos em cada etapa do trabalho. Finalizou-se a metodologia com a análise dos resultados.

##### 6.2.1 Etapa 1 – Soldagem de deposição sobre chapas na posição plana

###### 6.2.1.1 Definição dos fatores de entrada (variáveis independentes)

Nessa etapa do trabalho, o objetivo foi investigar se os efeitos causados pelas mudanças nas condições de defasagem nos pulsos de corrente, observados no Capítulo 5

(deflexões dos arcos voltaicos e variações na direção da trajetória de deslocamento da gota), refletiam nas características geométricas dos cordões de solda.

Os depósitos foram feitos sobre chapas na posição plana e com os eletrodos posicionados um ao lado do outro em relação ao sentido deslocamento da soldagem (LL).

Os fatores de entrada dos experimentos e os respectivos níveis de variação foram os mesmos adotados no Capítulo 5 (veja subitem 5.2.3).

#### 6.2.1.2 Definição das variáveis de saída

As características geométricas do perfil do cordão, apresentadas no Capítulo 3 (item 3.6 – Definição das variáveis de resposta dos experimentos) foram consideradas como variáveis de respostas dos experimentos: São elas: índice de convexidade (R/L); penetração média nas laterais do cordão ( $PLM = (PL1+PL2)/2$ ); penetração no centro do cordão (PC) e a relação que define o perfil da penetração (PLM/PC). Foi definida também a variável porcentagem de área diluída ( $D\% = AD/(AR+AD)*100$ ).

#### 6.2.1.3 Ensaios experimentais

- Bancada de equipamentos e materiais utilizados.

A bancada utilizada para realização dos ensaios era constituída dos seguintes equipamentos e sistemas de medição:

- a) duas fontes de soldagem (MTE DIGITEC 450);
- b) sistema de deslocamento da soldagem (TARTÍLOPE V1);
- c) duas tochas-robô;
- d) suportes de fixação das tochas;
- e) sistema de medição das velocidades de arame;
- f) sistema de medição das grandezas elétricas tensão e corrente;
- g) sistema de aquisição de dados.

Esses equipamentos e sistemas de medição foram caracterizados no Capítulo 3. Realizaram-se testes sobre chapas de aço baixo carbono da classe ABNT 1010. Essas foram cortadas nas dimensões de 12,5X100X200 mm e esmerilhadas para remoção da camada de óxido. Os arames eletrodos usados eram da classe ER70S-6 com diâmetro de 1,0 mm de espessura. Como gás de proteção empregou-se uma mistura com 96% de Ar e 4% de CO<sub>2</sub>, a uma vazão de 17 l/min.

➤ Procedimento experimental

O procedimento adotado para a execução dos ensaios foi baseado num projeto fatorial de dois fatores a três níveis, com repetição, o que totalizou 18 ensaios. Os fatores com os respectivos níveis, bem como as variáveis de respostas foram descritas nos subitens 6.2.1.1 e 6.2.1.2. A Tabela 6.1 apresenta a seqüência dos ensaios executados. Em cada chapa preparada conforme descrito no item anterior foram feitos dois cordões de solda. Tomou-se o cuidado de manter uma distância de aproximadamente 35 mm entre cada cordão e as extremidades das chapas. Variou-se a velocidade de soldagem, visando-se manter o mesmo volume de material depositado na unidade de tempo para cada condição testada. A distância bico de contato peça foi mantida em 17 mm, e os comprimentos dos arcos voltaicos monitorados em torno de 5 mm.

Para facilitar a análise dos resultados, o eletrodo e o arco referenciados nesse capítulo como “1” são controlados pela fonte mestra. A referência “2” é feita aos que são controlados pela fonte escrava. As variáveis de pulso da corrente são as mesmas apresentados no Capítulo 5 (Tabela 5.2) para as correntes médias testadas.

Tabela 6.1 - Condições de soldagem empregadas nos experimentos.

Im/arame (A)	DF/Td (ms)	Vs (cm/min)	Va (m/min)	
			Arame 1	Arame 2
80	Df/10,2	32	3,3	3,3
120	MP/2,0	50	5,2	5,4
160	F/0,01	70	7,1	7,5
120	F/0,01	50	5,2	5,5
80	MP/2,0	32	3,2	3,3
160	Df/10,2	70	7,1	7,4
160	MP/2,0	70	7,2	7,4
80	F/0,01	32	3,3	3,3
120	Df/10,2	50	5,2	5,4
80	Df/10,2	32	3,3	3,3
120	MP/2,0	50	5,2	5,5
160	F/0,01	70	7,1	7,5
120	F/0,01	50	5,1	5,3
80	MP/2,0	32	3,2	3,3
160	Df/10,2	70	7,1	7,4
160	MP/2,0	70	7,2	7,4
80	F/0,01	32	3,3	3,4
120	Df/10,2	50	5,2	5,4

➤ Medição dos perfis geométricos dos cordões de solda.

Cada cordão de solda (de aproximadamente 150 mm de comprimento) foi cortado no sentido transversal em duas posições. Tomou-se o cuidado de descartar 30 mm do início e do final dos cordões. Sendo assim, para cada condição de ensaio, apresentada na Tabela 6.1, duas

amostras das seções transversais dos cordões de solda foram preparadas para as medições. As amostras foram lixadas (até a lixa de 600 mesh) e atacadas com uma solução de nital a 3%, para revelação dos perfis de penetração. Realizou-se a medição das variáveis de resposta (perfil geométrico do cordão de solda) conforme o procedimento descrito no Capítulo 3 (item 3.7 – Metodologia de medição das características geométricas dos depósitos).

## 6.2.2 Etapa 2 - Soldagem sobre chapas na posição sobrecabeça

### 6.2.2.1 Definição dos fatores de entrada (variáveis independentes)

Os resultados encontrados no Capítulo 5 apontaram no sentido de que a defasagem nos pulsos de corrente poderia modificar o perfil de penetração das soldas, o que mostraria a relevância dessa variável para a soldagem MIG/MAG-PDAPI. Entretanto, os resultados encontrados naquele capítulo não permitem afirmar que a implementação dessa variável no processo seja uma condição essencial para o seu desempenho. Nessa etapa do trabalho, visou-se a comparação entre as soldagens realizadas com e sem defasagem nos pulsos de corrente.

Para execução desses ensaios, apenas um fator - defasagem nos pulsos de corrente – foi analisado. Três níveis de variação foram selecionados:

- Nível 1 – pulsos defasados - Df (ver Figura 6.3 a);
- Nível 2 – pulsos em fase – F (ver Figura 6.3 b);
- Nível 3 – pulsos aleatórios - Al. Não há controle sobre os instantes de pulsação das correntes de ambos os arcos voltaicos.

Em ensaios prévios, realizados na posição plana, com as mesmas condições de pulsação de corrente descritas pelos três níveis apresentados, não se verificaram diferenças marcantes entre os cordões de solda executados. A largura e o reforço dos cordões foram medidos e as diferenças não eram estatisticamente significativas. Em uma inspeção visual não se detectou a presença de defeitos, e a quantidade de salpicos sobre as chapas foi baixa em todas as condições ensaiadas. Diante desses resultados, decidiu-se por realizar esses testes na posição sobrecabeça. Esperava-se que, nessa posição, desfavorável em relação à plana para a realização das soldagens, as diferenças entre as soldas aparecessem mais nitidamente.

### 6.2.2.2 Definição das variáveis de resposta

Nesses ensaios, procurou-se simular uma soldagem de revestimento. Para cada condição de pulsação da corrente foram feitas duas camadas sobrepostas de material soldado. Acreditava-se que essa operação de soldagem poderia proporcionar uma melhor avaliação do acabamento superficial dos cordões. A inspeção das soldas foi feita visualmente e por intermédio de ensaios com líquido penetrante.

O desvio-padrão da tensão, nos períodos de pulso e de base da corrente, foi adotado como indicador do comportamento de oscilação dos arcos e, considerado nesses ensaios, como a variável de resposta do experimento para efetuar a análise estatística.

### 6.2.2.3 Ensaios experimentais

- Bancada de equipamentos e materiais utilizados.

O robô, cujas características operacionais foram relatadas no Capítulo 3, foi utilizado nesses ensaios. A repetitividade nos deslocamentos e nos posicionamentos das tochas proporcionaram mais confiabilidade aos testes executados. Os ensaios foram feitos sobre chapas de aço baixo carbono da classe ABNT 1010, que foram cortadas nas dimensões de 12,5X200X250 mm e esmerilhadas para remoção da camada de óxido. Os arames eletrodos usados eram da classe ER70S-6 com diâmetro de 1,0 mm de espessura. Como gás de proteção empregou-se uma mistura com 96% de Ar e 4% de CO<sub>2</sub> a uma vazão de 17 l/min.

- Procedimento experimental

Para cada um dos três níveis do fator defasagem, descritos no subitem 6.2.2.1, executaram-se dois procedimentos similares de soldagem. O procedimento consistiu em confeccionar duas camadas sobrepostas de cordões de solda sobre as chapas de aço carbono. Cada camada era composta por sete cordões igualmente espaçados. A distância entre cordões foi definida previamente e correspondia aproximadamente à metade da largura de um cordão (8 mm).

As soldagens foram feitas na posição sobrecabeça em um plano inclinado a 45° com o plano horizontal. O sentido de deslocamento da soldagem foi vertical descendente com os eletrodos posicionado um ao lado do outro (sentido “LD” da Figura 6.1).

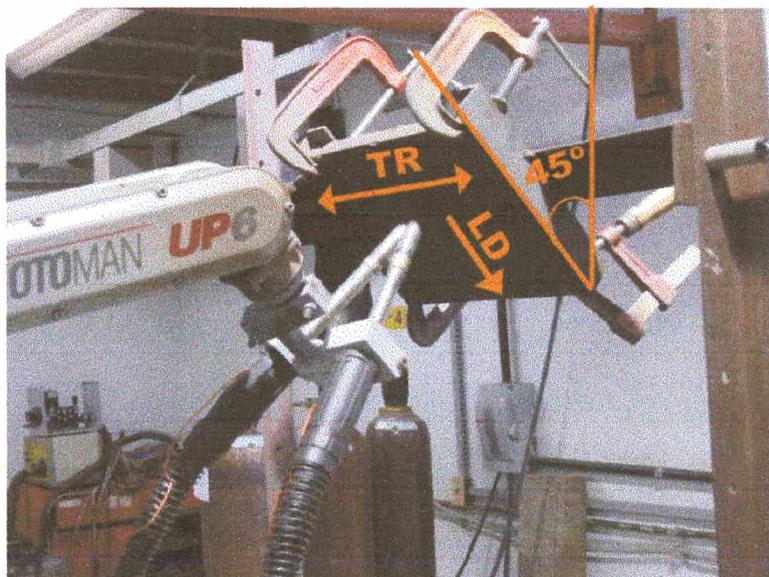


Figura 6.1 – Foto ilustrativa da posição e sentido de deslocamento das tochas.

O sistema de aquisição de dados apresentado no Capítulo 3 foi empregado nesses ensaios para adquirir sinais de ambos os arcos voltaicos. Foram feitas quatro aquisições de sinais para cada nível do fator defasagem (período de duração de uma aquisição foi de 5s). Os sinais foram adquiridos nos primeiros cordões depositados sobre as chapas.

Manteve-se a distância bico de contato peça em 17 mm, e os comprimentos dos arcos foram monitorados em torno de 5 mm. Como gás de proteção empregou-se uma mistura gasosa composta por 96 % de Ar e 4% CO<sub>2</sub> a uma vazão de 17 l/min. A Tabela 6.2 mostra as condições de soldagem ajustadas para a realização das soldas. Os parâmetros de pulso da corrente foram os mesmos empregados nos ensaios anteriores para arames de 1,0 mm de diâmetro da classe ER 70S-6 e uma corrente média de 120 A.

Tabela 6.2 - Condições de soldagem empregadas nos experimentos.

Im/aramé (A)	DF/Td (ms)	vs (cm/min)	Va (m/min)	
			Arame 1	Arame 2
120	Df/10,2	40	5,1	4,9
120	F/0,01	40	5,1	4,9
120	Al	40	5,1	4,9

### 6.2.3 Resultados experimentais e Análise estatística

#### 6.2.3.1 Etapa 1 – Soldagem de deposição sobre chapas na posição plana

Os resultados obtidos nos ensaios dessa etapa podem ser visualizados na Tabela 6.3. São apresentados os valores medidos das características geométricas dos cordões.

Tabela 6.3 - Valores medidos dos perfis geométricos dos cordões

Im/aramé (A)	DF.	R/L	D(%);	PLM (mm)	PC (mm)	PLM/PC
80	Df/10,2	0,18	32,0	1,25	0,30	4,17
120	MP/2,0	0,22	37,5	1,47	0,50	2,95
160	F/0,01	0,17	41,5	1,40	1,40	1,00
120	F/0,01	0,20	36,0	1,22	0,70	1,75
80	MP/2,0	0,20	30,5	1,27	0,15	8,50
160	Df/10,2	0,19	39,0	1,57	0,60	2,62
160	MP/2,0	0,22	35,5	1,37	0,90	1,53
80	F/0,01	0,22	29,0	1,10	0,80	1,37
120	Df/10,2	0,18	35,5	1,45	0,30	4,83
80	Df/10,2	0,16	40,5	1,27	0,35	3,64
120	MP/2,0	0,20	41,0	1,67	0,70	2,39
160	F/0,01	0,18	41,0	1,57	1,40	1,12
120	F/0,01	0,19	43,0	1,22	1,35	0,91
80	MP/2,0	0,18	30,0	1,17	0,20	5,87
160	Df/10,2	0,19	42,5	1,90	0,80	2,37
160	MP/2,0	0,19	42,5	1,82	1,50	1,22
80	F/0,01	0,26	33,0	1,22	0,90	1,36
120	Df/10,2	0,19	34,5	1,32	0,40	3,31

➤ **Análise estatística – Análise de Variância.**

Análises de variâncias foram aplicadas aos resultados da Tabela 6.3 com o intuito de verificar se os fatores do experimento (defasagem nos pulsos de corrente e corrente média de soldagem) exercem efeitos sobre as características geométricas dos cordões. Os valores dos níveis de significância “ $\alpha$ ”, calculados a partir das análises feitas, estão apresentados nas tabelas seguintes. Níveis de significância menores que 0,05 (valores sublinhados e destacados em azul nas tabelas) indicam efeitos estatisticamente significativos, ou seja, há uma probabilidade de erro menor que 5% em se admitir que os fatores e/ou as interações desses estão influenciando nas variáveis de resposta analisadas.

Os níveis de significância listados na Tabela 6.4 indicam que o fator defasagem nos pulsos de corrente e a interação entre os fatores exercem influências estatisticamente significativas sobre o índice de convexidade dos cordões.

Tabela 6.4 - Efeitos dos fatores e interação sobre o índice de convexidade (R/L)

Efeitos	Nível de significância ( $\alpha$ )
Defasagem	<u>0,042</u>
Corrente média	0,551
Interação	<u>0,012</u>

O gráfico da Figura 6.2 mostra uma tendência de se formar cordões mais planos (menor índice R/L) na condição de pulsos de corrente defasados. O efeito da interação é evidente no cruzamento das curvas da Figura 6.3. Esse gráfico mostra que em níveis mais baixos de corrente média, as condições meio pulso e defasagem, nessa seqüência, apresentam tendências à formação de cordões mais planos. Em níveis mais altos (120 e 160 A), o fator corrente média de soldagem passa a predominar e o efeito da defasagem já não é significativo para a obtenção de cordões mais planos

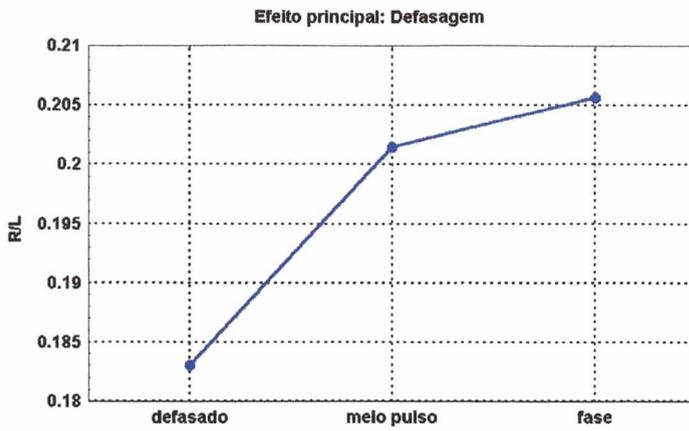


Figura 6.2 - Efeito da defasagem nos pulsos de corrente sobre o índice de convexidade dos cordões.

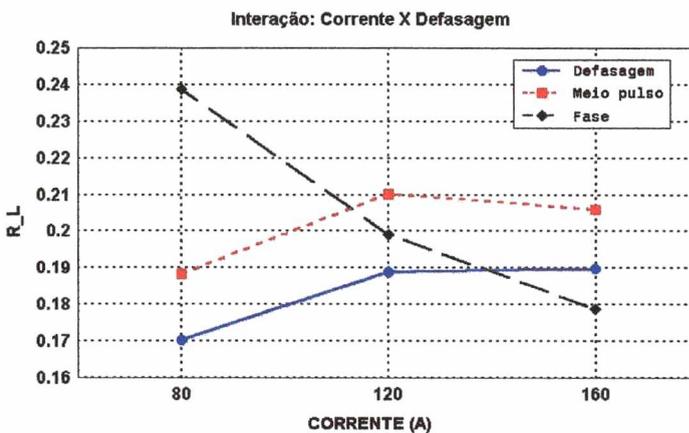


Figura 6.3 - Efeito da interação corrente média e defasagem sobre o índice de convexidade.

Os níveis de significância listados na Tabela 6.5 indicam que apenas o fator corrente média de soldagem exerce influência estatisticamente significativa sobre a diluição das soldas. O gráfico da Figura 6.4 mostra o efeito esperado desse fator. A diluição apresenta uma tendência de crescer com o aumento da corrente média.

Tabela 6.5 - Efeitos dos fatores e interação sobre a área diluída das soldas (D%).

Efeitos	Nível de significância ( $\alpha$ )
Defasagem	0,793
Corrente média	<u>0,008</u>
Interação	0,285

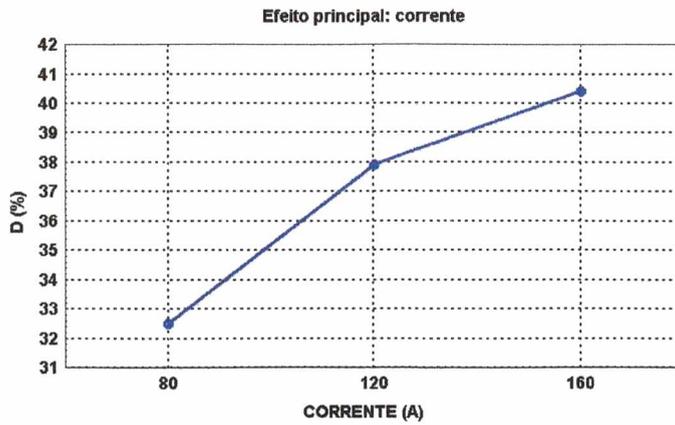


Figura 6.4 - Efeito da corrente sobre a porcentagem de área diluída.

Na Tabela 6.6 é mostrado que apenas o fator corrente média de soldagem exerce influências, estatisticamente significativas, sobre a penetração lateral dos cordões. O gráfico da Figura 6.5 ilustra o efeito. A penetração cresce com o aumento da corrente média.

Tabela 6.6 - Efeitos dos fatores e interação sobre a penetração lateral média das soldas (PLM).

Efeitos	Nível de significância ( $\alpha$ )
Defasagem	0,132
Corrente média	<u>0,005</u>
Interação	0,548

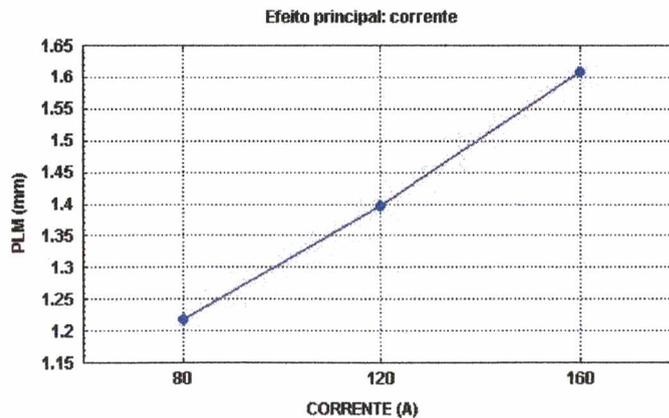


Figura 6.5 - Efeito da corrente média de soldagem sobre a penetração lateral média dos cordões.

Na Tabela 6.7 pode ser verificado que ambos os fatores influenciam na penetração no centro dos cordões. Nos gráficos das Figuras 6.6 e 6.7 podem ser vistos os efeitos dos fatores.

A interação não exerce efeitos significativos sobre a penetração, o que é comprovado pelas características similares das curvas. O aumento no nível da corrente média proporciona um crescimento da penetração na região central do cordão. Efeito similar é obtido com a mudança na condição de pulsação da corrente de pulsos defasados para pulsos em fase.

Tabela 6.7 -Efeitos dos fatores e interação sobre a penetração no centro das soldas (PC)

Efeitos	Nível de significância ( $\alpha$ )
Defasagem	<u>0,002</u>
Corrente média	<u>0,002</u>
Interação	0,386

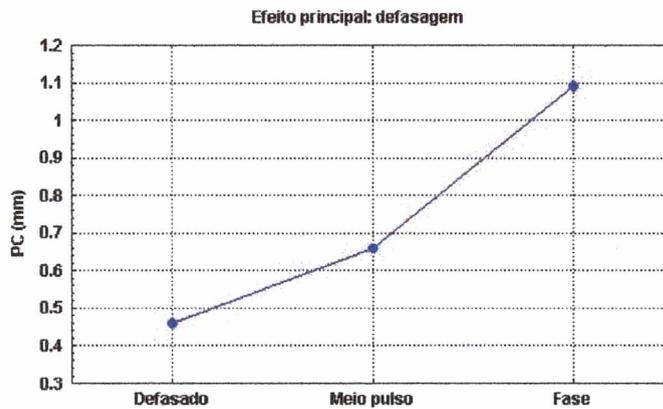


Figura 6.6 - Efeito da defasagem sobre a penetração no centro dos cordões.

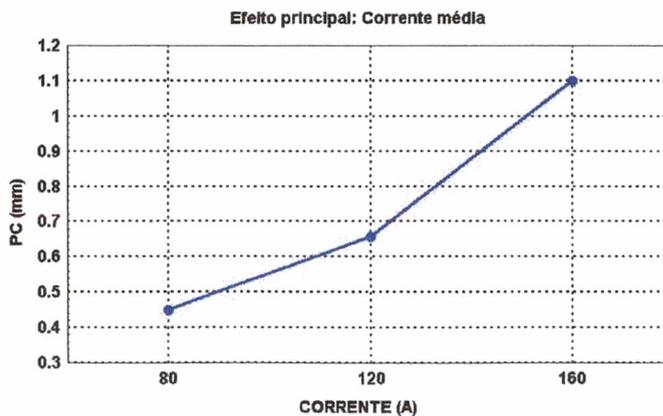


Figura 6.7 - Efeito da corrente média sobre a penetração no centro dos cordões.

Os níveis de significância listados na Tabela 6.8 indicam que tanto os fatores como as interações entre eles afetam significativamente o perfil de penetração das soldas (PLM/PC). Deve-se ressaltar que, quanto mais próximo do valor “1” for essa relação, mais uniforme é o perfil de penetração. Um aumento na relação PLM/PC, implica em uma tendência de se formar um perfil com dupla penetração (mencionado na literatura como “double finger”).

Tabela 6.8 -Efeitos dos fatores e interação sobre o perfil de penetração das soldas (PLM/PC).

Efeitos	Nível de significância ( $\alpha$ )
Defasagem	<u>0,0006</u>
Corrente média	<u>0,001</u>
Interação	<u>0,003</u>

O gráfico da Figura 6.8 mostra uma tendência de formação de perfis de penetração mais uniformes com o aumento da corrente média. O mesmo efeito é verificado para o gráfico da Figura 6.9 ao se mudar das condições de defasado e de meio pulso para a de pulsos em fase. O cruzamento das curvas da Figura 6.10 retrata a interação existente entre os fatores. Em níveis mais baixos de corrente média, o fator defasagem exerce uma influência mais significativa sobre a relação PLM/PC. A formação de perfis mais uniformes é verificada para a condição de pulsos em fase. As demais condições de pulsação da corrente apresentam uma tendência à formação de perfis com dupla penetração. Em níveis mais altos de corrente, a influência do fator defasagem nos pulsos de corrente é menos significativa. Entretanto, ainda é verificada uma tendência à formação de perfis com dupla penetração para as condições de pulsos defasados e em meio pulso.

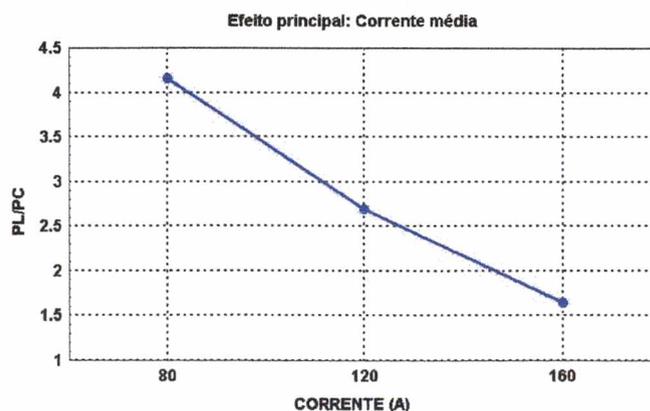


Figura 6.8 - Efeito da corrente média sobre o perfil de penetração das soldas.

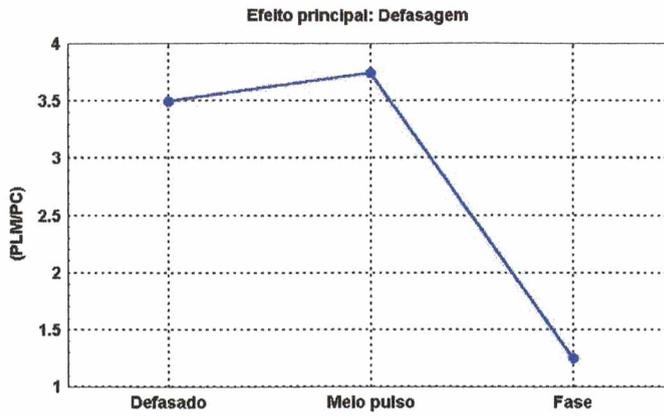


Figura 6.9 - Efeito da defasagem dos pulsos de corrente sobre o perfil de penetração das soldas.

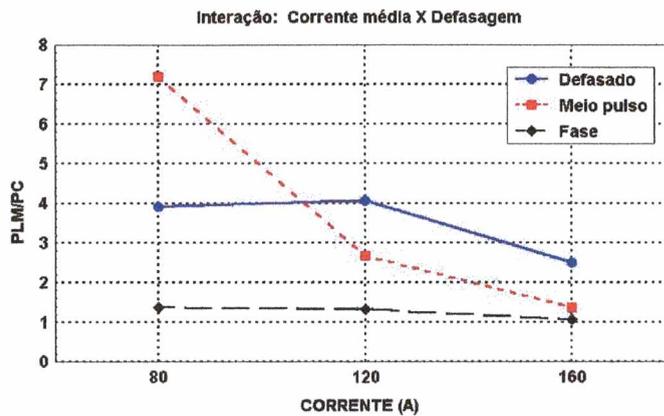


Figura 6.10 – Efeito da Interação corrente média e defasagem sobre o perfil de penetração das soldas.

Os resultados encontrados mostram que a formação de cordões mais planos é favorecida pelo uso de correntes médias mais altas e com a condição de pulsação de corrente defasada. De um modo geral, todas as variáveis de resposta, que caracterizam a penetração das soldas, aumentaram com o crescimento da corrente média. O fator defasagem nos pulsos de corrente apresentou influências significativas sobre o perfil de penetração das soldas. Uma mudança da condição de pulsos defasados para pulsos em fase proporciona aumentos na penetração no centro dos cordões. As condições de pulsação da corrente, defasada e em meio pulso, favorecem a formação de perfis com dupla penetração “double finger”. Esse efeito é mais acentuado em níveis mais baixos de corrente média. A condição de pulsação em fase apresentou um perfil de penetração mais uniforme, independentemente do nível de corrente média (Figura 6.11).

Esses resultados complementam os que foram observados no Capítulo 5. O perfil de penetração da solda pode ser modificado pela variável defasagem nos pulsos de corrente. A condição de pulsos em fase que apresentou, naquele capítulo, os valores mais altos de desvios das trajetórias das gotas em relação aos eixos dos eletrodos (desvios mais acentuados na

direção da região central da poça metálica), neste capítulo, proporcionou uma maior penetração no centro dos cordões. Uma tendência à formação do perfil de dupla penetração foi verificada no atual capítulo para as condições de pulsos defasados e em meio pulso. No capítulo anterior, essas mesmas condições de defasagem de pulsos, apresentaram menores desvios das trajetórias das gotas na direção do centro da poça fundida. Entretanto, a tendência à formação do perfil de dupla penetração pode ser reduzida pelo aumento na corrente média.

Esses resultados reforçam os obtidos por Essers & Walter (1981) e mostram que o local em que as gotas atingem a poça metálica é determinante para a penetração da solda.

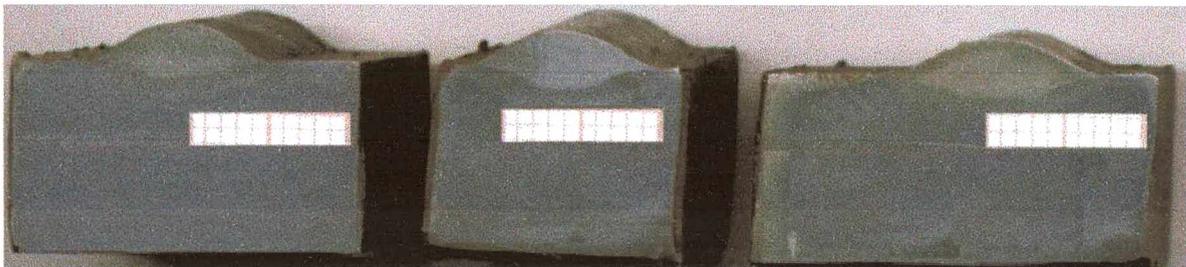


Figura 6.11 – Seções transversais de soldas realizadas com o pulsos de corrente em fase. a) 80 A; b) 120 A e c) 160 A. Escalas em mm.

### 6.2.3.2 Parte 2 - Soldagem sobre chapas na posição sobrecabeça.

#### ➤ Resultados experimentais e análise estatística

A Tabela 6.9 apresenta os valores dos desvios-padrão nos períodos de pulso e de base da corrente, calculados a partir das aquisições de sinais feitas nos ensaios.

Tabela 6.9 – Desvios-padrão das tensões nos períodos de pulso e de base da corrente.

Im/arame (A)	DF	dpUmp-a1(V)	dpUmb-a1(V)	dpUmp-a2(V)	dpUmb-a2(V)
120	Df	0,720	0,820	0,730	1,190
120	F	0,930	0,720	0,990	0,770
120	Al	1,007	0,950	0,980	0,780
120	Df	0,570	0,760	0,700	0,920
120	F	0,900	0,610	0,890	0,880
120	Al	0,770	0,760	0,720	0,880
120	Df	0,580	0,620	0,730	0,870
120	F	0,770	0,890	1,130	0,750
120	Al	0,605	0,690	0,620	1,040
120	Df	0,730	0,830	0,810	1,050
120	F	0,950	0,780	0,790	0,740
120	Al	1,050	1,009	0,940	1,001

Obs. dpUmp-a1 – desvio padrão da tensão média no período de pulso do arco1; dpUmb-a1 – desvio padrão da tensão média no período de base do arco1; dpUmp-a2 – desvio padrão da tensão média no período de pulso do arco2; dpUmb-a2 – desvio padrão da tensão média no período de base do arco2.

➤ **Análise estatística – Análise de Variância.**

Uma análise de variância foi aplicada aos resultados apresentados na Tabela 6.9 com o intuito de verificar o efeito da defasagem nos pulsos de corrente sobre as variáveis analisadas. Os valores dos níveis de significância “ $\alpha$ ”, calculados a partir das análises feitas, estão apresentados na Tabela 6.10. Níveis de significância menores que 0,05 (5%) indicam efeitos estatisticamente significativos, ou seja, que há diferença nos valores médios de pelos menos duas condições de soldagem analisadas (defasagem de pulsos de corrente, pulsos em fase e pulsação aleatória). Os níveis de significância listados na Tabela 6.10 indicam que o fator defasagem nos pulsos de corrente não exerce influências estatisticamente significativas sobre os desvios padrão das tensões nos períodos de pulso e de base da corrente.

Tabela 6.10 - Efeito do fator defasagem sobre os desvios padrão das tensões nos períodos de pulso e de base da corrente. Nível de significância ( $\alpha$ ).

<b>Fator</b>	<b>dpUmp-a1(V)</b>	<b>dpUmb-a1(V)</b>	<b>dpUmp-a2(V)</b>	<b>dpUmb-a2(V)</b>
<b>defasagem</b>	0,076	0,460	0,137	0,060

Nas Figuras 6.12 **a** a 6.12 **d** são apresentados os gráficos de dispersão dos valores calculados para os desvios padrão das tensões nos períodos de pulso e de base da corrente (6.12 **a** e 6.12 **b** para o arco 1 e 6.12 **c** e 6.12 **d** para o 2). As áreas limitadas pelos retângulos indicam a variabilidade dos valores calculados para os desvios padrão das tensões (dispersão de  $\pm 1$ \*desvio-padrão). As áreas maiores, limitadas pelas linhas horizontais finas, demarcam os intervalos de confiança para os desvios padrão das tensões ( $1,96$ \*desvio padrão - 95%). Ou seja, pode-se admitir com uma probabilidade estatística de 95% que os valores dos desvios-padrão das tensões estão dentro das faixas limitadas por essas linhas horizontais. Os pontos nos interiores dos retângulos indicam os valores médios calculados para os desvios padrão das tensões.

Podem ser verificadas nas Figuras 6.12 **a**, 6.12 **b** e 6.12 **c** que as dispersões dos valores calculados para os desvios-padrão das tensões são maiores para a condição aleatória. Na Figura 6.12 **d** (período de base do arco 2), a dispersão para a condição de pulsos defasados supera as demais.

Nos períodos de pulso da corrente pode observar-se uma tendência de aumento nos valores médios dos desvios-padrão das tensões ao se mudar da condição de pulsos defasados para pulsos em fase (Figuras 6.12 **a** e 6.12 **c**). O efeito inverso é verificado para o período de base da corrente (Figuras 6.12 **b** e 6.12 **d**), pois pode-se observar que os valores médios dos desvios-padrão tendem a diminuir ao se passar da condição de pulsos defasados para pulsos

em fase (mais acentuado no gráfico da Figura 6.12 **d**). Outro aspecto a ser salientado é que, esses efeitos, descritos anteriormente, se reproduzem nas faixas de dispersão do arco 2, ou seja, essa dispersão aumenta na Figura 6.12 **c**, e reduz na 6.12 **d**, ao se passar da condição de pulsos defasados para pulsos em fase. Os oscilogramas das Figuras 6.13 e 6.14 auxiliam na explicação desses resultados.

Na Figura 6.13 **a** são mostradas as curvas de tensões de ambos os arcos, que estão com os pulsos de corrente defasados. Na Figura 6.13 **b**, em uma escala reduzida, é apresentada parte do mesmo oscilograma. As Figuras 6.13 **c**, 6.13 **d**, 6.13 **e** e 6.13 **f** são curvas obtidas dos arcos sobre as mesmas condições de soldagem, porém com pulsos em fase e na condição aleatória. A uniformidade das curvas e a repetição nas características dos sinais retratam o comportamento estável dos arcos voltaicos, independentemente da condição de pulsação. Nos oscilogramas da Figura 6.13 **b**, as setas apontam as variações nos sinais de tensão do arco que está no período de base da corrente, no mesmo instante em que o outro arco está no período de pulso. Essas flutuações nos sinais de tensão explicam os valores mais elevados dos desvios-padrão das tensões no período de base da corrente, obtidos para a condição de pulsos defasados

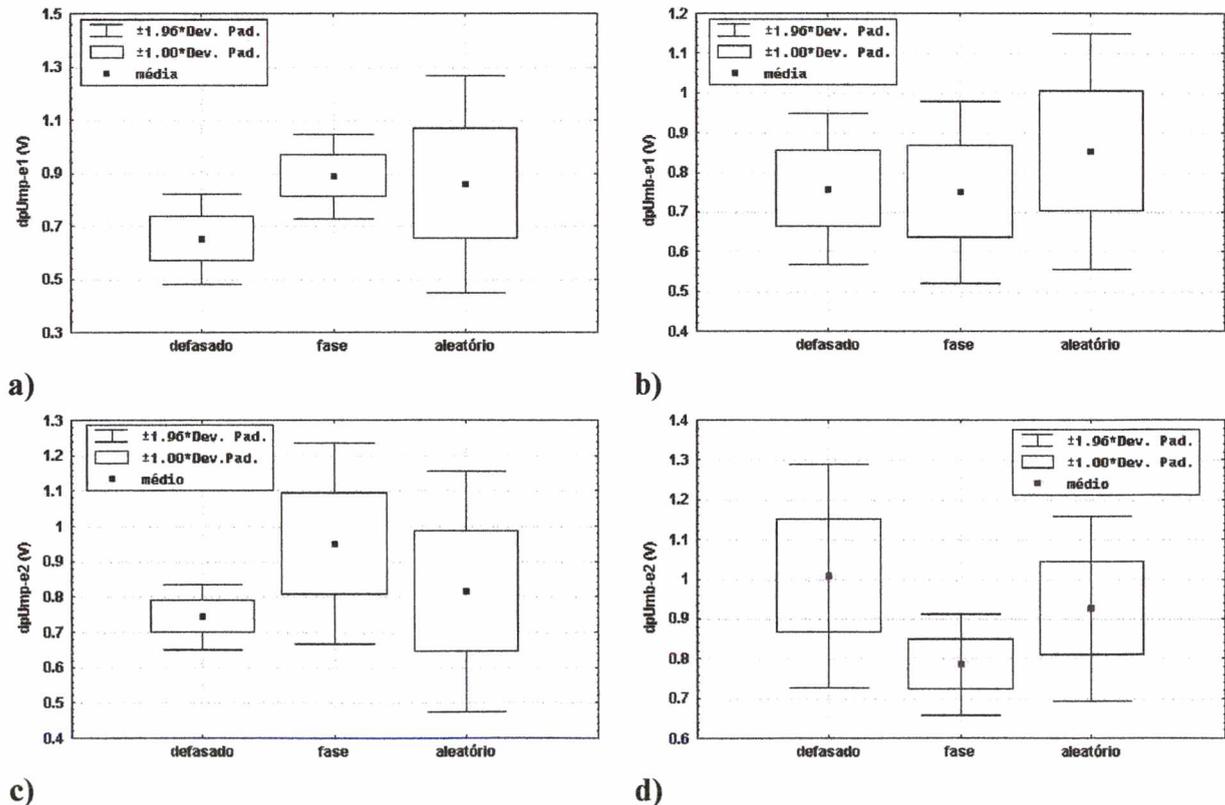


Figura 6. 12 – Gráficos de dispersão dos valores dos desvios-padrão das tensões nos períodos de pulso e de base da corrente. **a** - Desvio padrão da tensão no período de pulso do arco 1; **b** - Desvio padrão da tensão no período de base do arco 1; **c** - Desvio padrão da tensão no período de pulso do arco 2; **d** - Desvio-padrão da tensão no período de base do arco 2.

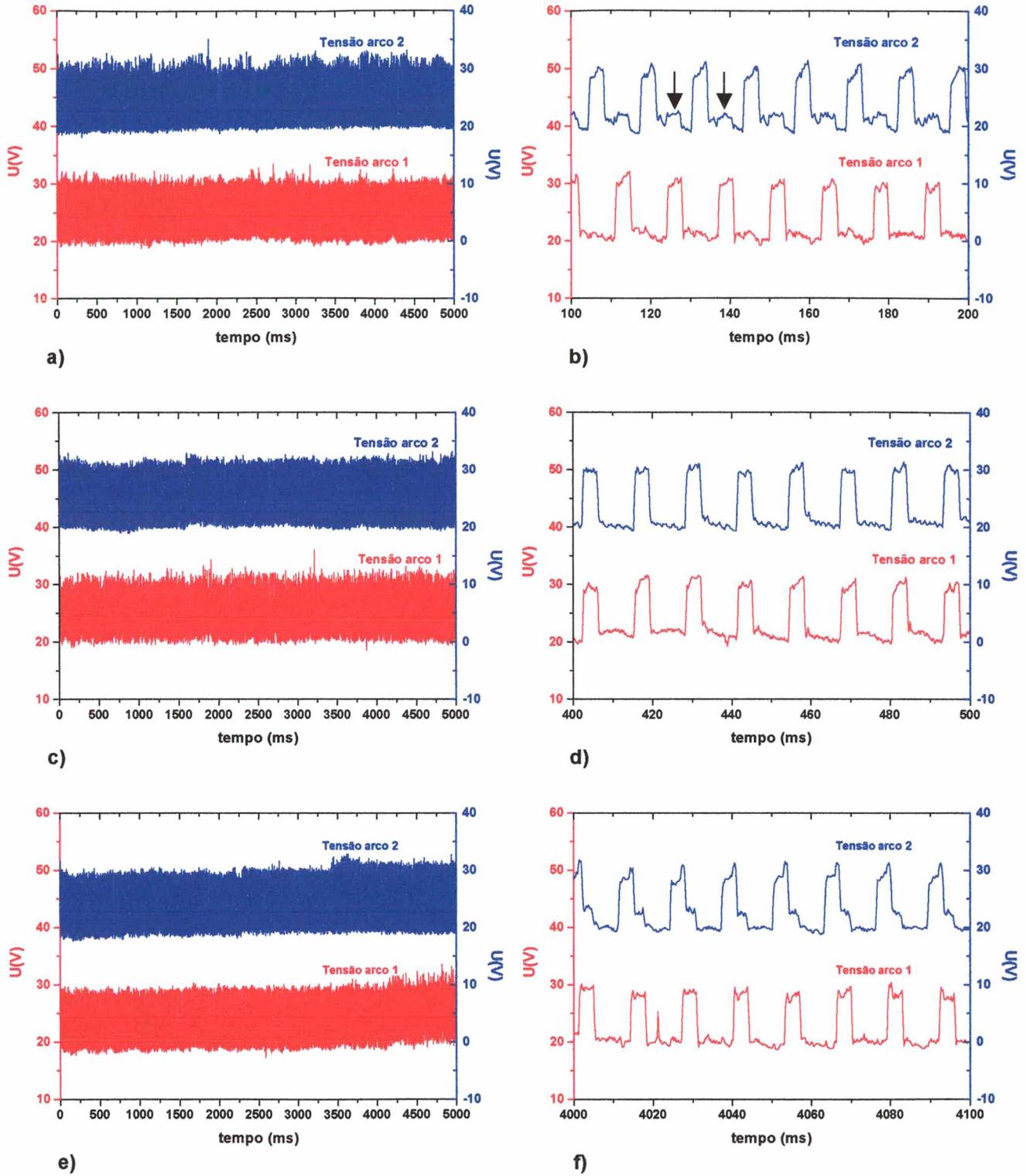


Figura 6.13 - Oscilogramas de tensões dos arcos voltaicos para uma corrente média de 120 A/aramé. a e b - pulsos de corrente defasados; c e d - pulsos em fase; e e f pulsação aleatória da corrente.

A seqüência de imagens da Figura 6.14 foi extraída de uma filmagem feita sem o uso do filtro da luz de arco e é usada nesse momento para elucidar os resultados.

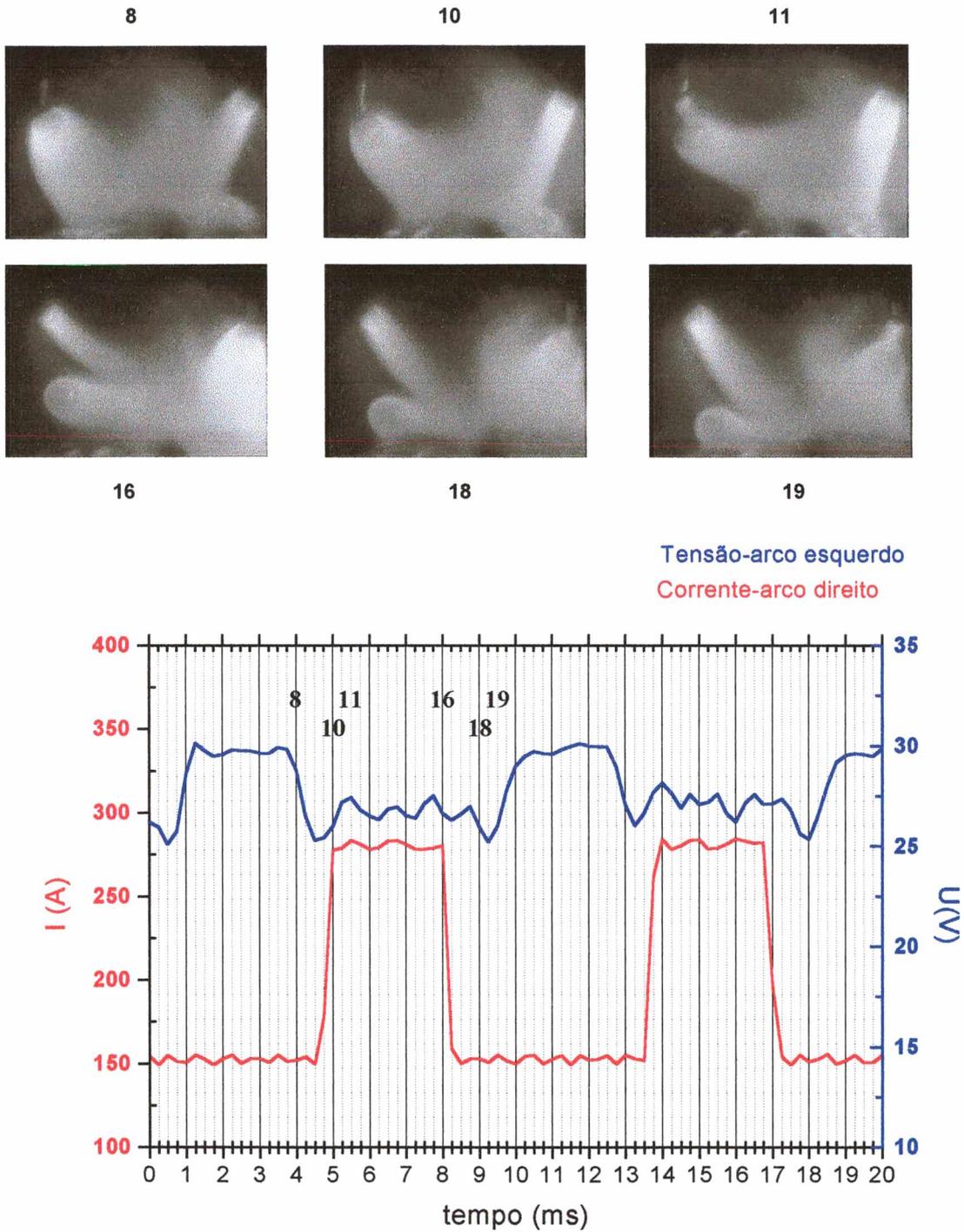


Figura 6.14 – Seqüência de imagens mostrando as deflexões dos arcos. Por intermédio do sincronismo dos sinais, visualiza-se o efeito da variação da corrente do arco direito sobre a oscilação da tensão do arco esquerdo.

Os oscilogramas mostram o sincronismo entre os pulsos de corrente do arco da direita e o efeito sobre a tensão do arco esquerdo. Os instantes de cada quadro podem ser vistos nos oscilogramas. A perturbação no sinal de tensão do arco que está no período de base da corrente (arco esquerdo) se deve à sua deflexão sofrida durante o período de pulso do outro arco (arco direito). Essa deflexão é causada pelo aumento de intensidade da força de interação eletromagnética que age sobre o arco esquerdo (veja subitem 5.2.6). Pode ser verificado no oscilograma da Figura 6.13 **b** que esse efeito é mais acentuado para o arco 2, o que explica também a faixa mais extensa de dispersão dos valores dos desvios padrão na Figura 6.12 **d**.

➤ Avaliação qualitativa das soldas.

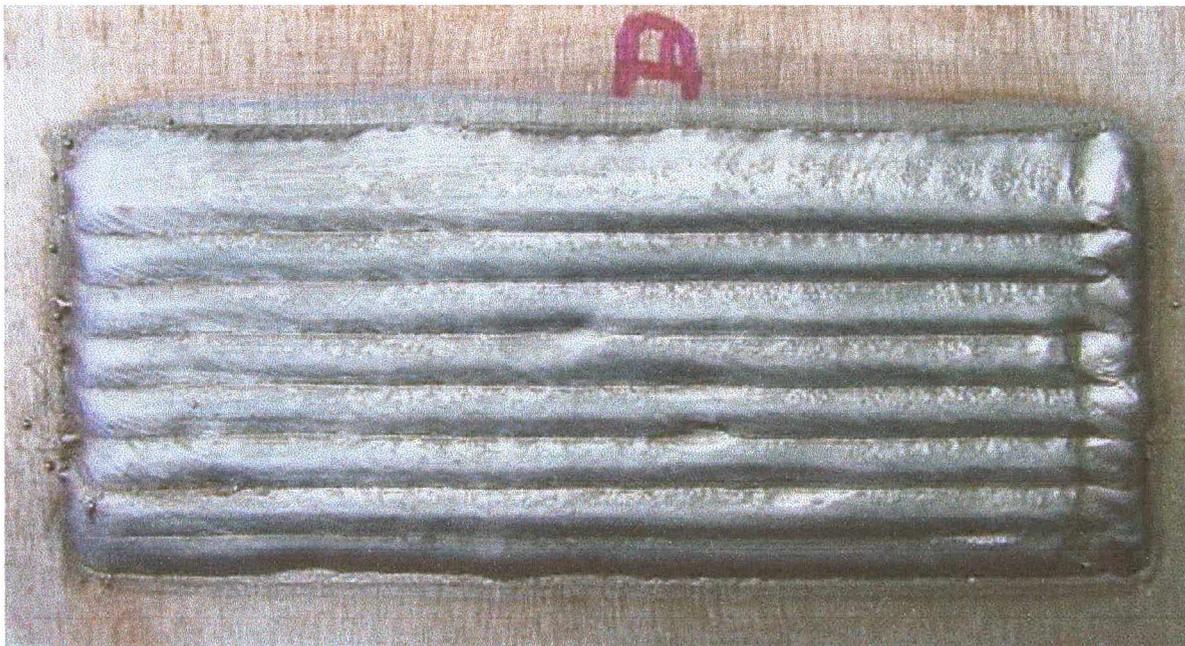
A avaliação do acabamento das soldas foi feita visualmente. As fotos das Figuras 6.15 a 6.17 mostram as camadas de material depositadas sobre as chapas de aço carbono. São apresentadas duas chapas para cada condição de pulso analisada (apenas a primeira camada de material depositada foi fotografada). Nota-se que o acabamento superficial, considerando-se a planicidade dos cordões foi similar entre as três condições analisadas. Com respeito aos salpicos, percebem-se alguns sobre a chapa soldada com os pulsos de corrente em fase, no início e no final da camada. Entretanto, as condições de pulsação aleatória e defasada apresentaram baixos índices de salpicos. Observa-se que defeitos entre cordões ocorreram em algumas chapas. Pelo fato de não se repetirem com mais intensidade para uma condição específica de pulsação da corrente, acredita-se que esses defeitos tenham ocorrido devido ao ajuste não apropriado da distância entre cordões ou devido a alguma interrupção na alimentação dos arames. Isso mostra que uma provável oscilação mais acentuada dos arcos na condição de pulsação aleatória (apontada pela dispersão dos desvios-padrão das tensões) não implicou (em uma análise visual) num menor acabamento superficial dos cordões.

As fotos das Figuras 6.18 a 6.20 mostram o resultado do ensaio feito com líquido penetrante nas mesmas chapas soldadas. Como pode ser visto, em todas as chapas ensaiadas, não se detectou a presença de poros e trincas sobre as camadas de material soldado.

As fotos das Figuras 6.21 a 6.23 apresentam o perfil de penetração das mesmas chapas soldadas. As chapas foram cortadas em suas seções transversais e preparadas para análise de metalografia. Pode ser verificado que os perfis apresentaram características geométricas similares para as três condições analisadas.



a)



b)

Figura 6.15 a) e b) – Fotos das camadas depositadas na condição de pulsos de corrente defasados. Corrente média de 120 A/arame.



a)



b)

Figura 6.16 - a) e b) - Fotos das camadas depositadas na condição de pulsos de corrente em fase. Corrente média de 120 A/arame.



a)



b)

Figura 6.17 - a) e b) - Fotos das camadas depositadas na condição de pulsos aleatórios. Corrente média de 120 A/aramé.

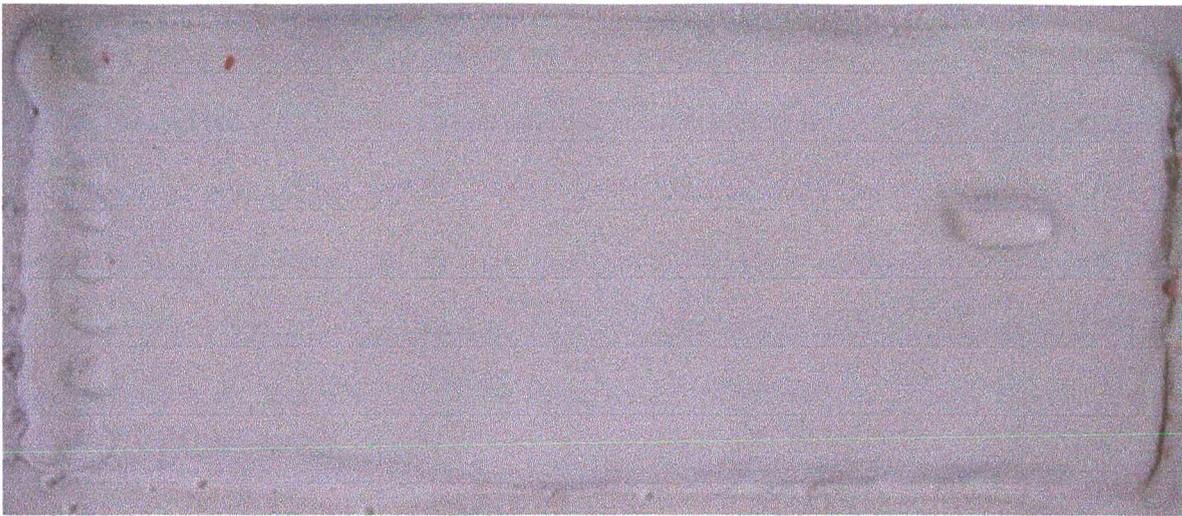


a)

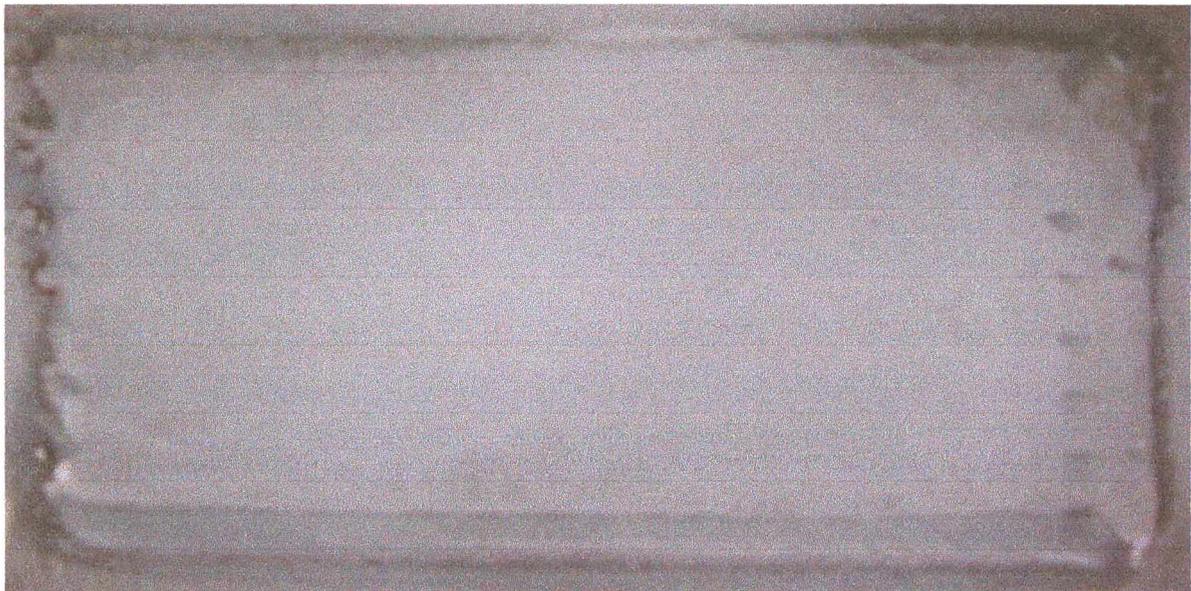


b)

Figura 6.18 - a) e b) – Resultados do ensaio com líquido penetrante feito sobre as chapas soldadas na condição de pulsos defasados.

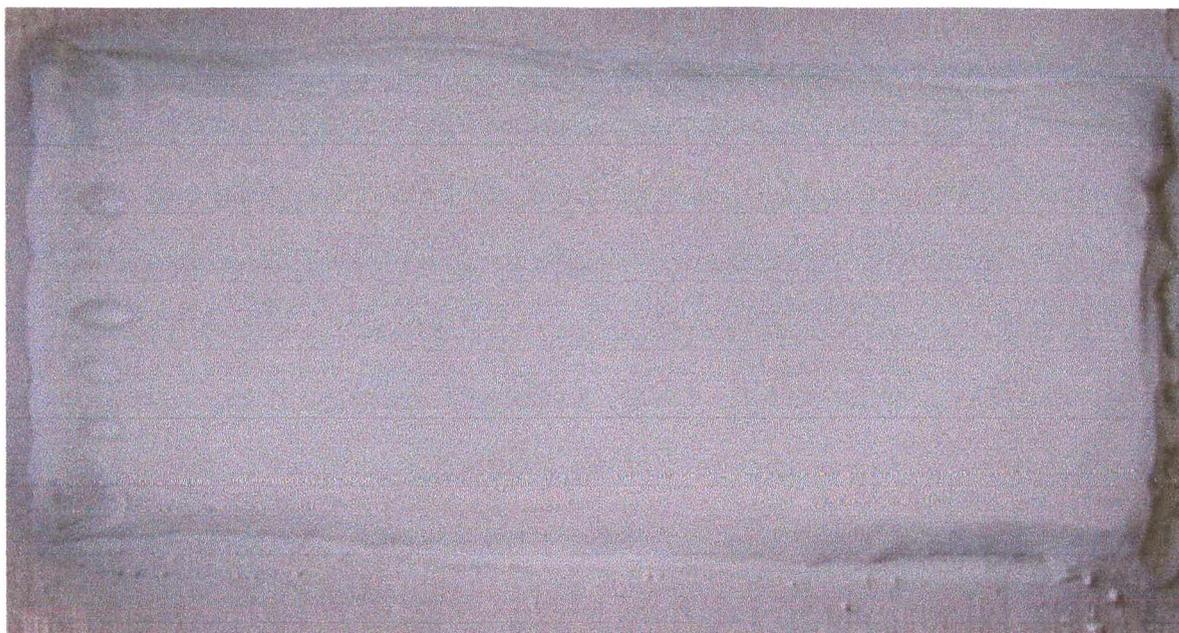


**a)**



**b)**

Figura 6.19 - a) e b) - Resultados do ensaio com líquido penetrante feito sobre as chapas soldadas na condição de pulsos em fase.



a)



b)

Figura 6.20 - a) e b) - Resultados do ensaio com líquido penetrante feito sobre as chapas soldadas na condição de pulsos aleatórios.



a)



b)

Figura 6.21 - a) e b) – Características do perfil de penetração das camadas depositadas na condição de pulsos defasados. Escala em milímetros. Cortes das seções transversais dos corpos de prova.



a)



b)

Figura 6.22 - a) e b) - Características do perfil de penetração das camadas depositadas na condição de pulsos em fase. Escala em milímetros.



a)



b)

Figura 6.23 - a) e b) - Características do perfil de penetração das camadas depositadas na condição de pulsos aleatórios. Escala em milímetros.

### 6.3 Considerações finais

Quanto aos perfis dos cordões de solda, os resultados indicaram uma tendência de se tornarem mais planos com o uso de correntes médias altas e os pulsos de corrente defasados. Entretanto, essa condição de pulsação resultou em um perfil de dupla penetração “double finger”, principalmente em níveis mais baixos de corrente média. A pulsação em fase proporcionou um perfil de penetração mais uniforme, independentemente do nível de corrente média de soldagem. A análise de variância feita sobre a diluição dos cordões de solda mostrou que essa variável não é influenciada estatisticamente pela defasagem nos pulsos de corrente.

Quanto às soldagens de revestimento, a condição de pulsação aleatória da corrente apresentou uma maior dispersão dos valores calculados para os desvios-padrão das tensões nos períodos de pulso e de base da corrente. Esse resultado retrata uma oscilação de arco maior para essa condição de soldagem. A condição de pulsos defasados resultou, para os períodos de base da corrente, numa tendência a se obter valores médios mais altos de desvio padrão, quando comparada à condição de pulsos em fase (Figura 6.12 b e mais acentuado na

Figura 6.12 d). Por outro lado, a pulsação em fase resultou em valores mais altos de desvios-padrão para os períodos de pulso da corrente. Entretanto, os efeitos desses comportamentos não alteraram significativamente as características geométricas dos cordões de solda e o número de defeitos sobre os depósitos.

O estudo efetuado sobre a influência da defasagem nos pulsos de corrente para o processo MIG/MAG-PDAPI mostrou que esse recurso permite modificar o perfil geométrico dos cordões de solda. Essa flexibilidade é notória em aplicações nas quais os eletrodos são posicionados um ao lado do outro em relação ao sentido de deslocamento da soldagem. Entretanto, nas condições em que foram realizados os ensaios nesse capítulo, a tecnologia da defasagem nos pulsos de corrente não mostrou ser essencial para a operacionalização do processo. Isso foi confirmado pelos os resultados satisfatórios alcançados com a condição de pulsação aleatória da corrente entre os dois arcos, considerando-se o acabamento superficial dos depósitos realizados na posição sobrecabeça.

## **CAPÍTULO 7**

### **ESTUDO DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO**

#### **7.1 Introdução**

Nos Capítulos 5 e 6 foram estudados os efeitos que a variável defasagem nos pulsos de corrente exerce sobre as características geométricas dos depósitos e sobre o comportamento dos arcos voltaicos. Nesse capítulo, o estudo se direciona no sentido de se verificar os efeitos das variáveis distância e ângulo entre os eletrodos, corrente média, defasagem dos pulsos de corrente e comprimento dos arcos voltaicos sobre as características geométricas dos depósitos. As soldagens foram realizadas com simples deposição de material sobre chapas na posição plana. Optou-se por essa condição de soldagem pelos seguintes motivos: 1) apresenta menor custo e tempo de preparação dos ensaios em relação às soldagens em chanfros; 2) pretende-se aplicar o processo MIG/MAG–PDAPI em operações de revestimento, as quais se caracterizam pela deposição de material sobre superfícies. Esse assunto será tratado no próximo capítulo.

#### **7.2 Metodologia experimental**

Devido ao número elevado de variáveis a serem analisadas, dividiram-se os ensaios em etapas. Nas etapas 1 e 2, os efeitos da distância e do ângulo entre os eletrodos sobre o perfil geométrico dos cordões de solda foram analisados separadamente.

Na etapa 3, as demais variáveis citadas no item 7.1 foram analisadas. Iniciou-se o estudo com a definição dos fatores de entrada e os seus níveis de variação. Na seqüência, elaborou-se um projeto de execução dos ensaios. Após a execução dos testes, os cordões foram preparados para as medições das suas características geométricas. Por fim, uma análise de correlação entre variáveis foi aplicada aos resultados.

#### **7.3 Bancada de ensaios e materiais**

A bancada utilizada para a realização dos ensaios era constituída dos seguintes equipamentos e sistemas de medição:

- a) duas fontes de soldagem (MTE DIGITEC 450);
- b) sistema de deslocamento da soldagem (TARTÍLOPE V1);
- c) duas tochas robô;
- d) suportes de fixação das tochas;
- e) sistema de medição das velocidades de arame;

- f) sistema de medição das grandezas elétricas (tensão e corrente);
- g) sistema de aquisição de dados.

Esses equipamentos e sistemas de medição foram caracterizados no Capítulo 3. As soldagens foram feitas sobre chapas de aço baixo carbono da classe ABNT 1010, que foram cortadas nas dimensões de 12,5X100X200 mm e esmerilhadas para remoção da camada de óxido. Os arames eletrodos usados eram da classe ER70S-6 com diâmetros de 1,0 e de 1,2 mm de espessura. Como gás de proteção empregou-se uma mistura com 96% de Ar e 4% de CO<sub>2</sub> a uma vazão média de 17 l/min.

#### 7.4 Definição das variáveis de saída

As características geométricas do perfil do cordão, apresentadas no Capítulo 3 (item 3.6 - Definição das variáveis de resposta dos experimentos), foram utilizadas para efetuar as comparações entre as diferentes condições de soldagem empregadas nesse capítulo. São elas: índice de convexidade ( $CV = R/L$ ); porcentagem de área diluída (D%); penetração média nas laterais do cordão ( $PLM = (P11+P12)/2$ ); penetração no centro do cordão (PC) e a relação que define o perfil da penetração (PLM/PC).

Cada cordão de solda executado, de aproximadamente 150 mm de comprimento, foi cortado no sentido transversal em duas posições. Tomou-se o cuidado de descartar 30 mm do início e do final dos cordões. Sendo assim, duas amostras das seções transversais de cada condição de soldagem ensaiada foram preparadas para as medições. As amostras foram lixadas (até a lixa de 600 mesh) e atacadas com uma solução de nital a 3%, para revelação dos perfis de penetração. Realizou-se a medição das variáveis de resposta (características geométricas do cordão de solda) conforme o procedimento descrito no Capítulo 3 (item 3.7 - Metodologia de medição das características geométricas dos depósitos).

#### 7.5 Ensaio experimentais

##### 7.5.1 Etapa 1 – Efeito da variável ângulo entre as tochas sobre as características geométricas dos depósitos

O objetivo dos ensaios foi verificar quais os efeitos que o ângulo entre as tochas exerce sobre as características geométricas dos depósitos. As soldagens foram realizadas utilizando-se os dois suportes de fixação de tochas apresentados no Capítulo 3 subitem 3.3.2 ( $\phi = 13^\circ$  e  $30^\circ$ ).

7.5.1.1 Procedimento experimental

As condições de soldagem em que foram conduzidos estes ensaios estão apresentados na Tabela 7.1. Os ensaios foram feitos com as tochas posicionadas “lado a lado” e, para cada condição, soldaram-se dois cordões.

Tabela 7. 1 - Condições de soldagem em que foram realizados os ensaios.

Im	Ip	tp	Ib	tb	Df	$\phi$	DBCP	Vs	da	Va1	Va2	ca	d <sub>e</sub>
(A)	(A)	(ms)	(A)	(ms)	(ms)	(°)	(mm)	(cm/min)	(mm)	(m/min)	(m/min)	(mm)	(mm)
100	240	4,1	46	10,6	7,4	13	16	30	8	4,5	4,9	≈ 5	1,0
100	240	4,1	46	10,6	7,4	30	16	30	8	4,5	4,9	≈ 5	1,0

**da – distância entre arames; ca – comprimento dos arcos; d<sub>e</sub> – diâmetro do eletrodo**

7.5.2 Etapa 2 - Efeitos da variável distância entre arames sobre as características geométricas dos depósitos.

Esses ensaios tinham por objetivo verificar os efeitos que a mudança na distância entre os eletrodos (Figura 7.1) exerce sobre o perfil geométrico dos cordões de solda.

**TOCHAS DE SOLDAGEM**

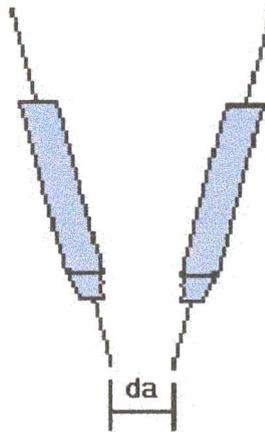


Figura 7. 1 – Distância “da” entre os arames.

7.5.2.1 Procedimento experimental

O suporte de fixação com um ângulo de 30° entre as tochas foi utilizado nos ensaios por permitir que se afastassem os eletrodos. Nesses ensaios, as tochas foram posicionadas “lado a lado” e uma única corrente média foi selecionada. A Tabela 7.2 apresenta as condições de soldagem em que foram realizados os ensaios.

Tabela 7.2 - Condições de soldagem em que foram realizados os ensaios

Im	Ip	tp	Ib	tb	Df	$\phi$	DBCP	Vs	da	Va1	Va2	ca	d <sub>e</sub>
(A)	(A)	(ms)	(A)	(ms)	(ms)	(°)	(mm)	(cm/min)	(mm)	(m/min)	(m/min)	(mm)	(mm)
160	240	4,1	113	7,0	5,6	30	16	50	6	6,4	6,0	≈ 5	1,0
160	240	4,1	113	7,0	5,6	30	16	50	7,5	6,5	6,1	≈ 5	1,0
160	240	4,1	113	7,0	5,6	30	16	50	9	6,5	6,1	≈ 5	1,0

7.5.3 Etapa 3 - Efeitos das variáveis posicionamento dos eletrodos em relação ao deslocamento da soldagem, corrente média, comprimento dos arcos e defasagem dos pulsos de corrente sobre o perfil dos cordões

O objetivo dessa etapa foi investigar os efeitos das principais variáveis do processo MIG/MAG-PDAPI sobre as características geométricas das soldas. Foram analisadas a corrente média, a posição dos arcos em relação ao sentido de deslocamento, o comprimento dos arcos e a defasagem entre os pulsos de corrente. A fim de verificar a repetitividade desses efeitos, os testes foram executados com dois eletrodos do mesmo material, mas de diâmetros diferentes (1,0 e 1,2 mm).

#### 7.5.3.1 Definição dos níveis das variáveis selecionadas

A variável corrente média foi analisada em dois níveis: 100 e 160 A/aramé. O nível superior foi selecionado com a preocupação de não se ultrapassar a corrente de transição do eletrodo de menor diâmetro.

A posição dos arcos em relação ao deslocamento da soldagem foi “lado a lado” para o nível 1 e “tandem” para o nível 2.

A defasagem entre os pulsos de corrente foi analisada em um nível (1), com os pulsos de corrente defasados, e em outro (2), com os pulsos em fase.

Os comprimentos dos arcos foram incluídos entre as variáveis a serem analisadas com o objetivo de se verificar os seus efeitos sobre o perfil e o acabamento dos depósitos, ao oscilarem entre valores toleráveis para as estabilidades dos arcos (comprimentos entre aproximadamente 5 e 8 mm).

#### 7.5.3.2 Procedimento experimental

O procedimento adotado para a execução dos ensaios baseou-se num projeto fatorial simplificado de quatro fatores a dois níveis, sem repetição, o que totalizou 8 condições de soldagem. Como os testes foram realizados em dois blocos, um com o eletrodo de 1,0 e o

outro com o de 1,2 mm, totalizaram-se 16 ensaios. A Tabela 7.3 apresenta a seqüência de experimentos executada para o eletrodo de menor diâmetro, e a tabela 7.4, para o de maior. Em cada bloco de testes, variou-se a velocidade de soldagem entre os ensaios, com o propósito de se manter o volume de material depositado na unidade de tempo aproximadamente constante. A distância bico de contato peça foi ajustada em 17 mm e a distância entre arames em 6 mm. O suporte com o ângulo  $\phi = 30^\circ$  foi empregado nestes ensaios.

Tabela 7.3 – Seqüência dos ensaios executados para o arame de 1,0 mm.

Sequen.	Im	Ip	tp	Ib	tb	Td	PE.	DF	ca	Vs	Va1	Va2
	(A/ar.)	(A)	(ms)	(A)	(ms)	(ms)			(mm)	(cm/min)	(m/min)	(m/min)
1	100	270	3,9	47	12,6	8,3	LL	Df	5	22	4,1	4,8
2	100	270	3,9	47	12,6	8,3	LL	F	8	20	3,7	4,4
3	160	270	3,9	76	5,6	4,8	LL	Df	8	34	6,1	7,4
4	160	270	3,9	76	5,6	4,8	LL	F	5	33	6,4	7,7
5	100	270	3,9	47	12,6	8,3	TD	Df	8	22	3,5	4,2
6	100	270	3,9	47	12,6	8,3	TD	F	5	22	3,9	4,7
7	160	270	3,9	76	5,6	4,8	TD	Df	5	33	6,3	7,6
8	160	270	3,9	76	5,6	4,8	TD	F	8	34	6,1	7,4

**Obs. PE. – posição dos eletrodos**

Tabela 7.4 – Seqüência dos ensaios executados para o arame de 1,2 mm.

Sequen.	Im	Ip	tp	Ib	tb	Td	PE.	DF	ca	Vs	Va1	Va2
	(A/arame)	(A)	(ms)	(A)	(ms)	(ms)			(mm)	(cm/min)	(m/min)	(m/min)
1	100	300	4,0	55	17,8	10,9	LL	Df	8	22	2,5	2,4
2	100	300	4,0	55	17,8	0,01	LL	F	5	20	2,9	2,6
3	160	300	4,0	102	9,6	6,8	LL	Df	5	34	4,3	4,4
4	160	300	4,0	102	9,6	0,01	LL	F	8	33	4,0	4,1
5	100	300	4,0	55	17,8	10,9	TD	Df	5	22	2,4	2,4
6	100	300	4,0	55	17,8	0,01	TD	F	8	22	2,3	2,3
7	160	300	4,0	102	9,6	6,8	TD	Df	8	33	3,9	3,9
8	160	300	4,0	102	9,6	0,01	TD	F	5	34	4,2	4,1

Em soldagem, a medição do comprimento do arco não é uma tarefa simples. Alguns procedimentos adotados em trabalhos científicos geram discussões, principalmente quando se pretende definir os limites dos arcos, ou seja, se eles iniciam sob a gota, no meio delas, ou em

outras regiões. A própria dimensão da poça, que é influenciada pela velocidade de soldagem, altera o comprimento do arco, e esse aspecto, muitas vezes, é desconsiderado pelos pesquisadores na definição do comprimento do arco. Quando há necessidade de se controlar de forma mais pontual esse comprimento, a filmagem de alta velocidade é uma ferramenta quase que imprescindível. Entretanto, efetuar esse controle não era o objetivo a ser tratado neste capítulo. Pretendia-se, apenas, estudar os efeitos dessa variável sobre os depósitos, quando ela se apresentava em níveis distintos de grandeza. Durante as soldagens, para se controlar os comprimentos dos arcos (que foram considerados em todos os ensaios deste trabalho como as distâncias das pontas dos eletrodos até a superfície da chapa<sup>1</sup>), foram utilizados gabaritos de 5 e 8 mm. Esses foram posicionados sobre as chapas e serviram de referência para ajustes nas velocidades de arames, para que os arcos ficassem, o mais próximo possível, dos valores estipulados.

## 7.6 Resultados dos ensaios experimentais e discussão

### 7.6.1 Etapa 1 – Efeito da variável ângulo entre as tochas sobre as características geométricas dos depósitos

Os resultados obtidos dos ensaios dessa etapa podem ser visualizados na Tabela 7.5, onde estão apresentados os valores medidos das características geométricas dos cordões.

Tabela 7.5 – Valores médios das características geométricas medidas nos cordões de solda.

	$\phi$ (°)	L (mm)	R (mm)	PC (mm)	PLM (mm)	PLM/PC	D(%)
Cordão 1	13	14,39	2,57	0,046	1,61	35,0	21,34
Cordão 2	13	14,85	2,66	0,06	1,68	28,0	21,67
Cordão 1	30	14,34	2,63	0,16	1,69	10,6	24,37
Cordão 2	30	13,72	2,69	0,15	1,82	12,1	25,10

A esses resultados foram aplicadas análises de variância. Os valores dos níveis de significância “ $\alpha$ ” estão apresentados na Tabela 7.6. Valores destacados em azul e sublinhados indicam efeitos estatisticamente significativos, ou seja, significam que há uma probabilidade de erro menor que 5% em se admitir que o fator ângulo entre tochas está influenciando as variáveis de resposta analisadas.

<sup>1</sup> As distâncias entre as pontas dos eletrodos à peça serviram como referências aos comprimentos reais dos arcos, uma vez que, conforme foi visto no Capítulo 5, no qual se pôde filmá-los, que esses arcos se declinam em direção a região central dos depósitos, portanto, são maiores que as distâncias da ponta do eletrodo à peça. A configuração em “V” da tocha também contribui para intensificar essa diferença de comprimentos.

Tabela 7.6 – Níveis de significância calculados para os efeitos dos ângulos das tochas sobre as variáveis de respostas.

Variáveis	L	R	PC	PLM	PLM/PC	D(%)
“ $\alpha$ ”	0,266	0,493	<u>0,007</u>	0,274	<u>0,027</u>	<u>0,015</u>

Os níveis de significância listados na tabela indicam que o ângulo entre as tochas exerce influência significativa em PC, em PLM/PC e em D(%). Esses efeitos podem ser vistos nos gráficos das Figuras 7.2 a 7.4. Os três gráficos mostram que tochas separadas com ângulos maiores tendem a aumentar a penetração no centro dos cordões e favorecem a formação de perfis mais uniformes, pois há uma tendência de redução na diferença de penetração entre o meio do cordão e as extremidades, e promovem aumentos na diluição das soldas.

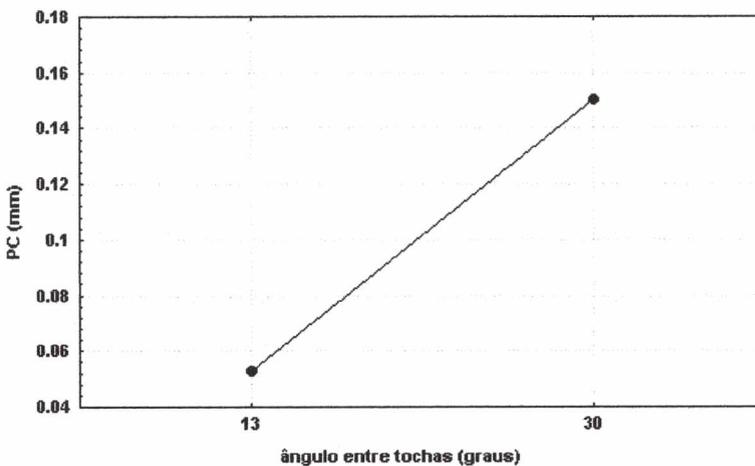


Figura 7.2 - Gráfico das penetrações no centro dos cordões em função do ângulo entre as tochas.

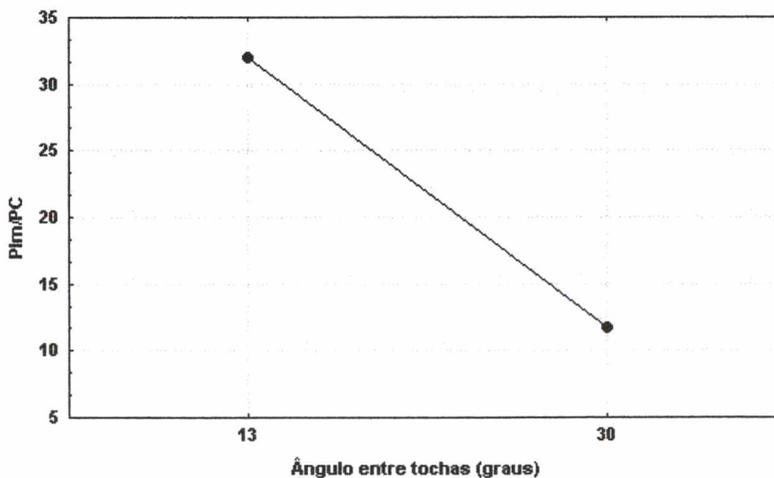


Figura 7.3 - Gráfico da variação dos perfis dos cordões em função do ângulo entre as tochas.

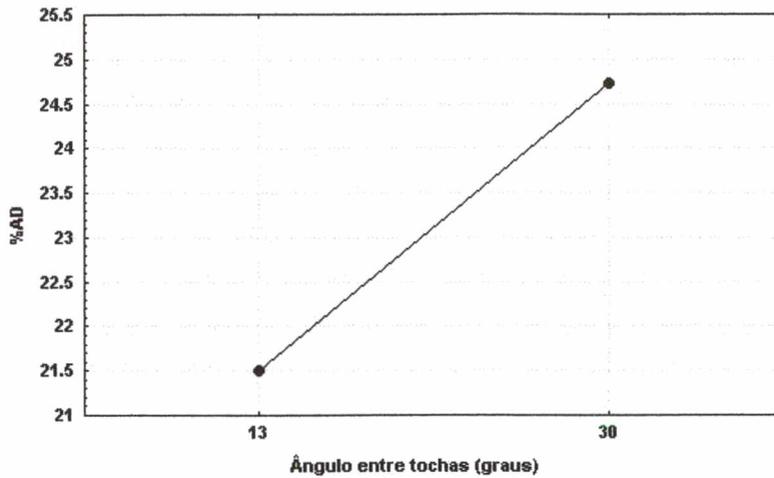


Figura 7.4 Gráfico das diluições dos cordões em função do ângulo entre as tochas.

A análise desses resultados permite afirmar que as tochas projetadas com um ângulo maior de separação entre elas favorecem a formação de perfis de penetração mais uniforme e com maior diluição.

7.6.2 Etapa 2 - Efeito da distância entre os eletrodos sobre as características geométricas das soldas

Os efeitos que a distância entre os eletrodos causam sobre o perfil geométrico dos cordões podem ser vistos no gráfico da Figura 7.5.

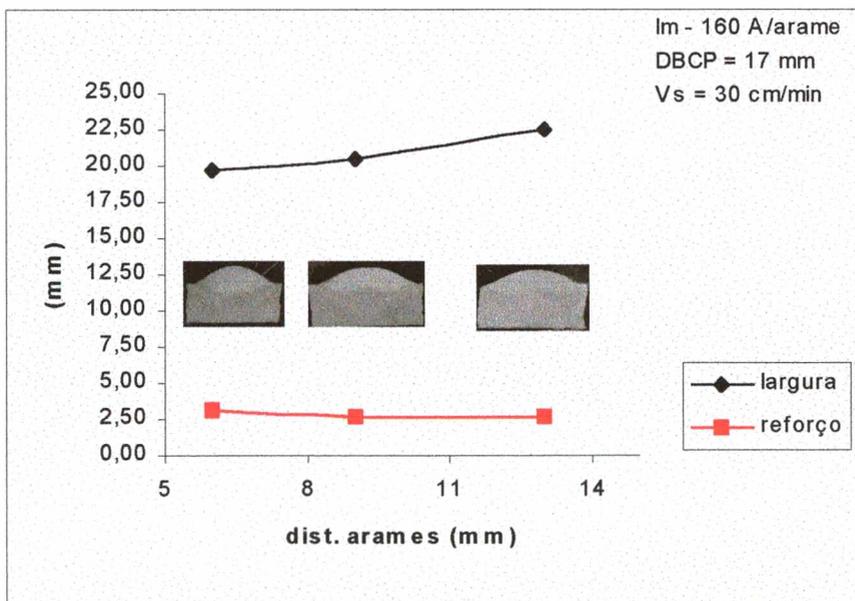


Figura 7.5 – Gráficos das variações nas larguras e nos reforços dos cordões em função da distância entre arames.

As curvas dos gráficos e os desenhos esquemáticos mostram as variações na largura, no reforço e no perfil de penetração dos depósitos. Verifica-se que para uma mesma corrente média, aumentando-se a distância entre os eletrodos, os cordões tornam-se menos convexas, mais largos e apresentam uma menor penetração no centro dos cordões (perfil característico de dupla penetração – “double finger”).

Essas mudanças nas características geométricas dos depósitos já eram esperadas e estão em concordância com os resultados apresentados por Brown et al. (1983) e por Voropay & Protsenko (2000).

### 7.6.3 Etapa 3 Efeitos das variáveis posicionamentos dos eletrodos, corrente média, comprimento dos arcos e defasagem dos pulsos de corrente sobre o perfil dos cordões

Os valores medidos das características geométricas dos depósitos estão apresentados nas Tabelas 7.7 e 7.8 para os ensaios realizados com os eletrodos de 1,0 e de 1,2 mm, respectivamente.

Tabela 7.7 Características geométricas medidas para os cordões soldados com arames de 1,0 mm.

Sequência	L (mm)	CV	PC (mm)	PLM (mm)	PLM/PC	D(%)
1	14,47	0,22	0,20	1,55	7,75	24,33
2	11,20	0,32	1,53	0,50	0,34	22,00
3	15,83	0,18	0,83	1,93	2,53	37,33
4	15,63	0,20	1,43	0,77	0,54	29,67
5	9,97	0,35	1,23	0,40	0,31	18,00
6	11,77	0,30	1,63	0,60	0,38	24,67
7	15,03	0,23	2,13	0,70	0,32	34,00
8	14,40	0,20	1,60	0,55	0,35	28,33

#### 7.6.3.1 Análise de correlação

Análises de correlação foram feitas com o intuito de determinar o grau de associação entre as variáveis analisadas e as características geométricas medidas. A Tabela 7.9 apresenta os coeficientes de correlação e os respectivos níveis de significância, para os ensaios realizados com os arames de 1,0 e de 1,2 mm. Níveis de significância menores que 0,05 indicam “correlação não zero”, ou seja, as variáveis são correlacionadas estatisticamente de forma significativa (com uma probabilidade de erro menor que 5%). Os índices destacados

em azul e sublinhados indicam quais são essas variáveis. Cabe ressaltar que, embora não tenham sido destacadas, por apresentarem probabilidades de erros acima de 5%, as variáveis PE e PLM; e Im e AD%, apresentam correlações significativas com níveis de significância 0,055 e 0,058 respectivamente.

Tabela 7.8 -Características geométricas medidas para os cordões soldados com arames de 1,2 mm.

Sequência	L (mm)	CV	PC (mm)	PLM (mm)	PLM/PC	D(%)
1	13,6	0,20	0,23	1,00	6,93	25,67
2	13,23	0,23	1,07	0,52	0,48	24,00
3	16,77	0,14	0,63	1,38	2,23	36,00
4	14,23	0,21	1,00	0,70	0,71	26,00
5	10,47	0,30	1,40	0,38	0,28	22,00
6	10,90	0,27	1,33	0,27	0,20	22,00
7	14,27	0,18	1,03	0,48	0,47	25,67
8	15,17	0,18	1,70	0,57	0,34	30,00

Tabela 7.9 Correlações entre as variáveis de entrada e as respostas dos experimentos. Coeficientes e níveis de significância (valores entre parênteses).

Variáv	d <sub>e</sub> . (mm)	L	CV	PC	PLM	PLM/PC	D(%)
PE LL⇒TD	1,0	-0,357 (0,385)	0,310 (0,455)	0,594 (0,121)	-0,601 (0,115)	-0,502 (0,205)	-0,175 (0,678)
	1,2	-0,450 (0,264)	0,398 (0,329)	<u>0,739</u> (0,036)	-0,696 (0,055)	-0,525 (0,182)	-0,346 (0,402)
Im	1,0	<u>0,808</u> (0,015)	<u>-0,805</u> (0,016)	0,319 (0,440)	0,216 (0,607)	-0,258 (0,538)	<u>0,848</u> (0,008)
	1,2	<u>0,782</u> (0,022)	<u>-0,729</u> (0,04)	0,097 (0,819)	0,354 (0,39)	-0,239 (0,568)	0,691 (0,058)
DF Df⇒F	1,0	-0,138 (0,745)	0,092 (0,829)	0,411 (0,311)	-0,521 (0,186)	-0,476 (0,233)	-0,189 (0,653)
	1,2	-0,100 (0,813)	0,176 (0,676)	0,525 (0,181)	-0,439 (0,276)	-0,474 (0,235)	-0,211 (0,616)
ca	1,0	-0,330 (0,426)	0,250 (0,558)	-0,050 (0,914)	-0,060 (0,895)	-0,280 (0,502)	-0,150 (0,728)
	1,2	-0,168 (0,690)	0,060 (0,887)	-0,350 (0,395)	-0,147 (0,729)	0,288 (0,489)	-0,365 (0,374)

Obs. LL⇒TD representa a passagem da variável PE do nível LL para o nível TD.

Df⇒F representa a passagem da variável DF do nível Df para o nível F.

Pode-se observar que em ambos os grupos de experimentos (ensaios com os arames de 1,0 e 1,2 mm), as correlações entre as variáveis apresentaram as mesmas tendências, por

exemplo, a largura dos cordões tende a aumentar, e o índice de convexidade, a reduzir, (significativamente para os dois diâmetros de eletrodos) com o crescimento da corrente média. Os coeficientes indicam que a variável comprimento dos arcos apresenta correlações pequenas com as variáveis analisadas. Entretanto, comparando entre os eletrodos, há uma inversão nos sinais dos coeficientes de correlação entre as variáveis comprimento dos arcos (ca) e perfil de penetração (PLM/PC).

### 7.6.3.2 Análise de correlação parcial

A análise de correlação parcial fornece uma visão mais clara dos efeitos individuais de cada variável independente sobre a variável de resposta, uma vez que ela mede a correlação de duas variáveis, mantendo as demais constantes. A Tabela 7.10 apresenta os coeficientes das análises de correlação parcial aplicadas aos dados das Tabelas 7.8 e 7.9.

Tabela 7.10 Coeficientes de correlação parcial entre as variáveis de entrada e as respostas dos experimentos.

Variáveis	d <sub>e</sub> (mm)	L	CV	PC	PLM	PLM/PC	D(%)
PE LL⇒TD	1,0	-0,763	0,582	0,697	-0,729	-0,633	-0,371
	1,2	-0,761	0,604	<u>0,960</u>	<u>-0,856</u>	-0,658	-0,588
Im	1,0	<u>0,937</u>	<u>-0,881</u>	0,464	0,358	-0,387	<u>0,888</u>
	1,2	<u>0,898</u>	-0,811	0,412	0,645-	-0,370	<u>0,824</u>
DF Df⇒F	1,0	-0,415	0,207	0,558	-0,678	-0,613	-0,397
	1,2	-0,253	0,318	<u>0,926</u>	-0,723	-0,620	-0,406
ca	1,0	-0,737	0,493	-0,075	-0,099	-0,415	-0,318
	1,2	-0,402	0,114	<u>-0,852</u>	-0,330	0,433	-0,609

Analisando os coeficientes, percebe-se que não houve mudanças nas tendências já observadas na análise de correlação da Tabela 7.9, no entanto, algumas correlações mais significativas são evidenciadas. São os casos das correlações de PE, de DF e de ca com PC, e de PE com PLM, para o eletrodo de 1,2 mm.

De forma semelhante à análise de correlação da Tabela 7.9, observa-se que, apesar de pequenos, os coeficientes de correlação parcial de ambos os eletrodos indicaram efeitos contrários entre as variáveis ca e PLM/PC. Esse resultado não significa que os efeitos da variável ca sobre as variáveis PLM e PC sejam diferentes para os dois diâmetros analisados. Pode-se verificar pelos coeficientes da Tabela 7.10, para os dois diâmetros de eletrodos, que tanto PC, quanto PLM tendem a diminuir com o crescimento dos comprimentos dos arcos. A

inversão nos sinais dos coeficientes significa que os perfis de penetração dos cordões soldados com os eletrodos de 1,2 mm e arcos voltaicos altos apresentaram características de dupla penetração (“double finger”) mais claras em relação aos perfis soldados nas mesmas condições com os eletrodos de 1,0 mm. Isso porque as soldagens com o eletrodo de maior diâmetro e arcos altos apresentaram uma baixa penetração no centro dos cordões, (o alto coeficiente de correlação parcial entre as variáveis  $ca$  e  $PC$  confirma esse resultado). Esses resultados concordam com os que foram observados por Ecer (1980) que estudou os efeitos de um campo magnético externo, paralelo à direção de soldagem, sobre o comportamento de arcos voltaicos no processo TIG. O autor alegou que: arcos formados a partir de eletrodos de maior diâmetro defletem menos, no entanto, são mais frios em relação aos que se formam a partir de eletrodos de diâmetros menores; arcos longos, apesar de se defletirem mais facilmente, apresentam uma densidade de corrente menor junta a poça fundida, não sendo suficiente para fundir o material na região. A redução da penetração no centro dos cordões (mais evidente para o arame de 1,2 mm) pode ser explicada pelos resultados obtidos por Ecer (1980).

### 7.7 Considerações finais

Na análise dos resultados pôde-se verificar que um ângulo entre as tochas maior tende a proporcionar aos cordões um perfil de penetração mais uniforme e uma maior diluição.

Ao se variar a distância entre os eletrodos, aumentando-a, a largura do cordão tende a aumentar e a penetração, a cair.

De um modo geral, as variáveis relacionadas às penetrações dos cordões ( $PC$ ,  $PLM$  e  $\%AD$ ) são mais propensas a aumentarem com o crescimento da corrente média. A penetração no centro dos cordões tende a aumentar e, nas laterais, a diminuir, com a mudança no posicionamento dos eletrodos de “lado a lado” para “tandem”. Essa mesma tendência é verificada com alteração da condição de pulsos defasados para pulsos em fase.

A possibilidade de se trabalhar com essas variáveis, e, como resultado, modificar as características geométricas dos cordões, mostra a flexibilidade do processo. Conforme a aplicação, perfis com características de dupla penetração (“double finger”) ou de penetração simples (“finger shape”) podem ser obtidos. Por exemplo, visando-se a aplicação do processo em operações de revestimento, cordões mais largos, com menor diluição e penetração são preferíveis. Esse resultado pode ser alcançado, modificando-se a distância entre os eletrodos e o posicionamento dos arcos em relação ao sentido de deslocamento.

## CAPÍTULO 8

# APLICAÇÃO DO PROCESSO MIG/MAG PULSADO COM DUPLO ARAME E POTENCIAIS ISOLADOS EM OPERAÇÕES DE REVESTIMENTO METÁLICO

### 8.1 Introdução

Nos capítulos anteriores, a abordagem do estudo do processo MIG/MAG PULSADO Duplo Arame e Potenciais Isolados esteve voltada para os efeitos que as variáveis do processo exercem sobre o comportamento dos arcos voltaicos e as características geométricas dos depósitos. Neste estágio do trabalho, as pesquisas são direcionadas para a aplicação do processo nas operações de revestimento, mais especificamente, para a recuperação das superfícies das pás de turbinas hidráulicas desgastadas por cavitação.

Baseando-se nos resultados satisfatórios do processo MIG/MAG (com um arame) em soldagens de revestimento, com a utilização da pulsação térmica da corrente, desenvolveu-se um “software” para comando remoto das fontes de soldagem (via computador), que conferiu ao Duplo Arame a característica de operação no modo Pulsado Térmico. Nesse modo de operação, foram realizados ensaios em laboratório na posição sobrecabeça utilizando-se materiais e consumíveis de soldagem, empregados nas aplicações de revestimento.

A metodologia experimental adotada possibilitou desenvolver um programa de seleção das variáveis de soldagem do Duplo Arame com vistas à aplicação do processo em soldagens de revestimentos. Uma simulação foi feita no final do trabalho e os resultados alcançados atestaram a aplicabilidade do processo nessas operações.

### 8.2 Metodologia experimental

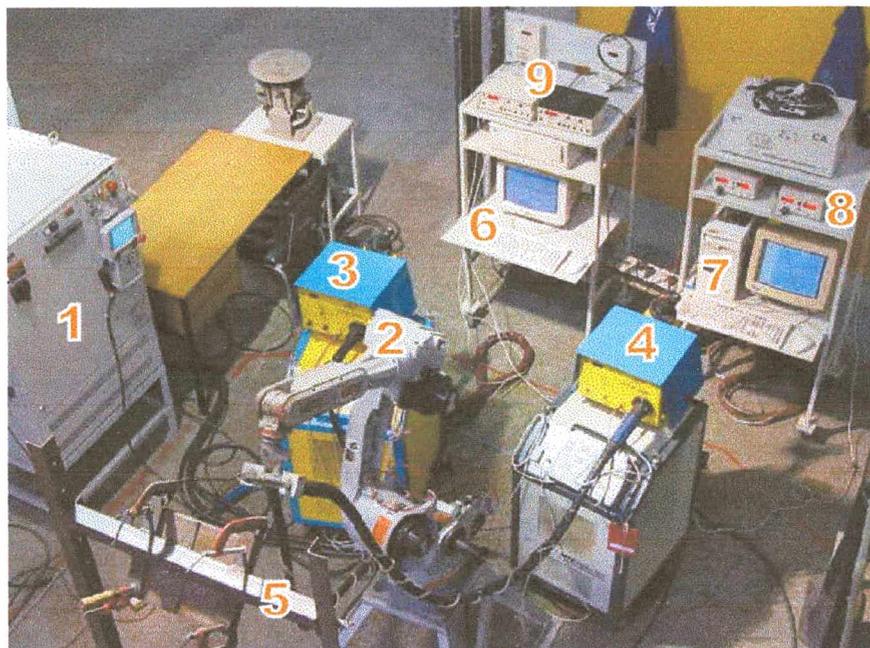
Para que fosse possível realizar soldagens com o duplo arame no modo pulsado, utilizando-se os arames tubulares empregados nas operações de revestimento das turbinas hidráulicas, foi necessário, na primeira etapa da metodologia experimental, determinar os parâmetros de destacamento de gotas desses eletrodos.

O segundo passo foi marcado pelo estudo e definição das variáveis que seriam mantidas fixas e das que foram consideradas ajustáveis (fatores) para a determinação de um campo operacional do processo nas aplicações de revestimento. Esse campo operacional foi levantado para apenas uma posição de soldagem. As respostas dos experimentos foram definidas em função do acabamento e das características geométricas dos depósitos (largura, reforço e convexidade). O planejamento e a condução dos experimentos foram feitos conforme o número de fatores e níveis considerados. A partir dos resultados obtidos, foi proposto, no terceiro passo desta metodologia, o programa de seleção das variáveis de

soldagem do Duplo Arame. Na última etapa, as equações empíricas que compõem o programa foram testadas experimentalmente em uma simulação no laboratório.

### 8.3 Bancada de equipamentos, materiais utilizados e software para comando remoto das fontes de soldagem

A foto da Figura 8.1 mostra a bancada montada para a execução dos testes. Os equipamentos que a compõem estão identificados na foto e foram caracterizados no Capítulo 3.



- 1 – CPU Robô
- 2 – Robô
- 3 - Fonte 1
- 4 – Fonte 2
- 5 – Suporte de fixação de chapas
- 6 – Micro de comando das fontes
- 7 - Micro para aquisição de dados
- 8 – TC1 1 e 2
- 9 - MVA 1 e 2

Figura 8.1- Bancada de equipamentos utilizada para realização das soldagens de revestimento.

As soldagens foram feitas com um arame tubular inoxidável com elementos de liga a base de cobalto, denominado comercialmente de CAVITEC. A Tabela 8.1 apresenta a composição química desse arame e do eletrodo inoxidável maciço AWS 309L-16Mo, que foi utilizado na confecção da camada intermediária (camada de amanteigamento) entre o metal de base e o de revestimento metálico. A soldagem da camada intermediária com arame de inox maciço é um procedimento realizado nas operações de recuperação das turbinas que visa preencher parcialmente a cratera de desgaste. A operação é finalizada com o arame de alta resistência ao desgaste (CAVITEC). O objetivo do procedimento é de reduzir o consumo do CAVITEC (que tem alto custo) e a sua diluição no material do rotor da turbina. O aço carbono da classe ABNT 1020 foi empregado como metal de base em todos os ensaios

executados neste capítulo. Esse material foi cortado em chapas de dimensões 12,4x100x150 mm.

Tabela 8.1 – Composição química dos eletrodos utilizados nas soldagens de revestimento.

Denominação		Composição Química (% em massa)							
Eletrodo	Diâmetro.(mm)	C	N	Cr	Ni	Mn	Mo	Co	Si
309L-16Mo	1,2	0,03	-	23,5	13	0,9	-	-	0,9
CAVITEC	1,2	0,17	0,18	17,0	-	10,0	-	9,5	3,5

Devido ao número elevado de variáveis do Duplo Arame e para facilitar o ajuste e controle de todas elas durante as soldagens, optou-se por comandar o processo em modo remoto (por intermédio do computador). Para tanto, desenvolveu-se um programa de controle das principais variáveis de soldagem. O “software”, cuja tela principal está apresentada na Figura 8.2, permite realizar soldagens com a corrente pulsada convencional e com a pulsação térmica.

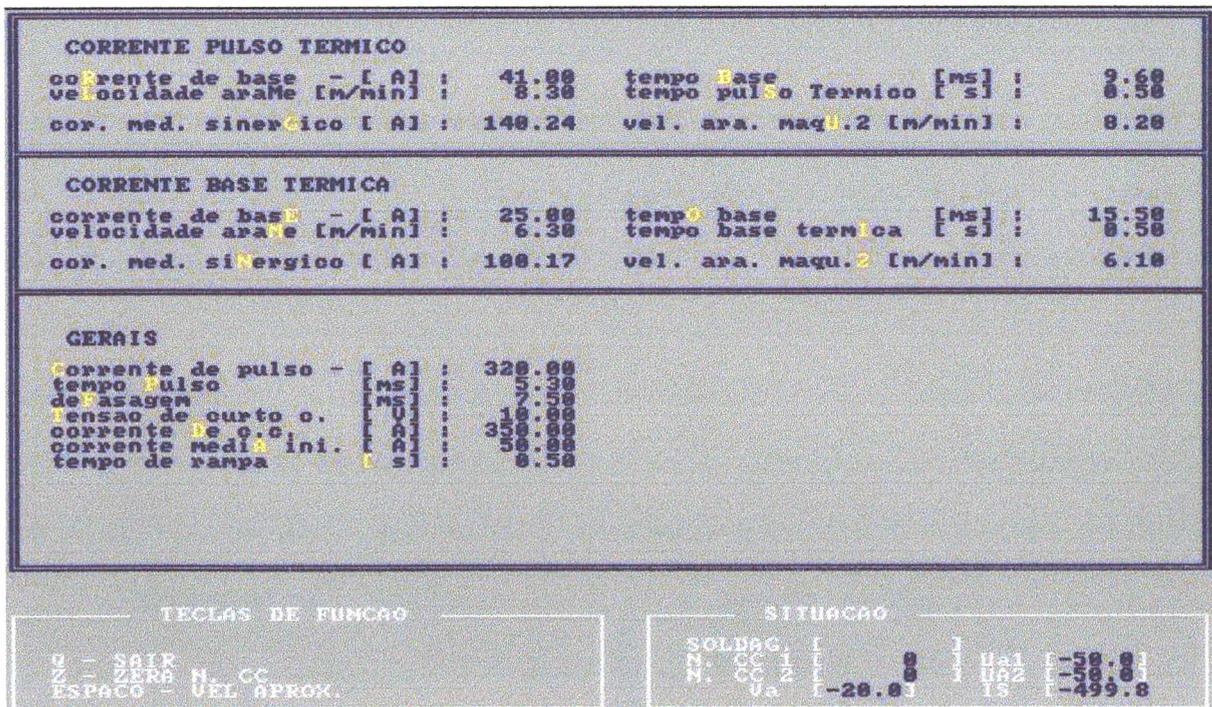


Figura 8.2 - Tela principal do programa utilizado para comandar as fontes de soldagem.

No campo da tela referente aos dados “GERAIS”, são ajustados os parâmetros comuns aos dois arcos voltaicos, tanto no período de pulso quanto no de base térmica:  $I_p$ ;  $t_p$  e  $D_f$  e. No campo “CORRENTE DE PULSO TÉRMICO”, ajustam-se os parâmetros de base da

corrente pulsada, a qual será aplicada em ambos os arcos, durante a fase de pulso térmico (Ib-P e tb-B). As velocidades dos arames são ajustadas nesse campo de forma independente. No campo “CORRENTE DE BASE TÉRMICA” ajustam-se os parâmetros descritos no campo anterior, porém, para a fase de base térmica (IbB e tbB).

#### 8.4 Determinação dos parâmetros de destacamento de gotas do eletrodo tubular em estudo

Uma vez que os ensaios deste capítulo deveriam ser realizados com corrente pulsada, foi necessário executar testes preliminares com o duplo arame, a fim de se determinar os parâmetros de destacamento de gotas do eletrodo tubular apresentado no item 8.3. Neste procedimento foi seguida a metodologia descrita no Capítulo 2 - Item 2.8. Os critérios utilizados para avaliar a estabilidade do processo basearam-se: nas características uniformes dos oscilogramas; no comportamento estável dos arcos; na regularidade das transferências metálicas e no acabamento superficial dos cordões de solda.

As deposições de material foram feitas sobre chapas, na posição sobrecabeça, em um plano inclinado a 45° com o eixo vertical (Figura 8.3). A escolha dessa posição específica para a realização dos ensaios deveu-se à tentativa de simular uma situação comum das operações de revestimento das turbinas hidráulicas.

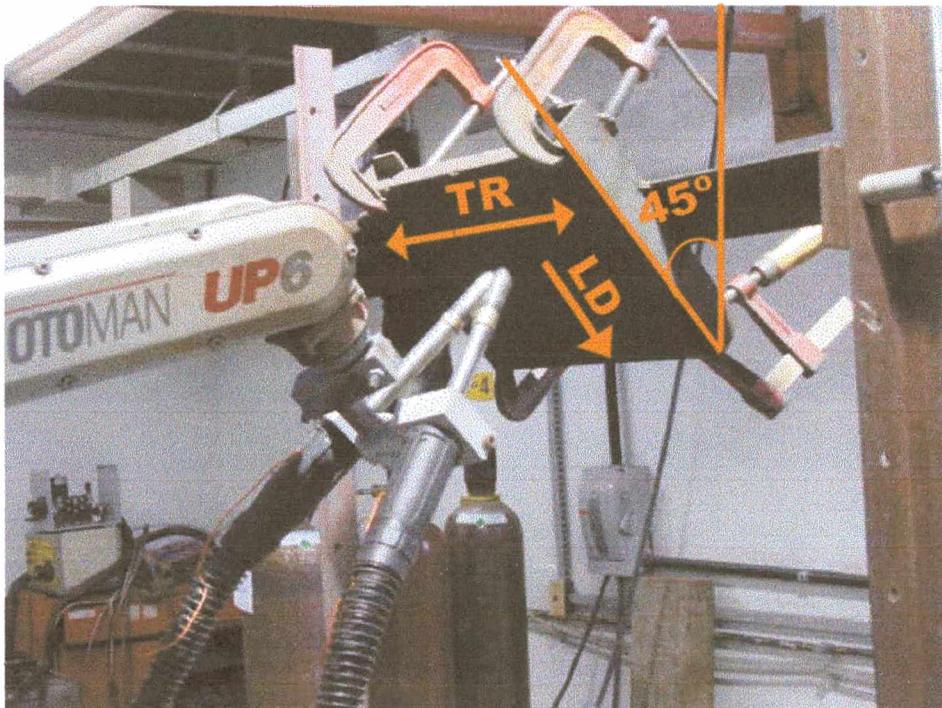


Figura 8.3 - Posição de soldagem na qual foram realizados os ensaios.

As tochas foram posicionadas uma ao lado da outra em relação ao sentido de deslocamento da soldagem, que é apontado na Figura 8.3 pela seta “LD” (para facilitar a identificação, a direção de soldagem é denominada neste capítulo de longitudinal e o sentido, de descendente). As demais variáveis de soldagem foram ajustadas nas seguintes condições: velocidade de soldagem - 60 cm/min; ângulo entre tochas - 30°; distância bico de contato peça - 17 mm; distância entre arames – aproximadamente de 6 mm; comprimentos dos arcos - aproximadamente de 5 mm; corrente média - 120 A/arames; gás de proteção - 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>, a uma vazão de 17 l/min.

Os parâmetros de destacamentos de gotas encontrados por Dutra (1995 – relatório), para esse eletrodo, na soldagem com o processo MIG/MAG com um único arame, foram utilizados como referência para um primeiro ajuste nas soldagens com o duplo arame ( $D = I_p^2 t_p = 477000 \text{ A}^2\text{ms}$  e diâmetro de gota = 1,5 mm). Aplicados à soldagem MIG/MAG Pulsado com duplo arame, esses ajustes apresentaram instabilidade nas transferências metálicas e, conseqüentemente, irregularidade nos cordões de solda. Observou-se durante os ensaios a formação de gotas de material fundido na ponta dos eletrodos que não se transferiam à poça metálica. Essas gotas, com o decorrer do tempo, atingiam dimensões demasiadamente elevadas e escorriam pelos eletrodos para dentro do bocal das tochas ou, em outras situações, caíam sobre o chão.

Foi observado nos experimentos que, para um diâmetro de gota de 1,62 mm, a aplicação de uma corrente de 320 A por um período de tempo, no pulso, de 5,3 ms ( $D = 542720 \text{ A}^2\text{ms}$ ) resultava em uma condição estável de soldagem. Essa estabilidade refletiu-se: i) nos arcos voltaicos, conferindo a eles regularidade, que se traduz nas formas repetitivas de ondas dos sinais de tensão, apresentados nas Figuras 8.4 e 8.5 (as curvas da Figura 8.5 são as mesmas da 8.4, porém em uma escala reduzida de tempo)<sup>1</sup>; ii) na transferência de material fundido, solucionando o problema da formação das gotas de grandes dimensões e; iii) no acabamento superficial das soldas, gerando depósitos uniformes e com poucos salpicos (Figura 8.6).

---

<sup>1</sup> As flutuações no sinal de tensão do arco que está no período de base da corrente, em decorrência da pulsação do segundo arco, podem ser vistas na figura 8.5 (apontadas na figura pelas setas). As causas destas flutuações foram discutidas no Capítulo 6.

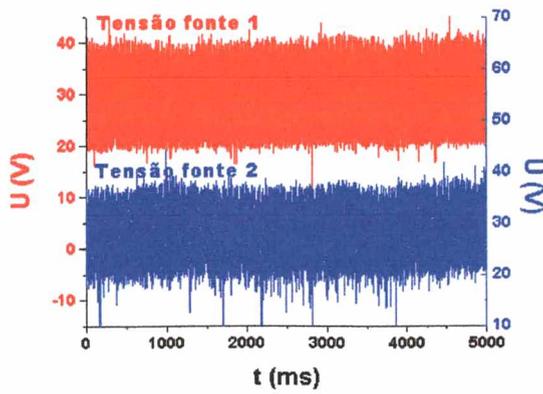


Figura 8.4 - Oscilogramas de tensão de ambos os arcos voltaicos para uma aquisição de 5s.  $I_m = 120$  A/arame e  $V_s = 60$  cm/min.

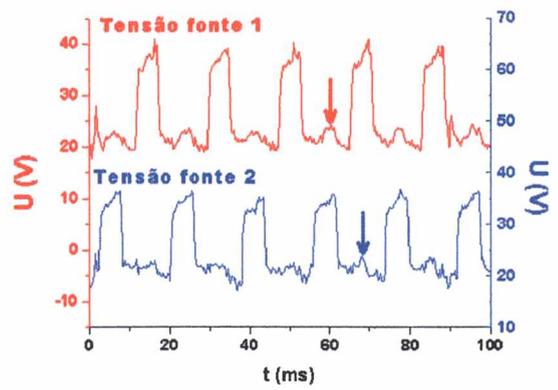


Figura 8.5 - Os mesmos oscilogramas de tensão da Figura anterior em escala reduzida de tempo.



Figura 8.6 - Aspectos dos cordões de solda executados com o duplo arame.  $I_m = 120$  A/arame;  $I_p = 320$  A;  $t_p = 5,3$  ms;  $I_b = 32$  A ;  $t_b = 12,1$  ms e diâmetro de gota calculado de 1,62 mm.

### 8.5 Estudo das variáveis fixas e das ajustáveis do processo duplo arame para a realização das soldagens de revestimento metálico

Dois grupos de variáveis foram estudados nesse capítulo para definir o procedimento de soldagem com o duplo arame em operações de revestimento. O primeiro é constituído de variáveis que são consideradas fixas, ou que não se alteraram nas soldagens. São elas: as características de pulsação da corrente; a direção de realização das soldagens de revestimento e o posicionamento dos eletrodos em relação ao sentido de deslocamento. As variáveis incluídas no segundo grupo foram utilizadas para a determinação de uma faixa operacional do duplo arame, a qual poderá ser usada quando o processo for empregado em condições de

soldagem similares às descritas neste capítulo. São elas: a corrente média da pulsação térmica, a velocidade de soldagem e a diferença entre as correntes médias no pulso e na base térmica.

Na análise das soldagens, procurou-se favorecer os resultados que conferissem ao processo características desejáveis às operações de revestimento, ou seja, aqueles que resultassem, por exemplo, em cordões de solda largos e menos convexos, e, ainda, que apresentassem um baixo índice de salpicos sobre as soldas.

### 8.5.1 Variáveis fixas

#### a) Características de pulsação da corrente

Atualmente, algumas usinas hidrelétricas no Brasil já utilizam, com significativo sucesso, o processo MIG/MAG Pulsado com Pulsação Térmica nas operações de recuperação de turbinas hidráulicas desgastadas por cavitação. Por isso, o trabalho é conduzido, neste capítulo, visando-se à aplicação do Duplo Arame com corrente pulsada termicamente nessas operações. Essa nova variante do processo será identificada neste estudo como MIG/MAG Pulsado Térmico com Duplo Arame e Potenciais Isolados. A variável defasagem nos pulsos de destacamento de gotas é tratada neste subitem.

#### ➤ Procedimento experimental

A defasagem nos pulsos de corrente para o destacamento de gotas foi analisada em duas situações distintas: i) pulsos de corrente em fase; ii) pulsos defasados<sup>2</sup>; que podem ser vistas nas Figuras 8.7 e 8.8 respectivamente. Observa-se nos gráficos que ambos os arcos voltaicos estão nos períodos de pulso e de base térmica simultaneamente (arcos em fase térmica). Uma outra situação de soldagem, iii), que foi também analisada, apresenta uma defasagem entre os pulsos térmicos dos dois arcos voltaicos (Figura 8.9). Nessa situação, durante os períodos de pulso e de base térmica, não foi possível aplicar a defasagem dos pulsos de corrente para destacamento de gotas, devido às frequências distintas de pulsação das correntes de ambos os arcos voltaicos.

---

<sup>2</sup> A defasagem nos pulsos de corrente foi novamente analisada neste capítulo com o intuito de verificar se os efeitos dessa variável, observados para arames maciços, ocorrem para os tubulares.

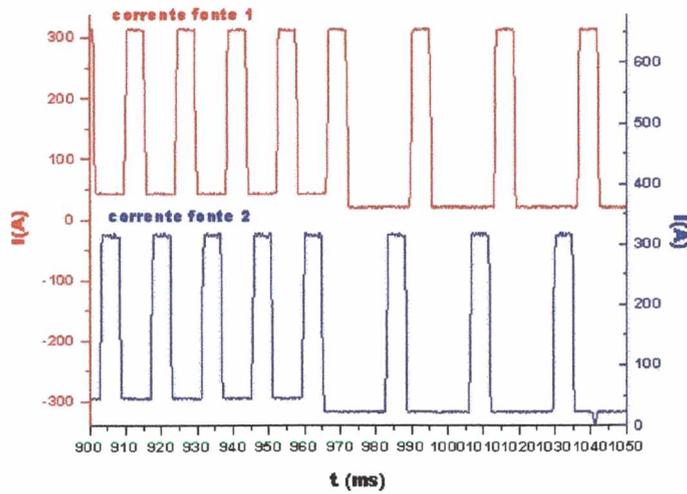


Figura 8.7 - Pulsos térmicos de corrente estão em fase e os pulsos para destacamento de gotas defasados.

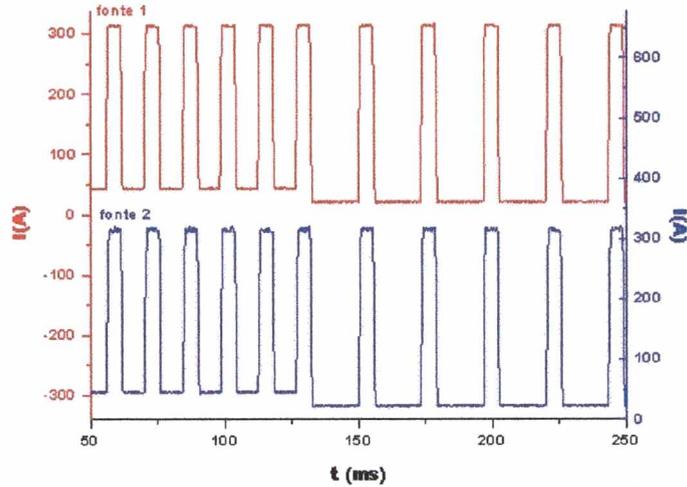


Figura 8.8–Pulsos térmicos e os pulsos para destacamento de gotas estão em fase.

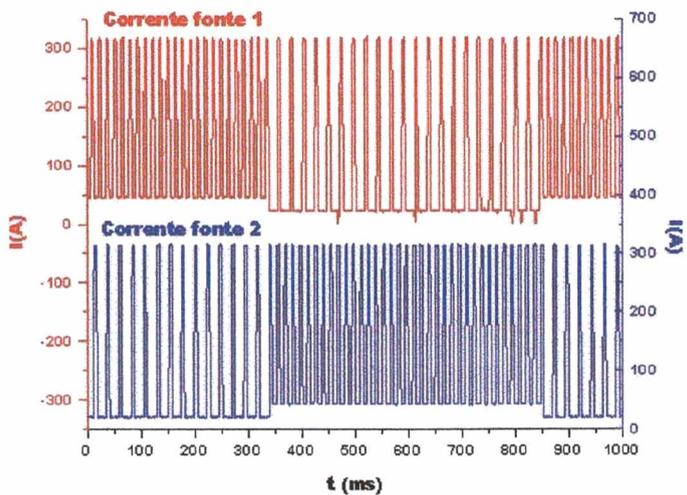


Figura 8.9– Pulsos térmicos de corrente defasados.

Todos os testes foram realizados segundo o arranjo ilustrado na Figura 8.3 (sentido de soldagem longitudinal descendente e eletrodos na posição “lado a lado”). As demais variáveis

de soldagem foram ajustadas nas seguintes condições: velocidade de soldagem - 65 cm/min; ângulo entre tochas - 30°; distância bico de contato peça - 17 mm; distância entre arames – aproximadamente de 6 mm; comprimentos dos arcos – aproximadamente de 5 mm; corrente média no pulsado térmico ( $I_{mPt} = (I_{mP} + I_{mB})/2$ ) - 120 A/arames; gás de proteção - 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>, a uma vazão de 17 l/min.

A Tabela 8.2 apresenta as variáveis e os parâmetros de pulso da corrente, para o destacamento de gotas, nos períodos de pulso e de base térmica.

Tabela 8.2 - Parâmetros e variáveis de destacamento de gotas das duas correntes médias empregadas nas soldagens com pulsação térmica. Tempos de pulso e de base térmica foram de 0,5 s.

Im/arames (A)	Ip (A)	tp (ms)	IbP (A)	tbP (ms)	Va_aj1 (m/min)	Va_aj2 (m/min)	Td (ms)
ImP - 150	320	5,3	44	8,5	8,3	8,1	6,9
ImB - 90	320	5,3	21	17,6	5,1	5,1	6,9

Obs.: As identificações de cada variável foram apresentadas no item 2.9. Va\_aj = velocidade de arame ajustada em cada cabeçote alimentador e Td = tempo de defasagem entre os pulsos de corrente.

Para cada uma das três condições descritas no procedimento experimental ( i, ii e iii ) foram realizadas quatro soldagens, totalizando 12 cordões de solda. Foram analisados nesses testes apenas aspectos relativos ao acabamento superficial dos cordões e o nível de salpicos.

➤ Resultados experimentais

As Figuras 8.10, 8.11 e 8.12 apresentam, respectivamente, as soldas realizadas nas condições i, ii e iii descritas no procedimento experimental. Os números ao lado dos cordões indicam a seqüência de execução das soldagens. Pode-se observar que das três condições de pulsação da corrente, a da Figura 8.10 (pulsos térmicos em fase e pulsos de destacamento de gotas defasados) apresentou um menor índice de salpicos.



Figura 8.10- Aspectos dos cordões de solda realizados na condição de pulsos térmicos em fase e pulsos de destacamento de gotas defasados.

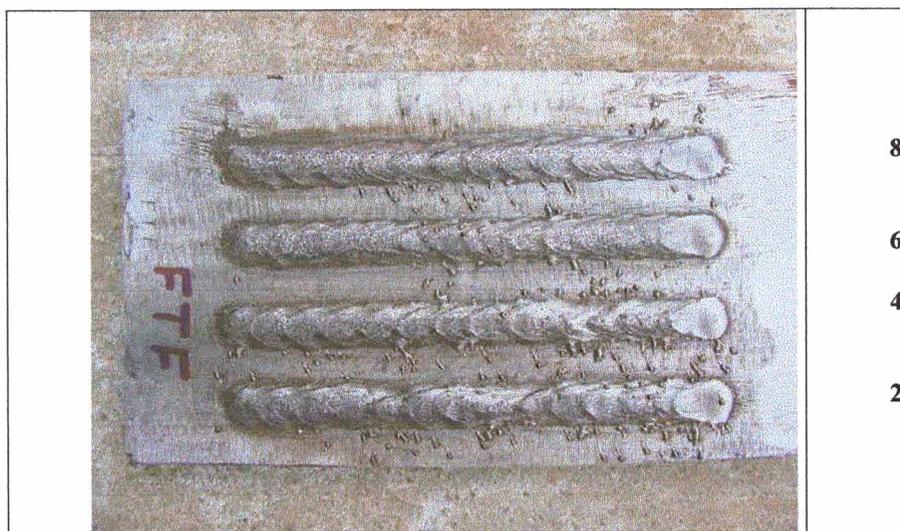


Figura 8.11- Aspectos dos cordões de solda realizados na condição de pulsos térmicos e pulsos de destacamento de gotas em fase.

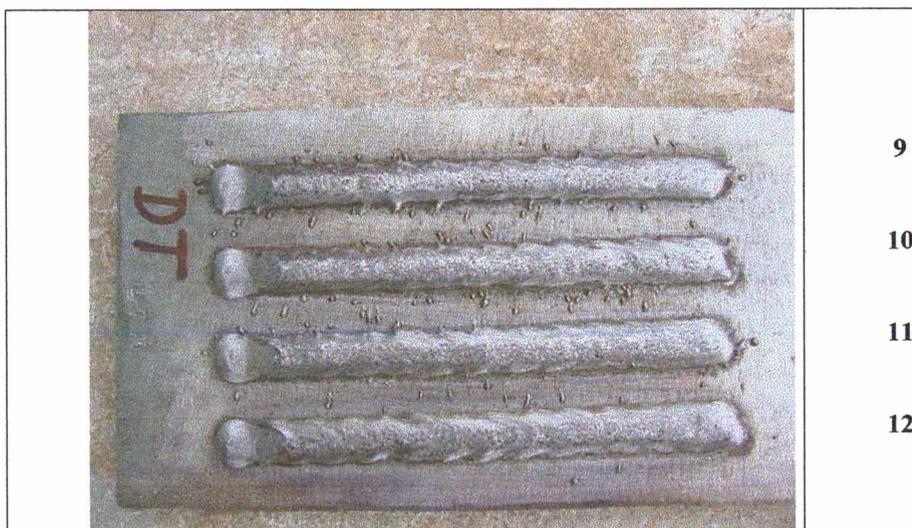


Figura 8.12- Soldas realizadas na condição de pulsos térmicos defasados

Diante desses resultados, optou-se por conduzir os testes seguintes, empregando-se sempre a condição de defasagem nos pulsos de corrente para destacamento de gotas.

A ocorrência de salpicos para a condição de pulsos em fase de destacamento de gotas ficou evidente nas soldagens com pulsação térmica, empregando-se arames tubulares. Para verificar se os salpicos ocorriam de forma acentuada, também, com o pulsado convencional, quatro cordões de solda foram feitos com o mesmo arame, utilizando-se a corrente pulsada com pulsos de destacamento de gotas em fase, porém, sem a pulsação térmica. Os cordões obtidos nesses ensaios podem ser vistos na Figura 8.13. Pode-se observar que a quantidade de salpicos sobre a chapa foi inferior à verificada nas Figuras 8.11 e 8.12, porém, percebia-se que alguns salpicos eram projetados para fora da poça metálica.



Figura 8.13 Aspectos dos cordões de solda realizados com corrente pulsada, sem a pulsação térmica e com os pulsos de destacamento ocorrendo em fase.  $I_m = 120$  A/arame;  $I_p = 320$  A;  $t_p = 5,3$  ms;  $I_b = 32$  A;  $t_b = 12,1$  ms;  $V_{a\_aj1} = 6,8$  m/min e  $V_{a\_aj2} = 6,7$  m/min.

Pelo fato de a variável defasagem nos pulsos de corrente não ser o escopo principal de investigação neste capítulo, não será levado adiante o estudo de seus efeitos sobre a soldagem com arame tubular, principalmente, sobre a transferência metálica, a qual se mostrou sensível às alterações dessa variável.

b) Direção de realização das soldagens e o posicionamento dos eletrodos em relação ao sentido de deslocamento (“tandem” ou “lado a lado”).

Nos itens anteriores, os ensaios foram executados com os eletrodos posicionados um ao lado do outro e com o deslocamento das tochas na direção longitudinal (Figura 8.3). Faz-se neste tópico um estudo da aplicabilidade do processo com a pulsação térmica em outras direções de deslocamento da soldagem e com os eletrodos posicionados em “tandem”.

➤ Procedimento Experimental

A posição de soldagem foi a mesma empregada nos ensaios anteriores ( $45^\circ$  com o eixo vertical - Figura 8.3). Com relação à direção de deslocamento das soldagens, além da longitudinal (sentido descendente), a transversal e uma inclinada (também no sentido descendente) foram também analisadas (inclinação de  $40^\circ$  com a transversal). Em cada uma das direções, as soldagens foram feitas com as tochas posicionadas “lado a lado” e em “tandem”, totalizando seis situações distintas. A foto da Figura 8.3 ilustra duas combinações de posicionamento de tocha e deslocamento da soldagem: na primeira combinação, as tochas estão posicionadas “lado a lado” e o sentido de deslocamento é longitudinal descendente (indicado pela seta LD); na segunda, o posicionamento das tochas é em “tandem” e a direção de soldagem é transversal (indicada pela seta de duplo sentido TR). Na Figura 8.14 podem ser vistas mais duas combinações: 1) posicionamento “lado a lado” para soldagem na horizontal e 2) posicionamento em “tandem” para soldagem no sentido longitudinal descendente. Os mesmos posicionamentos de tochas (“lado a lado” e “tandem”) foram usados para a direção inclinada, que é indicada na Figura 8.14 pela seta ID.

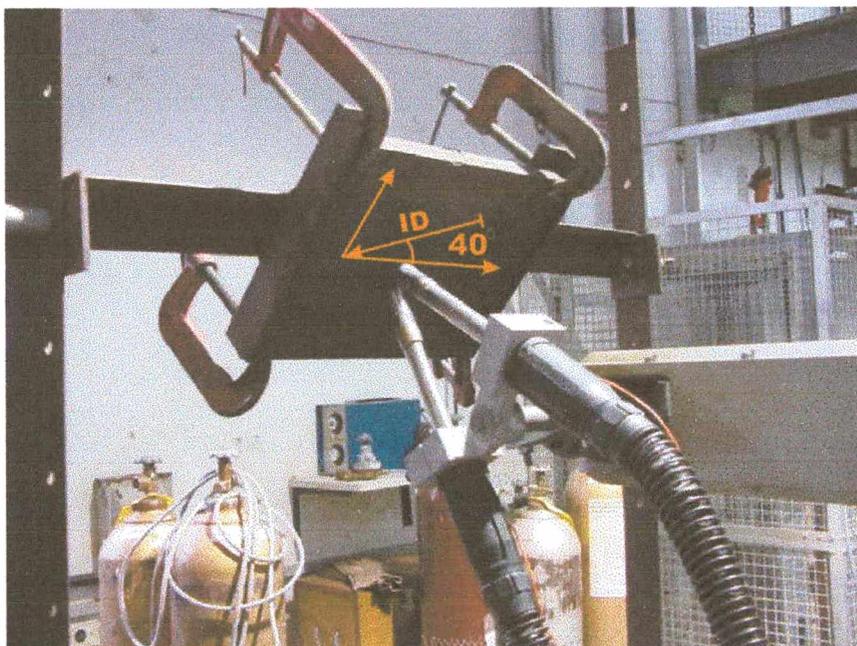


Figura 8.14 Posicionamento das tochas “lado a lado” para as soldagens na direção horizontal e em “tandem” para soldagem na longitudinal.

Uma vez que em cada situação foram realizados dois ensaios, somaram-se 12 cordões de solda executados. As demais variáveis de soldagem foram ajustadas nas seguintes condições: velocidade de soldagem - 55 cm/min; ângulo entre tochas -  $30^\circ$ ;<sup>3</sup> distância bico de

<sup>3</sup> Em ensaios prévios realizados na posição sobrecabeça, foi verificado que na faixa de velocidades de soldagem trabalhada neste capítulo (60 –90 cm/min), a utilização de distâncias entre arames superiores a 6,0 mm não resultava na formação de uma única poça fundida. Por isso, optou-se por trabalhar com o suporte, cujo ângulo entre eletrodos era de  $30^\circ$ , pois este permitia ajustar a distância entre arames. O suporte com ângulo de  $13^\circ$ , empregado nos testes do Capítulo 7, era fixo e resultava em uma distância entre arames de  $\approx 8$  mm.

contato peça - 17 mm; distância entre arames -  $\approx 6$  mm; comprimentos de arco -  $\approx 5$  mm; corrente média no pulsado térmico ( $ImPt = (ImP + ImB)/2$ ) - 100 A/arame; gás de proteção - 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>, a uma vazão de 17 l/min

A Tabela 8.3 apresenta as variáveis e os parâmetros de pulso da corrente que foram selecionados para o destacamento de gotas nas fases de pulso e de base térmica.

Tabela 8.3 Parâmetros e variáveis de destacamento de gotas das duas correntes médias empregadas nas soldagens com pulsação térmica. Tempos de pulso e de base térmica foram de 0,5s e Td = 8,8 ms.

Im (A)	Ip (A)	tp (ms)	Ib (A)	tb (ms)	Va_aj1 (m/min)	Va_aj2 (m/min)
ImP -120	320	5,3	32	12,1	6,7	6,7
ImB - 80	320	5,3	19	20,7	4,7	4,7

A comparação dos resultados foi feita por intermédio de análise visual e pelos valores medidos para a largura, o reforço e o índice de convexidade dos depósitos.

➤ Resultados Experimentais

Conforme pode ser visto na Figura 8.15, as soldagens realizadas, segundo a direção horizontal, apresentaram a formação de “humpings” (ver item 2.7), independentemente do posicionamento dos eletrodos em “tandem” ou em “lado a lado”. Entretanto, resultados satisfatórios foram alcançados nas direções longitudinal e inclinada (ambas no sentido descendente). Os perfis dos cordões de solda, obtidos segundo essas direções, foram medidos e estão apresentados na Tabela 8.4. Em cada cordão soldado, foram feitas cinco medições de largura e reforço. Os valores da tabela correspondem à média dessas medidas.

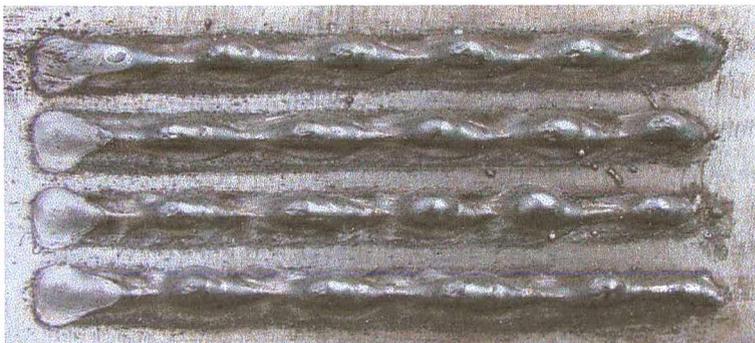


Figura 8.15– Fotos dos cordões de solda realizados segundo a direção horizontal. Os dois primeiros cordões, de cima para baixo, foram realizados com as tochas posicionadas em “tandem”, e, os outros dois, com elas posicionadas “lado a lado”.

Tabela 8.4 Valores medidos para a largura, o reforço e o índice de convexidade dos depósitos.

Direção	Posição	L (mm)		R (mm)		ICV	
		L1	L2	R1	R2	ICV1	ICV2
Desc.	LL	11,85	12,67	2,30	2,25	0,19	0,18
Desc.	TD	11,32	10,67	2,55	2,4	0,23	0,22
Incl.	LL	9,85	8,75	2,77	2,87	0,28	0,33
Incl.	TD	10,45	9,75	3,3	3,1	0,32	0,32

Obs. Os dados obtidos para as soldagens na direção horizontal foram desconsiderados em função dos defeitos observados sobre os cordões.

➤ Análise estatística e discussão dos resultados

Uma análise de variância foi aplicada aos valores da Tabela 8.4. Os níveis de significância listados na Tabela 8.5 indicam que o fator direção de soldagem e a sua interação com o fator posição dos eletrodos influenciaram, significativamente, o índice de convexidade dos depósitos (valores sublinhados e destacados em azul).

Tabela 8.5 - Níveis de significância ( $\alpha$ ) dos efeitos dos fatores e de suas interações sobre o índice de convexidade dos cordões.

Efeitos	Nível de significância ( $\alpha$ )
Posição dos eletrodos	0,499
Direção de soldagem	<u>0,000</u>
Interação	<u>0,037</u>

As Figuras 8.16 e 8.17 ilustram esses efeitos significativos. O primeiro gráfico mostra que as soldagens na direção longitudinal (sentido descendente) resultaram em depósitos mais planos<sup>4</sup>. No segundo, percebe-se a interação entre os fatores.

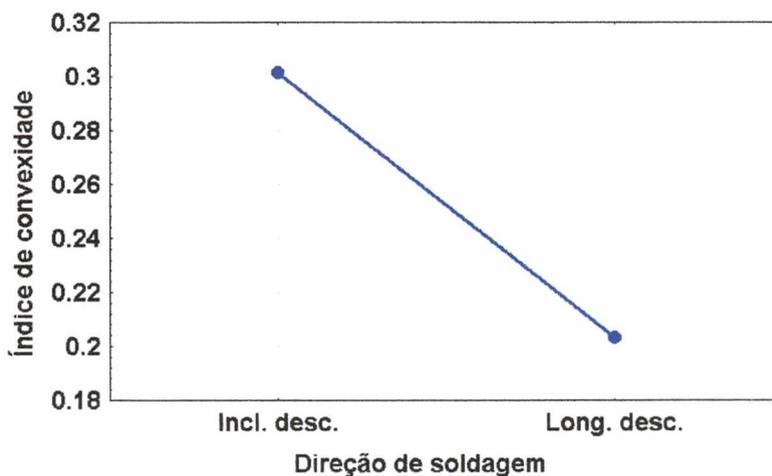


Figura 8.16 – Efeito da direção de soldagem sobre o índice de convexidade dos depósitos.

<sup>4</sup> Quanto menor for o valor do índice de convexidade, mais plano é o cordão de solda.

O posicionamento “lado a lado” das tochas apresentou uma tendência maior à formação de cordões planos na soldagem longitudinal, em relação ao posicionamento “tandem”.

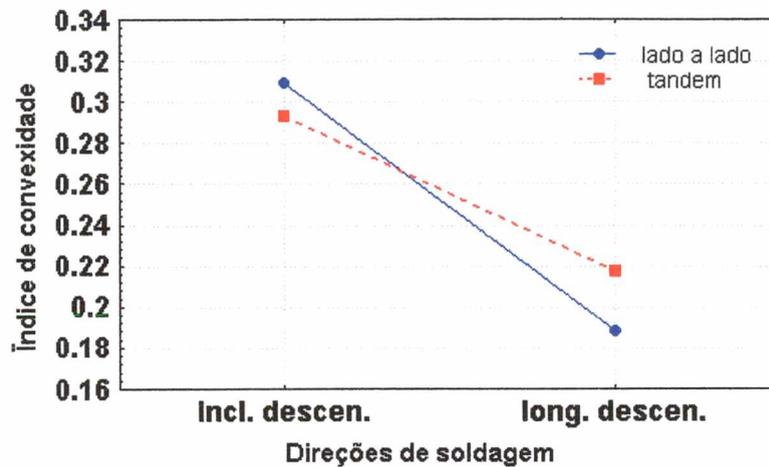


Figura 8.17 Efeito da interação entre a posição dos eletrodos e a direção de soldagem sobre o índice de convexidade dos depósitos.

Baseando-se nestes resultados, decidiu-se por conduzir os ensaios subseqüentes aplicando-se ao processo a condição que proporcionasse a formação de cordões mais favoráveis às operações de revestimento (cordões mais largos e planos). A soldagem na direção longitudinal e sentido descendente, com os eletrodos posicionados “lado a lado”, foi a opção escolhida.

### 8.5.2 Variáveis ajustáveis

No subitem 8.5.1 definiram-se algumas das variáveis que serão mantidas fixas no procedimento de determinação da faixa operacional do duplo arame, visando a aplicação do processo nas operações de revestimento. Neste subitem, foram estudadas as variáveis pertencentes ao grupo das ajustáveis, tais como a corrente média da pulsação térmica, a velocidade de soldagem e a diferença entre as correntes médias no pulso e na base térmica.

Quanto aos níveis de variação investigados para essas variáveis, adotaram-se, para a corrente média da pulsação térmica ( $I_{mPt}$ ), os valores 112 e 140 A/aramé. A seleção de uma corrente menor que o nível inferior dessa faixa, requeria ajustes, ainda mais baixos para as correntes médias na base térmica ( $I_{mB}$ ), o que dificultava a manutenção dos arcos acesos. Isso ocorria porque, ao se escolher uma  $I_{mB}$  baixa, para manter-se o mesmo volume de gota destacada, a cada pulso da corrente, o valor ajustado para a corrente de base na base térmica ( $I_{bB}$ ) estaria aquém do valor mínimo requerido para manter o arco voltaico aceso (requisito três descrito no subitem 2.8.1). Por exemplo, para uma  $I_{mB}$  de 70 A/aramé, a  $I_{bB}$  deveria ser de 15 A/aramé. Já, para valores ajustados de corrente térmica superiores a 140 A/aramé, a

sustentação da poça fundida, nos períodos de pulso térmico ( $\tau_P$ ), tornava-se problemática devido ao volume excessivo de material depositado nesses instantes.

Verificou-se durante a realização das soldagens do subitem 8.5.1 que havia relações entre velocidade de soldagem e corrente média que proporcionavam uma melhor sustentação da poça fundida na soldagem sobrecabeça. Por isso, a relação  $ImPt/Vs$ , ou, a energia imposta ( $E_{Imp} = ImPt/Vs$ ), foi analisada nesses ensaios como uma variável ajustável. Os níveis de variação selecionados para ela foram de 3,3 e 4,3 A.min/cm. Valores ajustados abaixo do nível inferior, implicavam, em alguns casos, na não formação de um único cordão, principalmente, nas soldagens com a corrente média da pulsação térmica,  $ImPt$ , igual a 112 A/aramé. Valores de  $E_{Imp}$  ajustados acima do nível superior dificultam a sustentação da poça fundida.

A última das variáveis ajustáveis analisada foi a diferença entre as correntes médias no pulso e na base térmica ( $DPeB = ImP-ImB$ ), cujos limites de variação eram 0% - condição ajustada que confere ao processo as características da pulsação convencional da corrente - e 80 % - diferença usualmente utilizada em aplicações práticas com o processo MIG/MAG, com um único arame.

### 8.5.3 Definição das variáveis de saída.

As variáveis de saída ou os resultados das soldagens foram avaliados em dois aspectos:

- a) Presença de defeitos: nos ensaios experimentais foram depositadas camadas de CAVITEC, que, após serem esmerilhadas, foram submetidas a ensaios com líquido penetrante para identificação de defeitos, como porosidade e falta de fusão de material.
- b) Características geométricas dos depósitos: sobre os cordões foram medidos os parâmetros geométricos largura e reforço. Os valores médios e os desvios-padrão dessas medidas, bem como o índice de convexidade dos depósitos integram as características geométricas analisadas.

### 8.5.4 Procedimento experimental para determinação da faixa operacional do duplo arame nas operações de revestimento.

Nestes ensaios, as soldagens foram feitas sobre chapas de aço carbono da classe ABNT 1020, revestidas com uma camada de aço inoxidável de dimensões aproximadas de 5x60x120 mm (camada de amanteigamento). Esse revestimento foi feito por soldagem, empregando-se eletrodos da classe E 309 L-16Mo. Antes das deposições com o CAVITEC, a camada foi esmerilhada superficialmente para remoção de impurezas.

O planejamento dos experimentos baseou-se num projeto fatorial de três fatores em dois níveis (fatores e níveis foram descritos no subitem 8.5.3), totalizando oito condições distintas de ensaios. A Tabela 8.6 apresenta a seqüência dos testes. Uma condição intermediária àquelas do projeto fatorial foi também testada (linha 9 da Tabela 8.6).

Os ensaios foram feitos na posição sobrecabeça e com as variáveis fixas ajustadas nas condições que proporcionaram, nos testes anteriores, uma melhor performance do processo nas soldagens de revestimento. Procurou-se manter o comprimento dos arcos em aproximadamente 5 mm. Em cada ensaio, foram depositadas duas camadas sobrepostas de CAVITEC, constituídas por quatro cordões de solda cada uma. A distância ajustada entre dois cordões consecutivos correspondeu à metade da largura de um cordão.

As larguras e os reforços foram medidos sobre o primeiro cordão de cada camada. Tomou-se o cuidado de soldá-los sempre com a temperatura das chapas igual à ambiente.

Os parâmetros e as variáveis das correntes pulsadas, empregadas nesses ensaios, estão listados na Tabela 8.7. Uma vez que os comprimentos dos arcos mudavam com as variações das velocidades de soldagem, para mantê-los próximos a 5 mm, houve a necessidade de se ajustarem as velocidades de alimentação dos arames. Cabe lembrar que alterações na velocidade de arame, para uma mesma freqüência de pulsação da corrente, causam variações no volume da gota destacada.

Tabela 8.6 - Condições de soldagem em que foram realizados os ensaios experimentais.

teste	ImPt (A)	EImp (A.min/cm)	DPeB (%)	Vs (cm/min)	ImP (A)	ImB (A)	Td (ms)
1	140	4,3	80	65	180	100	5,8
2	140	3,3	80	85	180	100	5,8
3	140	4,3	0	65	140	140	7,5
4	140	3,3	0	85	140	140	7,5
5	112	4,3	80	53	145	80	7,2
6	112	3,3	80	61	145	80	7,2
7	112	4,3	0	53	112	112	10,4
8	112	3,3	0	61	112	112	10,4
9	125	3,8	40	66	145	105	7,2

Tabela 8.7 - Parâmetros e variáveis das correntes pulsadas empregadas nos ensaios.

Im (A)	Ip (A)	tp (ms)	Ib (A)	tb (ms)	Vs (cm/min)	Va (m/min)
180	320	5,3	62	6,3	85	10,0
180	320	5,3	62	6,3	65	10,2
145	320	5,3	42	9,0	61	8,4
145	320	5,3	42	9,0	53	8,1
145	320	5,3	42	9,0	66	8,5
140	320	5,3	41	9,6	65	7,7
140	320	5,3	41	9,6	85	8,0
112	320	5,3	32	13,8	61	6,4
112	320	5,3	32	13,8	53	6,1
105	320	5,3	27	14,6	66	6,1
100	320	5,3	25	15,5	85	5,9
100	320	5,3	25	15,5	65	5,7
80	320	5,3	19,0	20,7	61	4,8
80	320	5,3	19,0	20,7	53	4,6

### 8.5.5 Resultados experimentais e análise estatística

A Tabela 8.8 apresenta os valores das variáveis de resposta do experimento. Cada valor indicado corresponde à média determinada a partir das medições feitas sobre os dois cordões de solda, de cada condição ensaiada.

Tabela 8.8 - Valores medidos das larguras e dos reforços dos cordões e os respectivos desvios-padrão e índice de convexidade calculados.

Ensaio	L (mm)	dpL (mm)	R (mm)	dpR (mm)	CV	defeitos
1	16,78	0,25	1,83	0,22	0,109	não ocorreram
2	15,42	1,00	1,75	0,19	0,113	não ocorreram
3	16,84	0,25	1,66	0,15	0,098	não ocorreram
4	15,47	0,135	1,68	0,09	0,108	não ocorreram
5	16,46	0,58	2,03	0,19	0,123	não ocorreram
6	15,14	0,67	2,06	0,18	0,136	não ocorreram
7	15,53	0,24	1,97	0,10	0,127	não ocorreram
8	14,99	0,125	1,98	0,09	0,132	não ocorreram
9	15,75	0,356	2,04	0,13	0,130	não ocorreram

Obs.: L – largura média do cordão; dpL – desvio padrão de L; R – reforço médio do cordão; dpR – desvio-padrão de R; IC – índice de convexidade.

Os testes com líquido penetrante, realizados sobre todas as chapas soldadas, mostraram que não ocorreram defeitos como porosidades e falta de fusão. A Figura 8.18 mostra uma das superfícies ensaiadas.

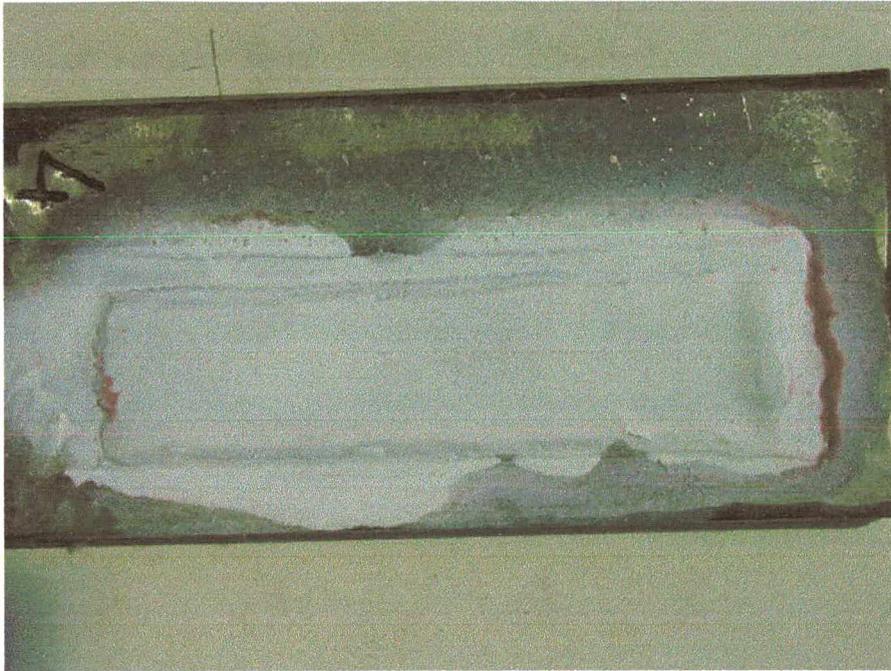


Figura 8.18 - Foto de uma das chapas submetida ao ensaio com líquido penetrante. Observa-se que não ocorreram defeitos. Condições de soldagem: ImPt = 140 A/arame; DPeB = 0%; Vs = 85 cm/min e EImp = 3,3 A.min/cm.

Uma análise de correlação foi feita entre as variáveis de entrada (fatores) e as de saída (respostas dos experimentos). A Tabela 8.9 apresenta os coeficientes de correlação e os respectivos níveis de significância. Esses últimos, quando menores que 0,05, indicam uma correlação estatisticamente significativa entre as variáveis (probabilidade de erro inferior a 5%).

Tabela 8.9 - Coeficientes de correlação entre as variáveis de entrada e as respostas dos experimentos. São apresentados também os níveis de significância ( $\alpha$ ).

entrad\respost	L	dpL	R	dpR	IC
ImPt	0,4288 (0,249)	0,0086 (0,983)	<b>-0,8698</b> <b>(0,002)</b>	0,2185 0,572	<b>-0,8650</b> <b>(0,003)</b>
DpeB	0,1728 (0,657)	<b>0,7483</b> <b>(0,020)</b>	0,2899 (0,449)	<b>0,8867</b> <b>(0,001)</b>	0,1519 (0,696)
EImp	<b>0,8227</b> <b>(0,006)</b>	-0,2608 (0,498)	0,0193 (0,961)	0,2956 (0,440)	-0,3134 (0,412)

Os coeficientes significativos da Tabela indicam que: as variáveis  $E_{Imp}$  e  $L$  se correlacionam de forma positiva, ou seja, o crescimento da primeira promove o aumento da segunda; aumentando-se a corrente média do pulsado térmico, os cordões tendem a se tornarem mais largos e planos (o índice de convexidade reduz); o crescimento da diferença entre as correntes médias dos períodos de pulso e de base térmica ( $DPeB$ ) resulta em aumentos nas variações dimensionais das larguras e dos reforços dos depósitos (indicados pelos acréscimos nos desvios-padrão das medidas de  $L$  e  $R$ ). Essas variações dimensionais eram esperadas para soldagens realizadas com o pulsado térmico, uma vez que volumes distintos de material são depositados alternadamente ao longo de um mesmo cordão.

Dois aspectos desses resultados devem ser ressaltados e mostram a adequação do processo MIG/MAG Duplo Arame às aplicações de revestimento. O primeiro é a ausência de defeitos nas camadas de solda, verificada em todos os testes executados. O segundo está relacionado às características geométricas dos depósitos, que em todas as condições ensaiadas, apresentaram-se na forma de cordões largos (as larguras variaram de 15 a 17 mm) e baixos (reforço máximo encontrado foi de 2,06 mm).

Os efeitos da pulsação térmica apresentaram-se sobre as alterações nas larguras e nos reforços dos cordões de solda, ao longo de seus comprimentos. Os valores calculados dos desvios-padrão dessas grandezas apontam essas variações, e, para as condições de soldagem em que foram realizados os ensaios, o desvio-padrão máximo foi de  $\pm 1$  mm para a largura e de 0,22 mm para o reforço. Essas variações, nos níveis em que se apresentaram, tornam-se desprezíveis para as soldagens de revestimento, pois, os cordões são feitos um ao lado do outro e a sobreposição deles compensa essas irregularidades.

Aos dados da Tabela 8.8, referentes às larguras e aos reforços dos cordões, foram feitas análises de regressão múltipla que resultaram em equações empíricas, cujos coeficientes estão apresentados na Tabela 8.10. Essas equações podem ser usadas, por exemplo, para estimarem as dimensões dos cordões de solda em uma soldagem automatizada.

Tabela 8.10 – Coeficientes das equações empíricas que relacionam as variáveis ajustáveis e as respostas dos experimentos.

Variáveis	Coeficientes	
	L	R
ImPt	0,0941	0,0404
DPeB	0,1279	-0,0018
EImp	3,0538	0,0019
ImPt^2	-	-0,0002
ImPt *DPeB	-0,0011	0,00002
ImPt *EImp	-0,0162	-
EImp*DPeB	-0,0235	-
ImPt *DpeB* EImp	0,00022	-
Significância do modelo ( $\alpha$ )	0,0007	0,0000
$R^2$	0,9998	0,9994
$R^2_{aj}$	0,9992	0,9989

$R^2$  – Coeficiente de determinação do modelo e  $R^2_{aj}$  – Coeficiente de determinação ajustado<sup>5</sup>

### 8.6 Programa de seleção das variáveis de soldagem do processo MIG/MAG Pulsado Térmico com Duplo Arame e Potenciais Isolados, quando aplicado às operações de revestimento.

A metodologia de condução dos ensaios adotada neste capítulo originou uma faixa operacional de soldagem para o Duplo Arame em uma posição específica (sobrecabeça em um plano inclinado a 45° com a horizontal – Figura 8.1). Uma vez especificados os limites da corrente média no pulsado térmico (ImPt), para aquela posição, essa faixa passou a ser limitada pelos valores da relação ImPt/Vs (energia imposta). Essa faixa e mais uma equação que relaciona a velocidade de arame com a corrente média e com a velocidade de soldagem (determinada experimentalmente) possibilitaram o desenvolvimento de um programa de seleção de variáveis, para soldagens com o Duplo Arame em operações de revestimento. Essa equação experimental, cujos coeficientes estão listados na Tabela 8.11, foi determinada, aplicando-se aos dados da Tabela 8.7 uma regressão múltipla. O gráfico da Figura 8.19, traçado a partir da equação levantada, mostra a variação da velocidade de arame em função da corrente média e da velocidade de soldagem.

O fluxograma da Figura 8.20 resume a lógica do programa proposto.

<sup>5</sup>  $R^2$  fornece a proporção de variabilidade da variável de resposta obtida pelos fatores incluídos no modelo.  $R^2_{aj}$  similar ao anterior, porém mais representativo, pois avalia se fatores são adicionados inadequadamente. Se ambos diferem drasticamente, há uma boa chance de que termos não significativos foram incluídos no modelo.

Tabela 8. 11 – Coeficientes da equação que relaciona a velocidade de arame com as variáveis corrente pulsada média e velocidade de soldagem.

Variáveis	Coeficientes das variáveis $I_m$ e $V_s$ .
	$V_a$ (m/min)
$I_m$	0,05009
$V_s$	0,01494
$I_m \cdot V_s$	-0,00011
$I_m^2$	0,00005
$V_s^2$	0,00002
Significância do modelo ( $\alpha$ )	0,0000
$R^2$	0,9994
$R^2_{aj.}$	0,9901

Deve-se destacar que uma transferência metálica estável é o alicerce de todo o programa, por isso o procedimento de determinação dos parâmetros de destacamento de gotas ( $I_p$ ,  $t_p$ , e diâmetro de gota -  $\varnothing_{gota}$ ), seja ele feito por filmagem ou por análise de oscilogramas, deve proporcionar essa estabilidade.

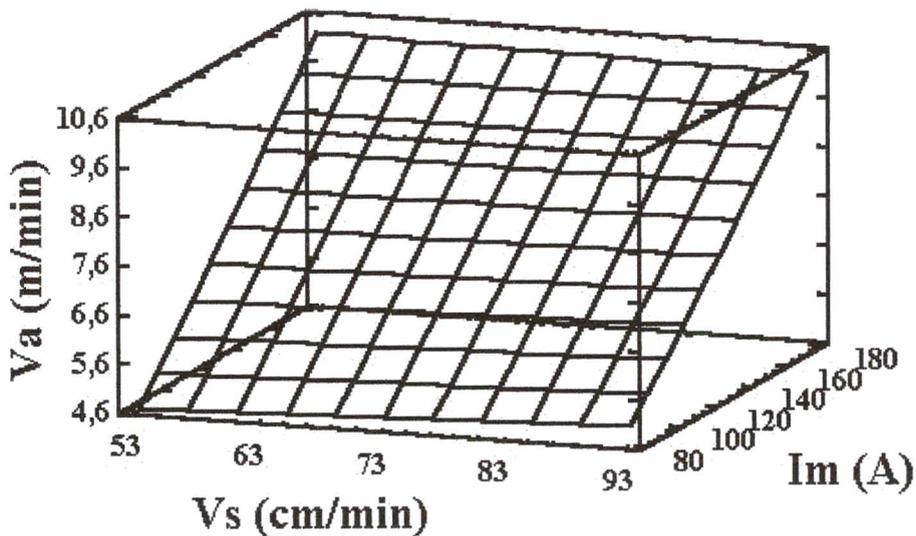


Figura 8.19 Superfície que mostra a variação da velocidade de arame em função das variáveis corrente média e velocidade de soldagem.

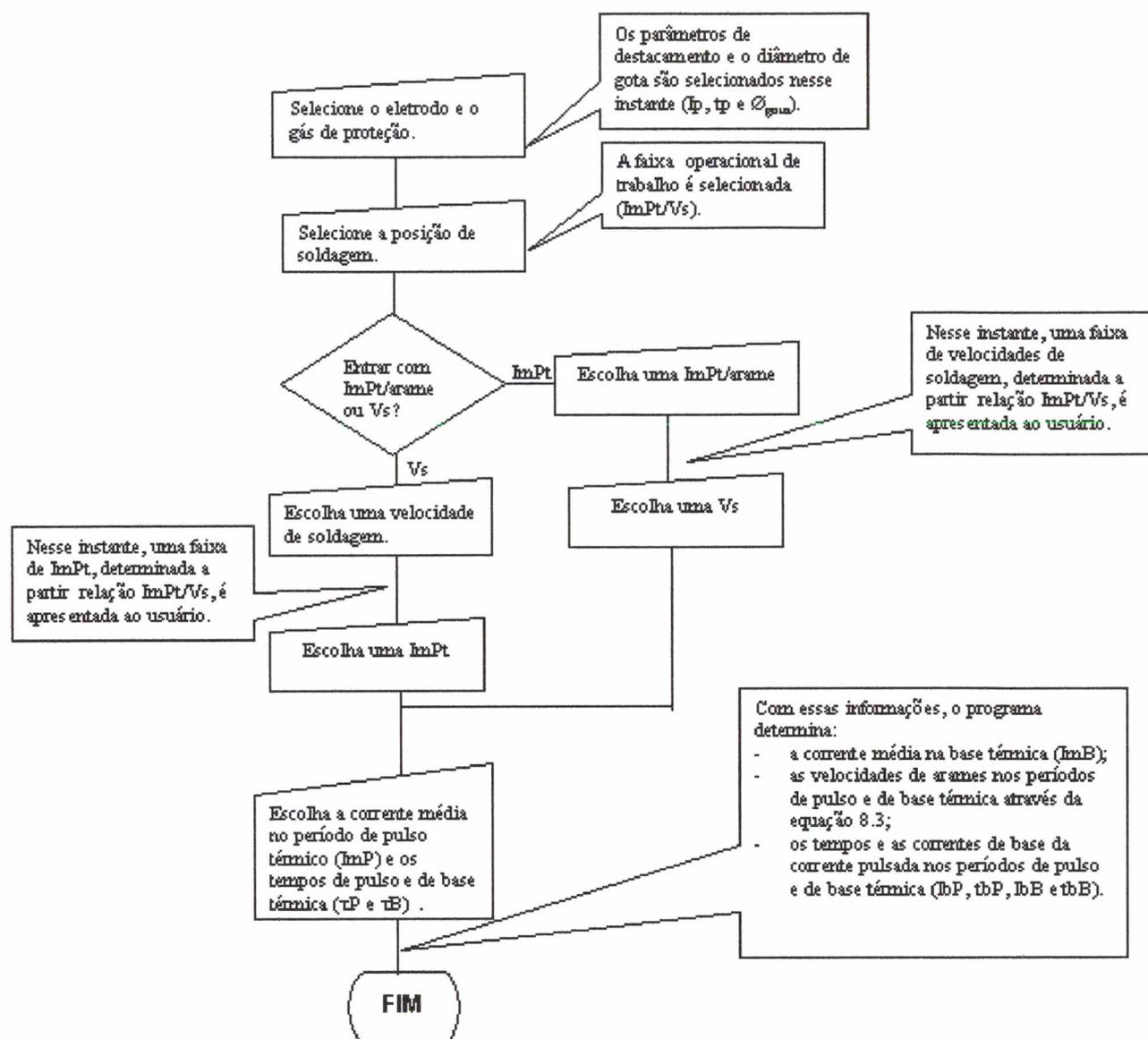


Figura 8.20 - Fluxograma do programa proposto

Inicialmente, o usuário define para o programa a combinação arame-eletrodo e gás de proteção, conforme a aplicação de soldagem desejada. O programa seleciona, para essa aplicação, os parâmetros de destacamento e diâmetro de gotas. Esses parâmetros devem ser determinados previamente em procedimento à parte, similar ao seguido no item 8.4. No passo seguinte é selecionada a posição de soldagem, e nessa opção, o programa deverá informar ao usuário uma faixa de correntes médias ou de velocidades de soldagem possível de ser aplicada naquela posição. Essa informação deverá ser obtida pelo programa a partir de levantamentos experimentais, realizados de forma semelhante aos apresentados nos itens 8.5.2 e 8.5.4. Esses experimentos devem determinar os limites da faixa para cada posição de soldagem que a aplicação requer. Sugere-se, por exemplo, para a aplicação de revestimento das turbinas hidráulicas, na qual as soldagens são executadas em diferentes posições, que se

faça esse levantamento na vertical e na sobrecabeça, sendo, nessa última, realizado em planos inclinados a 30°, 60°, 75° e 90° com a posição vertical. Conforme o valor da opção escolhida pelo usuário (ImPt ou Vs), o programa determina automaticamente, a partir da EImp, a segunda variável (Vs ou ImPt). Na seqüência, o programa solicita ao usuário que seja selecionada uma corrente média para o período de pulso térmico. O programa disponibiliza uma faixa de opções para essa corrente e os limites dessa faixa são estabelecidos pela diferença entre as correntes médias no pulso e na base térmica, investigada experimentalmente (para esse caso 0% e 80%). No passo seguinte, o usuário deverá informar os tempos de pulso e de base térmica<sup>6</sup>. Com essas informações, o programa determina a corrente média na base térmica, e, a partir de uma equação empírica, semelhante à da Tabela 8.11, ele calcula as velocidades de arames para os períodos de pulso e de base térmica. Determinadas as velocidades, o programa calcula os tempos e as correntes de base da corrente pulsada nos períodos de pulso e de base térmica (IbP, tbP, IbB e tbB), mantendo-se constantes os diâmetros das gotas destacadas.

## 8.7 Verificação experimental das equações do programa proposto

### ➤ Procedimento Experimental

Para verificar a funcionalidade das equações que integram o programa apresentado no fluxograma da Figura 8.20, foi realizada uma soldagem de revestimento, executada em duas condições distintas, mas pertencentes à faixa operacional levantada.

Sobre uma chapa de aço carbono de 25,4 x 300 x 400 mm foi feito inicialmente um revestimento, por soldagem, com o aço inox AWS 309 L-16Mo, nas dimensões 10 x 120 x 200 mm. Esse revestimento foi esmerilhado superficialmente e sobre ele foram depositadas quatro camadas sobrepostas de CAVITEC. As variáveis fixas foram mantidas nas mesmas condições dos ensaios anteriores: DBCP = 17 mm; da = 6 mm; ca ≈ 5 mm; proteção com o gás Ar + 8% CO<sub>2</sub> a uma vazão de 17 l/min; soldagem sobrecabeça em um plano inclinado a 45° com a posição vertical. Na Tabela 8.12 são apresentadas as variáveis ajustáveis que foram selecionadas para a realização dos ensaios e, na 8.13, estão os parâmetros de destacamento de gotas e as variáveis de base das correntes pulsadas, determinadas pela equação da Tabela 8.11.

<sup>6</sup> Em ensaios experimentais realizados verificou-se que uma relação  $\tau_P/(\tau_P + \tau_B)$  maior que 60% dificultava a sustentação da poça fundida na posição de soldagem. Recomenda-se, para essa aplicação uma relação de 50%.

Tabela 8.12 - Variáveis ajustáveis do programa que foram selecionadas para a realização dos ensaios.

Camada	ImPt/ar (A)	Elmp (Amin/cm)	Vs (cm/min)	DpeB (%)	ImP (A)	ImB (A)
1	135	3,86	70	45	160	110
2	135	3,86	70	45	160	110
3	120	3,53	68	40	140	100
4	120	3,53	68	40	140	100

Tabela 8.13 - Parâmetros de destacamento de gotas e variáveis de base das correntes pulsadas empregadas nos testes de revestimento.

Im (A)	Vs (cm/min)	Va_eq (m/min)	Ip (A)	tp (ms)	Ib (ms)	tb (ms)	Td (ms)	$\varnothing_{gota}$ (mm)
160	70	9,05	320	5,3	50	7,7	6,5	1,62
140	68	7,93	320	5,3	41	9,6	7,5	1,62
110	70	6,33	320	5,3	27	13,4	-6,5	1,62
100	68	5,80	320	5,3	23	15,1	-7,5	1,62

Obs.: Va\_eq. Velocidade de arame determinada pela equação da Tabela 8.11

Antes que se fizessem os depósitos de revestimento, foram executados ensaios nas condições de soldagem da Tabela 8.13, sem a pulsação térmica. Esses ensaios tinham como objetivo verificar o quanto seria necessário corrigir os comprimentos de arcos, para se atingir os 5 mm preestabelecidos. Pretendia-se calcular o erro entre os valores ajustados pela equação da Tabela 8.11 e os medidos experimentalmente. Foram preparadas quatro chapas (uma para cada condição da Tabela 8.13) com características semelhantes às que foram utilizadas em todos os ensaios anteriores. Para medir as velocidades de arames foram utilizados os medidores caracterizados no Capítulo 3, subitem 3.2.2. Para cada uma das condições de soldagem foram executados dois cordões de solda. Tomou-se o cuidado de realizá-los com a temperatura da chapa igual à ambiente.

#### ➤ Resultados experimentais

A Tabela 8.14 apresenta os valores de velocidades de arames previstos pela equação da Tabela 8.11 ao lado dos valores médios ajustados nos dois cabeçotes de alimentação de arame. Nas colunas 6 e 7 são listados os índices percentuais relativos às diferenças entre essas velocidades.

Tabela 8.14 - Valores das velocidades de arames previstas pela equação da Tabela 8.11 e os ajustáveis nos dois cabeçotes de alimentação de arame.

Im (A)	Vs (cm/min)	Va (m/min) eq. Tab. 8.11	Va (m/min) - cabeçote 1	Va (m/min) - cabeçote2	Diferença (%) cabeçote 1	Diferença (%) cabeçote 2
160	70	9,05	9,4	9,3	3,9	2,8
140	68	7,93	8,3	8,3	4,7	4,7
110	70	6,33	6,7	6,6	5,8	4,3
100	68	5,8	6,2	6,2	6,9	6,9

Na foto da Figura 8.21 podem ser vistas as quatro camadas de material depositadas. O aspecto plano das camadas e o baixo índice de salpicos sobre a chapa retratam a boa estabilidade do processo em ambas as condições em que foram feitas as soldagens com o arame CAVITEC.

Um problema que ocorre nas soldagens de revestimento das turbinas com o processo MIG/MAG pulsado com um arame, é o acúmulo de material depositado no início do cordão, mais especificamente, na região onde se dá a abertura do arco voltaico. Esse fato ocorria também com o duplo arame, porém, em menor intensidade. Para tentar amenizar ainda mais o problema, foi implementada no programa de controle das fontes uma opção de comando da corrente de soldagem, de ambos os arcos voltaicos, na fase inicial de processo. Após as aberturas dos arcos, as correntes cresciam a partir de um valor baixo e levavam um determinado tempo (ambos, corrente e tempo, são especificados pelo usuário) para atingir a corrente de base térmica, iniciando em seguida o regime de pulsação térmica<sup>7</sup>. Conseqüentemente, um menor volume de material era depositado na região de abertura dos arcos. O tempo e a corrente selecionados para a fase inicial das soldagens foram ajustados em 50 A e 0,5 s.

As regiões de aberturas dos arcos são apontadas na Figura 8.21 e percebe-se a uniformidade do material depositado com as demais regiões da camada. Esse resultado mostrou que um crescimento lento da corrente, logo após abertura do arco (rampa de corrente), proporciona uma melhora no problema de excesso de material depositado naquela região (apontada na figura pelas setas).

<sup>7</sup> Essas opções de ajustes podem ser vistas na figura 8.2, no campo denominado de “GERAIS” (corrente média inicial e tempo de rampa).

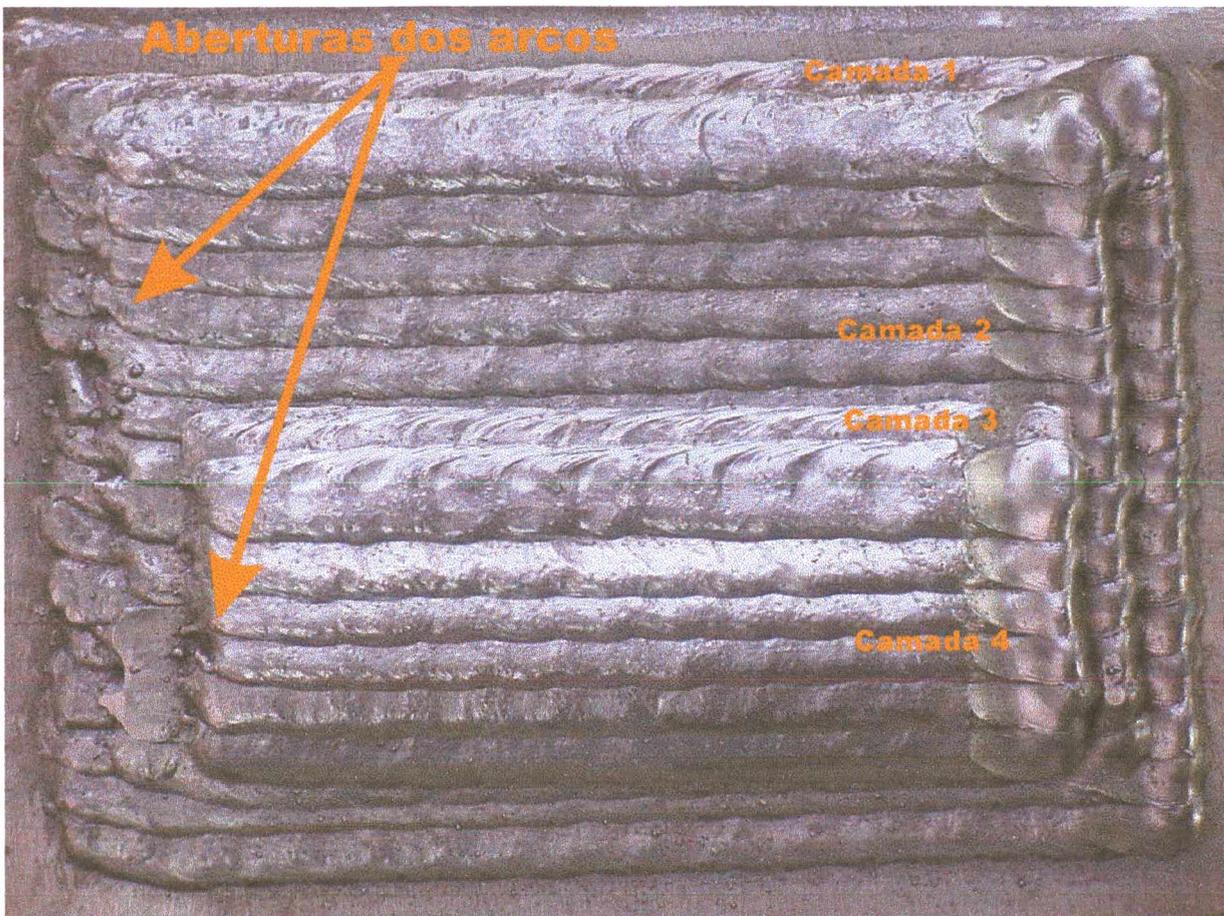


Figura 8.21 – Foto das quatro camadas de revestimento confeccionadas com o processo MIG/MAG Pulsado Térmico com Duplo Arame e Potenciais Isolados

### 8. 8 Considerações finais

No item em que se determinaram os parâmetros de destacamento de gotas do eletrodo tubular utilizado nesse capítulo, pôde-se observar que os parâmetros que resultam em uma condição estável de soldagem para o processo MIG/MAG, com um arame, não conferem a mesma estabilidade para o Duplo Arame. Esse resultado fornece evidências de que as combinações  $I_p$  e  $t_p$  que resultam no destacamento de uma gota por pulso para ambos os processos divergem.

Nas soldagens com arame tubular, no modo pulsado térmico, ficou demonstrada a relevância da variável defasagem nos pulsos de corrente para proporcionar um acabamento melhor aos depósitos. Nas soldagens com os pulsos em fase, ou naquelas em que não se controlaram os instantes de pulsação, os salpicos sobre os cordões foram mais acentuados.

Para soldagens na posição sobrecabeça, a combinação entre posicionamento de tochas (“lado a lado” e “tandem”) e direção de deslocamento, que melhor favorece as operações de revestimento, é a indicada na Figura 8.3 pela seta LD, isto é, eletrodos “lado a lado” e direção de soldagem longitudinal (sentido descendente). Com esse arranjo, cordões mais largos e planos foram obtidos em relação a uma direção inclinada (Figura 8.14). Na direção horizontal,

independentemente do posicionamento das tochas, não foram obtidos cordões de solda aceitáveis, devido aos defeitos verificados sobre os depósitos (“humping”).

O procedimento experimental seguido neste capítulo resultou em uma faixa operacional para o Duplo Arame, aplicada às operações de revestimento. Todos os ensaios realizados com os valores das variáveis de soldagem, selecionados dentro dessa faixa operacional determinada, não apresentaram defeitos do tipo falta de fusão ou porosidades. Esse resultado atesta a aplicabilidade do processo a esse tipo de operação.

A proposta do programa para seleção das variáveis de soldagem do duplo arame, quando esse é empregado em operações de revestimento, mostrou-se flexível por meio da sua faixa de operação, pois permite ao usuário atuar na energia imposta ao processo e nas características geométricas dos cordões de solda, sem comprometer, de forma significativa, o acabamento superficial do depósito e a sustentação da poça metálica na soldagem fora de posição.

Neste capítulo, pôde-se verificar a dependência da velocidade de arame com a corrente e com a velocidade de soldagem na posição sobrecabeça. Essa relação foi equacionada e é utilizada no programa para determinar as variáveis da corrente pulsada. A diferença máxima entre os valores de velocidade de arames prevista pela equação e os medidos experimentalmente foi de 6,9 pontos percentuais.

As equações determinadas experimentalmente para a largura e o reforço dos cordões, em função das variáveis ajustáveis do processo, podem ser utilizadas pelo usuário, em uma soldagem automatizada, para estimarem as dimensões dos depósitos. Recomenda-se para um melhor desempenho do processo nessa aplicação específica, que se selecionem, para as variáveis ajustáveis, valores intermediários aos limites analisados no trabalho, ou seja: para  $ImPt$  valores em torno 120 a 130 A/arame; para a energia imposta, em torno de 3,7 a 4,0 A.min/cm e para  $DPeB$ , valores entre 45 e 55%.

## CAPÍTULO 9

### CONCLUSÕES

Em relação às soldagens feitas com arames de aço carbono:

- A defasagem de tempo entre os pulsos de corrente dos arcos voltaicos influenciou o desvio dos arcos e, por consequência, a trajetória das gotas metálicas que se destacaram dos eletrodos. Os arcos voltaicos e as trajetórias das gotas declinaram-se mais em direção ao centro dos cordões na condição de pulsos de corrente em fase do que na condição de pulsos defasados.
- Para um posicionamento “lado a lado” dos eletrodos, a defasagem nos pulsos de corrente exerce influências sobre o perfil de penetração das soldas. A condição de pulsos defasados apresentou, em níveis mais baixos de corrente média (80 a 120 A), características de dupla penetração (“double finger”), e a de pulsos em fase, uma penetração maior no centro dos cordões, independentemente do nível de corrente média.
- Tendo como critérios de avaliação o acabamento dos depósitos, a quantidade de salpicos e a presença de porosidades, em soldagens por simples deposição sobre chapas, nas posições planas e sobrecabeça, não houve diferenças significativas entre os depósitos realizados com e sem a tecnologia de defasagem nos pulsos de corrente.
- A soldagem com os eletrodos posicionados “lado a lado” resultou em penetrações maiores nas regiões próximas às extremidades da solda e menor no centro do cordão. O aumento da corrente média tende a reduzir essa diferença, tornando o perfil de penetração mais uniforme. O posicionamento em “tandem” dos eletrodos resultou em perfis com penetração maior na região central da solda.
- Para o posicionamento “lado a lado” dos eletrodos, um ângulo maior entre as tochas promoveu o aumento da diluição e a formação de perfis mais uniformes, com uma diferença menor de penetração entre as laterais e o centro do cordão. O aumento na distância entre os eletrodos resultou em crescimento da largura e em redução da penetração no centro dos cordões.

Em relação às soldagens de revestimento feitas com eletrodos tubulares na posição sobrecabeça:

- Nas soldagens realizadas com a pulsação térmica ficou demonstrada a relevância da variável defasagem nos pulsos de destacamento de gotas. Nos ensaios realizados com os pulsos de corrente em fase ou, naqueles em que não se controlaram os instantes de pulsação, os salpicos sobre os cordões foram mais acentuados.
- O processo MIG/MAG-PDAPI pode ser aplicado em operações de revestimento fora de posição. Com o posicionamento “lado a lado” das tochas, cordões largos e planos foram obtidos sem apresentarem defeitos do tipo falta de fusão ou porosidades.
- O programa de seleção das variáveis de soldagem para o duplo arame pode ser implementado em fontes microprocessadas, similares às que foram empregadas neste trabalho. O programa é flexível e permite ao usuário controlar, dentro da faixa operacional levantada, a energia imposta ao processo e as características geométricas dos cordões de solda.
- Procedimento experimental similar ao que foi seguido para determinar o campo operacional de trabalho com duplo arame pode ser repetido para se fazer o mesmo levantamento em outras posições de soldagem e aplicações.

## CAPÍTULO 10

### SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Faz-se a seguir algumas sugestões de trabalhos para darem continuidade aos estudos com o processo MIG/MAG com dois arames.

- Estudos comparativos entre as variações do MIG/MAG Duplo Arame (potencial único e potenciais isolados) em soldagens de chapas finas a altas velocidades de soldagem. Neste trabalho, critérios de estabilidade dos arcos voltaicos, econômicos, de produtividade e de qualidade deverão ser estabelecidos para uma maior eficiência nas comparações dos resultados.
- Realizar ensaios de revestimento com o MIG/MAG Duplo Arame Potenciais Isolados, empregando-se os arames tubulares utilizados nas operações de revestimento das superfícies desgastadas das pás de turbinas hidráulicas, a fim de avaliar as propriedades mecânicas, as características metalúrgicas e a resistência à cavitação das superfícies revestidas.
- Estudar a influência da DBCP na estabilidade dos arcos voltaicos e na geometria dos depósitos, uma vez que, em operações práticas automatizadas, esta variável pode sofrer alterações decorrentes das características das juntas ou, no caso dos revestimentos, das irregularidades geométricas das superfícies deterioradas.
- Estudar e desenvolver um sistema de controle e monitoramento dos comprimentos dos arcos voltaicos, baseado, por exemplo, em sensores ópticos ou nas tensões de arcos, a fim de proporcionar uma maior estabilidade nas soldagens automatizadas.
- Aplicação da corrente alternada na soldagem MIG/MAG Duplo Arame com os objetivos de se estudar a estabilidade dos arcos e de se avaliar o processo em aplicações de soldagem de chapas finas a altas velocidades de deslocamento das tochas.

## CAPÍTULO 11

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLUM, C. J. (1983). Mig Welding – Time for reassessment, Metal Construction, 15, (6) jun 1983, pp347-355.

ALLUM, C. J. (1985). Recent Developments in Pulsed Gas Metal Arc Welding, Welding for Challenging Environments, Oct., 1985, pp. 1-10.

AMIN, M. (1981). Synergic Pulse Mig Welding, Metal Construction, 13 (6), 1981, pp. 349-353.

AMIN, M. (1983a). Prediction of Pulse Parameters for MIG Welding, The Welding Institute Research Bulletin, vol. 24, Feb, 1983, p. 48-54.

AMIN, M. (1983b). Pulse Current Parameters for Arc Stability and Controlled Metal Transfer in Arc Welding, Metal Construction, (5) May, 1983, p. 272-278.

AMERICAN WELDING SOCIETY – AWS (1987) Welding Handbook, Welding Processes, Vol. 2, 8ª edição, USA, 955 ps.

ASTM (1978). American Society For Testing And Materials. Stand Test Method for Resitivity of Electrical Conductor Materials. Committee B-1.

BAIXO, C. E. I. (1998). Aplicação do Processo MAG com Duplo Arame na Soldagem Hiperbárico a Sêco. Relatório Técnico LABSOLDA/UFSC, Florianópolis, SC, Maio de 1998, 19 ps.

BALSAMO, P.S.S. (2000). Desenvolvimento de Um Sistema Sinérgico não Linear para Soldagem MIG Pulsado de Aço Inoxidável. Tese de doutorado, UFU, Uberlândia, MG, 2000. 193p.

**BALSAMO, P.S.S., LOURIEL, O.V., VILELA, M. SCOTTI, A (2000)** Development of an Transfer in Welding: Synchronized Shadowgraphy, Int. J. For the Joining of Materials, 12, (2), 2000, pp 48-59.

**BILL, L. (1997).** FCAW, Multiwire & Gas Selection – Techniques to Enhance MIG Productivity, Welding & Metal Fabrication, May 1997, p. 10 a 12.

**BLAKELEY, P. J. (1991).** Magnetic arc blow – causes and remedies, Welding & Metal Fabrication. Aug/Sept 1991, 59 (7), p.401 a 404.

**BROWN, K. W. (1975).** Introducing the Switched-Arc Welding Process. Welding Institute Research Bulletin, 1975, 16 (6), p. 172-175.

**DISTCHUN, A. et al. (1988).** The Development and Application of a Synchronized, Twin Arc, Frequency-Modulated Pulsed GMAW/MIG Welding System. IIW Doc. XII 1067-88, 1988, pp. 203-225.

**DUTRA, J. C. (1989a).** Procedimento Computadorizado de Determinação, Seleção e Controle de Variáveis na Soldagem MIG/MAG. Tese de doutorado, UFSC, Florianópolis, SC, 1989. 151p.

**DUTRA, J. C. (1989b).** Procedimento Computadorizado de Estudo de Transferência Metálica para Determinação das Variáveis de Soldagem com Corrente Pulsada Anais do XIV ENTS, São Paulo, SP, Nov, 1989, ABS, pp. 637-652.

**DUTRA, J. C. et al (1993).** Comparação entre os Processos MIG Pulsado e MAG Curto Circuito em Soldagem Automatizada, Anais do XIX ENTS, ABS. Águas de São Pedro, SP, pp. 265-272.

**DUTRA, J. C. et al (1995)** O Processo MIG/MAG Pulsado com Pulsção Térmica, , Anais do XXI ENTS, ABS. Caxias do Sul, RS, Jun 1995, pp. 889-902.

**ECER, M. G. (1980).** Magnetic Deflection of the Pulsed Current Welding Arc, Welding Journal, nº 6: Junho, 1980, p. 183s-191s.

**ESSERS, W. G. & WALTER, R. (1981).** Heat Transfer and Penetration Mechanisms with GMA and Plasma-GMA Welding, Welding Journal, nº 2: February, 1981, p. 37s-42s.

**GUILE, A. E. (1980).** Process At Cathode Roots On Nonrefractory Metals Having Films Of Their Own Oxide. International Conference on Arc Physics and Weld Pool Behaviour. The Welding Institute Cambridge, 1980, pp. 79-86.

**GUILE, A. E. (1984).** Electric Arcs. Their Electrodes Process and Engineering Applications. IEE Proc., vol. 131, nº 7, 1984, pp. 450-480.

**GUREV, H. S. & STOUT, R. D. (1963).** Solidification Phenomena in Inert Gas Metal-Arc Welds. Welding Journal, nº 7, July, 1963, p. 298s –310s

**HACKL, H. (1997).** Faster with Two Wire Electrodes Metal Inert Gas Welding of Aluminium Materials, Proceedings, Exploiting Advances in Arc Welding Technology. TWI, Abington, Cambridge, U.K. 1997.

**IIW (1977).** Classification des Divers Modes de Transfer du Metal en Soudage a l'arc. Doc. International Institute of Welding, n. XIII-535-77, 1977.

**ISHIZAKI, K. (1980).** A New Approach to the Mechanism of Penetration. Int. Conf. Weld Pool Chemistry and Metallurgy. TWI, Abington, Cambridge, UK, 1980, pp. 65-76.

**JACOBSEN, N. (1992).** Monopulse Investigation of Drop Detachment in Pulsed Gas Metal Arc Welding, Journal Physics D: Applied Physics, 25, 1992, pp. 783-797.

**JOHNSON, J.A.; CARLSON, H.B.; SMART, H. B. & CLARK, D.E. (1991).** Processes Control of GMAW: Sensing of Metal Transfer Mode, Welding Research Supplement – Welding Journal, Apr, 1991, pp 91s-99s.

**KUJANPÄÄ, V. P.; KARJALAINEN L. P. & SIKANEN (1984).** Role of Shielding Gases in Discontinuity Formation in GTA Welding of Austenitic Stainless Steel Strips. Welding Journal, nº 5, May 1984, p. 150s – 155s.

**LAHNSTEINER, R. (1994).** Twin Process High Powered MAG Welding with Two Electrode Wires. Proceeding: Welding and Cutting, 1994, DVS- Verlag.

**LANCASTER, J. F. (1986)** The Physics of Welding, Pergamon Press, 2<sup>nd</sup> edition, IIW/IIS.

**LARSEN, U. (1990).** Investigation of Stability in Automated, Positional GMA Welding of Steel. M.Sc. Thesis, 1991, Cranfield Institute of Technology.

**LASSALINE, B. (1989).** et al, Narrow Groove Twin-Wire MIG/MAG of High-Strength Steel, Welding Journal, nº 9: September, 1989, p. 53-58.

**LESNEWICH, A. (1958).** Control of Melting Rate and Metal transfer in Gas Metal Arc Welding Research Supplement – Welding Journal, Agosto, 1958, p. 343s – 353s.

**MAMANI, L. G., DUTRA, J. C., GOHR, R. Jr. (1996).** Desenvolvimento de um Programa Computacional para Controle Sinérgico de Processo de Soldagem MIG/MAG. Anais do XXII ENTS, ABS. Blumenau, SC, 1996, pp. 401 a 407.

**MATSUNAWA, A. & NISHIGUSHI, K. (1980).** Arc Characteristics in High Pressure Argon Atmospheres. International Conference on Arc Physics and Weld Pool Behaviour. The Welding Institute Cambridge, 1980, pp. 67-77.

**MICHIE, K., BLACKMAN, S. & OGUNBIYI, T. E. B. (1999).** Twin Wire GMAW: Process Characteristics and Applications, Welding Journal, nº 5: May 1999, p. 31 a 34.

**MOTTA, M. F. & DUTRA, J. C. (2001).** Uma Discussão sobre a Utilização da Corrente Pulsada no Processo MIG/MAG Duplo Arame com Potencial Isolado. In: Anais XXVII CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem, CT-23, 2002. CD-ROM.

**NIXON, J. H. & NORRISH, J. (1988).** Determination of Pulsed MIG Process Parameters, Special Supplement from Welding & Metal Fabrication, April, 1988, pp. 4-7.

**NORRISH, J. (1992)** Gas metal arc welding. In: Advanced Welding Process. IOP Publishing, Bristol, Philadelphia and New York, 1992. pp. 131-173.

**ORCIOLI NETO, A., DUTRA, J. C. & MOTTA, M. F. (2002).** Influência Da Variação Das Características De Fabricação De Arames-Eletrodo, Com O Mesmo Diâmetro Nominal, Sobre A Taxa De Fusão, In: Anais do 57º Congresso Anual da ABM, pp. 2204 a 2213, 2002, São Paulo, SP. CD ROM.

**PATON, B. E., MANDEL'BERG, S. L. & SIDORENKO (1971).** Certain Special Features of the Formation of Welds Made at High Speeds. Avt Svarka, nº 8, 1971, pp. 1-6.

**PAULA, O. S. & DUTRA, J.C. (1996).** Uma contribuição para a Comparação entre o Processo MIG/MAG Convencional e Pulsado Anais do XXII ENTS, ABS. Blumenau, SC. 1996. pp. 239-250.

**PEREIRA, W. A., COSTA, U.P. & SCOTTI, A (1995).** Avaliação do Efeito dos Parâmetros de Soldagem sobre as Características Operacionais nos Processos MIG Pulsado e MAG Curto Circuito. Anais XXI ENTS, ABS. Caxias do Sul, RS. Jun. 1995. pp. 529-542.

**PLATZ, J. (1996)** Two Wire Technique Increases the Speed in MAG Welding. Zvaranie-Svarovani, 1996, 45 (6), pp. 124-126.

**QUINTINO, M.L.C. (1985).** Soldadura MIG/MAG com Corrente Pulsada – Estado Actual da Evolução. Anais do XI ENTS, ABS. Rio de Janeiro, RJ,. Out. 1985,. pp. 44-59.

**QUITES, A. M. & DUTRA, J. C. (1979).** Tecnologia da Soldagem a Arco. EDEME, Florianópolis, 1979, 248 ps.

**RAMIRES, A. M. G. (1999).** Análise e Desenvolvimento do Processo MIG/MAG Duplo Arame com Potencial Único, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Santa Catarina: Florianópolis, 1999.

**RHEE, S. & KANNATEY-ASIBU, Jr.** Observation of Metal Transfer During Gas Metal Arc Welding. Welding Journal, nº 10 Oct., 1992, pp. 381s a 386s.

**RICHARDSON, I. M. (1989).** Welding Technology; Introduction to Arc Physics. Cranfield Institute of Technology. 1989, 41 pgs.

**RICHARDSON, I. M. (1994).** The Influence of Power Source Dynamics on Wire Melting Rate in Pulsed GMA Welding, Welding Journal, nº 2, Feb. 1994, p. 32s-37s.

**SAVAGE, W. F., NIPPES, E.F. AND AGUSA, K. (1979).** Effect of Force on Defect Formation in GTA Welding. Welding Journal, nº 7, Jul. 1979, p. 212s-224s.

**SCOTTI, A. (1991).** Processes Modeling to Establish Control Algorithms for Automated GMAW. Tese PhD, Cranfield Institute Tecnology, Cranfie0ld, UK, 1991, 270 p.

**SCOTTI, A.; CLARK, D.E. & KENNEY, K. (1998).** Mapeamento da Transferência Metálica em MIG com Aço Inoxidável. In: Anais XXIV CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem, CT-30, Fortaleza, CE, 1998. CD-ROM

**STREET, J. A. (1990).** Pulsed Arc Welding. An Abington Publishing Special Report. Anbington Publishing, Cambridge CB1 6AH, England: 1990. 57p. ISBN 1 85 5573 0278.

**SUBRAMANIAM, S.; WHITE, D.R.; JONES, J. E. & LYONS, D. W. (1998).** Droplet Transfer in Pulsed Gas Metal Arc Welding of Aluminion. Welding Journal, nº 11, Nov. 1998, pp. 458s-464s.

**SUN, Z. et al, (1999)** Twin Wire Gas Tungsten Arc Cladding Offers Increased Deposition Rates. Welding Journal, nº 10, Out. 1999, p. 61 – 64.

**TROMMER G. (2002).** Welding with Two Wire Electrodes – Status and Prospects of the Optimisation of Gas – Shielded Metal – Arc Welding. Welding and Cutting, nº 3, 2002, pp. 122-125.

**UTRACHI, G. D.(1978)** Multiple Electrode Systems for Submerged Arc Welding. Welding Journal, nº 5: May 1978, p. 15 a 22.

**VOLODIN, V. S. & SLUCHANKO, N. A. (1955)** Automatic Welding with Two Electrodes. Svar. Proiz., vol. 3, 1955.

**VOROPAY, N. M. & PROTSENKO, P.P.** Features of Weld and HAZ Formation in Gas-Shielded Pulsed Twin-Arc Welding in High-Strength Low-Alloyed Steels. The Paton Welding Journal, nº 8, Aug., 2000, pp.40 – 46.

**WARSH, K. (1995)** Pulsed Arc Welding: Practical Specifications. Welding International, 9 (10).pp. 761 – 766.

**WASZINK, J. H. & PIENA, M. J. (1986).** Experimental Investigation of Drop Detachment and Drop Velocity in GMAW, Welding Journal, November, 1986, pp. 289s a 298s.