

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM
SOBRE A TRANSFERÊNCIA METÁLICA E PERFIL DO CORDÃO NO
PROCESSO MIG/MAG DUPLO-ARAME**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia por:

PETER JAN GROETELAARS

como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica

Aprovada por:

Prof. Américo Scotti, PhD., UFU (Orientador)

Prof. Valtair Antonio Ferraresi, Dr. Eng., UFU

Prof. Louriel Oliveira Vilarinho, Dr. Eng., UFU

Prof. Eduardo de Magalhães Braga, Dr. Eng., UFPA

Uberlândia, 01 de julho de 2005

À minha Mãe e ao Tio Eduardo
Às minhas irmãs

Agradecimentos

Ao meu orientador, professor Américo Scotti, pela orientação dedicada e de qualidade, pelo incentivo e apoio no decorrer do curso de Mestrado;

À minha mãe Tereza e tio Eduardo, pela motivação e pelo amor, o que foi imprescindível para o meu desempenho;

Ao meu pai (*in memoriam*), pelo exemplo de dedicação aos estudos;

Às minhas irmãs Gretha e Natalie, aos cunhados Fernando e Sérgio e ao meu sobrinho e afilhado Jan, pela alegria e incentivo permanentes;

Ao professor Valtair Ferraresi, por proporcionar o primeiro contato com o LAPROSOLDA, pelo incentivo durante o curso e pelos churrascos e pescarias que tantas alegrias trouxeram;

Ao meu amigo Ilvan, um dos principais incentivadores da minha jornada acadêmica, pela alegria, pela amizade e por todo apoio durante o curso;

À minha namorada Érica, pela dedicação e compreensão nos momentos difíceis do curso;

Aos amigos conterrâneos que ainda buscam o mesmo objetivo acadêmico, Ciro, Daniel, Venceslau, que tanto me apoiaram e conviveram durante boa parte da minha trajetória em Uberlândia;

Aos meus amigos do LAPROSOLDA, Temico, Duda, Clayton, Alexandre, Alessandra, Fernanda, Ruham, Otávio, Richetti, Vinícius, Louriel, Davi, Tereza, André, Lazinho, pela amizade e pela colaboração constante;

Aos membros da Oficina Mecânica e Laboratório de Materiais da UFU, pela colaboração na confecção e tratamento dos corpos de prova utilizados;

Aos meus amigos, Hexaner, Marco Túlio, Johan, Israel, Juan, Flávio, Danusa, Milena, Lucas, João, Dona Tereza, Sueli e demais que conviveram comigo na minha estadia em Minas;

Aos alunos de iniciação científica, Adriano, Diogo, Douglas, Catalão, Ênio, Vinícius, Thales, que tanto me apoiaram;

À BRASKEM em nome de Amílcar Andrade Sales, pela confiança e apoio na conclusão do curso através do fornecimento de passagens aéreas;

À White Martins, pelo fornecimento dos materiais de consumo e equipamentos utilizados neste trabalho;

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFU pelo suporte infra-estrutural;

À CAPES, pelo suporte financeiro através da bolsa de Mestrado fornecido no curso.

Sumário

SIMBOLOGIA.....	viii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xvi
RESUMO	xvii
ABSTRACT	xviii
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO II - REVISÃO DA LITERATURA - SOLDAGEM COM DUPLO ARAME.....	5
2.1 - INTRODUÇÃO	5
2.2 - CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO	5
2.2.1 - <i>Disposição em paralelo</i>	6
2.2.2 - <i>Disposição em série</i>	7
2.2.3 - <i>MIG/MAG Duplo Arame com Potencial Único</i>	7
2.2.4 - <i>MIG/MAG Duplo Arame com Potenciais Isolados</i>	9
2.2.5 - <i>Terminologia</i>	13
2.3 - VANTAGENS DO PROCESSO	14
2.3.1 - <i>Aumento da velocidade de soldagem</i>	14
2.3.2 - <i>Aumento da taxa de deposição</i>	16
2.3.3 - <i>Aumento da penetração</i>	16
2.3.4 - <i>Redução da porosidade</i>	17
2.3.5 - <i>Formabilidade do cordão</i>	17
2.3.6 - <i>Outras vantagens</i>	17
2.4 - DESVANTAGENS DO PROCESSO.....	18
2.4.1 - <i>Custo do equipamento</i>	18
2.4.2 - <i>Aspectos relacionados com segurança e saúde</i>	19
2.4.3 - <i>Necessidade de treinamento de pessoal</i>	19
2.4.4 - <i>Outras desvantagens</i>	19
2.5 – INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO.....	21
2.5.1 - <i>Transferência metálica</i>	22
2.5.2 - <i>Modo operacional</i>	28

2.5.3 - Alinhamento do eletrodo em relação ao cordão de solda	30
2.5.4 - Independência de parâmetros em cada arame	32
2.5.5 - Uso de corrente pulsada.	32
2.5.6 - Velocidade de soldagem	33
2.5.7 - Velocidade de alimentação	33
2.5.8 - Ângulo da tocha.....	36
2.5.9 - Tipo de junta e material	37
2.5.10 - Tipo do arame-eletrodo	38
2.5.11 - Distância bico de contato-peça (DBCP)	38
2.5.12 - Espaçamento entre eletrodos.....	40
2.5.13 - Gás de proteção	41
2.5.14 - Efeito dos gases de proteção no processo duplo arame	46
CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
3.1 – BANCADA DE SOLDAGEM	47
3.1.1 - Fontes de soldagem – MTE DIGITEC 600 (IMC/LABSOLDA)	47
3.1.2 - Tochas de soldagem MIG/MAG duplo arame	49
3.1.3 - Mesa de soldagem	50
3.1.4 - Sistema de aquisição de dados e comunicação entre as fontes.....	51
3.1.5 - Programas computacionais	52
3.2 - CALIBRAÇÃO DAS VARIÁVEIS ENVOLVIDAS NA SOLDAGEM	53
3.2.1 - Velocidade de alimentação do arame	53
3.2.2 - Velocidade de soldagem	54
3.2.3 - Vazão de gás.....	54
3.3 - BANCADA DE FILMAGEM	55
3.3.1 - Câmera de alta velocidade.....	56
3.3.2 - O laser e o sistema óptico	56
3.3.3 - Filtros.....	57
3.3.4 - Acessórios	58
3.3.5 - Software	58
3.4 - MATERIAIS DE CONSUMO	58
3.4.1 - Material de Base.....	58
3.4.2 - Material de Adição.....	58
3.4.3 - Gases de Proteção.....	58
3.5 - METODOLOGIA	59
3.5.1 - Variação do comprimento de arco em um mesmo nível de corrente	61

3.5.2 - Variação do teor de CO ₂ do gás de proteção em um mesmo nível de corrente	62
3.5.3 - Variação da distância entre arames-eletrodo no bico de contato em um mesmo nível de corrente.....	64
3.5.4 - Variação do ângulo de ataque em um mesmo nível de corrente	65
3.5.5 - Variação da velocidade de alimentação de cada arame em um mesmo nível de corrente.....	66
3.5.6 - Variação conjunta da velocidade de alimentação de cada arame e do ângulo de ataque em um mesmo nível de corrente	66
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
4.1 - ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA	67
4.1.1 - Transferência metálica para diferentes comprimentos de arco.....	67
4.1.2 - Transferência metálica para diferentes do teores de CO ₂ no gás de proteção.....	71
4.1.3 - Transferência metálica para diferentes distâncias entre eletrodos no bico de contato (tocha DAPU versus DAPI).....	79
4.1.4 - Transferência metálica para diferentes ângulos de ataque da tocha e velocidade de alimentação	83
4.2 - ANÁLISE DO PERFIL SOLDADO.....	87
4.2.1 - Perfil soldado para diferentes comprimentos de arco	87
4.2.2 - Perfil soldado para diferentes do teores de CO ₂ no gás de proteção	90
4.2.3 - Perfil soldado para diferentes distâncias entre eletrodos no bico de contato (tocha DAPU versus DAPI).....	96
4.2.4 - Perfis soldados para diferentes ângulos de soldagem e velocidade de alimentação em cada arame.....	99
CAPÍTULO V - ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS.....	104
CAPÍTULO VI - CONCLUSÃO.....	108
CAPÍTULO VII - TRABALHOS FUTUROS.....	110
CAPÍTULO VIII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112
ANEXOS.....	118

Simbologia

α e β	são constantes associadas com o gás de proteção, polaridade e diâmetro e material do eletrodo;
σ	Desvio Padrão;
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
Ang	Ângulo de ataque da tocha (graus) (inclinação em relação à direção de soldagem);
AWS	<i>American Welding Society</i> ;
B	Campo magnético;
CA	Corrente Alternada;
CC	Corrente Contínua;
CEA	Característica Estática do Arco;
CEF	Característica Estática da Fonte;
$\cos \varphi$	Fator de potência;
CP	Corpo de prova;
DAPI	Duplo arame com potencial isolado;
DAPU	Duplo arame com potencial único;
DBCP	Distância bico de contato-peça (mm);
Esc	Escrava;
Fem	Força eletromagnética ou de Lorentz;
I	Corrente (A);
I _{ef}	Corrente eficaz (A);
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> ;
IIW	<i>International Institute of Welding</i> ;
I _m	Corrente média de soldagem (A);
L	Extensão do eletrodo (comprimento energizado do eletrodo) (mm);
LAPROSOLDA	Laboratório para o Desenvolvimento de Processos de Soldagem - UFU
MAG	<i>Metal Active Gas</i> ;
MIG	<i>Metal Inert Gas</i> ;
θ_d	Ângulo Direito;
θ_e	Ângulo Esquerdo;
RMS	<i>Root Mean Square</i> ;
TF	Taxa de fusão;

TIG	<i>Tungsten Inert Gas;</i>
Uef	Tensão eficaz (V);
Um	Tensão média de soldagem (V);
V	Tensão ajustada na fonte de soldagem (V);
Vag	Velocidade de alimentação no arame guiado (m/min);
Valim	Velocidade de alimentação do arame (m/min);
Val	Velocidade de alimentação no arame líder (m/min);
Vs	Velocidade de soldagem (cm/min).

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Comparação da velocidade de soldagem entre o processo MIG/MAG arame simples e duplo arame (Berge, 2001).....	1
Figura 1.2 – Comparação da velocidade de soldagem entre o processo MIG/MAG arame simples e duplo arame, (Berge, 2001).....	2
Figura 1.3 – Comparação de macrografias referentes a soldagens de chapas de aço carbono com juntas de topo: (a) arame simples (5 passes); (b) duplo arame (2 passes) (Mulligan & Melton, 2002).	2
Figura 2.1 - Representação esquemática do processo MIG/MAG duplo arame	5
Figura 2.2 – Exemplo da utilização do processo com duplo arame com disposição em paralelo: (a) em revestimentos soldados; (b) em soldagem de uma junta de topo com cobre-junta.	6
Figura 2.3 – Exemplo da utilização do processo com duplo arame com disposição em série:(a) soldas de filete; (b) soldas de topo	7
Figura 2.4 – Representação do processo duplo arame com potencial único: (a) esquemática; (b) elétrica.....	8
Figura 2.5 - (a)Tocha de potencial único (modelo fabricado pela Abicor-Binzel); (b) detalhes do bocal/bico de contato.....	8
Figura 2.6 - Representação do processo duplo arame com potenciais isolados: (a) esquemática; (b) elétrica.....	9
Figura 2.7 - Defasagem entre pulsos da fonte "mestre" e "escrava" (Motta, 2002)	10
Figura 2.8 - Tochas de potencial isolado: (a) integrada, com arames paralelos (modelo fabricado pela TBI); (b) acopladas, com arames inclinados; (c) integrada, com arames inclinados (modelo fabricado pela Closs); (d) detalhes do bocal/bico de contato da tocha "c"	11
Figura 2.9 – Alongamento da poça de fusão do processo: (a) com arame simples; (b) com duplo arame (Boeme et al,1996).....	15
Figura 2.10 – Comparação da velocidade de soldagem entre o arame simples e duplo arame para soldagem de aço carbono (em juntas de topo, de filete e sobrepostas) e de aço inoxidável (junta de filete) (adaptação de Hedegard et al, 2004)	15
Figura 2.11 - Causas para assimetria dos campos eletromagnéticos, provocando sopro magnético. Em cima, causado pela posição da conexão do cabo	

terra, enquanto em baixo, causado pela diferença da permeabilidade entre a chapa e o ar atmosférico	20
Figura 2.12 - Interação entre os campos magnéticos produzidos por eletrodos próximos um do outro e soldando simultaneamente, em função da combinação do tipo de corrente.....	21
Figura 2.13 - Modos de transferência classificados pela IIW e adaptados à nomenclatura empregada no LAPROSOLDA, onde: A = globular, B = globular repelida, C = goticular (“spray”) axial, D = goticular com alongamento; E = goticular rotacional, F = gotas explosivas; e G = curto-circuito (Stenbacka & Persson, 1989).....	25
Figura 2.14 - Imagens de arcos voltaicos: a) arco esquerdo está no período de pulso da corrente; b) arco direito está no período de pulso; c) Ambos estão no período de pulso (Motta et al, 2005)	26
Figura 2.15 - Exemplo de uma seqüência de transferência pulsando em fase e a respectiva representação gráfica da trajetória com ângulos resultantes da interferência eletromagnética ($\theta_e = 30^\circ$ e $\theta_d = 16^\circ$) (Motta et al, 2005).....	27
Figura 2.16 – Oscilogramas e valores médios das correntes e tensões nos arames da frente e de trás (Soldagem MIG/MAG duplo arame de simples deposição sobre chapa, posição plana, configuração seqüencial, tocha potencial único, arame AWS ER70S6 de 1,2 mm, com proteção de Ar+8%CO ₂)	29
Figura 2.17- Soldagem de chapa de aço carbono de 12 mm de espessura na posição sobre-cabeça, utilizando DAPI, arames ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro e alinhamento transversal: (a) vista superior; (b) seção transversal (Motta, 2002).....	31
Figura 2.18 – Soldagem utilizando alinhamento seqüencial sobre material de base de aço carbono de 12 mm de espessura: (a) junta de topo; (b) junta de filete (Hedegård et al, 2004)	31
Figura 2.19 - Macrografias de soldagens feitas com a velocidade de alimentação do arame líder fixa (17,9 m/min) e decaindo a do guiado em 4 níveis (Mulligan & Melton, 2002).....	34
Figura 2.20 - Macrografias de soldagens feitas com a velocidade de alimentação do arame guiado fixa (17,9 m/min) e decaindo a do líder em 4 níveis (Mulligan & Melton, 2002).....	34
Figura 2.21 - Evolução da penetração para aumentos da Valim nos arames líder e guiado (Mulligan & Melton, 2002)	35

Figura 2.22 – Evolução da largura para aumentos da Valim nos arames líder e guiado (Mulligan & Melton, 2002)	35
Figura 2.23 – Configurações mais comuns de tocha comercial em relação ao ângulo entre os arames líder e guiado (Hedegård et al, 2004)	36
Figura 2.24- DBCP's diferentes nos bicos de contato em tochas DAPI devido à existência de ângulos distintos	39
Figura 2.25 – Efeito de pequenas distâncias entre eletrodos sobre transferência metálica (adaptada de Bohme et al,1996)	40
Figura 2.26 - Efeito de grandes distâncias entre eletrodos sobre transferência metálica (adaptação de Bohme et al,1996).....	40
Figura 3.1 – Bancada de Soldagem	47
Figura 3.2 – Fontes de Soldagem MTE DIGITEC 600 e Cabeçotes STA-20 trabalhando interligadas como MIG/MAG duplo arame (potencial único ou isolado)	48
Figura 3.3 – Esquema do circuito elétrico da Fonte DIGITEC 600.....	49
Figura 3.4 – Detalhe da tocha DAPU : (a) bocal refrigerado; (b) bico de contato único (distância de 4 mm entre eletrodos).....	50
Figura 3.5 – Detalhe da tocha DAPI : (a) bocal refrigerado; (b) bicos de contato isolados (distância de 10 mm entre eletrodos)	50
Figura 3.7 – Esquema de interligação entre fontes/micro para sistema de aquisição e comunicação entre fontes	51
Figura 3.8 - Tela principal do software Oscilos2ar	52
Figura 3.9 - Bibímetro	55
Figura 3.10- Bancada de Filmagem	55
Figura 3.11 - Câmera de alta velocidade da marca MEMRECAM modelo Ci	56
Figura 3.12- Sistema laser/óptico	57
Figura 3.13 – Posição de corte das amostras no corpo de Prova.....	60
Figura 3.14 – Parâmetros geométricos	60
Figura 3.15 – Sistema de obtenção e tratamento de imagens	61
Figura 3.16 – Representação do efeito da deposição do arame líder sobre a variação do comprimento do arco	63
Figura 3.17 – Configuração da tocha angulada de 10° empurrando.....	65
Figura 4.1 – Amostra seqüencial (tempo entre quadros não necessariamente constantes) que melhor ilustra a transferência metálica com arco curto, com Ar + 8% de CO ₂ e distância entre eletrodos de 4 mm (arco da mestra à esquerda) , CP 1 e 2	68

Figura 4.2 – Amostra seqüencial da transferência metálica com arco médio, com Ar + 8% de CO ₂ e distância entre eletrodos de 4 mm - comportamento 1, CP 3 e 4	69
Figura 4.3 - Amostra seqüencial da transferência metálica com arco médio, com Ar + 8% de CO ₂ e distância entre eletrodos de 4 mm - comportamento 2, CP 3 e 4	69
Figura 4.4 – Amostra seqüencial da transferência metálica com arco longo, com Ar + 8% de CO ₂ e distância entre eletrodos de 4 mm, CP 5 e 6	70
Figura 4.5 - Arco elétrico na DBCP de 20 mm, CP 3 e 4	71
Figura 4.6 - Arco elétrico na DBCP de 24 mm (arco da mestra à esquerda), CP 5 e 6	71
Figura 4.7 – Variação da corrente (média dos valores eficazes) para diferentes teores de CO ₂ , para uma mesma tensão.....	72
Figura 4.8 – Amostra seqüencial (tempo entre quadros não necessariamente constantes) da transferência metálica em arco curto, com o gás de proteção de Ar + 20% CO ₂ , CP 7 e 8.....	73
Figura 4.9 – Amostra seqüencial da transferência metálica do arco médio, com o gás de proteção de Ar + 20% CO ₂ , CP 9 e 10.....	75
Figura 4.10 – Amostra seqüencial da transferência metálica do arco longo com tensão de 32,8V, com o gás de proteção de Ar + 20% CO ₂ , CP 11 e 12.....	77
Figura 4.11 – Amostra seqüencial da transferência metálica do arco mais longo, com tensão de 37,6 V e com o gás de proteção de Ar + 20% CO ₂ , CP 13 e 14.....	79
Figura 4.12 – Amostra seqüencial (tempo entre quadros não necessariamente constantes) da transferência metálica do arco curto, com distância entre eletrodos de 10 mm e gás de proteção de Ar + 8% CO ₂ , CP 15 e 16.....	81
Figura 4.13 – Amostra seqüencial da transferência metálica do arco médio, com distância entre eletrodos de 10 mm e gás de proteção de Ar + 8% CO ₂ , CP 17 e 18	82
Figura 4.14 – Amostra seqüencial da transferência metálica do arco longo, com distância entre eletrodos de 10 mm e gás de proteção de Ar + 8% CO ₂ , CP 19 e 20	82
Figura 4.15 – Amostra seqüencial da transferência metálica do arco mais longo (37,6 V), com distância entre eletrodos de 10 mm e gás de proteção de Ar + 8% CO ₂ , CP 21 e 22	83
Figura 4.16 - Amostra seqüencial (tempo entre quadros não necessariamente constantes) da transferência metálica para ângulo de ataque da tocha de	

10° empurrando, distância entre eletrodos de 4 mm e gás de proteção de Ar + 8% CO ₂ , CP 23 e 24.....	85
Figura 4.17 - Amostra seqüencial da transferência metálica para diferentes velocidades de alimentação de cada arame (Valim líder =12 m/min e Valim guiado= 10 m/min), distância entre eletrodos de 4 mm e gás de proteção de Ar + 8% CO ₂ , CP 25 e 26.....	86
Figura 4.18 - Amostra seqüencial da transferência metálica para diferentes velocidades de alimentação de cada arame (Valim líder =12 m/min e Valim guiado= 10 m/min), distância entre eletrodos de 4 mm e ângulo de ataque da tocha de 10° empurrando, com gás de proteção Ar + 8% CO ₂ , CP 27 e 28	86
Figura 4.19 – Macrografias do perfil soldado com arco curto – DBCP 16 mm, CP 1 e 2 – duas seções por corpo de prova (a e b)	87
Figura 4.20 – Macrografias do perfil soldado com arco longo – DBCP 24 mm, CP 5 e 6 – duas seções por corpo de prova (a e b)	87
Figura 4.21 – Macrografias do perfil soldado com arco médio – DBCP 20 mm, CP 3 e 4 – duas seções por corpo de prova (a e b)	88
Figura 4.22 – Variação da Área Total e Adicionada <i>versus</i> Tensão para as diferentes DBCP's, onde quanto maior a Tensão, maior o arco.....	88
Figura 4.23 – Variação da Penetração e Largura <i>versus</i> Tensão para as diferentes DBCP's, onde quanto maior a Tensão, maior o arco.....	89
Figura 4.24 – Macrografias do perfil soldado com arco curto – DBCP 16 mm, CP 7 e 8 – duas seções por corpo de prova (a e b)	90
Figura 4.25 – Macrografias do perfil soldado com arco médio – DBCP 20 mm, CP 9 e 10 – duas seções por corpo de prova (a e b)	91
Figura 4.26 – Macrografias do perfil soldado com arco longo – DBCP 24 mm, CP 11 e 12 – duas seções por corpo de prova (a e b)	91
Figura 4.27 – Macrografias do perfil soldado com mais arco longo (37,6 V) – DBCP 24 mm, CP 13 e 14 – duas seções por corpo de prova (a e b)	91
Figura 4.28 – Variação da Área Total e Adicionada <i>versus</i> Tensão para diferentes gases de proteção, onde quanto maior a tensão, maior o comprimento de arco	93
Figura 4.29 – Variação da Área Total e Fundida <i>versus</i> Tensão para diferentes gases de proteção, onde quanto maior a tensão maior o comprimento de arco.....	94
Figura 4.30 – Variação da Largura e Penetração <i>versus</i> Tensão para diferentes gases de proteção, onde quanto maior a tensão maior o comprimento de arco.....	95

Figura 4.31 – Macrografias do perfil soldado com arco curto (24,0 V) – DBCP 16 mm, CP 15 e 16 – duas seções por corpo de prova (a e b)	96
Figura 4.32 – Macrografias do perfil soldado com arco médio (30,5 V) – DBCP 20 mm, CP 17 e 18 – duas seções por corpo de prova (a e b)	97
Figura 4.33 – Macrografias do perfil soldado com arco longo (32,8 V) – DBCP 24 mm, CP 19 e 20 – duas seções por corpo de prova (a e b)	97
Figura 4.34 – Macrografias do perfil soldado com mais arco longo (37,6 V) – DBCP 24 mm, CP 21 e 22 – duas seções por corpo de prova (a e b)	97
Figura 4.35 – Variação das áreas total e adicionada <i>versus</i> Tensão para diferentes distâncias entre eletrodos (DAPU <i>versus</i> DAPI), quanto maior a Tensão maior o comprimento de arco	98
Figura 4.36 – Variação da Largura e Penetração <i>versus</i> Tensão para diferentes distâncias entre eletrodos (DAPU <i>versus</i> DAPI), quanto maior a Tensão, maior o comprimento de arco	98
Figura 4.37 – Macrografias do perfil soldado com ângulo de ataque da tocha de 10° e velocidades de alimentação líder=guiado= 11 m/min, CP 23 e 24 – duas seções por corpo de prova (a e b)	100
Figura 4.38 – Macrografias do perfil soldado sem ângulo de ataque da tocha e velocidades de alimentação líder= 12 m/min e guiado= 10 m/min, CP 25 e 26 – duas seções por corpo de prova (a e b)	100
Figura 4.39 – Macrografias do perfil soldado com ângulo de ataque da tocha de 10° e velocidades de alimentação líder= 12 m/min e guiado= 10 m/min, CP 27 e 28 – duas seções por corpo de prova (a e b)	100
Figura 4.40 - Representação gráfica de área total e adicionada para diferentes ângulos de ataque e velocidade de alimentação em cada arame	101
Figura 4.41 – Representação gráfica de penetração e largura para diferentes ângulos de ataque e velocidade de alimentação em cada arame.....	102
Figura 4.42 - Representação gráfica da área adicionada para todos os experimentos	105
Figura 4.43 - Representação gráfica da Largura para todos os experimentos	105
Figura 4.44 - Representação gráfica da convexidade para todos os experimentos.....	106
Figura 4.45 - Representação gráfica da penetração para todos os experimentos.....	107
Figura 4.46 - Representação gráfica do grau de afunilamento para todos os experimentos	107

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - Comparação da velocidade de soldagem entre o processo MIG/MAG arame simples e duplo arame em soldagem, (Mulligan & Melton, 2002).	2
Tabela 2.1 - Classificação de transferência metálica pelo IIW (Liu & Siewert, 1989) adaptada para a nomenclatura empregada no LAPROSOLDA (Laboratório para o Desenvolvimento de Processos de Soldagem – UFU).	24
Tabela 3.1 – Dados técnicos da Fonte MTE DIGITEC 600	48
Tabela 3.2 – Obtenção de tensões de correção para a variação de DBCP, utilizando-se a tocha DAPU e a proteção por Ar+8%CO ₂	62
Tabela 4.1 – Parâmetros ajustados e monitorados nos experimentos com variação do comprimento do arco e Ar+8%CO ₂ (Valim líder = Valim guiado = 11 m/min).	67
Tabela 4.2 – Parâmetros ajustados e monitorados nos experimentos com variação do comprimento do arco e Ar+20%CO ₂ (Valim líder = Valim guiado = 11 m/min)	72
Tabela 4.3 – Parâmetros ajustados e monitorados nos experimentos com distância entre eletrodos de 10 mm e gás de proteção Ar+8%CO ₂ (Valim líder = Valim guiado = 11 m/min)	80
Tabela 4.4 – Parâmetros ajustados e monitorados nos experimentos com diferentes ângulos de ataque e velocidades de alimentação e gás de proteção Ar+8%CO ₂ (DBCP = 24 mm)	84
Tabela 4.5 - Parâmetros geométricos médios e desvios padrão para diferentes comprimentos de arco	88
Tabela 4.6 - Parâmetros geométricos médios e desvios padrão para diferentes teores de CO ₂	92
Tabela 4.7 - Parâmetros geométricos médios e desvios padrão para distâncias entre eletrodos no bico de contato (Tocha DAPU versus DAPI)	97
Tabela 4.8 - Parâmetros geométricos médios e desvios padrão para diferentes ângulos de ataque e velocidade de alimentação em cada arame	101
Tabela 4.9 - Parâmetros geométricos médios e desvios padrão gerais para todos os experimentos	104

Groetelaars, P. J., 2005, "Influência da Variação de Parâmetros de Soldagem sobre a Transferência Metálica e Perfil do Cordão no Processo MIG/MAG Duplo Arame", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG

Resumo

O processo de soldagem MIG/MAG duplo arame desponta no mercado como uma alternativa de união de metais, quando uma alta produtividade é desejada. O seu maior problema, entretanto, é a dificuldade de ajuste dos parâmetros, que, além de duplicados em relação ao MIG/MAG convencional, agem de forma dependentes. Um maior entendimento dessa tecnologia é fundamental para que se possa dominar o processo e as suas variáveis, objetivando uma maior aplicação na indústria. Com a intenção de conhecer melhor esse processo, foi proposto esse estudo a partir de dois enfoques: a) uma revisão bibliográfica abordando os conhecimentos operacionais básicos e a influência das variáveis operacionais sobre a transferência metálica e a geometria do cordão; e b) uma avaliação experimental para verificar a influência de algumas das variáveis sobre a transferência metálica e sobre o perfil do cordão. Inicialmente, foi proposta e avaliada uma metodologia para este estudo, baseada na variação sistemática de alguns parâmetros sem interferência das demais, com análise dos resultados suportados por filmagem em alta velocidade (para observação da transferência metálica), pela monitoração dos sinais elétricos e pela medição geométrica dos cordões. As variáveis escolhidas para a avaliação experimental foram o comprimento do arco, o teor de CO₂ em argônio no gás de proteção, a distância entre eletrodos, o ângulo de ataque da tocha e a relação entre as velocidades de alimentação dos arames. Os experimentos foram realizados sempre com arames de forma sequencial (líder e guiado). Foram também mantidas constantes a corrente média, a taxa total de deposição e a velocidade de soldagem, para permitir comparações, já que o estudo foi feito com a alteração de uma variável a cada vez. Através dos resultados, pôde-se observar que existe um comprimento de arco ideal para a soldagem, que corresponde ao ponto em que se inicia a transferência goticular. Também foi observada, em arcos mais longos, uma forte atração das gotas de cada arame, independentemente da distância entre os arames, que se tornou crítica para soldagens com alto teor de CO₂ no gás de proteção. De uma forma geral, quanto maior o comprimento de arco e a existência de um ângulo de ataque da tocha no sentido empurrando, maiores larguras e áreas totais do perfil soldado foram alcançadas. A maior penetração conseguida ocorreu na condição de velocidade do arame líder maior que do guiado. Um maior teor de CO₂ no gás de proteção mostrou crescer a área fundida, enquanto aumentava também a instabilidade no arco, resultando em elevada perda de material por respingos.

Palavras chave: MIG/MAG. Duplo Arame. Transferência Metálica. Perfil do Cordão.

Groetelaars, P. J., 2005, "Influence of the Weld Parameters on Metal Transfer and Weld Bead Profile in Double Wire MIG/MAG Process", M. Sc. Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brazil

Abstract

Double Wire MIG/MAG welding process appeared in manufacturing market as an alternative for metals joining, when highest productivity is demanded. However, the most important limitations of this process is the difficulty for parameter settings, as much because of doubled parameters in relation to the normal process as because each wire is dependent of each other. A better knowledge of this technology is fundamental to rule the process and its variables, aiming larger application in industry. With the intent of knowing more about this process, it was proposed this work with two approaches: a) a literature survey on basic operating knowledge and about the influence of the variables on metal transfer and weld bead profile; and b) an experimental evaluation to verify the influence of some variables on metal transfer and weld bead profile. Firstly, a methodology, based on a systematic variation of some parameters without the influence of the others, was proposed and evaluated, with the resulting analyses supported by metal transfer high-speed filming, electrical signal monitoring and weld bead profile measurements. The chosen variables for the experimental work were the arc length, the CO₂ content in Ar based shielding gas, the distance between the wires in the torch, the torch attack angle and the ratio between wire feed speeds. The experiments were carried out always with the wire in sequence (leader and trail) and same mean current, total deposition rate and travel speed, so that comparisons could be done. According to the results, there is an ideal arc length, corresponding to the extent in which spray transfer begins. It was observed a strong attraction between drops from each wire ends, regardless the distance between the wires. This attraction turned critical for weldings with high CO₂ content in the shielding gas. On the whole, the longer the arc and keeping the torch in a pushing position the wider and larger the beads. The deepest penetration was reached in a condition in which the speed of the wire leader was greater than of the trailing wire. A higher content of CO₂ in the shielding gas led to increasing melted area, yet increasing also the arc instability, resulting in high material losses due to spattering.

Keywords: MIG/MAG. Double Wire. Metal Transfer. Weld Bead Profile.

Capítulo I - Introdução

O processo MIG/MAG, cujas características são amplamente divulgadas na literatura corrente e de fácil acesso, foi introduzido no mercado no final da década de 40, com o intuito de aumentar a produtividade e versatilidade da fabricação soldada de ligas ferrosas e não-ferrosas. Em 1996 já era o processo de união de materiais mais utilizado nos países industrializados (Bohme et al, 1996).

Como a demanda pelo aumento da produtividade num mercado cada vez mais competitivo, o processo MIG/MAG convencional começa a não atender mais plenamente a demanda das indústrias no que diz respeito à produtividade; procura-se taxas de deposição mais elevadas (similares às do processo Arco Submerso), possibilitando a redução do tempo de soldagem e, conseqüentemente a custos globais. Neste contexto, foi desenvolvido o processo MIG/MAG Duplo Arame. Esta variante do processo MIG/MAG, que já havia sido explorada em 1955 (Volodin & Sluchanko apud Michie et al, 1999), baseia-se na formação de dois arcos elétricos entre a peça e dois arames-eletrodo continuamente alimentados (Michie et al, 1999). A poça de fusão é protegida da mesma forma que na soldagem MIG/MAG convencional, por um fluxo de gás inerte, ativo ou uma mistura de ambos.

A utilização de altas densidades de corrente é responsável pelas elevadas taxas de fusão absoluta desta versão do processo MIG/MAG e, conseqüentemente, pela possibilidade de maiores velocidades de soldagem (Figuras 1.1 e 1.2) ou cordões mais volumosos (Figura 1.3). A redução no número de passes pelo aumento do volume do cordão, em relação ao arame simples, garante um menor tempo de soldagem (Tabela 1.1).

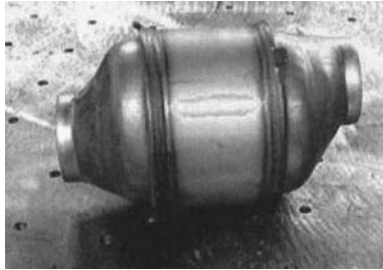
Conversor Catalítico – Acréscimo na Velocidade de Soldagem: 241 %			
	Material: CrNi 4370 de 1 mm de espessura		
	Variáveis	Arame Simples	Duplo Arame
	Processo		
	Arame:	1,2 mm	1,0 + 1,0 mm
	Vel. de Soldagem (Vs):	120 cm/min	290 cm/min
	Vel. de Alimentação:	11 m/min	19+14 m/min
	Taxa de Deposição:	5,3 kg/h	11,9 kg/h

Figura 1.1 – Comparação da velocidade de soldagem entre o processo MIG/MAG arame simples e duplo arame (Berge, 2001).

Tanque de combustível – Acréscimo na Velocidade de Soldagem: 236 %			
	Material: Alumínio de 2 mm de espessura		
	Variáveis	Arame Simples	Duplo Arame
	Processo		
	Arame:	1,2 mm	1,0 + 1,0 mm
	Vel. de Soldagem (Vs):	55 cm/min	130 cm/min
	Vel. de Alimentação:	4,6 m/min	8,2+ 6,1 m/min
	Taxa de Deposição:	0,84 kg/h	1,82 kg/h

Figura 1.2 – Comparação da velocidade de soldagem entre o processo MIG/MAG arame simples e duplo arame, (Berge, 2001).

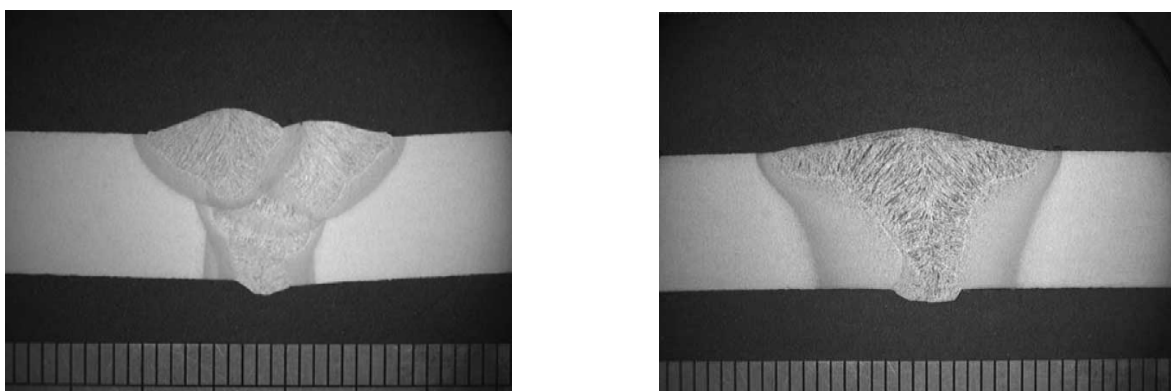


Figura 1.3 – Comparação de macrografias referentes a soldagens de chapas de aço carbono com juntas de topo: (a) arame simples (5 passes); (b) duplo arame (2 passes) (Mulligan & Melton, 2002).

Tabela 1.1 - Comparação da velocidade de soldagem entre o processo MIG/MAG arame simples e duplo arame em soldagem, (Mulligan & Melton, 2002).

Tempo (min:s)	Duplo Arame	Arame Simples
Processo	(2 passes)	(5 passes)
Arco aberto	3:26	9:33
Outros	2:16	6:23
Total	5:42	15:56

Segundo Michie et al (1999), pode-se efetuar soldagens com mais de 100% de aumento na velocidade de soldagem e na taxa de deposição de material. Já Hedegård et al (2004) afirmam que se pode alcançar um aumento de até 300% na velocidade de soldagem em se comparando com o processo com arame simples. Além de capacidade de obter altas taxas

de deposição e velocidades de soldagem, o processo duplo arame ainda possibilita algumas outras vantagens¹ como:

- Controlar a geometria do cordão de solda, através do posicionamento da tocha (ângulos), do comprimento de arco e da corrente de cada arame, apresentando-se como uma solução na soldagem de juntas mal ajustadas;
- Utilizar eletrodos com diferentes diâmetros e diferentes composições químicas;
- Alimentar arames com diferentes velocidades e diferentes intensidades de corrente;
- Reduzir o nível de porosidade em altas velocidades devido ao aumento da área da poça de fusão (maior o tempo para liberação dos gases dissolvidos na poça de fusão para a atmosfera, antes de ocorrer a solidificação do cordão de solda);
- Extrema versatilidade e ampla faixa de aplicações, excelentes características para robotização e pouca produção de escória (intrínsecas ao processo MIG/MAG).

Mesmo apresentando inúmeras vantagens¹, o processo MIG/MAG duplo arame também apresenta algumas limitações, como por exemplo:

- Maior complexidade operacional (ajuste de parâmetros, que além de multiplicados, ainda não se conhece bem como é a interação entre os dois arcos);
- Excessiva geração de fumos e radiações luminosas;
- As taxas de fusão são ainda limitadas (devido principalmente às condições físicas do arco e capacidade mecânica da tocha em correntes elevadas);
- Instabilidades devido à deflexão magnética (proximidade dos arcos);
- Dificuldade na montagem e preparação da área de trabalho (aumento da complexidade do sistema);
- Custo elevado da tocha.

A possibilidade de alterar a disposição dos eletrodos em relação ao cordão de solda empresta uma característica extra em relação ao processo utilizando somente um arame-eletrodo. Existem basicamente duas disposições utilizadas nesse processo: em paralelo, que é mais aplicada para revestimentos, e disposição em série (ou seqüencial), que é mais usada para união e preenchimento de juntas. Há também uma outra variante do processo em relação ao aspecto construtivo da tocha, relacionado com a energização dos eletrodos, a saber, potencial único e potencial isolado.

Por ser um processo de soldagem ainda não muito usual, ao contrário do MIG/MAG convencional, a literatura corrente não explora a fundo alguns aspectos importantes para um

¹ - Américo Scotti (Comunicação verbal)

melhor conhecimento do processo e, conseqüentemente, um uso mais eficaz do mesmo. Por exemplo, muitos trabalhos sobre transferência metálica já foram desenvolvidos para arame simples (Scotti, 1988, Bálsamo et al, 2000a, Scotti, 2000 e Bálsamo et al 2000b), mas pouco se sabe do comportamento de um arco duplo sobre a transferência e mesmo a respeito da influência da mudança de alguns parâmetros de soldagem e aspectos construtivos de tochas sobre esta transferência no Duplo-Arame. O entendimento dos modos de transferência metálica na soldagem tem proporcionado um grande desenvolvimento de técnicas e processos de união de materiais. Através desse entendimento, é possível proporcionar, durante a soldagem, um melhor controle do processo, além da automação com mais eficiência (Vilarinho et al, 2000, 2002 e Ponomarev et al, 2004).

Como a transferência metálica está diretamente ligada aos valores de corrente de soldagem e comprimento de arco (sem mencionar variáveis secundárias, como comprimento do eletrodo e tipo de gás), existe, no caso do duplo arame, a possibilidade de ocorrência de modos de transferência metálica não convencionais e/ou diferenciadas para cada arame. Pequenas variações de corrente entre os arames-eletrodo podem ocorrer por vários motivos, desde problemas de calibração na velocidade de alimentação dos arames por parte dos cabeçotes até a diferenças de valores reais do comprimento do arco, que podem ocorrer devido à sobreposição dos dois arcos em diferentes posições sobre o material depositado (poça de fusão). Pode-se também citar a interação eletromagnética entre os arcos elétricos (sopro magnético), que dependendo da disposição, podem exercer uma influência no tipo de transferência e, conseqüentemente, no perfil do cordão da solda.

Devido ao pouco conhecimento sobre o comportamento da transferência metálica e sobre muitos outros aspectos não enfocados até o momento, e por ser uma técnica com um potencial vasto de aplicação na indústria, justifica-se, então, um estudo mais aprofundado a respeito da mesma, explorando suas possibilidades de aplicação e fundamentos operacionais. Dessa forma, é proposto neste trabalho, como tema de uma dissertação de mestrado, um estudo sobre os fundamentos básicos da operação do processo MIG/MAG Duplo Arame, seguido por um aprofundamento experimental em relação ao comportamento da transferência metálica e do perfil soldado em função da mudança de alguns parâmetros de soldagem e aspectos construtivos do processo. Espera-se, ao final, que esta dissertação possa ser utilizada como manual simplificado para usuários dessa variante do processo MIG/MAG.

Capítulo II - Revisão da Literatura - Soldagem com Duplo Arame

2.1 - Introdução

O processo de soldagem MIG/MAG duplo arame tem sido comercialmente aplicado e avaliado nos últimos anos (Michie et al, 1999, Ketron et al, 2002 e Mulligan & Melton, 2002). Entretanto, o potencial de aplicação desse processo e a mensuração de seus benefícios ainda estão em pleno desenvolvimento. Conforme Michie et al (1999), embora as variantes desse processo estejam sendo estudadas desde meados dos anos 50, somente com o advento de equipamentos de soldagem eletrônicos é que o mesmo se tornou comercialmente disponível. Estes autores ainda citam que só com a minimização da interação eletromagnética entre os arcos elétricos dos arames-eletrodo, através da utilização de fontes mais modernas, que se possibilitaram melhores resultados e controle da transferência metálica.

2.2 - Características do processo

O processo de soldagem MIG/MAG duplo-arama pode ser apontado como uma variante do processo MIG/MAG convencional, na qual se visa o aumento da capacidade de produção do processo. A grande diferença que aparece em relação ao MIG/MAG convencional, como está ilustrado na Figura 2.1, é a utilização de dupla alimentação de arame, podendo formar uma ou duas poças de fusão, protegida por gases inertes, ativos ou uma mistura de ambos.

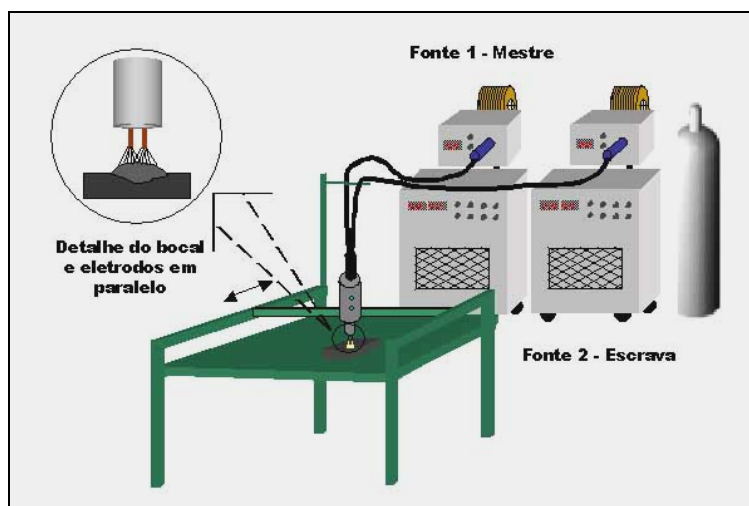


Figura 2.1 - Representação esquemática do processo MIG/MAG duplo arame

A energização dos dois arames-eletrodo pode ser feita por uma única fonte (ou duas interligadas em paralelo) ou por duas fontes independentes, o que caracteriza o processo como potencial único (DAPU) ou potencial isolado (DAPI), respectivamente.

Como dois alimentadores de arame-eletrodo são utilizados, podem-se usar diferentes composições químicas de arames e obter velocidades de alimentação distintas. Como duas fontes podem opcionalmente ser usadas para comandar os dois alimentadores, diferentes parâmetros elétricos podem ser impostos sobre cada arame. Também pode-se variar a disposição (posicionamento) relativa das pontas dos arames em relação à peça, ou seja, disposição em paralelo ou em série.

2.2.1 - Disposição em paralelo

É aquela configuração onde os eletrodos estão dispostos lado a lado numa posição transversal ao sentido de deslocamento da tocha (Figura 2.2). A disposição em paralelo é utilizada, na maioria das aplicações, para soldagem de revestimentos soldados, porém também pode ser encontrada na soldagem de juntas de topo (Sadler, 1999). Neste último caso, a concentração de calor é maior nas bordas da junta do que no centro do cordão, o que é considerado por Gonzáles (1999) como vantagem, pois permite uma soldagem de juntas mal ajustadas ou com grande abertura de raiz, garantindo uma fusão satisfatória das laterais da junta e diminuindo a possibilidade de aparecimento de defeitos por falta de fusão. Já para revestimentos soldados, Lassaline et al (1989) afirmam que se pode obter uma pequena penetração com uma baixa diluição, características desejáveis nesta aplicação.

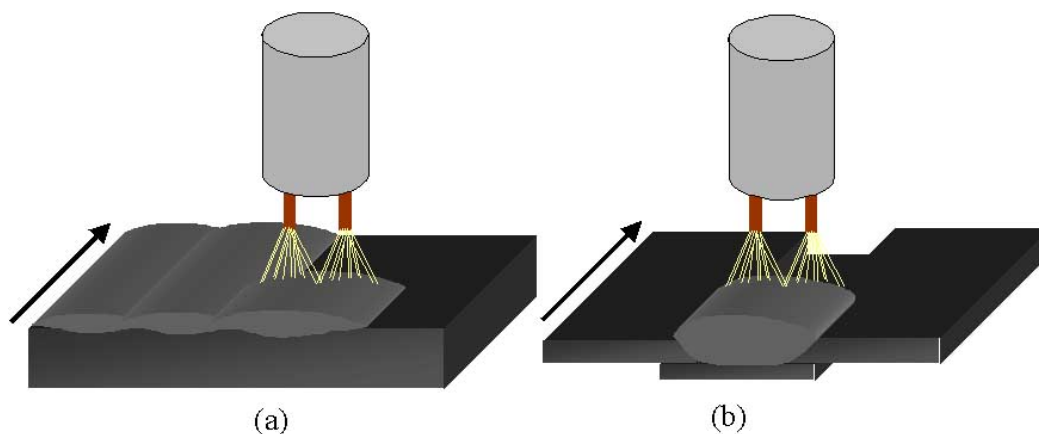


Figura 2.2 – Exemplo da utilização do processo com duplo arame com disposição em paralelo: (a) em revestimentos soldados; (b) em soldagem de uma junta de topo com cobre-junta.

2.2.2 - Disposição em série

Na disposição em série, os arames-eletrodo estão posicionados um atrás do outro na direção do cordão de solda. Essa disposição é utilizada em soldas de preenchimento de chanfro e, comparando-se com a disposição em paralelo, possibilita uma maior penetração e acarreta em aumento da diluição, devido à concentração da energia. Devido a essas características, a disposição em série é bastante utilizada em soldas de filete e de topo (Figura 2.3).

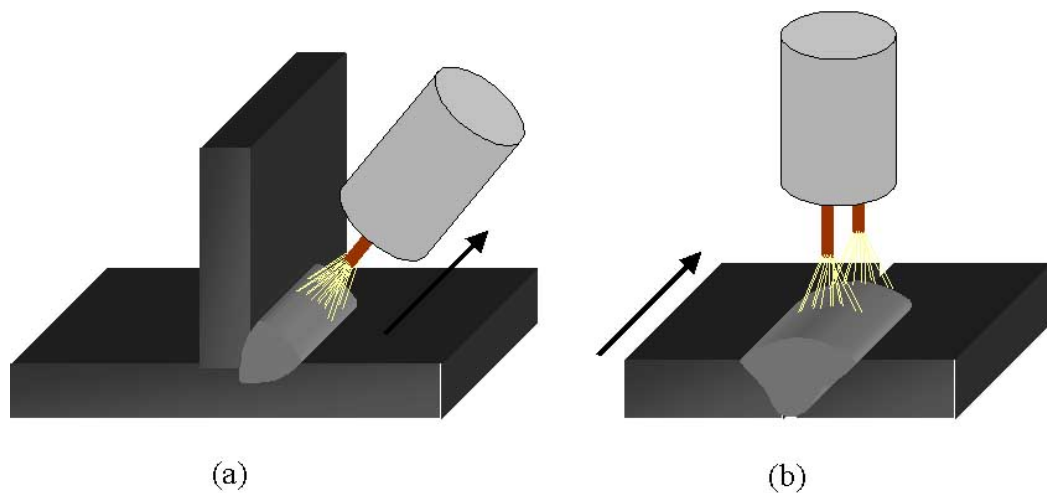


Figura 2.3 – Exemplo da utilização do processo com duplo arame com disposição em série: (a) soldas de filete; (b) soldas de topo

2.2.3 - MIG/MAG Duplo Arame com Potencial Único

Nesses sistemas, como esquematizado pela Figura 2.4, dois arames-eletrodo são fornecidos por alimentadores independentes através de um único contato elétrico no bico de uma tocha especial (Figura 2.5). Conseqüentemente, ambos os arames são submetidos ao mesmo potencial elétrico. A corrente de soldagem é fornecida por uma única fonte, com potência suficiente para a fusão dos dois arames nas condições estabelecidas, ou por duas fontes de menor potência. No caso da utilização de duas fontes, faz-se necessário uma interligação eletrônica, possibilitando uma comunicação entre elas. Uma das fontes terá a função de comandar a tensão disponível no bico de contato. Normalmente, as fontes são denominadas Mestre (a que comanda) e Escrava (a comandada). As velocidades de alimentação de cada arame são normalmente as mesmas, mas pequenas variações são aceitáveis ou até recomendáveis.

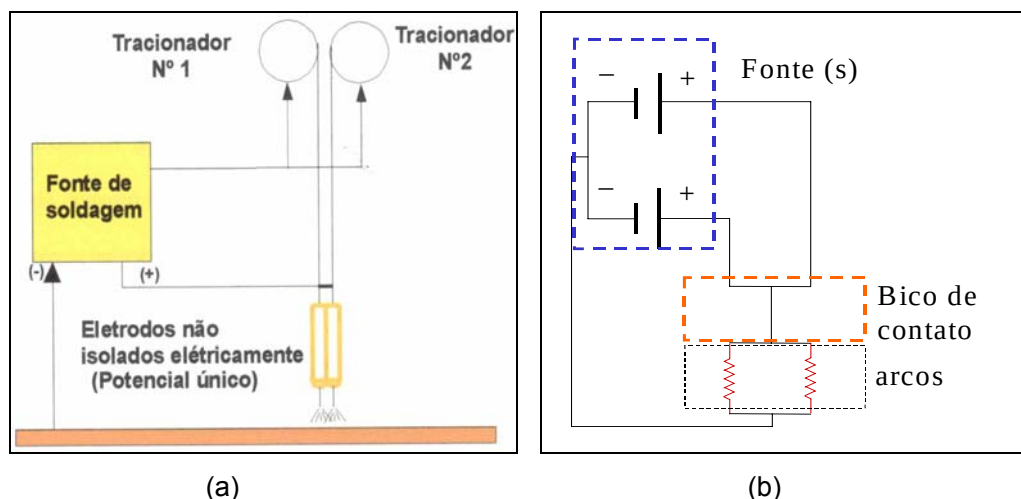


Figura 2.4 – Representação do processo duplo arame com potencial único: (a) esquemática; (b) elétrica

Uma característica do sistema com potencial único é a possibilidade da construção de uma tocha mais compacta e mais leve, facilitando a operação robotizada (Figura 2.5). Um único bico de contato facilita a limpeza automática do bocal, uma vez que ele usualmente ele é cilíndrico e concêntrico ao bico de contato. Outra característica é que os arames saem do bico de forma paralela (não confundir com a disposição em paralelo). A distância entre os arames é geralmente menor que nas tochas utilizadas para potencial isolado e, em algumas tochas comerciais, pode chegar até a 4 mm. A tocha pode ser inclinada ou trabalhar perpendicularmente à chapa.

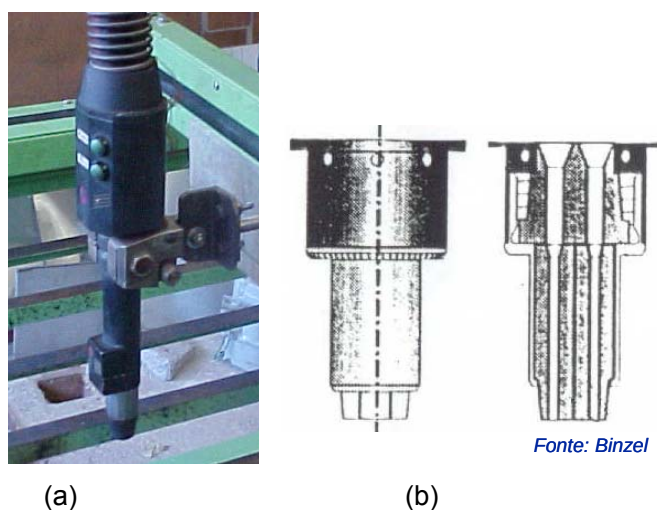


Figura 2.5 - (a)Tocha de potencial único (modelo fabricado pela Abicor-Binzel); (b) detalhes do bocal/bico de contato

2.2.4 - MIG/MAG Duplo Arame com Potenciais Isolados

A característica principal deste sistema é o isolamento elétrico entre os eletrodos (Figura 2.6). Por isso, utilizam-se duas fontes de potência e dois cabeçotes alimentadores independentes. Essa configuração possibilita controlar mais facilmente o tamanho dos arcos elétricos de forma independente, o que dá maior flexibilidade para a escolha dos parâmetros de soldagem. O alcance da possibilidade de ajuste independente dos parâmetros de soldagem foi confirmado por Michie et al (1999) através do uso de fontes de corrente pulsada com características similares.

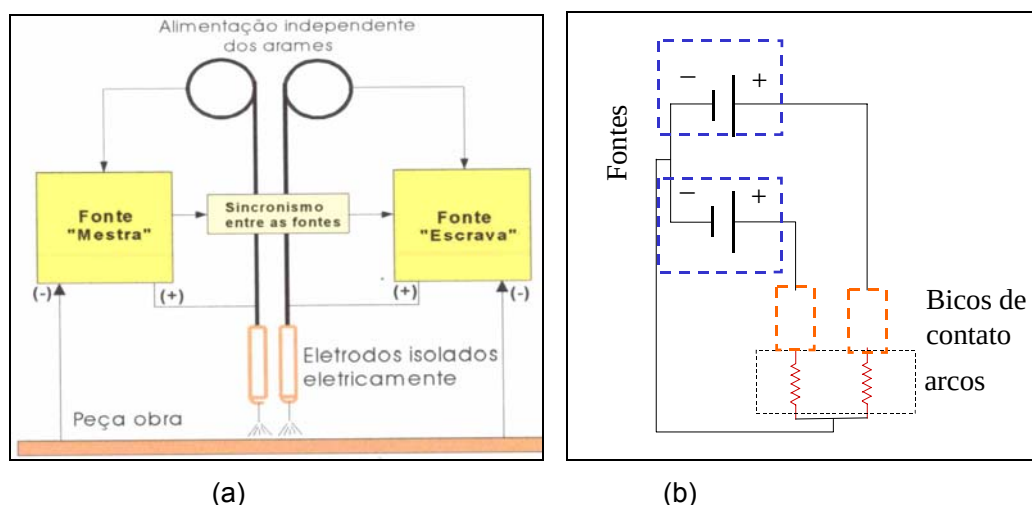


Figura 2.6 - Representação do processo duplo arame com potenciais isolados: (a) esquemática; (b) elétrica

Já foi verificado por Motta (2002) que o sopro magnético, problema considerado crítico nos sistemas de duplo arame por muitos pesquisadores, fabricantes e usuários, pode ser contornado nesta aplicação através de uma defasagem da corrente que circula por cada arame-eletrodo (Figura 2.7). Este procedimento permitiu uma excelente estabilidade do arco.

Para garantir a defasagem durante todo o processo, é utilizado um sistema de sincronismo entre as duas fontes de modo que os pulsos da fonte “escrava” são ativados pelos pulsos da fonte “mestre”, depois de um tempo preestabelecido (t_d) (Lassaline et al, 1989). Este procedimento evita que os pulsos de corrente das duas fontes aconteçam ao mesmo tempo, minimizando os efeitos da deflexão magnética entre arcos. A origem da designação de fonte “mestre” e “escrava” decorre justamente desta característica.

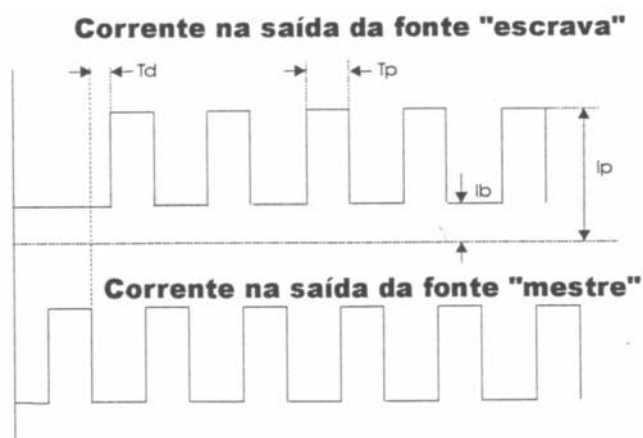


Figura 2.7 - Defasagem entre pulsos da fonte "mestre" e "escrava" (Motta, 2002)

As tochas aplicáveis ao processo com potenciais isolados disponíveis no mercado possuem basicamente duas configurações, integradas (especialmente fabricada e com um único bocal) e acopladas (duas tochas convencionais para o processo MIG/MAG unidas por um suporte especial). As tochas integradas, em função do projeto do fabricante, podem ter os arames paralelos ou inclinados. A Figura 2.8 ilustra estes tipos de tocha.



(a)



(b)

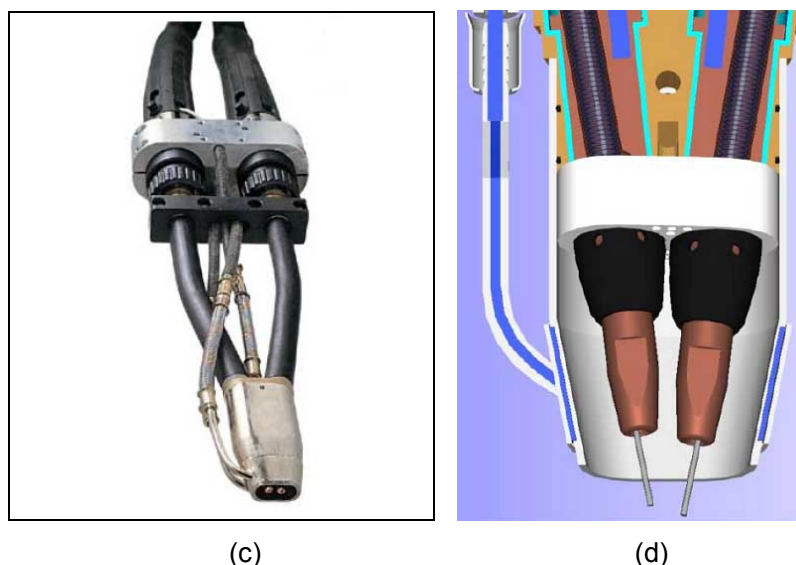


Figura 2.8 - Tochas de potencial isolado: (a) integrada, com arames paralelos (modelo fabricado pela TBI); (b) acopladas, com arames inclinados; (c) integrada, com arames inclinados (modelo fabricado pela Closs); (d) detalhes do bocal/bico de contato da tocha “c”

Sistemas com tochas acopladas por um suporte oferecem maior versatilidade, uma vez que utilizam tochas convencionais (facilidade de reposição de peças), e maior flexibilidade, porque permitem a variação da angulação entre as tochas. Nesse último tipo de tocha, a distância entre eletrodos pode chegar até a 25 mm (Kodama et al, 1997). Ainda deve-se lembrar a possibilidade de soldar com a tocha inclinada ou perpendicularmente à chapa.

Presume-se que a utilização de tochas de potencial isolado resulte em um maior consumo de gás de proteção e dificuldade de acesso às juntas, já que essa tocha possui maiores dimensões em se comparando com a tocha de potencial único (Mulligan & Melton, 2002).

2.2.5 – Característica estática da fonte

Para ambos os sistemas (Duplo Arame com Potencial Único e Isolado) existem duas opções de ajuste de comando, por imposição de corrente ou por imposição de tensão. No modo de ajuste pela corrente, possibilita-se um controle de corrente constante ou pulsada e, o ajuste pela tensão, permite somente o controle por tensão constante.

Fontes de tensão constante são aquelas que permitem o ajuste da tensão de trabalho (tensão de referência) e que têm uma curva estática tensão *versus* corrente (CEF – característica estática da fonte) que tende a produzir uma tensão média de arco constante, independentemente do valor da corrente. A corrente é função da carga (comprimento do arco para uma dada combinação de distância bico de contato-peça (DBCP), diâmetro e tipo do

arame-eletrodo, tipo de gás de proteção e ajuste da tensão), ajustada indiretamente pela velocidade de alimentação do arame. Em fontes do tipo tensão constante, quanto maior for a velocidade de alimentação do arame, menor será o comprimento do arco e maior a corrente, para uma determinada tensão de referência e DBCP.

Com a fonte do tipo tensão constante, acontece o fenômeno de auto-ajuste do comprimento do arco. Quando, por exemplo, há um afastamento da tocha (aumento da DBCP), acontece num primeiro momento (transitório) um crescimento do comprimento do arco. Nesse caso, a corrente forçosamente se reduz e, conseqüentemente, menor se torna a velocidade de fusão do arame. Como a velocidade de alimentação não se altera (ajustada inicialmente), ela se torna maior do que a velocidade de fusão, fazendo com que a ponta do arame se aproxime progressivamente da poça (reduzindo o comprimento do arco). Todavia, à medida que o arco reduz seu comprimento, a corrente de soldagem se regenera quase que integralmente, até que haja novamente o equilíbrio da velocidade de alimentação com a velocidade de fusão. Em outras palavras, acontece um auto-ajuste do tamanho do arco elétrico e da corrente de soldagem², fazendo com que a soldagem se aproxime do seu ponto inicial de trabalho estabelecido (ponto de trabalho é o cruzamento da CEF com a CEA - curva estática do arco). Essa regulagem é chamada de controle interno ou controle pela velocidade de fusão.

Já para se ajustar comprimentos de arco em fontes do tipo tensão constante, pode-se fazer de duas formas, a saber; alterando-se a regulagem da tensão ou da velocidade de alimentação. Em ambos os casos (ao se trabalhar com arames com alta resistividade elétrica) haverá mudança do valor de corrente, sobretudo no último caso, no qual o valor da taxa de deposição também é diferente. Uma técnica para se manter a mesma velocidade de alimentação e mesma corrente (mesma taxa de deposição e aproximadamente a mesma energia imposta), mas alterar o comprimento do arco (por exemplo, aumentar), é ajustar um novo valor para a DBCP (por exemplo, aumentar) e compensar a variação da corrente (no exemplo, ficaria menor) pelo aumento da tensão de referência (por exemplo, aumentando).

Fontes de corrente constante são aquelas que permitem o ajuste da corrente de trabalho e que têm uma curva estática tensão *versus* corrente que tende a produzir uma corrente de soldagem relativamente constante, independentemente da tensão de trabalho. A tensão é função da carga, ajustada indiretamente pela velocidade de alimentação do arame. Devido às diferenças entre este tipo de fonte e as fontes do tipo tensão constante, com o uso de fontes do tipo corrente constante, há a necessidade de um ajuste externo de parâmetros de soldagem para a manutenção do comprimento do arco relativamente constante. Para tal, usa-

² - Na verdade, como será visto no exemplo citado ao final, o comprimento do eletrodo se torna maior, demandando parte da tensão do arco, já que a tensão de soldagem é a mesma. Desta forma, esta

se o sinal de tensão do arco como parâmetro de controle, já que arcos mais longos significam maiores tensões, enquanto arcos menores significam menores tensões. A ação externa pode dar-se, por exemplo, sobre o motor de alimentação do arame. No caso do crescimento do arco, a tensão do arco supera o valor da tensão de referência, fazendo o motor aumentar a velocidade de alimentação, e vice versa. Esse sistema é conhecido como Controle Externo, ou controle pela velocidade de alimentação. Existem outros sistemas de controle em que, atuando ainda pelo sinal de tensão, agem sobre a fonte no sentido de aumentar ou reduzir temporariamente a corrente média.

Já para ajustar diferentes valores de comprimentos de arco em fontes do tipo corrente constante, deve-se alterar o ajuste da DBCP ou a regulação da velocidade de alimentação. No último caso, o valor da taxa de deposição também se torna diferente. Uma técnica para se manter a mesma velocidade de alimentação e a mesma corrente (mesma taxa de deposição e aproximadamente a mesma energia imposta), mas alterar o comprimento do arco (por exemplo, aumentar), é a de somente ajustar para um novo valor de DBCP (por exemplo, aumentar). Bem mais simples do que em fontes do tipo tensão constante.

Já no modo pulsado, a fonte normalmente opera com o comando da corrente. O ajuste das variáveis da corrente pulsado pode ser realizado diretamente pelo próprio operador ou através de um modo chamado sinérgico, onde as variáveis de soldagem encontram-se preestabelecidas na memória da fonte.

2.2.6 - Terminologia

Não há muita consistência na terminologia utilizada no mercado e no meio científico para caracterizar as técnicas operacionais do processo MIG/MAG Duplo Arame. Em alguns casos, são utilizados os termos “Twin” e “Tandem” para caracterizar a disposição dos arames em relação ao sentido de soldagem. A configuração “Twin” denominaria a disposição em paralelo e a “Tandem” a disposição em série, independentemente de a alimentação elétrica ser do tipo potencial único ou isolado. Porém, a maior parte da literatura e empresas utilizam as definições da AWS (American Welding Society), herança da terminologia tradicionalmente utilizada para o processo Arco Submerso com dois ou mais arames. Segundo essa definição, a terminologia de “Twin” é utilizada para o processo MIG/MAG Duplo Arame com Potencial Único e “Tandem” no caso de potenciais isolados. Porém, um importante fabricante de equipamentos para MIG/MAG duplo arame chama sua configuração de “Time Twin Digital Configuration”,

recuperação do arco e da corrente não é total, apenas aceitável, a menos que um arame sem resistência elétrica fosse usado, como de alumínio.

apesar de usar tocha com potencial isolado e poder ser usado no modo seqüencial; o “twin” apenas indica tratar de arames gêmeos (duplo).

Essa falta de consistência pode levar a uma má interpretação do processo por parte de usuários. Como nenhuma das terminologias aplicadas se completa por si só, elas não serão utilizadas neste trabalho, exceto quando a mesma for referência de algum outro trabalho em que não estiver claro do que se trata. Serão utilizados, por outro lado, os termos potencial único (DAPU) ou isolado (DAPI) para identificar o sistema, e arame em paralelo ou em série para especificar a disposição ou técnica do arame em relação à junta. O arame da frente será doravante referenciado como “líder”, enquanto o de trás como “guiado”.

2.3 - Vantagens do Processo

2.3.1 - Aumento da velocidade de soldagem

A utilização do MIG/MAG convencional com um único arame de alimentação e em altas velocidades de soldagem freqüentemente ocasiona descontinuidades nos cordões (Michie et al, 1999). Essas descontinuidades acontecem devido a uma intensa força do arco elétrico, decorrente de altas correntes de soldagem. A força que o arco exerce sobre a poça de fusão tende a empurrar o metal fundido para fora da cratera criada pelo arco. Como a solidificação da poça de fusão acontece antes do preenchimento adequado da cratera, há o aparecimento de descontinuidades como falta de fusão e mordeduras. Porosidade também pode ocorrer porque os gases dissolvidos na poça de fusão não têm tempo de escapar para a atmosfera antes da solidificação do metal fundido do cordão de soldagem (Michie et al, 1999). Porém, o defeito típico creditado a altas velocidades de soldagem é mesmo a mordedura.

O uso de Duplo Arame proporciona um grande número de características que podem atuar como solução de alguns problemas ocorridos no processo MIG/MAG em se utilizando altas velocidades de soldagem. Para uma dada corrente, o uso de dois eletrodos aumenta a área da poça onde a força do arco atua (Okui et al, 1989), possibilitando o uso de maiores correntes totais antes do aparecimento de mordeduras e de outros efeitos. Maiores correntes de soldagem resultam em maiores taxas de fusão e de deposição.

Boeme et al (1996) observaram que altas velocidades de soldagem são conseguidas devido ao formato alongado do arco, o que significa que o mesmo aquece o material por um maior tempo antes da transferência metálica ocorrer (Figura 2.9). Esse autor ainda cita que a contribuição da porção do calor do arco do arame de trás está relacionada com a qualidade do perfil do cordão soldado.

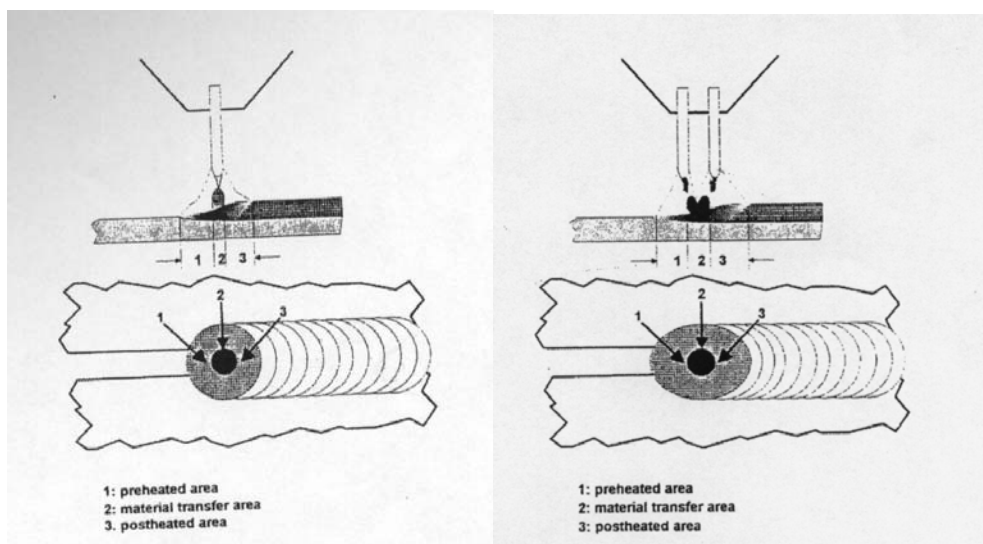


Figura 2.9 – Alongamento da poça de fusão do processo: (a) com arame simples; (b) com duplo arame (Boeme et al, 1996)

Desta forma, velocidades de soldagem acima de 3,5 m/min são citadas por catálogos da Lincoln Electric (1999) para soldagem de chapas de aço carbono de 2 mm de espessura usando o processo MIG/MAG com a disposição em série com DAPU. Velocidades de soldagem de até 8 m/min foram alcançadas com sucesso na soldagem de filetes em juntas sobrepostas na posição vertical descendente (Obnawa et al, 2003). Já Hedegard et al (2004) fizeram uma comparação demonstrando a possibilidade de aumento da velocidade de soldagem em aço carbono (em juntas de topo, de filete e sobrepostas) e de aço inoxidável (junta de filete), como pode ser observado na Figura 2.10.

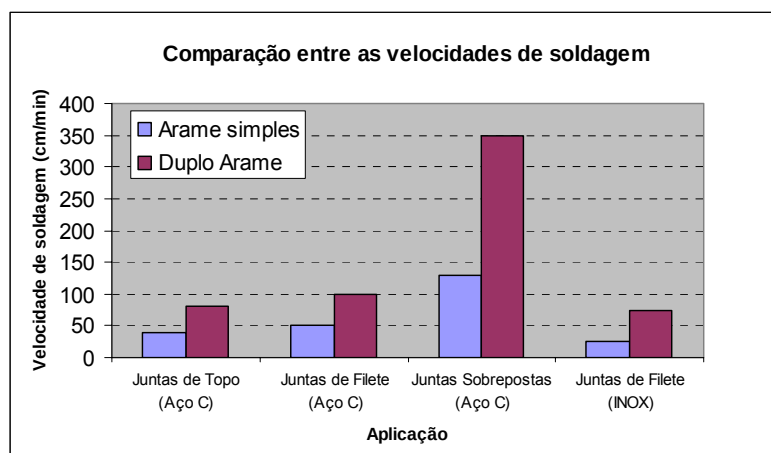


Figura 2.10 – Comparação da velocidade de soldagem entre o arame simples e duplo arame para soldagem de aço carbono (em juntas de topo, de filete e sobrepostas) e de aço inoxidável (junta de filete) (adaptação de Hedegard et al, 2004)

Altas velocidades de soldagem são aconselhadas com preparação e posicionamento das peças a serem soldadas na posição plana e superfície da peça limpa. Devido a essas altíssimas velocidades de soldagem, o processo MIG/MAG Duplo Arame só pode ser realizado com mecanismos automáticos ou robotizados.

2.3.2 - Aumento da taxa de deposição

Devido a uma alimentação dupla, espera-se que o processo duplo arame aumente pelo menos em duas vezes a taxa de deposição em relação ao processo convencional com um só arame e, portanto, consiga-se reduzir ao meio o tempo de soldagem (produtividade). Taxas de deposição de até 24 kg/h são esperadas no processo MIG/MAG DAPI seqüencial (Platz apud Mulligan & Melton, 2002). Porém, taxas de deposição mais realistas de 13-14 Kg/h são encontradas na prática (Meyer & Lahnsteiner, 1998).

Entretanto esse resultado não pode ser obtido sem que haja uma adaptação das outras variáveis. Quando se alimenta a poça de fusão com dois arames ao mesmo tempo, por praticamente duplicar a corrente, há o aparecimento de fenômenos, como: interferência do campo magnético, aumento da poça de fusão para uma dada velocidade de soldagem (maior fluidez e diminuição da velocidade de resfriamento), etc. Essas e outras variações no processo têm de ser levadas em consideração para que se possa obter bons resultados com o crescimento da taxa de deposição.

Devido à possibilidade de soldar-se com altas taxas de deposição, o processo MIG/MAG duplo arame tem a vantagem de manter o mesmo perfil soldado e o calor imposto por unidade de comprimento, porém, sem o aparecimento de mordedura e de outros defeitos, já que a velocidade de alimentação (taxa de deposição) é aumentada juntamente com a velocidade de soldagem (Boeme et al, 1996). Blackman et al (2004) demonstraram que, tanto para sistemas de dupla e simples alimentação, a velocidade de resfriamento não se altera (para uma mesma energia de arco calculada), garantindo desse modo a manutenção do calor imposto por unidade de comprimento.

2.3.3 - Aumento da penetração

Mulligan & Melton (2002) indicam que há um aumento da penetração comparando-se com o processo com arame simples numa mesma velocidade de soldagem, fato explicado pela possibilidade de maiores correntes e devido à formação de uma poça de fusão de maiores dimensões. Maiores penetrações são economicamente benéficas. Por exemplo, menores

filetes podem ser especificados, requerendo menores deposições e possuindo a mesma dimensão efetiva da garganta, portanto, possuindo a mesmo desempenho mecânico.

2.3.4 - Redução da porosidade

Devido ao alongamento da poça de fusão (conseqüentemente uma maior área de escape) e um maior tempo para os gases dissolvidos evadirem da poça (menor velocidade de solidificação da poça), espera-se que o processo MIG/MAG Duplo Arame seja particularmente adequado para materiais mais susceptíveis a defeitos de porosidade (Michie et al, 1999). Porém, o aumento da movimentação da poça de fusão é que é considerado por Akulov et al (1966) um fator que realmente contribui para a maior difusão dos gases diluídos na poça, o que é questionável a depender do sentido dessa movimentação, podendo tanto contribuir difusão dos gases quanto aumentar a absorção desses.

A habilidade do duplo arame na soldagem de aços revestidos com uma camada de zinco (galvanizados) e com “primer” (tinta anti-corrosiva) tem sido apontada como um dos maiores benefícios do processo (Bohme et al, 1996 e Dilthey et al, 1998). Pode-se encontrar baixos níveis de porosidade em soldagem de algumas ligas de alumínio, mesmo utilizando-se altas velocidades de soldagem (Dilthey et al, 1998).

2.3.5 - Formabilidade do cordão

O processo MIG/MAG duplo arame é normalmente realizado na posição plana, disposição em série. Porém, há a possibilidade de rotacionar a tocha no intuito dos arames possuírem um ângulo em relação ao sentido da soldagem, o que é citado por Mulligan & Melton (2002) como uma vantagem no aumento da tolerância nos ajustes entre peças a serem soldadas.

2.3.6 - Outras vantagens

Outras vantagens operacionais que o processo MIG/MAG Duplo Arame possui são descritas a seguir:

- Controle da geometria do cordão de solda, através do posicionamento das tochas (ângulos) e do comprimento de arco de cada arame (Gonzales, 1999 e Michie et al, 1999);
- Utilização de eletrodos com diferentes diâmetros e diferentes composições químicas (Gonzales, 1999);

- Eletrodos podem ser alimentados com diferentes velocidades (Gonzales, 1999 e Michie et al, 1999);
- Apresenta-se como uma solução na soldagem de juntas mal ajustadas (Gonzales, 1999 e Michie et al, 1999);
- Baixo aporte térmico – é possível reduzir o aporte de calor, aumentando-se a velocidade de soldagem, minimizando tensões residuais (distorções) (Gonzales, 1999 e Michie et al, 1999);
- Economia no consumo do gás de proteção e redução nos custos no que diz respeito à mão de obra. Segundo Mulligan & Melton (2002), o custo por metro foi menor em 45% (soldas de topo com chapas de 10 mm) e de 26% (soldas de filete), comparado ao processo MIG/MAG convencional, com arame simples. Esta redução de custo deu-se ao decréscimo do número de passes.

Pode-se ainda apontar algumas vantagens intrínsecas ao próprio processo MIG/MAG citadas pelo Welding Handbook (American Welding Society – AWS, 1991) e outros autores:

- Extrema versatilidade e ampla faixa de aplicações;
- Excelentes características para robotização;
- Redução na produção de fumos em relação ao eletrodo revestido e eletrodo tubular;
- Pouca ou nenhuma produção de escória. (Sadler, 1999).

2.4 - Desvantagens do processo

2.4.1 - Custo do equipamento

O custo dos equipamentos e acessórios que compõem o sistema MIG/MAG Duplo Arame normalmente encontrados no mercado ainda é muito elevado, o que muitas vezes afasta os potenciais consumidores dessa nova tecnologia. Sistemas com potencial isolado exigem ainda um custo maior que sistemas com potencial único, isto porque há a necessidade de equipamentos mais sofisticados como, por exemplo, fontes de soldagem sinérgicas, dois cabeçotes de alimentação e sistemas de resfriamento da tocha (devido à altas correntes de soldagem) (Mulligan & Melton, 2002). Mesmo com esse alto custo, o processo pode fornecer um retorno financeiro considerável devido à sua capacidade de aumentar a produção.

2.4.2 - Aspectos relacionados com segurança e saúde

Um grande problema a ser considerado é a emissão de luzes ultravioletas por parte do arco elétrico. No caso do duplo arame, essa emissão supera bastante a versão do MIG/MAG para um só arame, pois há a soma da emissão de dois arcos-elétricos. Essa luz pode ser muito danosa ao ser humano, podendo provocar queimaduras na pele e, sem a proteção adequada, afetar a visão.

Similarmente, os altos níveis de calor devem ser levados em conta, sendo necessário a utilização de roupas apropriadas. Não se pode esquecer da geração de fumos que é intensa, sendo aconselhável a extração do mesmo através de exaustores. A emissão de ruídos é intensificada e, dependendo do tipo de transferência metálica, pode ser bastante nociva ao sistema auditivo humano. O tipo de transferência metálica que produz um maior nível de ruído é por curto-circuito.

2.4.3 - Necessidade de treinamento de pessoal

No processo MIG/MAG Duplo Arame é possível controlar separadamente os parâmetros de cada arame. Todavia, há muitos parâmetros que precisam ser ajustados para se obter uma soldagem contínua e com estabilidade do arco. Treinamento, portanto, é necessário para familiarizar o engenheiro de soldagem e operador com o processo.

2.4.4 - Outras desvantagens

Algumas outras limitações são apresentadas por Gonzáles (1999) no uso de duplo arame em MIG/MAG, ou seja:

- As taxas de fusão são limitadas – devido principalmente às condições físicas do arco em correntes elevadas;
- Interferência do campo magnético ou deflexão magnética devido à proximidade dos arcos.

A esta lista de limitações citadas por Gonzáles ainda poderiam ser acrescentados³:

- Dificuldade na montagem e preparação da área de trabalho onde serão realizadas as soldagens, acarretando em maior tempo de preparação e, conseqüentemente, aumento dos custos do processo (aumento da complexidade do sistema);

³ Américo Scotti (Comunicação verbal)

- A abertura dos arcos é mais complicada.

Em relação à limitação quanto ao “*sopro magnético*”, deve-se lembrar que o arco de soldagem é um condutor de corrente elétrica e assim sofre interações da corrente elétrica por ele transportado com os campos magnéticos por ele gerado. Se um condutor de corrente elétrica de comprimento l , percorrido por uma corrente elétrica i , é colocado numa região onde exista um campo magnético B , ele experimenta uma força **Fem**, conhecida como Força eletromagnética ou “*Força de Lorentz*”, que é dada pela Equação 1:

$$\mathbf{Fem} = \mathbf{B.i.l} \quad (1)$$

sendo Fem, B e l grandezas vetoriais mutuamente perpendiculares.

Existem importantes efeitos que podem influir numa soldagem a arco, sendo que estes efeitos podem favorecer ou prejudicar a soldagem. Um desses efeitos é o chamado “*Sopro Magnético*”, conhecido também como *Deflexão Magnética*. Este efeito consiste em um desvio do arco de sua posição normal de operação, como consequência de uma assimetria (gradiente) na distribuição da intensidade do campo eletromagnético em função de variações bruscas na direção da corrente elétrica e/ou arranjo assimétrico de material ferromagnético em torno do arco, como pode-se observar na Figura 2.11.

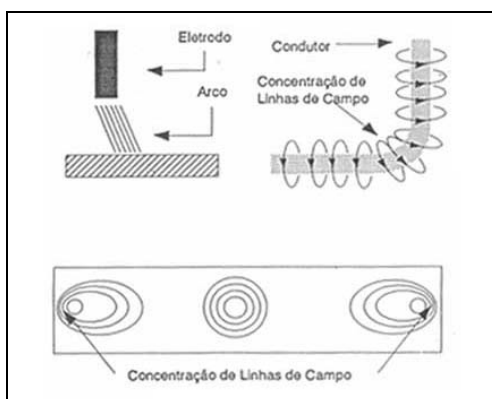


Figura 2.11 - Causas para assimetria dos campos eletromagnéticos, provocando sopro magnético. Em cima, causado pela posição da conexão do cabo terra, enquanto em baixo, causado pela diferença da permeabilidade entre a chapa e o ar atmosférico

A assimetria do campo magnético também se manifesta quando se emprega mais de um arame-eletrodo (Machado, 1996) soldando continuamente e relativamente próximos um do outro, como pode ser observado na Figura 2.12. Existem três possíveis casos: **(a)** eletrodos com diferentes polaridades (os campos magnéticos são aditivos e há deflexão no sentido

oposto ao centro); **(b)** dois eletrodos com mesma polaridade, + ou – (a deflexão ocorre no sentido do centro); **(c)** um eletrodo é CC (+ ou -) e o outro CA (é esperada que muito pouca deflexão ocorra).

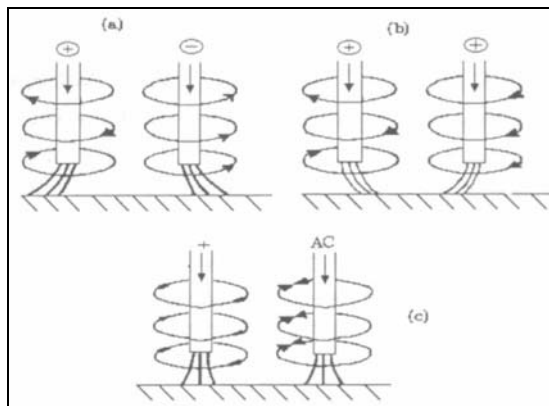


Figura 2.12 - Interação entre os campos magnéticos produzidos por eletrodos próximos um do outro e soldando simultaneamente, em função da combinação do tipo de corrente

O sopro magnético é quase sempre indesejável em soldagem, pois orienta o arco para direções que, em geral, prejudicam a penetração e uniformidade do cordão de solda, além de causar a instabilidade do arco e dificultar a operação.

No caso do processo duplo arame, o sopro magnético é originado pelos campos magnéticos gerados quando dois arcos operam um próximo do outro. A deflexão magnética neste caso pode ser minimizada ou eliminada através de algumas medidas simples, tais como:

- Soldar com arco mais curto;
- Usar correntes mais baixas, quando possível, e
- Usar correntes pulsadas defasadas, de tal forma que só um eletrodo esteja mais energizado de cada vez;
- Usar corrente alternada, pois o efeito do sopro seria menor (prática ainda não comentada na literatura para o caso do MIG/MAG).

2.5 – Influência das variáveis do processo

Quanto mais conhecido é o processo de soldagem, mais fácil se torna para o engenheiro de soldagem prever o efeito esperado do ajuste das variáveis sobre o cordão resultante. O comportamento de muitas destas variáveis, como corrente, pode até ser extrapolado para outros processos similares. Entretanto, devido ao caráter inovador do processo MIG/MAG Duplo Arame e do grande número de novas variáveis, um melhor aproveitamento do processo passa pelos conhecimentos dos efeitos de variáveis, como:

- Transferência metálica (ou níveis de corrente);
- Modo operacional (potencial único ou potencial isolado);
- Alinhamento do eletrodo em relação ao cordão de solda (seqüencial ou transversal);
- Independência de parâmetros em cada arame;
- Uso de Corrente Pulsada
- Velocidade de Alimentação;
- Velocidade de Soldagem;
- Ângulo de ataque;
- Tipo de junta e espessura do material;
- Distância bico de contato-peça (DBCP);
- Gás de proteção;
- Distância entre eletrodos

A seguir, são feitas explicações mais detalhadas sobre cada um desses aspectos.

2.5.1 - Transferência metálica

Os processos de soldagem com eletrodo consumível são amplamente usados, visto que o metal de enchimento é depositado mais eficientemente e em maiores taxas do que nos outros métodos. Nestes processos, tais como eletrodo revestido, MIG/MAG, eletrodo tubular e arco submerso, o arco é aberto entre a peça e a ponta do eletrodo consumível. O eletrodo, que transporta a corrente de soldagem, é aquecido e fundido, resultando no destacamento de gotas metálicas que proporcionam o enchimento da junta. Este metal transferido combina-se com a poça fundida na superfície da peça, produzida pela ação do aquecimento do arco, para dar um formato particular ao cordão de solda (Pandey et al, 1995).

Se a taxa de alimentação do arame for balanceada por sua taxa de fusão, o processo operará de forma estável e contínua. Uma falha neste balanço resultará na extinção do arco, ou por curto-circuito ou pelo crescimento excessivo do arco. A relação entre a taxa de fusão e a corrente é dada e amplamente apresentada na literatura (por exemplo, Norrish & Richardson, 1988) como:

$$TF = \alpha \cdot I + \beta \cdot \ell \cdot I^2 \quad (2)$$

onde TF é a taxa de fusão, α e β são constantes associadas com o gás de proteção, polaridade e diâmetro e material do eletrodo, I é a corrente e L a extensão do eletrodo (comprimento energizado). Esta relação é útil na determinação da velocidade de alimentação do arame em MIG/MAG, mas não dá nenhuma indicação dos mecanismos de transferência envolvidos (Norrish & Richardson, 1988).

De acordo com Norrish & Richardson (1988), Heald et al (1994) e Pandey et al (1995), entre outros, o modo onde o metal é transferido no arco afeta diferentes aspectos do processo de soldagem, tais como: quantidade e tipo de respingo e de porosidade gerados, taxa de geração de fumos, nível de retenção de gás, estabilidade do arco, possibilidade de soldagem em várias posições, composição química e propriedades mecânicas e metalúrgicas do metal de solda, molhamento do metal de base, aparência superficial (geometria) do cordão, qualidade do metal de solda e estabilidade da poça de solda. Além disso, o modo de transferência metálica tem um grande efeito sobre a penetração, a solidificação, o fluxo de calor e a faixa disponível dos parâmetros de soldagem. A qualidade da transferência de material é dependente da forma do arco, da corrente de soldagem, da polaridade do eletrodo, da tensão do arco, da distância bico de contato peça, do tipo e vazão do gás de proteção, do ângulo da tocha e dos elementos de liga do eletrodo, além da pressão ambiente (Pandey et al, 1995).

Dependendo das condições de soldagem, existem diferentes modos pelos quais esta transferência de metal pode ocorrer. O fenômeno em geral é chamado transferência metálica e depende de várias forças que atuam na gota (Pandey et al, 1995).

a) Tipos de transferência metálica

A transferência metálica tem sido estudada desde a introdução dos processos de soldagem com eletrodos consumíveis. O fenômeno da transferência metálica em soldagem a arco e especialmente os mecanismos que o governam receberam considerável atenção entre as décadas de 1950 e de 1960, quando técnicas de filmagem de alta velocidade, mesmo que limitadas, foram usadas para investigar o arco elétrico do processo MIG/MAG. Além da filmagem com câmaras de alta velocidade (500 a 14000 quadros por segundo), que é uma das mais valiosas ferramentas para estas investigações, outra ferramenta usada para investigar os mecanismos de transferência metálica foi o osciloscópio que registra sinais de tensão e corrente simultaneamente com filmagens de alta velocidade (Liu & Siewert, 1989 e Pandey et al, 1995).

Algumas tentativas foram feitas para classificar a larga faixa de comportamentos observados nos tipos de transferência metálica e o International Institute of Welding (IIW) propôs um sistema de classificação desses tipos em grupos (Norrish & Richardson, 1988). De

acordo com o IIW (IIW DOC XII-636-76 apud Pandey et al, 1995), a transferência metálica pode ser classificada em três grupos principais: transferência por vôo livre, transferência por contato (curto-circuito) e transferência protegida por escória.

A classificação completa dos tipos de transferência metálica em MIG/MAG é apresentada junto com alguns tipos adicionais na Tabela 2.1 e esquematicamente ilustrada na Figura 2.13 (Stenbacka & Persson, 1989). O International Institute of Welding (IIW) classificou a transferência metálica em 12 tipos mas, em geral, três tipos (curto-circuito, globular e goticular (“spray”)) são citados na maioria das publicações (Liu & Siewert, 1989 e Pandey et al, 1995).

Tabela 2.1 - Classificação de transferência metálica pelo IIW (Liu & Siewert, 1989) adaptada para a nomenclatura empregada no LAPROSOLDA (Laboratório para o Desenvolvimento de Processos de Soldagem – UFU).

Tipo de Transferência	Processos de Soldagem (exemplos)
<i>I Transferência por vôo livre</i>	
1. Globular	MIG/MAG baixas correntes
1.1 Globular repelida	MIG/MAG protegido por CO ₂
2. Goticular (“Spray”)	
2.1 Goticular axial	MIG/MAG com corrente intermediária
2.2 Goticular com alongamento	MIG/MAG com corrente média
2.3 Goticular rotacional	MIG/MAG com correntes altas
3. Gotas explosivas	Eletrodos revestidos e arame tubular
<i>II Transferência por contato</i>	
2.1 Curto-circuito	MIG/MAG com baixas correntes e comprimento de arco.
2.2 Contato sem interrupção	TIG com alimentação
<i>III Transferência protegida por escória</i>	
3.1 Fluxo guiado por parede	Arco Submerso
3.2 Outros	Eletrodos Revestidos, Arame tubular, Eletroescória, etc.

Na transferência por vôo livre, o eletrodo não toca a poça de fusão. As gotas metálicas são destacadas da ponta do eletrodo e se movem através da coluna do arco. Nesse processo, um arco é mantido continuamente entre o arame de enchimento e a peça e o metal é transferido através do arco em pequenas gotas (Figura 2.13, A - F) (Norrish & Richardson, 1988 e Stenbacka & Persson, 1989).

Quando o eletrodo toca a poça de solda e a gota formada em sua ponta é puxada para a poça de solda fundida por ação da tensão superficial, ocorre outro tipo de transferência metálica chamada transferência por contato ou curto-circuito (Figura 2.13, G). Para os processos de soldagem que usam grande quantidade de fluxo, a transferência metálica pode envolver camadas de escória, conhecida como transferência protegida por escória, que é o

caso do processo de soldagem por arco submerso e por eletrodos revestidos (Pandey et al, 1995).

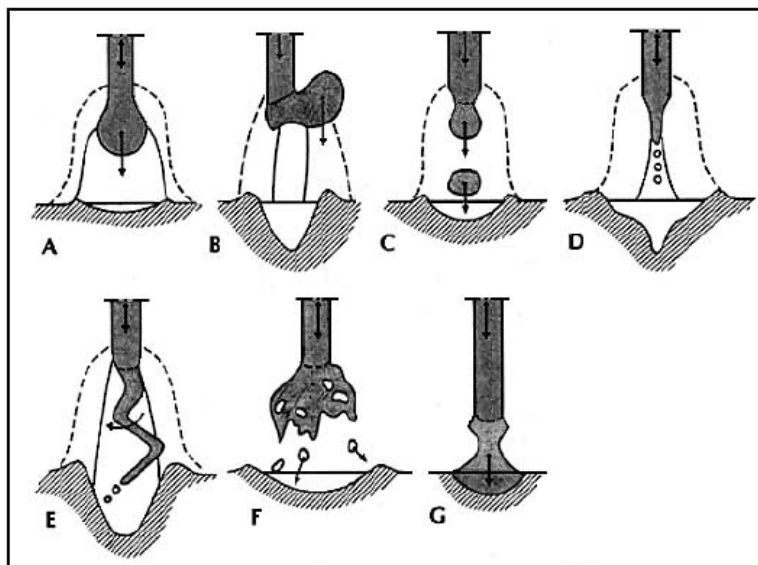


Figura 2.13 - Modos de transferência classificados pela IIW e adaptados à nomenclatura empregada no LAPROSOLDA, onde: A = globular, B = globular repelida, C = goticular ("spray") axial, D = goticular com alongamento; E = goticular rotacional, F = gotas explosivas; e G = curto-circuito (Stenbacka & Persson, 1989).

Liu & Siewert (1989) investigando o fenômeno de transferência metálica em aço carbono comum, observaram que havia uma repentina mudança na frequência de transferência da gota sobre uma estreita faixa de corrente, que foi chamada de "corrente de transição", e que esta aumenta com a diminuição da extensão e com o aumento do diâmetro do eletrodo.

Woods apud Liu & Siewert (1989) observou a importância da composição química do eletrodo na determinação do tipo de transferência metálica e nos níveis de respingo. Ele verificou que as características de transferência de todas as ligas de metal de enchimento também dependem da concentração e da pressão de vapor dos elementos de liga incorporados. A vaporização de elementos como magnésio e zinco causam instabilidade do arco e explosão das gotas metálicas, resultando em transferência metálica instável.

b) Transferência metálica no processo duplo arame

Muitos trabalhos sobre transferência metálica já foram desenvolvidos para arame simples, porém pouco se sabe a respeito da influência da mudança de alguns parâmetros de soldagem e aspectos construtivos de tochas sobre a transferência metálica no Duplo-Arame.

No processo MIG/MAG, o modo de transferência metálica atuante pode ser influenciado por vários fatores, principalmente por aqueles relacionados com a intensidade de corrente, com

o comprimento do arco, com a composição do gás, com o diâmetro, comprimento e material do eletrodo. Especialmente no processo duplo arame, há ainda a influência dos campos eletromagnéticos formados em cada arame.

Motta et al (2005) estudaram a transferência metálica e a influência dos campos eletromagnéticos entre os arcos para o processo MIG/MAG (DAPI) na disposição transversal e com corrente pulsada defasada. Eles demonstraram uma relação entre desvios ocorridos nos arcos elétricos com desvios nas gotas metálicas destacadas. Os autores puderam confirmar a interferência entre os arcos através da filmagem da soldagem com corrente pulsada em três momentos, a saber, arco esquerdo no período de pulso da corrente, arco direito no período de pulso e ambos no período de pulso, como pode ser observado pela Figura 2.14

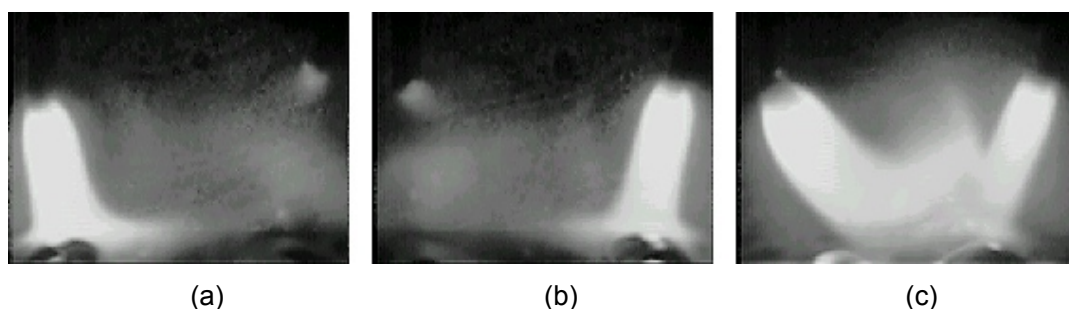


Figura 2.14 - Imagens de arcos voltaicos: a) arco esquerdo está no período de pulso da corrente; b) arco direito está no período de pulso; c) Ambos estão no período de pulso (Motta et al, 2005)

Motta et al (2005) puderam ainda verificar (Figura 2.14) a diferença no formato dos arcos elétricos quando estão abertos, separadamente, e juntos, ao mesmo tempo, o que possibilitou a identificação da interferência eletromagnética. Ainda, segundo os autores, outro aspecto que chama a atenção na Figura 2.14c é a maior deflexão sofrida pelo arco esquerdo (comandado pela fonte mestra) em relação ao arco direito, fato explicado pelo posicionamento do eletrodo do lado esquerdo, que em seus experimentos sempre ficou mais próximo do cabo terra.

Como consequência do maior desvio do arco da esquerda, os desvios das gotas destacadas desse eletrodo foram mais acentuados, como pode ser observado na Figura 2.15. Como as condições de soldagem foram similares para ambos os arcos, suspeitou-se que uma maior interferência eletromagnética estava influenciando de forma mais intensa a resultante das forças que agiam sobre as gotas destacadas do eletrodo (Motta et al, 2005).

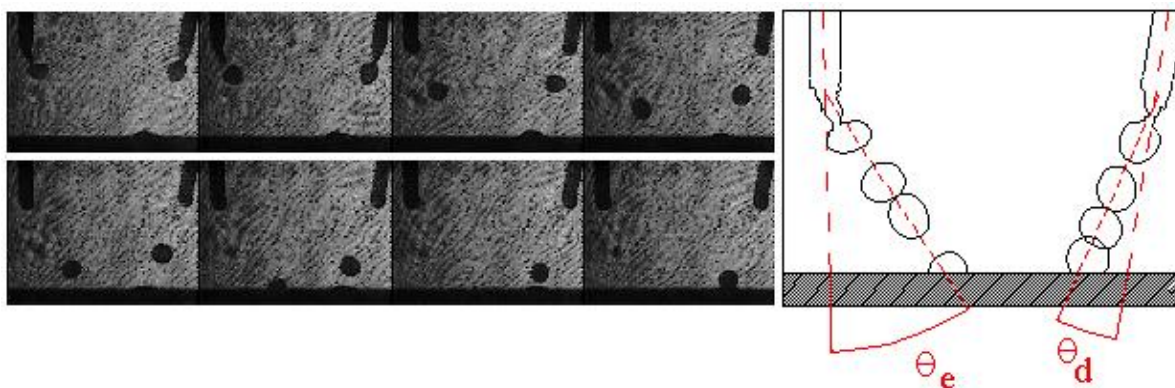


Figura 2.15 - Exemplo de uma seqüência de transferência pulsando em fase e a respectiva representação gráfica da trajetória com ângulos resultantes da interferência eletromagnética ($\theta_e = 30^\circ$ e $\theta_d = 16^\circ$) (Motta et al, 2005)

Pereira (2001), também enfrentando o problema de desvio do arco para paredes do chanfro, analisou a mudança no posicionamento do cabo terra para soldagem de corpos de provas chanfrados para o processo MIG/MAG, com um único arame. O autor esperava que o sopro magnético gerado poderia provocar o desvio do cordão para um lado preferencial do chanfro, porém, isto não foi observado, isto é, não houve desvio preferencial do cordão para qualquer parede do chanfro, sendo que em alguns casos, houve até a geração de desvio duplo dos cordões.

Em ambas as tochas, de potencial único e de potencial isolado, pode-se obter os quatro modos conhecidos de transferência metálica:

- Globular: baixas correntes e comprimentos de arco altos;
- Curto-circuito: baixas, medias e altas correntes e comprimentos de arco curtos;
- Goticular ("spray"): médias e altas correntes e comprimentos de arco longo;
- Rotacional: altas correntes e comprimentos de arco longos.

Deve-se ressaltar que, dependendo da tocha e dos parâmetros utilizados, pode-se obter modos de transferência diferentes para cada arame. Pode-se também obter diferentes modos de transferência quando se estiver trabalhando em correntes de transição, onde os modos de transferência ainda não estão bem definidos.

Existem basicamente duas correntes de transição. A primeira, onde a transferência pode mudar de globular ou curto-circuito, dependendo do comprimento do arco, para a transferência goticular, e a segunda, quando o modo de transferência muda de goticular para rotacional. As correntes de transição são dependentes de vários fatores como diâmetro do eletrodo, gás de proteção, comprimento do arco, etc.

Mudanças nos modos de transferência metálica têm relação direta com o resultado final do cordão soldado, tanto no aspecto de visual quanto nos aspectos relacionados aos parâmetros geométricos do perfil soldado.

2.5.2 - Modo operacional

Existem duas correntes no mercado, uma que defende a utilização da tocha tipo potencial único e a outra, endossada pela maior parte da literatura, que sustenta que cada arame deve ser alimentado separadamente, ou seja, a tocha deve ter potencial isolado. A defesa da segunda corrente baseia-se na maior flexibilidade para ajustar parâmetros independentes para cada arame e, até mesmo, no fato de se poder usar corrente pulsada defasada, reduzindo o efeito da interferência eletromagnética, conseguindo obter um arco mais estável e um melhor aspecto do cordão. Esta vantagem superaria a vantagem da maior simplicidade do ajuste dos parâmetros (o mesmo ajuste, tensão e velocidade de alimentação, para os dois arames). Deve-se lembrar que em qualquer dos casos pode-se usar a transferência metálica do tipo curto-circuito, goticular e pulsada.

A princípio, poder-se-ia pensar que por estar trabalhando com potencial único, as intensidades de correntes, valores de tensão e os comprimentos dos dois arcos seriam os mesmos para os dois arames. Também seria possível pensar que não haveria distinção entre eletrodo da frente ou de trás, caso se trabalhe na configuração seqüencial. Na verdade, isto não é sempre correto, pois, na prática, o arco da frente tende a ter uma distância bico de contato-peça (DBCP) real um pouco mais longa do que do arco de trás, por ter o arco aberto sobre a chapa, enquanto o arco de trás age sobre a poça. Uma maior DBCP tende a favorecer um arco mais curto para uma dada tensão disponível, para compensar por um comprimento de eletrodo mais longo (mesma resistência elétrica = mesma queda de tensão). Como em potencial único os arcos podem ser por analogia equiparados a duas resistências em série (ver Figura 2.4(b)), a corrente que passa nos dois arcos deveria ser a mesma. Mas como os comprimentos dos eletrodos não são os mesmos (devido à diferença na DBCP real), o consumo seria maior para o eletrodo da frente (maior comprimento). Porém, se a velocidade de alimentação ajustada for a mesma para os dois arames, para se manter a igualdade da velocidade de alimentação com o consumo, a corrente do eletrodo da frente torna-se menor.

Na Figura 2.16 se pode observar essa diferença entre os valores médios das correntes dos eletrodos da frente (I_1) e de trás (I_2), os quais foram obtidos durante uma soldagem real. Apesar da pouca diferença nos valores, outros experimentos mostraram ser os mesmos sempre sistemáticos ($I_1 < I_2$). A diferença também para os valores de tensão ($V_1 > V_2$) não era esperada por ser a tocha de potencial único, mas estes valores referem-se a tensões dentro de

cada fonte e não no arco. A causa pode estar relacionada ao sistema de controle que cada fonte exerce para procurar manter um mesmo valor de tensão no bico de contato.

Pelo parágrafo anterior, pode-se perceber que o uso de uma tocha potencial único não vai garantir exatamente os mesmos parâmetros nos dois arcos. A diferença vai se tornando ascendente quanto maior a resistividade do eletrodo. Porém, o usuário pode usar o artifício (se o equipamento permitir) de se usar velocidades de alimentação diferenciadas entre os dois arames. Ao se aumentar a velocidade do arame do arco de frente, por exemplo, a corrente sobre este arco vai aumentar, mas o arco vai ficar mais curto. Como não se pode aumentar a tensão sobre só o primeiro arame, para aumentar o comprimento do arco, existe uma limitação grande para ajustar diferentes valores de velocidade de alimentação entre os dois arames. O entendimento deste fenômeno é que fará possível ao usuário ajustar corretamente seus parâmetros.

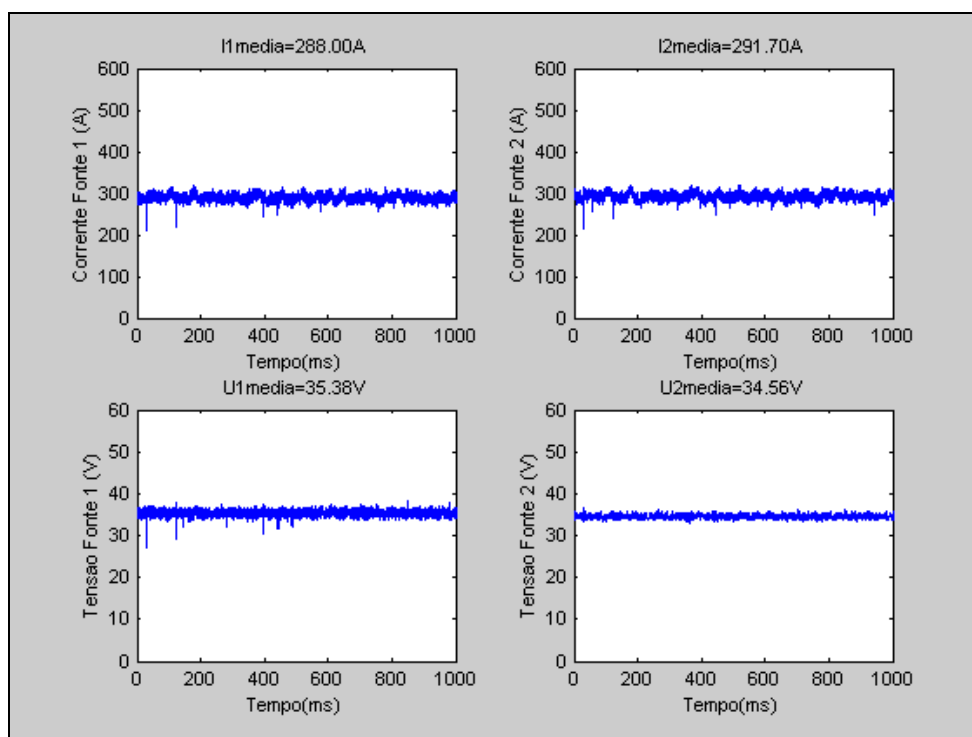


Figura 2.16 – Oscilogramas e valores médios das correntes e tensões nos arames da frente e de trás (Soldagem MIG/MAG duplo arame de simples deposição sobre chapa, posição plana, configuração seqüencial, tocha potencial único, arame AWS ER70S6 de 1,2 mm, com proteção de Ar+8%CO₂)

A literatura mostra que os primeiros trabalhos empregando multi-eletrodos no processo MIG/MAG foram com uma fonte única de soldagem, portanto com mesmo potencial. Segundo Michie et al (1999), o processo apresentou instabilidade em soldagens com

transferência por curto-circuito, uma vez que quando um dos arames tocava a poça de fusão, toda a corrente passava somente por esse arame, causando o seu rompimento de uma forma violenta.

Ainda sobre a tocha de potencial único, um mesmo ajuste de tensão pode levar a soldagens diferentes (correntes, tipos de transferências, acabamento, etc.), caso este ajuste tenha sido feito na fonte conectada no arame da frente ou no de trás e a direção de soldagem mude sem se reposicionar a tocha (ou seja, o arame da frente passa a ser o de trás e vice-versa). Nas fontes modernas, o controle da tensão pode ser feito pelo valor da corrente. Como visto, apesar de em potencial único a tensão ser a mesma, a corrente real sobre cada eletrodo pode se tornar diferente. Assim, os valores dos parâmetros de soldagem serão diferentes caso a fonte mestre esteja comandando o eletrodo da frente ou o de trás.

O processo de potencial isolado tem sido mais recomendado pela maior parte da literatura devido a maior versatilidade em termos de ajuste de parâmetros em cada eletrodo. Porém, deve-se levar em consideração os custos dos equipamentos envolvidos.

2.5.3 - Alinhamento do eletrodo em relação ao cordão de solda

Os arames na soldagem MIG/MAG duplo arame podem estar alinhados, em relação ao cordão de solda, um atrás do outro (alinhamento seqüencial) ou um paralelo ao outro (alinhamento transversal).

Como já foi citado anteriormente, a utilização do alinhamento transversal é bastante utilizada na soldagem de revestimentos. Motta (2002) encontrou bons resultados (cordões uniformes) para essa aplicação utilizando o processo duplo arame com duas tochas acopladas, tanto na posição plana quanto na sobre-cabeça. Pode-se observar pela Figura 2.17, uma série de soldagens efetuadas na posição sobre-cabeça nesse alinhamento estudado pelo mesmo autor.



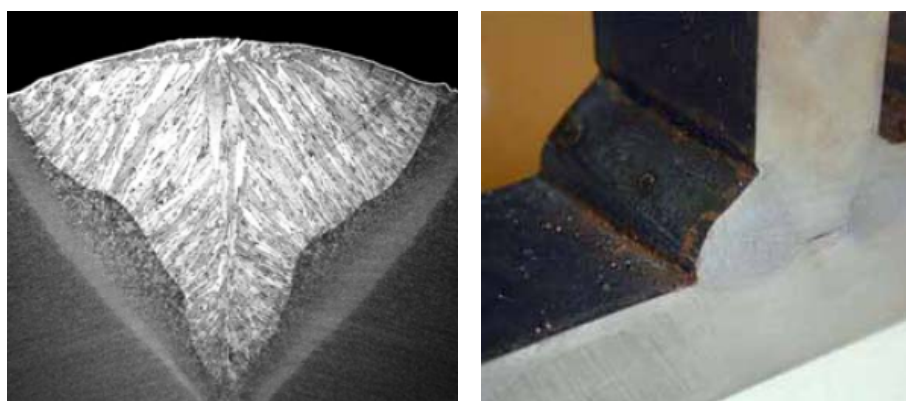
(a)



(b)

Figura 2.17- Soldagem de chapa de aço carbono de 12 mm de espessura na posição sobre-cabeça, utilizando DAPI, arames ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro e alinhamento transversal: (a) vista superior; (b) seção transversal (Motta, 2002)

Em se fixando os mesmos parâmetros de soldagem, a mudança de alinhamento transversal para seqüencial garante maiores penetrações, o que é visto como vantajoso para o preenchimento de juntas de topo e filete. Hedegård et al (2004) demonstraram essas vantagens em algumas aplicações, o que pode ser ilustrado pela Figura 2.18.



(a)

(b)

Figura 2.18 – Soldagem utilizando alinhamento seqüencial sobre material de base de aço carbono de 12 mm de espessura: (a) junta de topo; (b) junta de filete (Hedegård et al, 2004)

Visualizando o uso de parâmetros diferentes em cada eletrodo, é possível imaginar benefícios do alinhamento seqüencial (como no processo arco submerso multi-arames), condição em que a penetração do cordão parece ser maior. Mas a simplicidade advinda do uso de parâmetros iguais levaria a considerar os uso dos arames dispostos transversalmente. Este alinhamento poderia ainda levar a um melhor acabamento (maior molhabilidade, conseqüentemente, maior largura e menor convexidade), além de favorecer a formação do cordão em soldagens de alta velocidade e juntas com menor tolerância de preparação.

Como solução intermediária entre a maior penetração do alinhamento seqüencial e o melhor acabamento do alinhamento transversal vem a proposta do alinhamento em diagonal. Esta situação poderia ser interessante em juntas sobrepostas, sendo que o arame-eletrodo líder atuaria sobre o lado da chapa superior (maior capacidade de absorção de calor).

2.5.4 - Independência de parâmetros em cada arame

Ao se trabalhar com potencial único, as velocidades de alimentação também podem ser diferentes para cada arame. É de se esperar que o de menor velocidade vá tender a um arco maior e conduzir menor corrente. Esta característica pode se tornar importante em soldagem com alinhamento seqüencial, possibilitando um controle do acabamento pela ação do segundo arame. Mas acredita-se também que haverá pouca margem para ajuste.

Já no caso do modo potencial isolado, pode-se controlar a corrente e tensão em cada arco separadamente, ou seja, pode-se conseguir arcos mais longos, embora mantendo a mesma corrente ou, mesmo, maior corrente (maior consumo).

2.5.5 - Uso de corrente pulsada.

A tocha DAPI possibilita a utilização da técnica de defasagem entre pulsos, a qual foi explorada por, entre outros pesquisadores, Motta et al (2005). Estes autores chegaram às seguintes conclusões para aço carbono, com o posicionamento paralelo dos eletrodos e corrente média abaixo da corrente de transição:

- A defasagem de tempo entre os pulsos de corrente dos arcos voltaicos realmente reduz os desvios dos arcos, como apregoado na literatura e por fabricantes de equipamento, mas este resultado pode não se reproduzir se for extrapolado para correntes médias acima da de transição;
- Há um conseqüente desvio de trajetória das gotas em transferência com os desvios dos arcos, com implicação sobre a formação da poça de fusão;
- Entretanto, a defasagem não é necessariamente benéfica para a formação do cordão, já que torna o cordão com dupla penetração, embora com menor convexidade. Aparenta ser benéfico para revestimento, mas pode não ser para união;
- Tendo como critério de avaliação para a estabilidade dos arcos os desvios-padrão das tensões nos períodos de pulso e de base da corrente, pode se afirmar que a defasagem nos pulsos de corrente não teve influência estatisticamente significativas sobre a estabilidade dos arcos;
- Tendo como critérios de avaliação o acabamento dos depósitos, a quantidade de salpicos e a presença de porosidades, não houve diferenças significativas entre os depósitos realizados com e sem a tecnologia de defasagem nos pulsos de corrente;
- Finalmente, esses resultados mostram que a tecnologia da defasagem nos pulsos de corrente não é essencial para a operacionalização do processo.

2.5.6 - Velocidade de soldagem

A velocidade de soldagem, como já foi citado anteriormente, é um parâmetro de grande importância para o processo MIG/MAG Duplo Arame, pois é ela que dita a possibilidade de aumento da produtividade.

A relação da velocidade de soldagem com a velocidade de alimentação é que determina a quantidade de material depositado para um dado rendimento de deposição. Portanto, para uma determinada análise da área do perfil soldado, esses parâmetros são normalmente considerados juntos, sendo usualmente postos numa proporção constante, a qual significará numa mesma área total (área depositada, mas não necessariamente área fundida) para diferentes velocidades.

É sabido que altas velocidades de soldagem não são conseguidas no processo com arame simples devido ao aparecimento de defeitos, como falta de fusão, “humping⁴” e principalmente mordeduras. O aparecimento desses defeitos está relacionado com o tempo decorrido entre a 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 desse canal, as falhas que surgirão poderão ser caracterizadas como defeitos (Baixo apud Motta, 2002)

Conforme Paton et al apud Motta (2002), a soldagem com mais de um arco operando sobre uma mesma poça fundida possibilita aumentar consideravelmente a velocidade de soldagem antes que ocorra o aparecimento dos defeitos citados anteriormente. Entretanto, este aumento de velocidade no processo Duplo Arame também tem seu limite. Um aumento exagerado gera os mesmos defeitos existentes no arame simples, portanto, deve-se estudar bem as possibilidades de aumento de velocidade.

2.5.7 - Velocidade de alimentação

Nos dois tipos de tocha, potencial único e potencial isolado, há possibilidade de variar a velocidade de alimentação nos dois arames, pois sempre são utilizados dois cabeçotes de alimentação.

Normalmente no MIG/MAG Duplo Arame com potencial único são utilizadas as mesmas velocidades de alimentação. Pequenas diferenças de velocidade são aceitas, pois

⁴ Humping pode ser definido como um defeito que apresenta uma superfície de contorno irregular, consistindo de uma sequência de saliências intercaladas por depósitos de contornos relativamente uniformes (Savage et al apud Motta, 2002)

nessa configuração a tensão de soldagem não pode ser ajustada para cada arame, fazendo com que grandes diferenças venham a acarretar numa transferência muito instável.

Uma das grandes vantagens do MIG/MAG Duplo Arame com potencial isolado é justamente a possibilidade de se obter maiores variações de velocidade alimentação para cada arame, devido a maior capacidade de ajuste de parâmetros para cada arame.

Mulligan & Melton (2002) estudaram a influência da variação das velocidades de alimentação para os dois arames sobre a mudança no perfil soldado numa mesma velocidade de soldagem (600 mm/min). Um resumo dos seus resultados pode ser visto pelas Figuras 2.19 a 2.22 (há pouca robustez nos resultados, i.e., há uma dispersão dos dados geométricos). Segundo estes autores, ambas as velocidades quando incrementadas proporcionam um aumento da penetração e largura dos cordões soldados, mas o efeito do arame líder é muito mais pronunciado quando se trata de penetração (ver inclinação das curvas na Figura 2.21) e o efeito do arame guiado é um pouco mais pronunciado quando se trata de largura do cordão (ver inclinação das curvas na Figura 2.22).

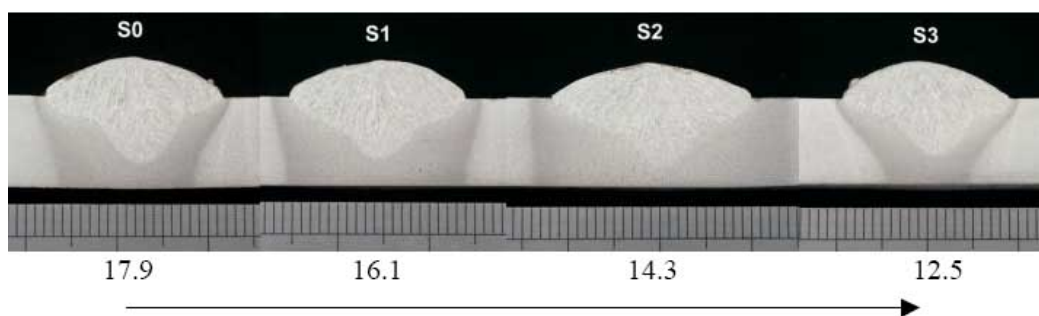


Figura 2.19 - Macrografias de soldagens feitas com a velocidade de alimentação do arame líder fixa (17,9 m/min) e decaindo a do guiado em 4 níveis (Mulligan & Melton, 2002)

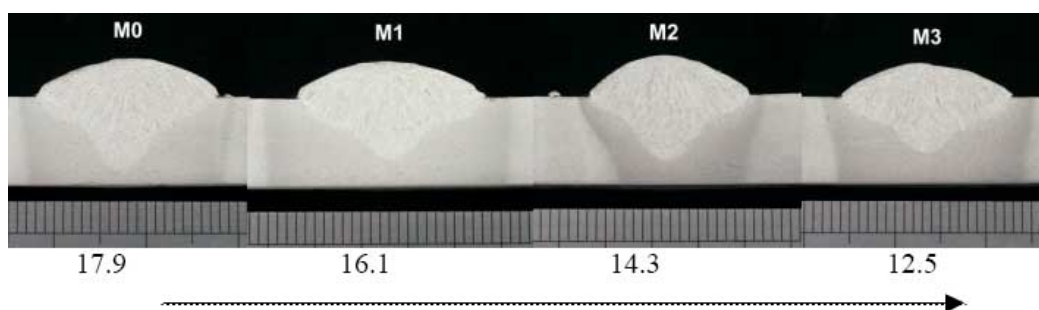


Figura 2.20 - Macrografias de soldagens feitas com a velocidade de alimentação do arame guiado fixa (17,9 m/min) e decaindo a do líder em 4 níveis (Mulligan & Melton, 2002)

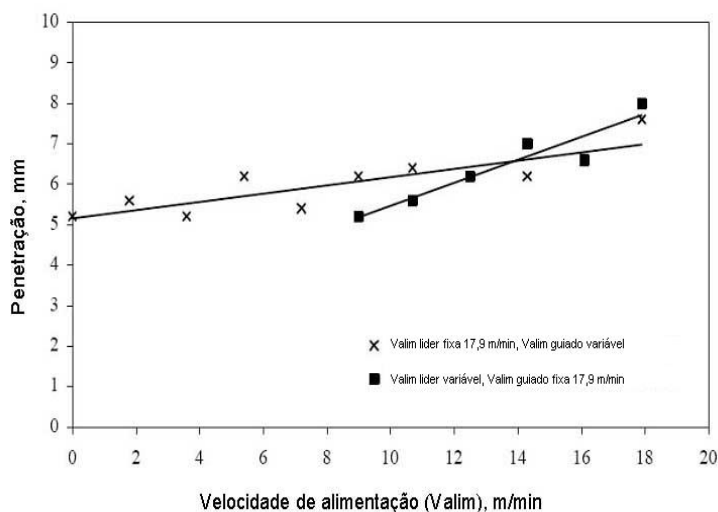


Figura 2.21 - Evolução da penetração para aumentos da Valim nos arames líder e guiado (Mulligan & Melton, 2002)

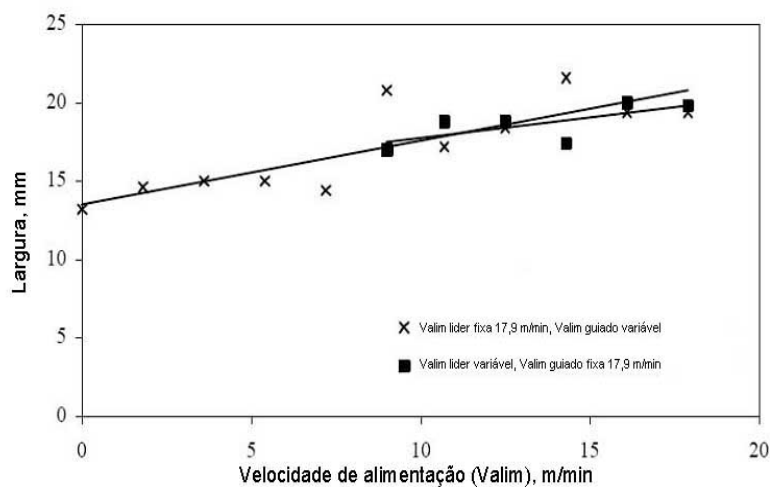


Figura 2.22 – Evolução da largura para aumentos da Valim nos arames líder e guiado (Mulligan & Melton, 2002)

Ainda segundo Mulligan & Melton (2002) para se obter uma maior estabilidade na transferência com menores perdas de material por respingo e melhor formato do cordão soldado, utiliza-se velocidade de alimentação maior no arame líder. Esses autores alcançaram melhores resultados com a velocidade de alimentação do arame de trás (guiado) menor que o do líder, ficando entre 60 a 100% do valor da velocidade do arame líder.

2.5.8 - Ângulo da tocha

A tocha pode ser posicionada de três formas em relação ao ângulo de ataque: empurrando, perpendicular e puxando. Existem dois aspectos a serem analisados. O primeiro é sobre a penetração. É sabido classicamente que a posição puxando favorece a penetração na chapa de base e que a posição empurrando favorece um cordão menos convexo em detrimento da penetração. Visualizando uma aplicação do processo em chapas mais finas, a opção empurrando parece mais atrativa.

Com a inclinação da tocha promove-se a mudança do ângulo de ataque dos dois arames ao mesmo tempo. Porém, algumas configurações de tochas (Figura 2.23) possibilitam que o próprio bico de contato imponha o ângulo de ataque de cada arame.

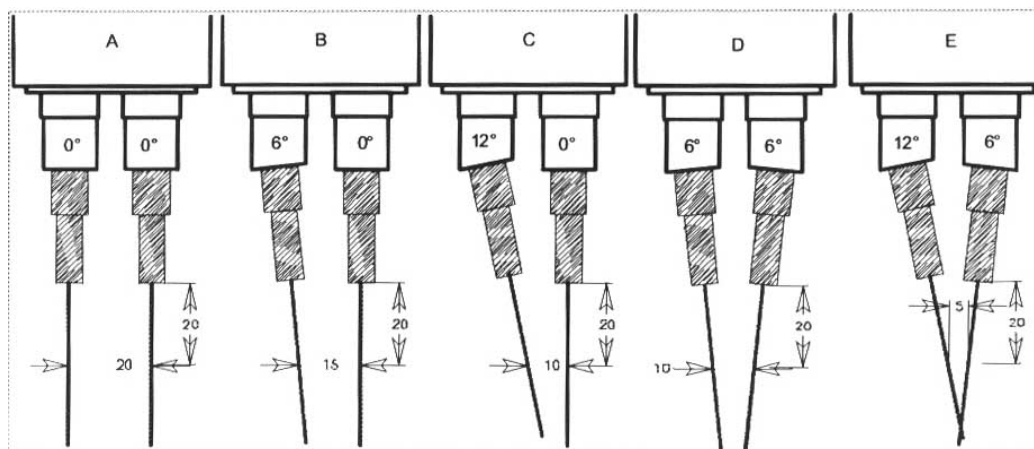


Figura 2.23 – Configurações mais comuns de tocha comercial em relação ao ângulo entre os arames líder e guiado (Hedegård et al, 2004)

Trabalhos foram desenvolvidos por alguns autores (Okui et al, 1989; Diltthey et al 1998 e Mulligan & Melton, 2002) na intenção de avaliar o efeito do ângulo para cada arame. Cada autor tem sua opinião própria sobre as melhores configurações. Deve-se ressaltar que, dependendo dos outros parâmetros utilizados, configurações diferentes podem ser encontradas como as ideais. Para Okui et al (1989), por exemplo, a configuração ideal de estabilidade da poça de fusão usando um sistema de duas tochas e para arames de 1,2 mm foi: distância entre eletrodos de 15 a 40 mm, com o eletrodo líder angulado de 10° e o guiado de -5° (os autores não deixam claro se os ângulos são empurrando ou puxando, mas presume-se que o ângulo positivo seja empurrando e o negativo puxando). Kodama et al (1997) usou duas tochas anguladas a 6° (empurrando) e separação entre 25 a 35 mm. Já Diltthey et al (1998) afirmam que ambos os eletrodos (tocha única) devem estar angulados simetricamente entre 10 a 11°. Mulligan & Melton (2002) citam que a tocha da Fronius é construída de tal forma

a ter o eletrodo líder perpendicular e o eletrodo guiado levemente inclinado na direção empurrando.

Uma outra forma de ajustagem é rotacionar a tocha é em relação à linha de centro do cordão, ou seja, numa disposição seqüencial do arame pode-se desviar em pouco um do outro. Acredita-se que este procedimento permite se soldar com juntas com menor tolerância nos ajustes entre peças a serem soldadas (Mulligan & Melton, 2002). Porém, a existência de um ângulo por volta de 20° resulta numa necessidade de redução da velocidade de soldagem em 25-30% (Dilthey et al, 1998). Para materiais de pequenas espessuras (< 4 mm) essa rotação é considerada desnecessária (Bohme et al, 1996).

2.5.9 - Tipo de junta e material

Acredita-se que as juntas mais prováveis para a utilização do MIG/MAG duplo arame sejam as de chapas entre 2 a 12 mm, de topo, em ângulo (junta em T) e sobrepostas (principalmente). Chapas mais finas provavelmente demandariam processos com arco mais concentrados e chapas mais grossas teriam outros processos mais atrativos em termos de facilidade operacional.

O processo Duplo Arame é aplicado principalmente na soldagem de peças em aço carbono e alumínio e, em menor escala em aços inoxidáveis. É também bastante estudado em áreas que historicamente são problemáticas para o MIG/MAG, como por exemplo, na soldagem de chapas oxidadas, galvanizadas e pintadas (Ketron et al, 2002). Sabe-se que um dos fatores que aumenta o tempo de preparação das chapas a serem soldadas é a necessidade de remoção de óxidos e “primers”, pois esses têm grande influência sobre o resultado do cordão soldado. Porosidade e inclusões são defeitos freqüentes encontrados em chapas soldadas com oxidação e pintura em se utilizando o processo MIG/MAG arame simples. Essas camadas superficiais também aumentam a formação de escória, o que acarreta na necessidade de remoção das mesmas e de mudança de parâmetros geométricos. Hoje em dia, como solução para esse problema, são utilizados alguns tipos combinados de removedores de óxidos juntamente com a soldagem com arames tubulares ou, também, combinações formuladas por alguns tipos de arames com fluxos especiais utilizados no processo de soldagem por arco submerso (Ketron et al, 2002).

As características de maior área da poça de fusão e menor velocidade de solidificação da mesma garantem ao processo MIG/MAG duplo arame uma possibilidade da não necessidade de preparação, tanto no que se refere à limpeza quanto à preparação dos chanfros em chapas a serem soldadas, o que significa redução de mão de obra, ou seja, redução de custos.

2.5.10 - Tipo do arame-eletrodo

A maior parte dos trabalhos publicados tem sido realizada utilizando-se arames sólidos de mesmos diâmetros, principalmente de aço carbono e ligas de alumínio. Segundo Dilthey et al (1998), investigações preliminares indicam melhoras consideráveis na aparência e penetração em soldagem de aço utilizando-se arames tubulares com fluxos rúflicos. A maior aplicação de arames tubulares no duplo arame é encontrada nos estaleiros japoneses (Kodama et al, 1997).

Segundo Mulligan & Melton (2002), o processo com duplo arame também oferece a possibilidade de se usar uma combinação dos tipos de arame, normalmente utilizando o arame sólido como líder (contribuindo com a penetração) e o arame tubular logo atrás (contribuindo com o acabamento). Estes autores ressaltam ainda que se pode utilizar diferentes composições e diâmetros para os arames, o que é pouco explorado pela literatura corrente, e ressaltam também, que estas diferentes configurações são utilizadas nesse processo com objetivos da soldagem em chapas “não preparadas”, seja a utilização de dois arames sólidos, bem como a combinação de arames sólido/tubular.

Um fato importante é que alguns autores, Modenesi & Avelar (1999) e Neto et al (2002), têm demonstrado que pequenas variações no diâmetro dos arames-eletrodo, situação típica devido a tolerâncias entre corridas, são suficientes para alterar a taxa de fusão dos mesmos. Em soldagem duplo arame, esta característica pode comprometer o ajuste correto entre as velocidades de alimentação dos dois arames. Uma maneira de prevenir este problema é o uso de arames com embalagem do tipo capa-a-capa, para as quais se demanda uma menor tolerância de diâmetro na sua fabricação, para poder acomodar cada fiada em uma mesma camada.

2.5.11 - Distância bico de contato-peça (DBCP)

Composta da extensão do eletrodo (distância do bico de contato ao arco) e do comprimento do arco, a distância bico de contato-peça (DBCP) afeta o modo de transferência metálica principalmente pela alteração da quantidade de aquecimento ôhmico ocorrendo no eletrodo. O efeito da DBCP na resistência do circuito requer que um novo mapa tensão/corrente seja desenvolvido para cada DBCP (Heald et al, 1994).

O efeito da DBCP em soldagens MIG/MAG com um único arame é razoavelmente conhecido; caso se deseje alta produção e pouca penetração, deve-se procurar DBCP longas. Espera-se um comportamento parecido para o processo MIG/MAG duplo arame. Da mesma forma que para o processo MIG/MAG arame simples, espera-se que um dos principais efeitos

da mudança da DBCP seja a influência sobre a mudança dos modos de transferência metálica, mesmo em se trabalhando em níveis semelhantes de corrente. Variações nos modos de transferência metálica ocasionam mudanças no perfil soldado, o que pode ser prejudicial em certas aplicações.

Quando a distância do bico de contato-peça aumenta para uma dada tensão, três efeitos são observados: O primeiro é o aumento do comprimento do eletrodo, resultando em mais aquecimento ôhmico no mesmo, pré-aquecendo-o e aumentando a sua taxa de fusão. O segundo efeito observado é a redução da corrente no circuito, caso não se altere o ajuste da tensão e a velocidade de alimentação. Para se manter o equilíbrio entre velocidade de alimentação e taxa de fusão com o aumento do comprimento do eletrodo, a corrente diminui automaticamente para compensar.

Finalmente, com um aumento gradual na DBCP para uma dada tensão, o comprimento do arco torna-se progressivamente mais curto para compensar o aumento da queda de tensão no eletrodo, já que a tensão é a mesma. Da mesma forma que a corrente, o comprimento do arco também pode alterar o modo de transferência. Eventualmente, o arco se extingue e a transferência por curto-circuito ocorre. Durante a porção de curto-circuito (alta corrente), ocorre suficiente aquecimento ôhmico para fundir o arame e um arco é restabelecido (Lucas, 1992).

De qualquer forma, como o objetivo deste processo é aumentar a produção, deve-se usar DBCP longos. Mas como as correntes são muito altas, não se deve usar DBCP extremamente longas, devido ao efeito Joule. Por isto, recomenda-se trabalhar de 20 a 25 mm.

Uma outra questão particular a ser analisada é a existência de ângulos (intrínsecos ao projeto da maioria de fabricantes de tocha) entre os arames de tochas com potencial isolado. O ângulo entre os arames vai levar à variação da distância entre os arames para diferentes DBCP, como sugere a Figura 2.24.

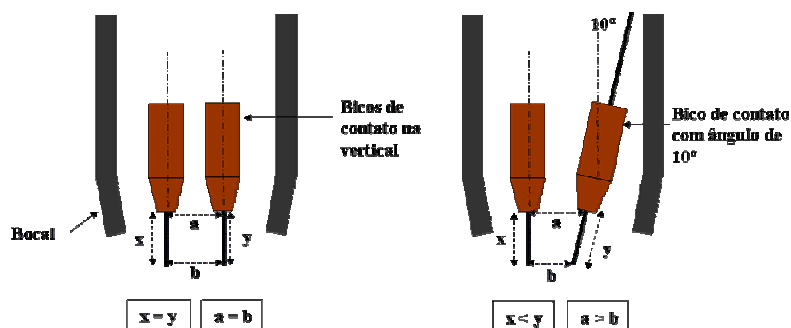


Figura 2.24- DBCP's diferentes nos bicos de contato em tochas DAPI devido à existência de ângulos distintos

2.5.12 - Espaçamento entre eletrodos

Na soldagem duplo arame, quando os eletrodos estão dispostos em paralelo em um mesmo bico de contato (DAPU), Diltthey et al (1998) encontraram que a transferência metálica dos dois eletrodos ocorreu numa mesma poça de fusão para uma distância entre eletrodos de 4 a 7 mm, dependendo do diâmetro e da intensidade de corrente imposta. Segundo Bohme et al (1996), se um espaçamento muito pequeno é utilizado, uma única gota pode ser progressivamente formada ao longo do tempo e não há energia “pinch” suficiente para o destacamento da mesma (Figura 2.25) e o arco pode crescer muito até queimar o bico de contato.

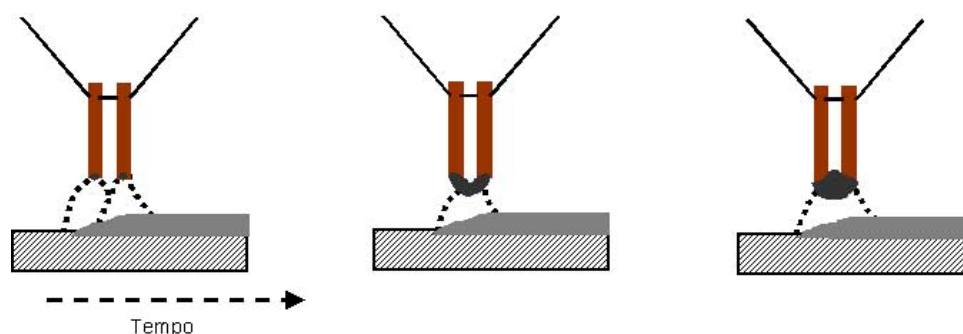


Figura 2.25 – Efeito de pequenas distâncias entre eletrodos sobre transferência metálica (adaptada de Bohme et al,1996)

Já pela Figura 2.26, pode-se observar o efeito de uma elevada distância entre os arames, o que ocasiona a formação de dois arcos independentes e conseqüentemente duas poças de fusão. A conseqüência dessa distância estendida é a necessidade de se trabalhar com menores velocidades de soldagem (Bohme et al,1996)

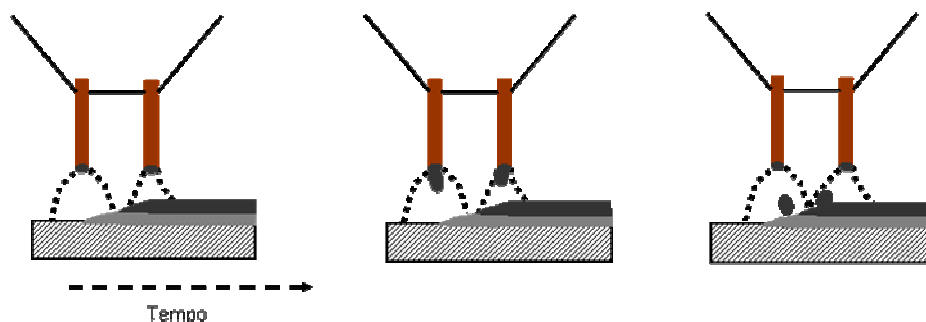


Figura 2.26 - Efeito de grandes distâncias entre eletrodos sobre transferência metálica (adaptação de Bohme et al,1996)

A característica de se usar arcos sobre poças separadas tem sido aplicada em sistemas duplo arame com duas tochas totalmente independentes, onde espaçamentos de aproximadamente 25 mm são tipicamente utilizados (Okui et al, 1989, e Kodama et al, 1997).

Com o aumento do espaçamento, Kodama et al (1997) observaram um maior reforço, pernas menores e ocorrência de mordeduras em distâncias maiores do que 35 mm.

Mas em sistemas que utilizam somente uma única tocha, um espaçamento por volta de 7 mm é aplicado em algumas tochas comerciais (Mulligan & Melton, 2002). Mas deve-se lembrar novamente que os eletrodos são comumente inclinados nestes tipos de tochas, portanto, a DBCP se torna uma variável crítica, pois determina a separação entre os dois arames. Se a DBCP não for otimizada, instabilidades devem ocorrer durante a soldagem.

2.5.13 - Gás de proteção

Pierre (1987) e Lyttle & Stapon (1990) sintetizam os fatores que governam a seleção de gases de proteção para o processo MIG/MAG, entre eles estão o material de base a ser soldado, o tipo de transferência metálica desejado, o diâmetro do eletrodo e o tipo e posição de soldagem. De acordo com Pierre (1987), a escolha do gás de proteção para uso em MIG/MAG deve ser baseada em um conhecimento das características de desempenho deste processo e deve considerar o seu efeito na eficiência de proteção, na qualidade do metal de solda depositado, na forma da penetração, na estabilidade do arco, na geometria do cordão de solda e nas propriedades mecânicas da solda.

Os gases de proteção para soldagem MIG/MAG são classificados pelos seus efeitos sobre as características do arco, a transferência metálica e o comportamento da poça fundida (Bennett, 1989). Duas características de extrema importância em gases de proteção, são o potencial de ionização e a condutividade térmica.

- Potencial de Ionização: A formação do plasma é dependente do “potencial de ionização” (a tensão necessária para remover um elétron de um átomo tornando este em um íon) dos gases vizinhos ao arco. Variações nesta propriedade criam algumas das diferenças distintas de desempenho vistas entre os gases de proteção (Lyttle & Stapon, 1990).

O acendimento e a estabilidade do arco são grandemente influenciados pelo potencial de ionização dos gases de proteção usados nos processos de soldagem. Um gás com baixo potencial de ionização, como o argônio, pode transformar átomos em íons facilmente. Isto ajuda a manter um arco suave e estável (Lyttle & Stapon, 1990).

- Condutividade Térmica: Diferenças na condutividade térmica dos componentes do gás de proteção também criam diferenças nas características do depósito de solda resultante. Aqueles gases que têm alta condutividade térmica transferem mais calor para a peça, influenciando, assim, a forma e o perfil de penetração da solda. Uma melhor transferência de calor para o metal de base promove uma melhor penetração na junta e maior fluidez da poça de solda. Alta condutividade térmica é crítica, especialmente quando se solda metais altamente

condutores como o alumínio e o cobre, isto é, metais que perdem calor rapidamente, geralmente necessitam um arco que transfere mais calor para a peça, para que não haja uma perda de produtividade devido à necessidade de redução da velocidade de soldagem, para que a solda não apresente problemas de falta de fusão e/ou de penetração (Lyttle & Stapon, 1990).

Para obter-se um gás de proteção que seja adequado para uma aplicação específica, uma mistura de gases geralmente é necessária. Cada gás básico contribui com determinadas propriedades para o desempenho global da mistura (Scotti, 1991) em acréscimo os fenômenos de separação (demixing). Um entendimento destas contribuições deverá tornar o processo de seleção mais fácil. As características e efeitos dos principais gases e de suas misturas para o processo MIG/MAG são descritas nos itens a seguir.

a) Argônio (Ar)

O Argônio é um gás inerte com baixo potencial de ionização (15,8 eV), baixo potencial de oxidação e baixa condutividade térmica (Pierre, 1987 e Lyttle & Stapon, 1990). De acordo com Dillenbeck & Castagno (1987), a relativamente alta densidade do argônio (1,38 em relação ao ar) promove uma efetiva ação protetora em fluxo de gás moderado, porque o argônio facilmente substitui o ar em torno da solda. Esta é uma característica importante para o processo duplo arame que demanda altas velocidades ou produzem poças de grandes dimensões.

Argônio puro é fornecido comercialmente para soldagem MIG/MAG normalmente com 99,95% de pureza e é usado como gás de proteção para soldagem de alumínio, magnésio, cobre e suas ligas, ligas de níquel e ligas reativas, tais como, titânio e zircônio. A soldagem desses materiais proporciona um arco estável, boa penetração e cordões suaves. Em seções espessas e em materiais de alta condutividade térmica, como o alumínio, a adição de hélio ao argônio aumenta o calor imposto (Bennett, 1989 e Lucas, 1992).

Uma atmosfera rica em Ar (90% ou mais) é necessária para obter transferência goticular (“spray”) convencional e goticular (“spray”) com alta densidade de corrente no processo MIG/MAG. Além disso, altas taxas de deposição com melhor eficiência da deposição do arame (baixos níveis de respingos) são geralmente obtidas quando se usa misturas à base de argônio como gás de proteção para a soldagem de aço (Pierre, 1987, Lyttle & Stapon, 1990).

A característica não desoxidante deste gás proporciona soldas livres de inclusões, mas isto leva a uma coluna de arco mais estreita e um arco instável em aços carbono comuns, além de uma pobre molhabilidade. Adicionando O₂ ou CO₂ ao Ar, supera-se esta dificuldade, porque os óxidos formados por estes gases promovem a fixação de cátodos, por isto aumentando a estabilidade do arco. Proteção à base de Ar promove retenção de elementos de liga, devido a

este gás ser inerte ou não reativo, melhorando as propriedades mecânicas; bom acendimento e estabilidade do arco em baixas correntes, além de permitir transferência goticular (“spray”) (Pierre, 1987, Bennett, 1989, Scotti, 1991 e Lucas, 1992). A combinação da baixa penetração e da menor quantidade de respingos gerados torna o uso do argônio puro desejável somente na soldagem de chapas finas, onde excessiva fusão da chapa e aparência superficial são de principal interesse (Dillenbeck & Castagno, 1987).

O custo direto do Ar é várias vezes maior que o do CO₂. Melhoramentos indiretos, porém, reduzem esta diferença. Gases à base de Ar produzem menos respingos que CO₂, reduzindo a necessidade de manutenção do equipamento e limpeza da solda. Eles reduzem a geração de fumos, porque a oxidação é menor. O contorno do cordão é mais plano, reduzindo ou eliminando operações de acabamento. As propriedades mecânicas do metal de solda são melhores e o menor índice de oxidação proporciona o uso de arames de soldagem mais baratos.

De todos os gases inertes, o argônio tem sido mais extensivamente usado em soldagens com proteção gasosa por causa de sua maior disponibilidade. O ar atmosférico contém aproximadamente 0,94% de argônio por volume. Embora isto pareça pouco, é preciso lembrar que tirando os 21% de oxigênio e os 78% de nitrogênio, todos os outros gases juntos correspondem a 0,04% da atmosfera (Dillenbeck & Castagno, 1987).

b) Dióxido de Carbono (CO₂)

O gás Dióxido de Carbono é o mais barato (comercialmente ele é quatro vezes mais barato que o argônio) e o mais utilizado gás de proteção para soldagem MIG/MAG e eletrodo tubular em aço, sendo largamente usado sozinho em MIG/MAG de aço carbono com transferência subarco ou curto-circuito (Dillenbeck & Castagno, 1987, Pierre, 1987 e Lyttle & Stapon, 1990). Porém, freqüentemente, o uso do CO₂ gera uma falsa economia, visto que os resultados obtidos com ele podem requerer maiores custos para a limpeza após a soldagem (Lyttle & Stapon, 1990).

Ele exibe características de gás inerte em temperatura ambiente, não reagindo com outros elementos, mas é um gás ativo nas temperaturas de soldagem (Dillenbeck & Castagno, 1987 e Lucas, 1992). O CO₂ dissocia-se no arco para formar CO e O₂, e o efeito global é o de gerar uma proteção oxidante. A porosidade no cordão de solda pode ser prevenida pela presença de desoxidantes no metal de adição (por exemplo, pelo uso de uma arama AWS ERXXS6 ao invés de um ERXXS3).

Sua alta condutividade térmica é responsável por uma alta transferência de calor para o metal de base (Lyttle & Stapon, 1990, e Scotti, 1991). A tensão do arco é de 1 a 2 V maior em

CO₂ (para uma corrente e comprimento de arco equivalente) do que aquela encontrada em misturas a base de argônio, e o calor de entrada é ligeiramente maior, resultando em uma maior fusão do metal de base (Norrish apud Perreira, 2001). Um perfil de penetração mais largo e arredondado é obtido quando se compara com o argônio, mas a maior distorção na chapa de base e a maior probabilidade de o arco atravessar a chapa são possíveis problemas (Lyttle & Stapon, 1990, Scotti, 1991 e Lucas, 1992).

Quando a proteção com CO₂ puro é empregada, uma complexa interação de forças (devido a sua baixa condutividade elétrica) ocorre à medida que as gotas metálicas se formam na ponta do arame. A resultante destas forças atua no sentido de retenção da gota na ponta do arame e, desta forma, há um crescimento excessivo e instável das gotas na ponta do eletrodo que são repelidas pelo arco e, então, transferem-se de modo explosivo gerando respingo excessivo. Este efeito também explica a elevação da corrente de transição do modo globular para o modo goticular (“spray”) com o aumento da quantidade de CO₂ em misturas à base de argônio (Dillenbeck & Castagno, 1987, Pierre, 1987, Lyttle & Stapon, 1990 e Lucas, 1992).

O uso de arcos curtos e controle de indutância da fonte, obtendo-se desta forma, uma transferência por curto-circuito mais estável, pode melhorar o desempenho do processo. Porém, de acordo com Scotti (1991), sempre pode ocorrer uma quantidade indesejável de respingos. Normalmente, a soldagem com CO₂ puro não produz transferência goticular (“spray”), devido à elevação da corrente de transição globular/“spray” com o aumento da quantidade de CO₂.

c) Misturas

Misturas de gases de proteção são formuladas para soldagem de tipos específicos de metais. A American Welding Society (AWS) teve dois sub-comitês trabalhando para desenvolver especificações para os gases de proteção e recomendações de uso (Pierre, 1987).

Tradicionalmente, misturas Ar+CO₂+O₂ e Ar+CO₂, ou CO₂ puro têm sido usados em uma ampla variedade de aplicações em soldagem MIG/MAG em aço. A seleção da mistura tem sido freqüentemente baseada na disponibilidade e não nas necessidades específicas do trabalho. Para muitas aplicações, uma mistura específica de Ar+CO₂ pode ser usada muito bem. Misturas de gases de proteção baseadas em Ar+He+CO₂ ou Ar+He+CO₂+O₂ são desejáveis para melhorar a produtividade de soldagem MIG/MAG com alta densidade de corrente (Bennett, 1989 e Lyttle & Stapon, 1990).

O CO₂ é normalmente usado para dar maior penetração na junta, embora uma mistura de Ar+CO₂ com seu arco mais estável e níveis de corrente controlados possa proporcionar

ótima penetração. Quando se necessita de uma grande penetração, os níveis de corrente devem ser aumentados, isto é, o nível de corrente de soldagem, e não o gás, que determina qual quantidade de penetração na junta será obtida, além de favorecer a produtividade da operação. Quantidades pequenas de CO_2 em argônio são mais convenientes para chapas finas enquanto maiores níveis de CO_2 são convenientes para seções grossas (Hilton, 1990 e Lyttle & Stapon, 1990).

Eagar (1990) descreve a influência do gás de proteção na coroa do ponto anódico. Com hélio ou CO_2 , o ponto anódico é atacado na superfície inferior da gota pendente na extremidade do eletrodo. O tamanho do ponto não muda significativamente quando a corrente aumenta. Com argônio, o ponto anódico é mais difuso e aumenta visivelmente em tamanho quando a corrente aumenta. Em correntes suficientemente altas, o ponto anódico preenche a gota fundida e começa a escalar o lado da parede cilíndrica do eletrodo, levando-o à fusão e à formação de conicidade na extremidade do eletrodo, que não se desenvolve em proteção de argônio e CO_2 puros. Sob esta condição, argônio transfere gotas menores que He e CO_2 na mesma corrente, mas ele é menos eficiente em transferência de calor para o eletrodo. Consequentemente, a formação de conicidade reduz a taxa de fusão do eletrodo. O autor conclui que a maior taxa de fusão do metal de base em He, por exemplo, não é devido ao maior potencial de ionização deste gás como é normalmente assumido, mas a uma maior área de contato líquido/sólido no qual o calor é transferido para o eletrodo sólido.

Norrish & Richardson (1988) testando a otimização do gás de proteção nos modos curto-circuito e goticular (“spray”) em soldagem de aço, observaram que a melhor mistura é dependente do modo de transferência da gota. Eles também observaram que o efeito de adicionar pequenas quantidades de oxigênio ao argônio envolve a formação de uma base do arco concêntrica estável imediatamente acima da gota. Adições de CO_2 , por outro lado, tendem a confinar o ponto do anódico e promover transferência não axial. Estes efeitos são mais comuns em transferência goticular e pulsada.

Na soldagem de aço carbono, usa-se misturas de argônio com uma alta porcentagem de CO_2 (acima de 20%) ou O_2 (10-15%) para transferência por curto-circuito. Utilizam-se estas mesmas famílias de gases, mas com uma porcentagem mais baixa do componente oxidante (5-18% CO_2 , 2-5% O_2) para transferência goticular (“spray”) convencional e pulsada (Lyttle & Stapon, 1990).

Em aço não é possível realizar soldagem pulsada com transferência controlada usando CO_2 puro, pois o nível de transição para goticular é extremamente alto e, portanto, misturas de CO_2 e O_2 em argônio e hélio são normalmente usadas. Com misturas ricas em argônio, o comportamento da transferência metálica é pouco afetado pela quantidade de gás ativo na mistura (Modenesi & Nixon, 1994).

Misturas de três ou mais gases chegaram ao mercado mais recentemente. Estas oferecem melhorias especializadas e, às vezes, mínimas. São geralmente selecionadas pela versatilidade que elas podem proporcionar do ponto de vista da transferência metálica ou pela maior qualidade da solda que elas podem oferecer. Para aplicações críticas especiais, tais como soldagem de aços de alta resistência fora de posição para aplicações estruturais, estes gases podem vir a ser úteis e econômicos. Por exemplo, a combinação de três gases tais como $\text{Ar}+\text{CO}_2+\text{O}_2$ ou $\text{Ar}+\text{He}+\text{CO}_2$ pode produzir ótimas características de desempenho em várias aplicações de soldagem. Hilton (1990) observou que uma mistura contendo cerca de 12% CO_2 e 2% O_2 produz uma condição de transferência goticular muito estável, tornando esta mistura particularmente conveniente para uso em aplicações robóticas ou pulsadas.

Algumas misturas ternárias são consideradas gases de proteção “universais”, quando elas proporcionam operacionalidade em todos os modos de transferência metálica (Bennett, 1989).

2.5.14 - Efeito dos gases de proteção no processo duplo arame

Na soldagem com duplo arame, o desempenho dos gases de proteção é parecido com o do processo utilizado no arame simples, sendo que o efeito de diferentes misturas é bem conhecido. Dilthey et al (1998) investigaram esse efeito para aços carbono no processo MIG/MAG Duplo arame e constataram que com um aumento do teor de CO_2 (mais de 18%) em misturas com Argônio, houve um aumento da penetração lateral no perfil do cordão soldado, formando assim perfis com formato mais simétrico. Os autores ainda observaram que velocidades de soldagem acima de 2 m/min não puderam ser alcançadas com gases de alto teor de CO_2 , pois com tal velocidade a poça de fusão tornou-se mais viscosa e maiores gotas são formadas pela união da transferência metálica dos dois arames (efeito de interferência do campo magnético), ocasionando a transferência por curto-circuito, gerando assim muito respingo.

Mulligan & Melton (2002) julgaram mais adequado a utilização do gás $\text{Ar}+5\%\text{CO}_2+2\%\text{O}_2$ para soldagem com corrente pulsada e $\text{Ar}+20\%\text{CO}_2+2\%\text{O}_2$ para soldagem no modo convencional. Dilthey et al (1998) não observaram melhoras significantes na qualidade e desempenho do processo quando foi utilizada uma mistura de três componentes no gás de proteção. Segundo os mesmos, o custo dessa mistura não é comercialmente justificável.

Capítulo III - Materiais e Métodos

3.1 – Bancada de soldagem

Para o desenvolvimento dos experimentos foi montada uma bancada de soldagem (Figura 3.1) que possibilitasse a filmagem da transferência metálica e controle dos diversos parâmetros. Essa bancada foi composta por duas fontes de soldagem com respectivos cabeçotes alimentadores, tochas de soldagem (DAPU ou DAPI), mesa de soldagem, sistema computacional de monitoramento e aquisição de corrente e tensão, câmera de alta velocidade, canhão laser, monitor, jazz e demais acessórios.

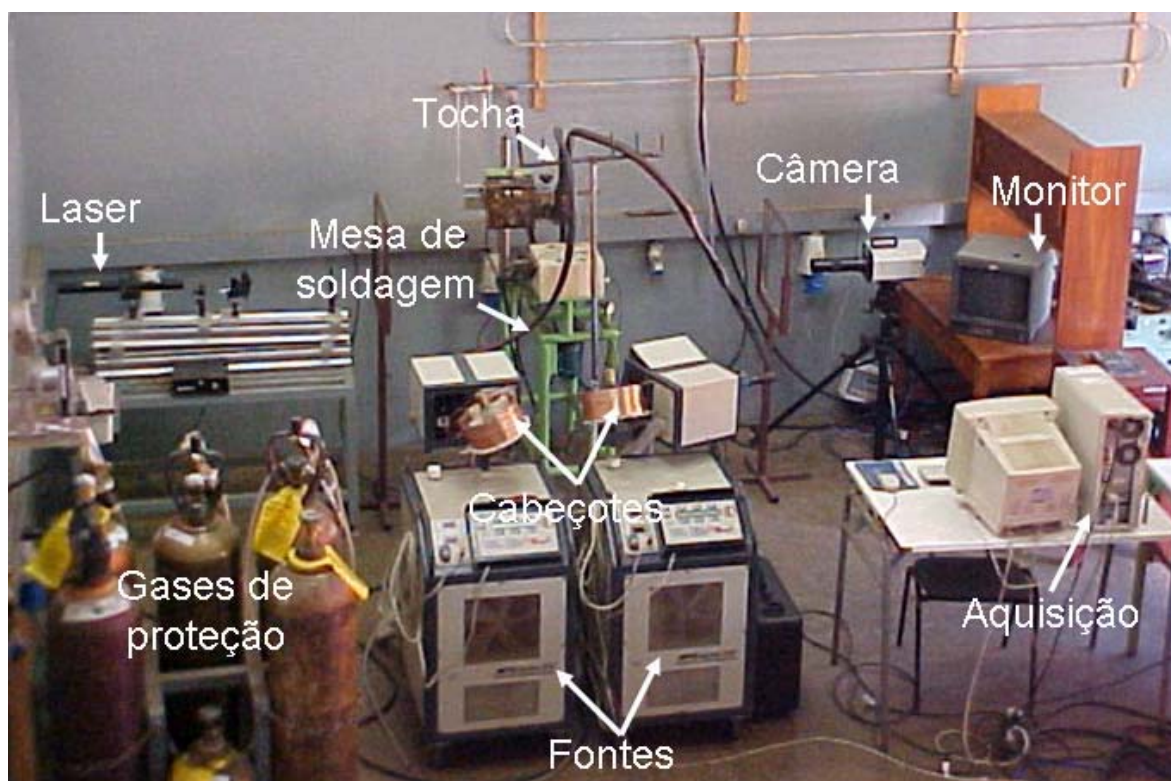


Figura 3.1 – Bancada de Soldagem

3.1.1 - Fontes de soldagem – MTE DIGITEC 600 (IMC/LABSOLDA)

Em todos os experimentos, foram utilizadas duas fontes MTE DIGITEC 600 (Figura 3.2), trabalhando em paralelo e conectadas eletronicamente através de cabos. Nelas estão acoplados cabeçotes alimentadores do modelo STA-20, cada um com quatro roletes

tracionadores, permitindo assim a alimentação contínua dos dois arames-eletrodo necessários ao processo MIG/MAG duplo arame.

O sistema tracionador de arame da Inversal, STA-20, possibilita a alimentação de arame bobinado de diversos tipos, com velocidade regulada pelo usuário numa faixa de 0,1 a 20,0 m/min. O STA-20 também oferece regulagem para rampas de aceleração e desaceleração do arame, melhorando as condições de início e término dos cordões de solda. Pela configuração das fontes, permitiu-se o ajuste das velocidades de alimentação para cada arame de forma independente.



Figura 3.2 – Fontes de Soldagem MTE DIGITEC 600 e Cabeçotes STA-20 trabalhando interligadas como MIG/MAG duplo arame (potencial único ou isolado)

Deve-se ainda citar que essas fontes de soldagem são multiprocessos, permitindo também a soldagem de outros processos, a saber, Eletrodo Revestido e TIG. Os dados técnicos referentes às fontes de soldagem MTE DIGITEC 600 podem ser encontrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Dados técnicos da Fonte MTE DIGITEC 600

Corrente nominal	350 A 100% FC
Corrente máxima	550 A
Tensão em vazio	220, 380, 440 V 3 ~
Alimentação	220, 380, 440 V 3 ~
$\cos \phi$	0,95
Dimensões	500 x 600 x 900 mm
Peso	180 kg

Esta fonte utiliza transistores de 3ª geração, denominados IGBT's (Insulated Gate Bipolar Transistor). O circuito esquemático da fonte DIGITEC 600 pode ser demonstrado através da Figura 3.3.

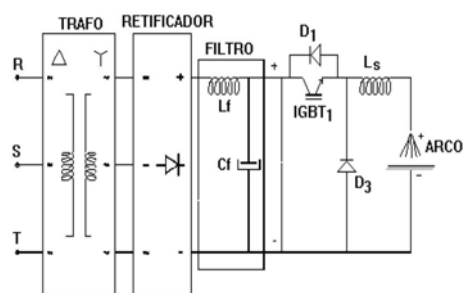


Figura 3.3 – Esquema do circuito elétrico da Fonte DIGITEC 600

Utilizando-se a fonte DIGITEC 600 na opção de soldagem pelo processo MIG/MAG, existem duas opções de ajuste de comando, por imposição de corrente ou por imposição de tensão. No modo de ajuste pela corrente, possibilita-se um controle de corrente constante ou pulsada e, o ajuste pela tensão, permite somente o controle por tensão constante. Em relação a indutância, que também pode ser alterada nas fontes, foi mantido o valor de 20 (na DIGITEC 600 os valores de referencia de indutância variam entre 0 a 30) .

Nesta dissertação foi utilizada somente a opção onde as duas fontes trabalham com o ajuste pela tensão (modo tensão constante).

3.1.2 - Tochas de soldagem MIG/MAG duplo arame

Nos experimentos realizados foram utilizadas duas tochas de soldagem comerciais para o processo MIG/MAG duplo arame. Uma delas adequada para o processo duplo arame com potencial único (DAPU), de marca BINZEL (modelo MWT-2DW) e a outra, de marca TBI, utilizada para potenciais isolados (DAPI).

A tocha DAPU é refrigerada a água, possuindo arames-eletrodo numa trajetória paralela entre eles na saída e distanciados de 4 mm. A tocha pode operar com três diferentes diâmetros de eletrodo, a saber, 0,8, 1,0 e 1,2 mm, através da troca das peças metálicas que fazem parte do bico de contato. A Figura 3.4 mostra detalhadamente o bocal refrigerado e a distância entre eletrodos no bico de contato, devendo-se apontar que os bicos de contato ficam para dentro do bocal em aproximadamente 1,3 mm.

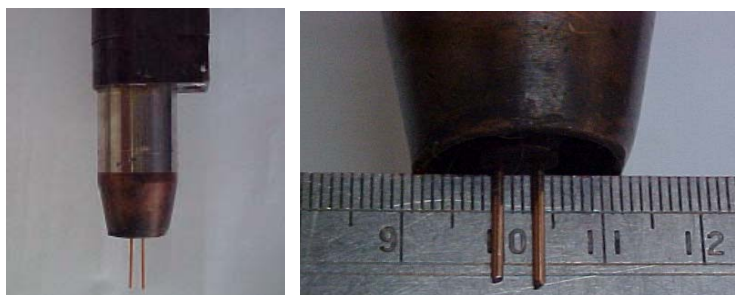


Figura 3.4 – Detalhe da tocha DAPI : (a) bocal refrigerado; (b) bico de contato único (distância de 4 mm entre eletrodos)

A configuração da tocha DAPI usada exige três bombas de água para refrigerar o conjunto das peças do bocal. Os eletrodos têm uma trajetória paralela entre eles na saída e uma distância fixa entre eles de 10 mm. A tocha pode operar com três diferentes diâmetros de eletrodo, a saber, 0,8, 1,0 e 1,2 mm, através da troca dos bicos de contato. A Figura 3.5 mostra detalhadamente o bocal refrigerado e a distância entre eletrodos no bico de contato. Os bicos de contato ficam para dentro do bocal em aproximadamente 4,4 mm.

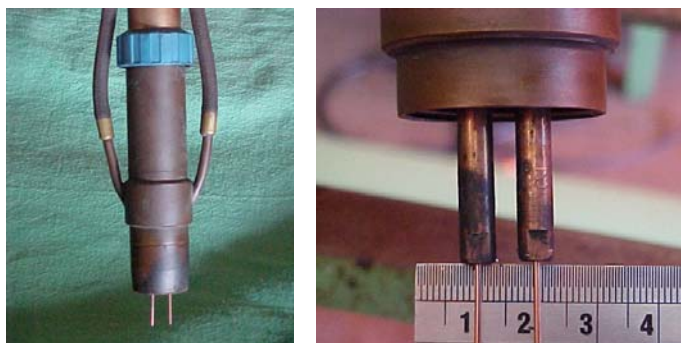


Figura 3.5 – Detalhe da tocha DAPI : (a) bocal refrigerado; (b) bicos de contato isolados (distância de 10 mm entre eletrodos)

3.1.3 - Mesa de soldagem

Para realizar as soldagens, foi utilizada uma mesa de soldagem em que a tocha é fixada na posição desejada e a placa de teste é movimentada relativamente à tocha na velocidade desejada (ajustada no painel do controlador). Essa mesa, ilustrada na Figura 3.6, possibilita a variação da velocidade de soldagem de 1 a 800 mm/min e foi devidamente calibrada (ver item 3.2.2). A opção de manter a tocha parada teve como objetivo possibilitar a filmagem do arco elétrico, visto que seria impossível movimentar o sistema óptico e a câmera juntamente com a tocha, se, no caso, essa última promovesse o movimento.



Figura 3.6 - Mesa de soldagem

3.1.4 - Sistema de aquisição de dados e comunicação entre as fontes

O sistema de aquisição de dados é composto por um microprocessador e uma placa de conversão AD/DA. A placa utilizada foi a INTERDATA II, dotada de um conversor A/D de 8 ou 12 bits, com até 16 canais de entradas analógicas, o que possibilita aquisições em altas frequências, dependendo do computador em que a mesma é instalada. No presente caso, foi instalada num computador Pentium MMX – 200 MHz, com configuração para trabalhar com 4 canais de entrada com até 4 kHz, a 12 bits de resolução. Os sensores responsáveis pela geração de sinais de tensão e corrente estão dispostos internamente nas fontes, o que possibilitou a ligação direta da placa de aquisição às fontes. A comunicação entre as fontes foi também efetuada pelo mesmo cabo, permitindo ambas as funções. A disposição dos cabos pode ser observado pelo esquema da Figura 3.7 (ao se trabalhar com a tocha com potencial isolado, não havia necessidade de comunicação entre as fontes).

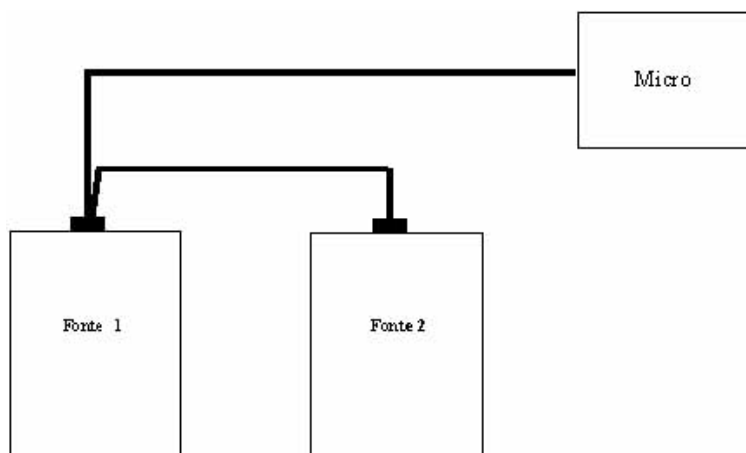


Figura 3.7 – Esquema de interligação entre fontes/micro para sistema de aquisição e comunicação entre fontes

Esta placa foi usada para monitorar os sinais de tensão e corrente em cada tocha com o auxílio do software Oscilos2ar, o qual será comentado no item a seguir.

3.1.5 - Programas computacionais

Para a aquisição e tratamento de dados, foram utilizados alguns programas computacionais específicos. Para visualização e monitoramento dos parâmetros de tensão e corrente das duas fontes (Mestre e Escrava), foi utilizado um programa dedicado a esta medida, desenvolvido pelo fabricante do equipamento de soldagem e denominado Oscilos2ar. O programa possui funções como trigger, cursores para medição e cálculo de potência e energia.

Depois de iniciado o programa, o usuário tem acesso à tela principal mostrada na Figura 3.8. Uma dificuldade desse software é que ele não possibilita a mudança da taxa de aquisição, sendo ela fixada em 4 kHz. Em compensação, o mesmo permite a escolha do tempo de aquisição em 1, 5, 10, 50, 100, 500 ms e 1, 5, 10 s (opções fixas no display do software). Para monitoramento e visualização dos 2 sinais de corrente e 2 de tensão (mestre e escrava), o programa possibilita observar 2 sinais por vez, ficando à critério do usuário.

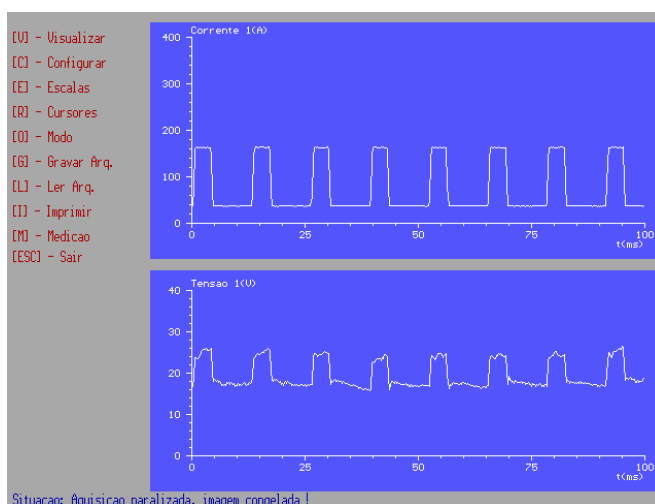


Figura 3.8 - Tela principal do software Oscilos2ar

O programa possibilita dois modos de operação: Modo Normal ou Modo com “Trigger”. Caso o usuário opte pelo modo com “Trigger”, aparecerá uma tela para selecionar a grandeza (Tensão ou Corrente). Após a definição da grandeza, o usuário indica se o disparo da aquisição acontecerá para valores maiores (subida) ou menores (descida) que o nível especificado. Em seguida, o usuário digita o valor da amplitude da grandeza. Quando o valor

da grandeza medida tornar-se maior ou menor (conforme selecionado) que o valor especificado, é iniciado o processo de aquisição. Será realizada uma única varredura, o sinal será mostrado após ser congelado. É importante observar que o Trigger é por nível. Por exemplo, se for selecionado como trigger uma corrente de 200 A com a opção maior (subida), quando a corrente for superior a este valor, a aquisição será realizada. Caso a corrente já esteja acima deste valor, a aquisição será imediata.

Nas aquisições efetuadas neste trabalho foi escolhida a opção Modo Normal, a qual congela a imagem a partir do tempo selecionado até o momento em que o usuário clica a tecla "Enter", ou seja, no caso do usuário ter escolhido o tempo de 5 segundos o período adquirido será dos 5s anteriores ao clique do usuário.

Após gravar os arquivos, há a necessidade de transformar esses em extensões conhecidas e que possibilitem o tratamento em outros softwares. O próprio pacote do Oscilos2ar possibilita essa operação através do programa chamado Oscgr2aw, que gera arquivos no formato de texto (txt).

Para tratamento dos sinais obtidos, foi desenvolvida uma rotina no ambiente do software Matlab® sob o nome de converte1 (Anexo I), que possibilitou o cálculo dos valores médios e eficazes (rms) de corrente e tensão, além de traçar gráficos destes parâmetros contra o tempo.

3.2 - Calibração das variáveis envolvidas na soldagem

3.2.1 - Velocidade de alimentação do arame

Para se fazer a aferição da velocidade de alimentação, foram tomadas algumas medidas do comprimento de arame impulsionado para fora da tocha (sem arco aberto) em diferentes velocidades de alimentação ajustadas e seu respectivo tempo. Entretanto, para se ter certeza de que esse procedimento daria valores de velocidade de alimentação com uma pequena margem de erro, propôs-se monitorar a velocidade em uma fonte durante o processo de calibração. Para monitorar a velocidade, foi utilizado um sensor (Silva et al, 2000) que, por sua vez, necessita ser calibrado. O sensor utilizado foi um encoder (modelo Css 58, fabricado pela Suprasonic) de 500 pulsos por volta, que é um dispositivo que transforma um sinal de frequência, emitido através da velocidade de rotação do eixo acoplado ao trem de polias do alimentador de arame, em um sinal de tensão. Este sinal, tratado numa interface eletrônica, corresponde à velocidade imposta ao arame (desconsiderando qualquer deslizamento).

O processo de aferição do alimentador de velocidade é o mesmo de calibração do sensor. Desta forma, propôs-se realizar simultaneamente a calibração e a aferição, baseados

na medição do comprimento de eletrodo impulsinado para fora da tocha. Para eliminar o efeito da inércia do motor no início e no final da operação, idealizou-se um procedimento pelo qual, em todo o tempo de medida, o sistema de alimentação estivesse operando em regime de velocidade constante. Para isso, estipulou-se um referencial com uma distância inicial conhecida, iniciando-se a cronometragem do tempo quando o arame passasse pelo mesmo, além de acionar o sistema de aquisição de tensão. Após terminado a aquisição da tensão, cujo tempo de aquisição é estipulado no programa, parava-se simultaneamente a alimentação do arame na tocha e o cronômetro. Através desses dados, pôde-se traçar uma curva de calibração para os alimentadores das duas fontes, e, portanto, obter a velocidade de alimentação real dos arames (Anexo II).

3.2.2 - Velocidade de soldagem

A calibração da velocidade de soldagem foi feita através do uso de um medidor dedicado (Silva et al, 2000) baseado num cronômetro e dois sensores magnéticos acoplados numa escala metálica e distanciados, no caso, de 300 mm. Estes sensores são acionados pela passagem de um ímã fixo na mesa de soldagem, disparando o cronômetro na passagem pelo primeiro sensor e interrompendo-o na passagem pelo segundo sensor.

Inicialmente, escolheu-se uma larga faixa de velocidade mais utilizada para executar a aferição. Com isto, ajustava-se a velocidade no equipamento e iniciava-se o processo. A velocidade obtida (real) foi calculada através da simples equação de espaço sobre tempo, gerando assim uma curva e uma equação de ajuste (Anexo III).

3.2.3 - Vazão de gás

Como a vazão é função das perdas de carga (tubulações, válvulas e tochas, à vazante) e do tipo de gás, fez-se necessário uma calibração para se saber a vazão real na saída do bocal.

A calibração foi feita com auxílio de um bibímetro (Figura 3.9), que é constituído basicamente por um tubo cônico e com um flutuador interno de dimensões reduzidas com escala de vazão em unidades normalmente utilizadas nos processos de soldagem, litros por minuto (l/min).



Figura 3.9 - Bibímetro

Houve também a necessidade de um dispositivo composto de uma mangueira com um bocal de maior largura, basicamente pela necessidade de adaptação à saída da tocha e devido à possibilidade de tomada de vazões, mesmo com a tocha na posição vertical (posição de soldagem), o que não é possível com o bibímetro.

Como o ajuste da vazão é feito no manômetro que está logo após a saída do cilindro de gás, fez-se então a relação entre vazão ajustada (numa faixa operacional) no manômetro e a vazão encontrada no bibímetro. Com essa relação obteve-se uma curva e uma equação de correção do valor da vazão na saída do bocal. O resultado da calibração podem ser encontrados no Anexo IV.

3.3 - Bancada de Filmagem

Para a visualização da transferência metálica, fez-se necessário a utilização de uma bancada de filmagem, que pode ser observada pela Figura 3.10. A bancada é constituída, basicamente, por uma câmara de alta velocidade, vidros de proteção, cabeçote laser, alguns componentes ópticos (objetivas, filtros, etc), um sistema de visualização (monitor) e gravação (Jazz Drive).

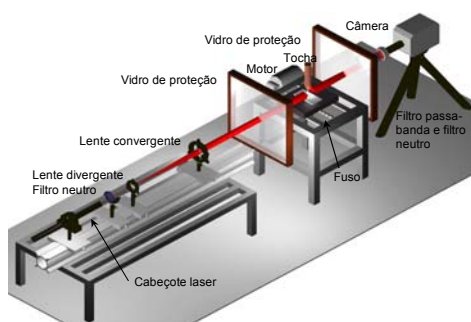


Figura 3.10- Bancada de Filmagem

3.3.1 - Câmera de alta velocidade

Para as filmagens, foi utilizada uma câmera CCD de alta velocidade, de marca MEMRECAM modelo Ci (Figura 3.11). Este tipo de câmera permite não só a gravação digital de imagens, como a saída digital de dados. Pode-se, como ela, captar até 2000 quadros por segundo, isto é, 0,5 ms entre cada quadro (uma câmera CCD comum capta algo em torno de 30 quadros/segundo) e com abertura de shutter de até 1/24000 s, isto é, cada quadro de 0,5 ms grava somente 0,04 ms, evitando ao máximo “borrar” as imagens em movimento. Com esta velocidade de filmagem é possível definir claramente o instante do destacamento da gota. Porém, o tempo de filmagem é limitado pela memória interna da câmera. Para 2000 quadros/s, por exemplo, o tempo de filmagem é limitado em 13 segundos. A câmera armazena as imagens captadas em sua memória interna até que outra filmagem seja realizada. Dessa forma, após cada filmagem (cada teste), as imagens devem ser transferidas da filmadora para o jazz.



Figura 3.11 - Câmera de alta velocidade da marca MEMRECAM modelo Ci

Em todos os experimentos foi utilizada a velocidade máxima de gravação, de 2000 quadros por segundo, com uma resolução de 252x186 pixels e um ajuste do shutter de 1/24000 s.

3.3.2 - O laser e o sistema óptico

A Figura 3.12 mostra o sistema laser/óptico, que tem por objetivo produzir a sombra do eletrodo, da gota transferida e do cordão formado sobre a chapa. Essa técnica utilizada para produzir essa sombra é conhecida como Shadowgrafia.