

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

**DESENVOLVIMENTOS NO PROCESSO HÍBRIDO PLASMA-MIG PARA
OPERAÇÕES DE SOLDAGEM E BRASAGEM**

**Tese submetida à
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
para a obtenção do grau de
doutor EM ENGENHARIA MECÂNICA**

CANDIDATO: Moisés Alves de Oliveira

Florianópolis, Janeiro de 2006.

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

**DESENVOLVIMENTOS NO PROCESSO HÍBRIDO PLASMA-MIG PARA OPERAÇÕES DE
SOLDAGEM E BRASAGEM**

M. Eng. Moisés Alves de Oliveira

**Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de
DOUTOR EM ENGENHARIA
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA
sendo aprovada em sua forma final.**

Orientador: Prof. Jair Carlos Dutra, Dr.

Coordenador: Prof. José A. Bellini da Cunha Neto, Dr.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Berend Snoeijer, Dr. Ing. - Presidente

Prof. Américo Scotti, Ph. D – Relator

Prof. Dr. Ing. Prof. h. c. Dieter Böhme - Coorientador

Prof. Nelson Back, Ph. D.

Prof. Paulo José Modenesi, Ph. D.

À minha esposa Nalinle,
Aos nossos pais Albertina e Ermes; Nara e Milton.
A toda a nossa família.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Jair Carlos Dutra, pelo apoio durante a execução do trabalho de doutorado.

Ao Prof. Dr. Ing. Prof h. c. Dieter Böhme, pela aceitação e apoio durante a execução do trabalho no SLV – München e pelas visitas ao Brasil.

Ao Prof. Dr. Ing. Berend Snoeijer pela orientação o processo de obtenção da bolsa DAAD.

Ao CNPq e ao DAAD pelas bolsas e apoio para compra de equipamentos para a bancada de ensaios.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da UFSC, por viabilizar a execução do presente trabalho.

Ao Dr. Eng. Raul Gohr Jr. pelo apoio incondicional em todos os momentos.

A todos os colegas do LABSOLDA, em especial aos engenheiros Regis H. G. Silva e Guilherme Locatelli e ao Físico Tiago V. Cunha, pelos momentos de companheirismo, descontração e trabalho.

Aos bolsistas Tomazo Burin e Fabio Lanznaster, pela ajuda decisiva na execução do trabalho.

Aos colegas do SLV-München, em especial à Frau Dr. Ing. Heidi Crammer, Dipl. Ing. Wulf Rosenfeld, Dipl. Ing. Mirko Duziak e Herr Reinhard Magg pelos agradáveis momentos vividos em Munique.

E especialmente à minha esposa, pelo companheirismo, dedicação e apoio incondicional.

SUMARIO

AGRADECIMENTOS.....	IV
LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABELAS.....	XIII
SÍMBOLOGIA.....	XIV
RESUMO.....	XVI
ABSTRACT.....	XVII
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo Geral.....	3
1.2 Objetivos Específicos.....	3
1.3 Justificativas.....	4
1.4 Estrutura da Tese.....	5
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS E BIBLIOGRÁFICOS.....	6
2.1 Introdução.....	6
2.2 Princípios fundamentais do processo Plasma-MIG.....	7
2.3 Fontes de soldagem para o processo Plasma-MIG.....	9
2.4 Acendimento do arco plasma.....	11
2.4.1 Acendimento do arco por alta frequência.....	11
2.4.2 Acendimento do arco plasma realizado com o auxílio do arco MIG.....	13
2.5 Características físicas dos arcos voltaicos e da transferência metálica.....	16
2.5.1 Arame não conectado a uma fonte de energia.....	16
2.5.2 Arame conectado a uma fonte de energia.....	17
2.6 Transferência de Calor e Mecanismos de Penetração.....	21
2.7 Eficiência Térmica.....	23
2.8 Distribuição de temperatura e composição química dos arcos Plasma e MIG/MAG no processo híbrido Plasma-MIG.....	24
2.9 Tamanho e Temperatura das Gotas.....	25
2.10 Forças envolvidas no destacamento e influência da vazão de gás sobre o tamanho das gotas.....	26
2.11 Modelo Elétrico para o processo Plasma-MIG.....	27

3 A CORRENTE PULSADA E SUA UTILIZAÇÃO NO PROCESSO PLASMA-MIG	30
3.1 Possíveis melhorias viabilizadas pela corrente pulsada	30
3.2 A corrente pulsada no processo MIG/MAG	31
3.3 Determinação do comando sinérgico	38
3.3.1 Relação entre corrente média e velocidade do arame	38
3.3.2 Determinação dos parâmetros de pulso: <i>Corrente de Pulso</i> “ I_p ” e <i>Tempo de Pulso</i> “ t_p ”	43
3.3.3 Determinação dos parâmetros de soldagem MIG/MAG pulsada utilizando-se apenas uma variável de entrada, utilizando os equacionamentos do comando sinérgico	46
4 APARATO EXPERIMENTAL.....	48
4.1 Introdução	48
4.2 Bancada N. 1	49
4.2.1 Fontes de Soldagem	49
4.2.2 Programação dos Parâmetros	50
4.2.3 Pistola de Soldagem Plasma-MIG	51
4.2.4 Acendimento do Arco	54
4.2.5 Controle da vazão de gás	54
4.2.6 Sistema de arrefecimento de água	54
4.2.7 Sistema de deslocamento	55
4.2.8 Sistema de aquisição de dados	55
4.3 Bancada de Soldagem N. 2.....	55
4.3.1 Fontes de Soldagem	55
4.3.2 Pistola de Soldagem	56
4.3.3 Acendimento do Arco Plasma	58
4.3.4 Controle da vazão de gás	58
4.3.5 Sistema de arrefecimento de água	58
4.3.6 Sistema de deslocamento	58
4.3.7 Sistema de aquisição de dados	58
5 DESENVOLVIMENTO DA BANCADA PLASMA-MIG NO LABSOLDA.....	59
5.1 Motivação para a construção da bancada no LABSOLDA	59
5.2 Fontes de Soldagem	60
5.3 Sistema de controle e aquisição de parâmetros de soldagem.....	62
5.4 Circuito Hidráulico (água de refrigeração)	68
5.5 Robô de 6 eixos e mesa rotativa para a realização de soldagens automáticas	69
5.6 Pistola de Soldagem	72
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	73
6.1 Introdução	73
6.2 Refinamento do sistema SOFT-START para abertura do arco plasma.	73
6.3 Instabilidades Causadas por Curtos-Circuitos entre o arame-eletrodo e a peça de trabalho	78

6.4	Característica Estática do Processo Plasma-MIG	83
6.5	Características Dinâmicas do Processo Plasma-MIG	87
6.5.1	Correntes Constantes	87
6.5.2	Corrente MIG Pulsada.....	92
6.6	Elaboração de um modelo elétrico para o processo Plasma-MIG	94
6.7	Influência das correntes MIG e Plasma sobre a taxa de fusão de arame.....	102
6.7.1	Influência da corrente Plasma Sobre a Taxa de Fusão.....	108
6.7.2	Influência da corrente MIG sobre a taxa de fusão	110
6.8	Influência das correntes I_{MIG} e I_{PL} sobre o diâmetro de gota e determinação dos parâmetros de pulso I_p e t_p.....	110
6.9	Influência do balanço de correntes I_{PL} e I_{MIG} sobre a geometria do cordão de solda.	120
7	A UTILIZAÇÃO DO PROCESSO PLASMA-MIG NA UNIÃO DE CHAPAS POR SOLDAGEM E BRASAGEM	123
7.1	Introdução	123
7.2	Soldagem de Alumínio	123
7.3	Soldagem Plasma-MIG de Aços.....	126
7.4	Brasagem de Chapas Galvanizadas	128
8	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	130
8.1	Conclusões	130
8.2	Sugestões para trabalhos futuros	131
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	132

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Desenho Esquemático do processo de soldagem MIG/MAG.....	7
Figura 2.2 – Desenho esquemático do Processo de Soldagem Plasma-MIG (Essers, 1972).....	8
Figura 2.3 – Pistola de soldagem Plasma-MIG equipada com eletrodo anular de cobre (Essers, 1982)	9
Figura 2.4 – Processo Plasma-MIG com apenas uma fonte de energia (Liefkens, 1969).....	10
Figura 2.5 – Desenho esquemático da abertura do arco plasma por alta frequência	12
Figura 2.6 – Abertura do arco plasma utilizando-se arco piloto	13
Figura 2.7 – Seqüência de acendimento do arco plasma pelo método "Soft Start" (Draugelates, 2001) 14	14
Figura 2.8 – Seqüência de fotos do acendimento do arco plasma (ISF/ISAF, 2002).....	15
Figura 2.9 – Seqüência de fotos do reacendimento do arco MIG/MAG (ISF/ISAF, 2002)	15
Figura 2.10 – Soldagem Plasma-MIG com arame não energizado.....	17
Figura 2.11 – Plasma-MIG com Polaridade Reversa.....	18
Figura 2.12 – Características Tensão x Corrente dos processos Plasma-MIG e MIG convencional, para arame de 0,9 mm, extensão do eletrodo de 25 mm e comprimento do arco de 7 mm, corrente plasma de 90 A (Jelmorini, 1975).	19
Figura 2.13 – Transferência goticular axial (Essers, 1972-2).....	20
Figura 2.14 – Transferência rotacional no processo Plasma-MIG (Essers, 1972-2).....	20
Figura 2.15 – Corrente de transição entre os modos de transferência goticular axial e rotacional para os processos MIG/MAG (A) e Plasma-MIG (B). Arame-eletrodo de Aço, 1,2 mm de diâmetro (Essers, 1972-2).	21
Figura 2.16 – Distribuição da densidade de potência transferida para a peça de soldagem para o processo Plasma-MIG (Makarenko, 2003).	22
Figura 2.17 – Ciclos térmicos do processo Plasma-MIG (Makarenko, 2003).....	23
Figura 2.18 – Eficiência Térmica dos processos de soldagem ao arco voltaico – Plasma; TIG; Plasma-MIG; MIG/MAG e Arco Submerso.	24
Figura 2.19 – Temperatura das Gotas em função da corrente através do arame-eletrodo para os processos Plasma-MIG e MIG/MAG. Corrente Plasma = 100 A. Arame-eletrodo: AISi5, 1,6 mm de diâmetro (van der Heuvel, 1978).	25
Figura 2.20 – Frequência de Destacamento e Massa das Gotas em função da Corrente através do arame para os processos Plasma-MIG e MIG/MAG em atmosfera de CO₂. Arame-Eletrodo: Aço Carbono, diâmetro = 1,2 mm. Corrente Plasma = 100 A (van der Heuvel, 1978).	26
Figura 2.21 – Massa das Gotas em função da Vazão de Gás para o processo Plasma-MIG, sem corrente através do arame. Arame de Aço carbono, 1,6 mm de diâmetro e corrente Plasma de 100 A – Polaridade Reversa (Graat, 1979).	27

Figura 2.22 – Modelo Elétrico do processo de soldagem Plasma-MIG (Matthes, 2002).....	28
Figura 3.1 – Corrente pulsada de onda retangular	30
Figura 3.2 – Esquema da transferência por curto-circuito no processo MIG/MAG (Gonçalves e Silva, 2005)	32
Figura 3.3 – Forças eletromagnéticas resultando em uma força contrária ao destacamento, em transferência globular.....	33
Figura 3.4 – Seqüência de imagens mostrando a repulsão de uma gota de metal fundido em transferência globular (AGA Welding Training Package)	34
Figura 3.5 – Definição da corrente de transição no processo MIG/MAG (Lesnewich, 1958)	34
Figura 3.6 – Variação da Corrente de Transição em função do comprimento do eletrodo. Arame de aço carbono, 1,6 mm de diâmetro (Rhee, 1992)	35
Figura 3.7 – Variação da Corrente de Transição em função do gás de proteção. Arame de aço carbono, 1,6 mm de diâmetro (Rhee, 1992)	35
Figura 3.8 – Corrente média em função da velocidade do arame para o processo MIG/MAG pulsado (Amin, 1982)	42
Figura 3.9 – Oscilograma esquemático do destacamento de gotas.....	45
Figura 3.10 – Histograma dos intervalos de destacamento	45
Figura 4.1 – Fontes de soldagem da bancada n. 1.	50
Figura 4.2 – Sistema de aquisição de dados, console de comando da fonte Plasma e software para comando dos parâmetros MIG.....	51
Figura 4.3 – Pistola de soldagem e sistema de deslocamento da peça de trabalho.	51
Figura 4.4 – Eletrodo anular de cobre, equipado com inserto de tungstênio.	53
Figura 4.5 – Bocal Constritor	53
Figura 4.6 – Bancada de soldagem n. 2.....	56
Figura 4.7 – Pistola Plasma-MIG fabricada pela empresa Tbi.	56
Figura 4.8 – Eletrodo Anular Plasma.....	57
Figura 4.9 – Bocal constritor integrado ao bocal de gás de proteção.....	57
Figura 5.1 – Fonte de soldagem MTE Digitec 600.....	61
Figura 5.2 – Fonte de Soldagem INVERSAL 300.....	61
Figura 5.3 – Placa de aquisição e controle de sinais INTERDATA	63
Figura 5.4 – Interface do software PMIG, para controle da bancada do LABSOLDA	65
Figura 5.5 – Interface do sistema de aquisição de dados desenvolvido para o Plasma-MIG	65
Figura 5.6 – Computadores de controle e aquisição de dados.....	66
Figura 5.7 – Central de controle e aquisição e fontes de soldagem.....	66
Figura 5.8 – Esquema da bancada Plasma-MIG desenvolvida no LABSOLDA	67

Figura 5.9 – Diagrama Esquemático do circuito de refrigeração da pistola Plasma-MIG	69
Figura 5.10 – Robô UP-6 adaptado para a soldagem Plasma-MIG.....	70
Figura 5.11 – Adaptação do Cabeçote para tracionamento do arame e conexões elétricas, de gás de proteção e de água de refrigeração	70
Figura 5.12 – Adaptação da extremidade do sexto eixo para suportar a pistola Plasma-MIG	71
Figura 5.13 – Mesa rotativa comandada pelo robô UP-6	71
Figura 5.14 – Pistola de soldagem Plasma-MIG, marca TBI.	72
Figura 6.1 – Aderência do arame na peça, durante o procedimento de soft start.	75
Figura 6.2 – Procedimento de abertura Soft-Start na bancada LABSOLDA	76
Figura 6.3 – Abertura por "Soft Start" Modificado – Oscilograma real obtido durante um procedimento de abertura utilizando-se arame de aço carbono.	77
Figura 6.4 – Instabilidades no arco Plasma cusadas por curto-circuitos arame-eletrodo/peça .	78
Figura 6.5 – Migração do arco Plasma para o bico de contato e arame MIG.....	79
Figura 6.6 – Bocal de isolamento cerâmico danificado pelo arco plasma.....	80
Figura 6.7 – Pistola Plasma-MIG adaptada com bucha de isolamento de nylon.....	80
Figura 6.8 – Oscilograma de soldagem Plasma-MIG com curto transferência metálica por curto-circuito em atmosfera de Ar + CO ₂ sem extinção do arco plasma.	81
Figura 6.9 – Bucha de Nylon danificada pela ação do arco plasma	81
Figura 6.10 – Projeto Original do Eletrodo Plasma / Pistola.....	82
Figura 6.11 – Eletrodo Plasma Modificado	83
Figura 6.12 – Curva característica constante para o arco Plasma com eletrodo anular de cobre, 6 mm de diâmetro. Argônio puro como gás interno, externo e de proteção, com vazões de 5; 5 e 10 l/min respectivamente. Comprimento do arco: 12 mm.	84
Figura 6.13 – Influência das correntes MIG e Plasma sobre a tensão MIG. Arame: AISi5, 1,6 mm de diâmetro. Argônio como gás MIG, Plasma e de proteção, com vazões de 5; 5 e 10 l/min respectivamente. Distância eletrodo plasma-peça: 12 mm. Distância bico de contato – peça: 16 mm. Distância ponta do eletrodo – peça: 4 mm.....	85
Figura 6.14 – Influência de I-MIG sobre U-MIG e U-Plasma. Arame: AISi5, 1,2 mm de diâmetro. Argônio puro como nos três gases do processo e I-Plasma = 64 A.	86
Figura 6.15 – Comportamento da tensão dos arcos plasma e MIG, em função das correntes Plasma e MIG.	86
Figura 6.16 – Variação das tensões plasma e MIG em função dos curtos-circuitos arame/poça de fusão – I-MIG e I-Plasma = 80 A. Velocidade do Arame (Va=7m/min). Argônio em todos os gases do processo.	88
Figura 6.17 – Detalhe mostrando o comportamento das tensões durante o curto-circuito.	88
Figura 6.18 – Plasma-MIG com transferência por curto-circuito, mostrando uma transferência metálica sem migração do arco plasma	89

Figura 6.19 – Oscilograma do modo de transferência globular no processo Plasma-MIG Alumínio	90
Figura 6.20 – Comparação da distribuição de corrente na gota fundida para os processos Plasma-MIG e MIG/MAG.....	91
Figura 6.21 – Modo de transferência "Spray" no processo Plasma-MIG. Arame de Alumínio, 1,2 mm de diâmetro. I-Plasma = 80 A; I-MIG = 200 A. Va = 11,5 m/min.....	92
Figura 6.22 – Soldagem Plasma-MIG com pulsação de I-MIG	93
Figura 6.23 – Diagrama Esquemático da Característica Estática do Processo Plasma-MIG. Ib = Corrente MIG de Base; Ip = Corrente MIG de Pulso; Ub designa tensão de base e Up designa tensão de pulso.	93
Figura 6.24 – Modelamento elétrico dos arcos voltaicos, segundo Mathes e Kohler (Mathes, 2002) 94	
Figura 6.25 – Características Estáticas do processo Plasma-MIG	95
Figura 6.26 – Desenho esquemático do processo Plasma-MIG com arco Plasma e arco Híbrido 96	
Figura 6.27 – Modelo elétrico proposto para o processo Plasma-MIG.....	98
Figura 6.28 – Pontos do modelo proposto comparados aos pontos experimentalmente obtidos. 99	
Figura 6.29 – Característica estática do processo Plasma-MIG - Comparação dos resultados calculados pelo modelo proposto e resultados medidos.....	100
Figura 6.30 – Comparação entre um oscilograma da soldagem Plasma-MIG pulsada medido e calculado pelo modelo desenvolvido.	100
Figura 6.31 – Comparação entre um oscilograma da soldagem Plasma-MIG pulsada medido e calculado pelo modelo desenvolvido.	103
Figura 6.32 – Influência de IMIG e IPL sobre Va. Arame: AISi-5, 1,6 mm de diâmetro. Argônio como gás central, periférico e de proteção, com vazões de 5; 5 e 10 l/min.	104
Figura 6.33 – Influência da corrente plasma sobre o coeficiente linear da equação 7.8.....	105
Figura 6.34 – Influência de IMIG e IPL sobre a velocidade do arame CuSi-3, 1,2 mm de diâmetro. 106	
Figura 6.35 – Influência de IMIG e IPL sobre a velocidade do arame ER 70 S-6, 1,2 mm de diâmetro	107
Figura 6.36 – Influência de LE sobre a taxa de fusão do arame.....	107
Figura 6.37 – Identificação do tempo entre destacamentos utilizando-se oscilograma da tensão MIG. 111	
Figura 6.38 – Determinação do Tempo Modal de Destacamento utilizando-se um histograma	112
Figura 6.39 – Influência das correntes IMIG e IPL sobre o diâmetro modal de gota. Arame AISi-5, 1,2 mm de diâmetro em atmosfera de argônio.....	113
Figura 6.40 – Influência das correntes IMIG e IPL sobre o tempo modal de destacamento	114
Figura 6.41 – Influência da mistura de hélio aos gases MIG e Plasma sobre o diâmetro de gota destacada.	115

- Figura 6.42 – Parâmetro de destacamento Kv de Amin [A2,3. ms] em função do diâmetro modal de gota, para arame de alumínio, 1,2 mm de diâmetro em atmosfera de argônio puro. 116**
- Figura 6.43 – Oscilogramas dos parâmetros UMIG e IMIG Na soldagem com arame de alumínio, 1,2 mm de diâmetro, realizada com o processo Plasma-MIG, com corrente MIG pulsada. Parâmetros: Tabela 7.3117**
- Figura 6.44 – Oscilograma de brasagem realizada com arame de CuSi-3 – Parâmetros: Tabela 6.5. 119**
- Figura 6.45 – Oscilograma de soldagem realizada com arame ER 70 S-6. Parâmetros: Tabela 6.5. 119**
- Figura 6.46 – Influência do balanço de correntes sobre a geometria do cordão de solda. VS = 0,3 m/min e Va = 5,3 m/min para os três ensaios. Demais parâmetros: Tabela 6.6.121**
- Figura 6.47 – Largura do Cordão em função da corrente plasma no processo Plasma-MIG em atmosfera de Ar + 4% CO₂. Arame-eletrodo de aço, 1,2 mm de diâmetro. Velocidade do arame: 4 m/min. Velocidade de soldagem: 50 cm/min. Material de base: Aço carbono, 3 mm de espessura.....121**
- Figura 6.48 – Influência do balanço das correntes IMIG e IPL sobre a geometria do cordão de solda. Vs = 1,5 m/min; Va = 6,1 m/min. Demais parâmetros: tabela 6.7.122**
- Figura 7.1 – Soldagem de chapas de alumínio. Espessura: 5 mm. Arame: AISi5, 1,2 mm de diâmetro. Velocidade de soldagem: 0,55 m/min. Junta de topo, sem preparação de chanfro. .124**
- Figura 7.2 – Soldagem de chapas de alumínio. Espessura: 2 mm. Arame: AISi5, 1,2 mm de diâmetro. Velocidade de soldagem: 2,7 m/min. Demais parâmetros: Tabela 7.1.....124**
- Figura 7.3 – Soldagem Plasma-MIG de chapa de alumínio 2 mm de espessura. Vs = 2,7 m/min. Demais parâmetros: Tabela 7.1.125**
- Figura 7.4 – Seção transversal de soldagem Plasma-MIG em chapas de aço carbono 2 mm de espessura. Vs = 4 m/min. Demais parâmetros: Tabela 7.2.126**
- Figura 7.5 – Seção transversal de união soldada pelo processo Plasma-MIG, de aço de alta resistência XABO 1100. Material de Adição: Union X 92 / M 21, 1,2 mm de diâmetro. Espessura da chapa: 6 mm. Junta em V, nariz de 1 mm, com espessamento de 1 mm. Velocidade de soldagem: 0,4 m/min. Gases: MIG= Ar + 10 %CO₂; Plasma = Proteção = Ar Puro.....128**
- Figura 7.6 – Brasagem de chapa de aço galvanizado 1 mm de espessura, realizada pelo processo Plasma-MIG. Vs = 4 m/min. Demais parâmetros: Tabela 7.5.128**
- Figura 7.7 – Seção transversal de brasagem realizada pelo processo Plasma-MIG. Vs = 3 m/min. Parâmetros: Tabela 8.5.129**

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1 – Parâmetros de soldagem para arame NiFe 6040, 1,2 mm de diâmetro.....	92
Tabela 6.2 – Parâmetros para validação do modelo que simula o processo Plasma-MIG estaticamente.....	98
Tabela 6.3 – Influência de IPL sobre o coeficiente linear das curvas V_a x IMIG.....	104
Tabela 6.4 – Experimentos com diferentes valores de d_g e l_p, para testes de estabilidade	117
Tabela 6.5 – Experimentos com corrente MIG pusada, na soldagem de aço e brasagem de chapas galvanizadas.....	119
Tabela 6.6 – Ensaios com diferentes balancos entre IPL e IMG para observar variações da geometria de soldas em aço carbono	120
Tabela 6.7 – Ensaios com diferentes balancos entre IPL e IMG para observar variações da geometria de soldas em alumínio.....	122
Tabela 7.1 – Parâmetros de pulso para a soldagem de chapa de 2 mm de espessura de alumínio.....	125
Tabela 7.2 – Parametros de Pulso para a soldagem de chapas de aço carbono de 2 mm de espessura.....	127
Tabela 7.3 – Composição química do aço XABO 1100.	127
Tabela 7.4 – Parametros de pulso para a soldagem do aço XABO 1100, 6 mm de espessura..	127
Tabela 7.5 – Parametros de pulso para a brasagem de chapas de aço galvanizado, 1 mm de espessura.....	129

SÍMBOLOGIA

Alfabeto Latino:

A	área transversal do arame-eletrodo	
Ar	argônio	
Cu	cobre	
CO ₂	dióxido de carbono	
d _a	diâmetro do arame-eletrodo	[mm]
d _g	diâmetro de gota	[mm]
d _{mg}	diâmetro modal de gota	[mm]
F _A	força de arraste provocada pelo fluxo de plasma	
F _{em}	força eletromagnética	
F _g	força causada pela aceleração da gravidade	
F _γ	força causada pela tensão superficial	
Fe	ferro	
H _f	entalpia para aquecer e fundir um determinado volume de arame	[J/m ³]
He	hélio	
H ₂	hidrogênio	
I	corrente	
I _b	corrente de base	[A]
I _m	corrente média	[A]
I _{MIG}	corrente que circula pelo circuito MIG	[A]
I _p	corrente de pulso	[A]
I _{PL}	corrente que circula pelo circuito Plasma	[A]
k	constante de Boltzmann	
K _v	constante de destacamento	
L _e	comprimento do arame-eletrodo	[mm]
MAG	metal active gas	
MIG	metal inert gas	
Mn	manganês	
Ni	níquel	
q	densidade de potência entregue à peça	[W/m ²]
r	raio	

R	resistência ôhmica	[Ω]
R_h	resistência do arco híbrido	[Ω]
R_{MIG}	resistência do circuito MIG	[Ω]
R_t	resistência total do circuito	[Ω]
t	tempo	
t_b	tempo de base	[ms]
T_d	período de destacamento de gota	[ms]
t_f	taxa de fusão	[kg/h]
TIG	Tungsten Inert Gas	
T_{md}	período modal de destacamento de gota	[ms]
t_p	tempo de pulso	[ms]
U	tensão	[V]
U_{fh}	tensão da força contra eletromotriz do arco híbrido	[V]
U_{fp}	tensão da força contra eletromotriz do arco plasma	[V]
U_{MIG}	tensão MIG	[V]
U_{PL}	tensão Plasma	[V]
v	volume	[mm ³]
V_a	velocidade do arame	[m/min]
V_s	velocidade de soldagem	[m/min]
ZAC	zona afetada pelo calor	

Alfabeto Grego:

α	coeficiente de correlação $I_{MIG} \times V_a$	[m/min.A]
β	coeficiente de correlação $I_{PL} \times V_a$	[m/min.A]
φ	função de trabalho anódico	[V]
ρ	resistividade elétrica do arame-eletrodo	[$\rho.m$]

RESUMO

Avanços no desenvolvimento da tecnologia da soldagem têm ocorrido pela associação de dois processos, formando uma nova categoria de processos de soldagem, denominados de “Processos Híbridos de Soldagem”. A associação é feita normalmente entre um processo de eletrodo consumível com um outro de eletrodo não consumível. Com isto, o novo processo híbrido resultante tem características muito mais versáteis. Além da possibilidade do aumento de produtividade, aumenta-se a flexibilidade de controle da geometria da solda. O presente trabalho atua nesta temática, enfocando a associação do processo PLASMA e do processo MIG/MAG, que formam o híbrido PLASMA-MIG – um processo relativamente novo, com pouca informação básica e tecnológica a seu respeito. O objetivo, de acordo com a filosofia de atuação do Laboratório de Soldagem da UFSC (LABSOLDA), é promover, além do estudo fenomenológico do processo e das inter-relações de suas variáveis, o desenvolvimento de um equipamento e colaborar para a consolidação do processo na indústria. Os estudos foram realizados em duas etapas. A primeira etapa do trabalho foi conduzida no Instituto de Pesquisa e Ensino da Soldagem de Munique (SLV-München). A segunda etapa da pesquisa foi realizada no Brasil, por intermédio da montagem de uma bancada PLASMA-MIG totalmente automatizada no LABSOLDA/UFSC. Assim, além dos desenvolvimentos intrínsecos para o bom funcionamento do processo, como o aprimoramento da pistola e metodologias para melhorar a abertura do arco plasma, o trabalho apresenta a aplicação em diferentes situações. Os resultados confirmam a boa performance do processo no controle da geometria da solda, utilizando-se diferentes combinações entre a potência do circuito MIG e a potência do circuito PLASMA: quanto maior a corrente MIG maior é a penetração e quanto maior a corrente Plasma maior é a largura do cordão. Em relação aos modos de transferência metálica, foi observado que a corrente plasma exerce pouca influência sobre o diâmetro de gota destacada e sobre a corrente de transição entre curto-circuito e transferência por vôo livre. Não foi encontrada instabilidade da transferência na zona de transição entre os citados modos, como ocorre no processo MIG/MAG simples. Instabilidades, como a extinção do arco Plasma, foram observadas na transferência por curto-circuito, principalmente quando são utilizados gases ativos em mistura com argônio. Foi desenvolvido, também, um comando sinérgico para a soldagem PLASMA-MIG com corrente pulsada, sendo constatado que a corrente plasma não influi na corrente de destacamento de gota no processo MIG. Soldagens de juntas sobrepostas e de topo, em alumínio e aço carbono foram realizadas com sucesso. Uniões de boa qualidade e com velocidade de soldagem de até 4 m/min foram realizadas em chapas de alumínio e aço carbono com 2 mm de espessura. Excelentes níveis de velocidade de soldagem também foram atingidos na brasagem de chapas galvanizadas de 1 mm de espessura, onde se observou também que o processo quase não afetou a camada de zinco nas periferias do cordão. Do todo é concluído que o processo possui um grande potencial de aplicação na indústria e que o equipamento desenvolvido se encontra já adequado para tal.

ABSTRACT

The hybrid Plasma-MIG Welding Process combines the power and stability of the Plasma arc with the good melting rate level of the MIG/MAG process within one special welding gun. The present work presents the results of experiments carried out by means of the Plasma-MIG process regarding melting rate, metal transfer modes and bead geometric characteristics in the welding of steel, aluminum and cast iron, as well as in the brazing of galvanized plates. The studies were carried through in two stages. The first stage of the work was lead at the Institute of Welding Research and Education, in Munich (SLV-München). The second stage of the research was carried out in Brazil, the activity being the assembly of a totally mechanized Plasma-MIG workbench at the LABSOLDA/UFSC. The results indicate that the process presents a considerably wide relationship between Arc Power and Wire Melting Rate, through the possibility of different energy distributions between the MIG and Plasma arcs. It was observed that, for one same melting rate, it is possible to obtain different weld bead geometric characteristics: the higher the MIG current, the higher the penetration depth, while the higher the Plasma current, the higher the width of the bead, with higher weldability. Regarding metal transfer modes, it was observed that the plasma current exerts little influence on drop diameter and on transition current. In contrast to the MIG/MAG process, the globular transfer mode in Plasma-MIG yields good stability, with relatively constant detachment frequency, good drops trajectory straightness and spatter free beads. The Spray transfer mode also yields good regularity and stability, as expected. Instabilities, as Plasma arc extinctions, were observed in short-circuiting transfer, mainly when active gases are used, as Argon / CO₂ mixtures. A synergic command was also developed for the Plasma-MIG welding with pulsed current. The welding of overlap and butt joints was carried out in aluminum and carbon steel. Unions with good quality and welding speeds up to 4 m/min were performed in plates of aluminum and carbon steel with 2 mm thickness. Excellent levels of welding speed were also reached in the brazing of galvanized plates, 1 mm thickness, whereas it was also observed that the process almost did not affect the zinc layer in the weld peripheries. For all these reasons, it was concluded that Plasma-MIG presents good potentiality in high speed welding and brazing process and good mechanical properties of cast irons welded joints.

1 INTRODUÇÃO

Um dos objetivos da pesquisa no campo da soldagem ao arco voltaico direciona-se ao desenvolvimento de processos que permitam maior independência entre a taxa de fusão de material de adição e a potência do arco. Neste contexto, os processos de soldagem a arco podem ser analisados em dois grandes grupos: os que utilizam eletrodo permanente, como é o caso do TIG e Plasma e os processos que utilizam eletrodos consumíveis – MIG/MAG, Eletrodo Revestido e Arco Submerso.

Os processos com eletrodo permanente permitem certa independência da taxa de fusão do material de adição em relação à potência do arco. A soldagem pode ser realizada até sem material de adição para determinados materiais e tipos de junta, ou com alimentação manual/automática de material em forma de varetas ou de arame, com velocidade que pode variar desde valores iguais a zero até um limite superior, determinado pela potência do arco. Esta propriedade permite ao processo de soldagem maior atuação na geometria da solda, caracterizada principalmente pela penetração, largura do cordão e ângulo de molhamento. Entretanto, estes processos têm a tendência de apresentar menor taxa de produção.

Os processos com eletrodos consumíveis apresentam uma maior produtividade em função de que a energia transferida à peça não ser somente oriunda da ação do arco voltaico, mas sim porque o material em transferência do eletrodo à peça conjuga também boa parte da energia transferida. Entretanto, a grande dependência entre a taxa de fusão e a potência do arco passa a ser, em determinadas situações, um inconveniente às propriedades da solda resultante. Como exemplos disto, podem-se citar a soldagem do alumínio e do cobre, a soldagem de peças de grande porte e a soldagem em elevadas velocidades.

Atualmente existem algumas alternativas que buscam agregar a capacidade de controle da geometria da solda, oferecida pelos processos de eletrodo permanente, com as altas taxas de produção dos processos com eletrodo consumível. Como exemplo, pode-se citar os processos TIG e Plasma com alimentação automática de arame pré-aquecido (Lambert, 1990; Sykes, 1995), que oferecem boas taxas de fusão, ou os processos híbridos, que utilizam duas fontes de calor, como é o caso do Laser-MIG (El Rayes, 2004) e do Laser-Plasma (Dolles, 2002).

Dentre os processos híbridos, surgiu a proposta da soldagem Plasma-MIG, que agrupa, em uma única pistola de soldagem, um arco plasma, gerado por um eletrodo permanente, a um arco MIG, gerado por um eletrodo consumível na forma de arame. Este processo apresenta bons níveis de taxa de fusão e velocidade de soldagem, bem como eficiente atuação na geometria da solda.

Apesar de ter sido estudado nas décadas de 70 e 80, e posteriormente aplicado em alguns casos particulares (Swart, 1981; Inversen, 1998), este processo não foi significativamente absorvido pela indústria. A tecnologia de automação/mecanização e de fontes de soldagem então disponível foi, provavelmente, uma das dificuldades que impediram a maior utilização do Plasma-MIG. O interesse pelo processo só ressurgiu na Europa, principalmente na Alemanha, no final da década de 90, impulsionado principalmente pelos seguintes fatores:

- A incessante busca por processos econômicos, produtivos e de alta qualidade;
- A difusão da utilização de robôs industriais de soldagem, que possibilitam operações em altas velocidades em peças de geometria relativamente complexa;
- A grande difusão das novas fontes eletrônicas utilizadas em soldagem, que permitiram um melhor controle na fusão e transferência de material, utilizando-se diferentes formas de onda de corrente.

Este último fator, em particular, contribuiu de forma decisiva nesta retomada do interesse pelo processo Plasma-MIG, pois as fontes chaveadas possibilitam a utilização de corrente pulsada, tanto no arco MIG quanto no arco Plasma, permitindo desta forma, também a soldagem e brasagem de chapas finas com alta qualidade e produtividade. Como o processo Plasma-MIG foi estudado principalmente durante as décadas de 70 e 80, muito pouco se sabe a respeito de sua potencialidade quando aliado às características das fontes eletrônicas de soldagem. Não é conhecida, por exemplo, a aplicabilidade de diferentes formas de onda de corrente e, por conseqüência, de um maior controle das formas de transferência metálica.

No presente trabalho, que foi realizado em um programa conjunto entre o Laboratório de Soldagem da UFSC (LABSOLDA), a Universidade Técnica de

Munique (TUM) e o Instituto “SLV-München - Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt”, é conduzido um estudo com o objetivo de identificar as potencialidades do processo Plasma-MIG quando aliado às novas tecnologias de controle das fontes de soldagem eletrônicas. O trabalho aborda desde questões básicas, como curvas de consumo de arame em função das correntes MIG e Plasma, até o desenvolvimento e utilização de um comando sinérgico com corrente pulsada para a soldagem e brasagem de aço e alumínio. Para estes desenvolvimentos, são utilizadas bancadas equipadas com sistemas mecanizados de deslocamento de pistola e sistemas de aquisição de dados, que permitem, por exemplo, a identificação de destacamento de gota através da interpretação de oscilogramas de tensão e corrente.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é a criação das condições para a utilização industrial do processo Plasma-MIG. Assim, além do conhecimento científico e tecnológico gerado, a meta é a obtenção de conhecimento fundamental a respeito de formas e controle da transferência metálica, causas de instabilidades no processo e capacitação para fabricação de um equipamento que atenda as necessidades da indústria atual.

Para que esta meta seja atingida é necessário, primeiramente, desenvolver conhecimentos a respeito da influência da interação das correntes plasma e MIG sobre a taxa de fusão de arame, destacamento e transferência do material de adição e geometria do cordão de solda.

1.2 Objetivos Específicos

Para que o objetivo geral do trabalho seja atingido, os seguintes objetivos específicos devem ser traçados:

- Construção de uma bancada de ensaios no LABSOLDA/UFSC;
- Levantamento da influência das correntes plasma e MIG sobre a taxa de fusão de material, para diferentes materiais, diâmetros de eletrodo e gases de proteção;

- Estudo da influência do balanço de corrente Plasma/MIG sobre as características geométricas do cordão de solda, como penetração e largura;
- Estudo da influência das correntes plasma e MIG sobre o modo de transferência metálica. Por meio deste estudo pretende-se conhecer melhor as formas de transferência metálica adequadas para a soldagem de chapas de pequena espessura.
- Desenvolvimento de um comando sinérgico para a soldagem Plasma-MIG com corrente pulsada, para viabilizar ensaios de soldagem com estabilidade e rapidez na seleção dos parâmetros;
- Teste de soldagem/brasagem para avaliar o desempenho dos procedimentos desenvolvidos.

1.3 Justificativas

O processo híbrido de soldagem Plasma-MIG oferece a possibilidade de uniões e revestimentos com elevadas velocidades de soldagem, isto é, elevada produtividade. Entretanto, ainda não existem conhecimentos científicos consolidados a respeito de algumas propriedades fundamentais do processo, como um estudo mais detalhado sobre a transferência metálica e utilização de corrente pulsada no Plasma-MIG.

Apesar de certo desenvolvimento e algumas aplicações práticas na década de 70 e início dos anos 80, o Plasma-MIG só voltou a figurar como processo de interesse na indústria e em centros de pesquisa a partir de meados da década de 90. Portanto, ainda não existem informações suficientes disponíveis a respeito da potencialidade do processo quando aliado às novas tecnologias de fontes de soldagem. Neste contexto, pode-se citar como exemplo a possibilidade de utilização de corrente pulsada nos arcos plasma e MIG, que somente foi relatada de forma superficial em um dos trabalhos encontrados (Matthes, 2001). No processo de soldagem MIG/MAG, a corrente pulsada tem apresentado aplicações na soldagem de chapas finas de alumínio, aço carbono ou aços inoxidáveis, ou na brasagem de chapas revestidas. No processo Plasma-MIG a influência das correntes plasma e MIG ainda não foi estudada e, conseqüentemente, a utilização de corrente pulsada não está adequadamente caracterizada.

A adaptação de modelos matemáticos para a soldagem com corrente pulsada é importante para a utilização prática do processo. Com estes modelos, o número de variáveis que deve ser programado é consideravelmente reduzido, facilitando a operação dos equipamentos de soldagem, justificando um estudo para viabilizar este modelamento.

Neste trabalho, a influência das correntes MIG e Plasma sobre as formas de transferência metálica é analisada, com o auxílio de oscilogramas de sinais de corrente e tensão de ambos os arcos voltaicos. Para isso, foram utilizadas três bancadas de ensaios (duas no instituto alemão e uma construída no LABSOLDA/UFSC para o presente trabalho). Estas bancadas são equipadas com fontes chaveadas de soldagem, que permitem controle de corrente ou de tensão nos arcos voltaicos, além de sistemas de aquisição de dados, que permitem a aquisição e registro dos sinais elétricos de tensão e corrente, para posterior análise de por oscilogramas ou com tratamento estatístico dos dados.

1.4 Estrutura da Tese

A tese foi estruturada em 9 capítulos. No capítulo 2 são apresentadas as informações coletadas da literatura técnico-científica a respeito do tema. No capítulo 3 é apresentada a fundamentação para a formulação de um comando sinérgico, baseado na experiência consolidada do LABSOLDA e de estudos realizados por Amin (1981 e 1983). O capítulo 4 apresenta as bancadas experimentais utilizadas durante o desenvolvimento da tese no SLV-München – Alemanha – enquanto que o capítulo 5 apresenta a bancada desenvolvida no LABSOLDA para os testes do processo Plasma-MIG no Brasil. No capítulo 6 são apresentados os experimentos realizados, resultados obtidos, além de discussões e proposições de modelos para pré-determinação de parâmetros de soldagem em função das correntes MIG e Plasma. No capítulo 7 são apresentados testes de soldagem e brasagem realizados com o processo Plasma-MIG, aplicando-se os modelos desenvolvidos no capítulo 6. O capítulo 8 trata das conclusões e sugestões para trabalhos futuros e no capítulo 9 as referências bibliográficas consultadas são listadas.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS E BIBLIOGRÁFICOS

2.1 Introdução

No processo de soldagem MIG/MAG a corrente elétrica que flui através do arame de adição, do arco voltaico e da peça de trabalho é necessariamente a mesma. Esta corrente possui, portanto, múltiplas funções. No arame-eletrodo ela é responsável pelo aquecimento causado pelo efeito joule, influenciando diretamente a taxa de fusão. Esta mesma corrente também gera forças eletromagnéticas, que desempenham um importante papel no tamanho e destacamento das gotas, bem como na velocidade com a qual estas são projetadas em direção à poça de fusão. A corrente é responsável pela manutenção do arco voltaico, e pela geração de calor nas regiões anódica e catódica, onde é gerada a maior parte do calor necessário para a fusão dos materiais (Essers, 1976).

Assim, no processo MIG/MAG e nos outros processos baseados em eletrodos consumíveis, a corrente de soldagem, a taxa de alimentação de metal de adição e o comprimento do eletrodo estão estreitamente interligados. Este fato traduz a forte dependência existente entre o aporte de energia e o aporte de material dos processos que trabalham com eletrodos consumíveis. Uma das principais conseqüências desta dependência é a dificuldade em se atuar na geometria do cordão de solda.

Em função destas considerações, algumas variantes de processos já consagrados têm sido desenvolvidas, onde a corrente que flui através do eletrodo consumível pode possuir diferente magnitude da corrente que é efetivamente transferida para a peça de soldagem. Uma destas variantes é o processo de soldagem mundialmente conhecido como Plasma-MIG ou Plasma-GMAW, onde uma parcela da corrente total do processo flui através do arame-eletrodo, e outra parcela flui através de um gás ionizado – um plasma que envolve o arame-eletrodo – responsável por parte do aquecimento do arame e formação da poça de fusão.

As primeiras propostas deste processo foram citadas por D. M. Yenni, em 1958 (Yenni, 1958), seguidas por Taver e Shorshov em 1971 e por Smars, em 1975, onde o arame-eletrodo era incidido perpendicularmente ao arco plasma. Em 1969

Essers e Liefkens apresentaram uma outra proposta para o processo, onde o arame-eletrodo é alimentado diretamente no centro do arco plasma, em direção à peça de trabalho (Essers, 1981). Este arranjo permite a construção de pistolas mais compactas e simétricas, com melhor praticidade de manutenção e, em função destas características, é atualmente o mais utilizado e difundido.

2.2 Princípios fundamentais do processo Plasma-MIG

No processo de soldagem MIG/MAG o arame-eletrodo, as gotas em transferência, o arco voltaico e a poça de fusão são protegidos da atmosfera por um gás, que envolve estes componentes e é constantemente alimentado à temperatura ambiente – figura 2.1.

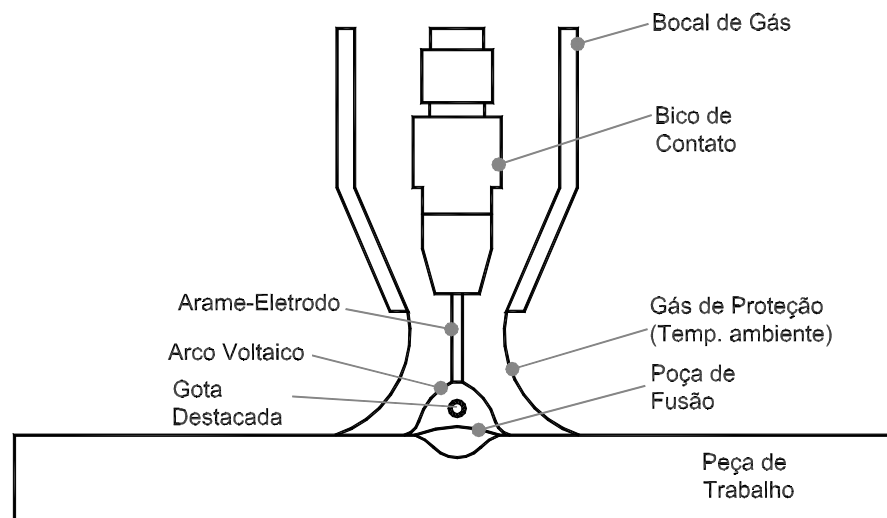


Figura 2.1 – Desenho Esquemático do processo de soldagem MIG/MAG

Já o princípio fundamental do processo de soldagem Plasma-MIG se constitui no fato de que o arame-eletrodo, o arco voltaico e as gotas são envolvidos por uma corrente de gás termicamente ionizado, também denominado de plasma (Essers, 1981) (figura 2.2).

A pistola de soldagem utilizada para o processo Plasma-MIG deve, portanto, ter a capacidade de gerar, simultaneamente, o arco voltaico entre o eletrodo permanente e a peça a ser soldada, denominado de “Arco Plasma”, e o arco voltaico entre o eletrodo consumível, na forma de arame, e a peça a ser

soldada, denominado pela literatura de “Arco MIG”¹. Entretanto, para um entendimento prévio das informações coletadas na literatura, as denominações “Arco MIG” e “Arco Plasma” são mantidas na redação deste capítulo.

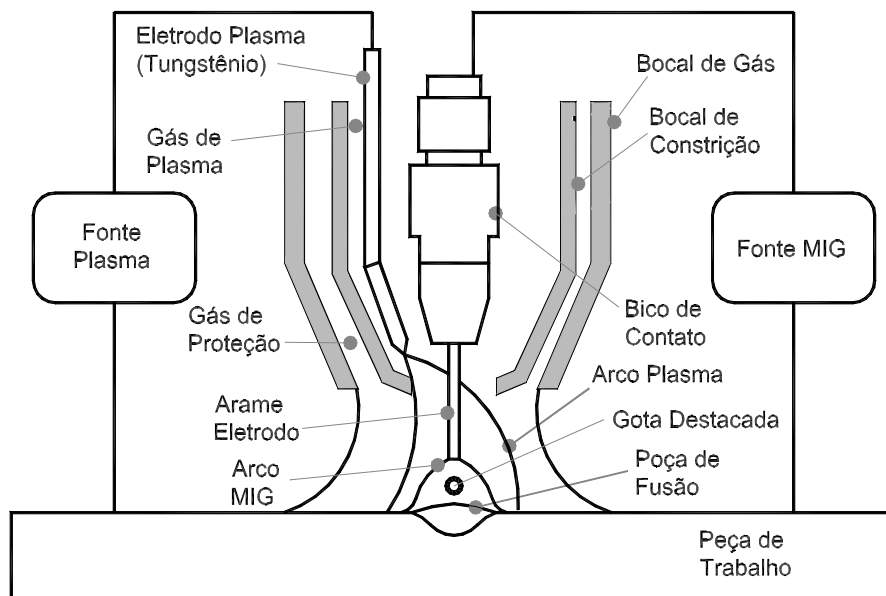


Figura 2.2 – Desenho esquemático do Processo de Soldagem Plasma-MIG (Essers, 1972)

No conceito original das pistolas Plasma-MIG utiliza-se um eletrodo de tungstênio, o mesmo das soldagens Plasma e TIG, para a geração do arco plasma. Nesse projeto o eletrodo é localizado ao lado do bico de contato MIG, como ilustrado na figura 2.2. Em função do alto desgaste do eletrodo de tungstênio em atmosferas oxidantes, o gás de plasma utilizado neste tipo de pistola deve ser de natureza inerte. Normalmente utiliza-se argônio (Ar), hélio (He) ou uma mistura destes, sendo que a utilização de misturas de Ar com H₂ também é citada na literatura. O gás de proteção pode ser de natureza ativa, já que este fluxo não entra em contato com o eletrodo de tungstênio. Misturas de argônio com CO₂ são tipicamente utilizadas como gás de proteção na soldagem de aços ao carbono. Na soldagem de não ferrosos, normalmente utiliza-se argônio puro e misturas com He.

Um outro projeto da pistola de soldagem foi desenvolvido e publicado por Essers (Essers, 1981), no qual o eletrodo pontiagudo de tungstênio é substituído por um eletrodo em forma de anel. Este eletrodo anular é confeccionado em cobre, e pode ser equipado com um inserto de grafite, ou de tungstênio – figura 2.3.

¹ No desenvolvimento do presente trabalho, em função de observações experimentais, propõe-se uma diferente denominação e localização destes arcos. Esta discussão é apresentada no item 6.6.

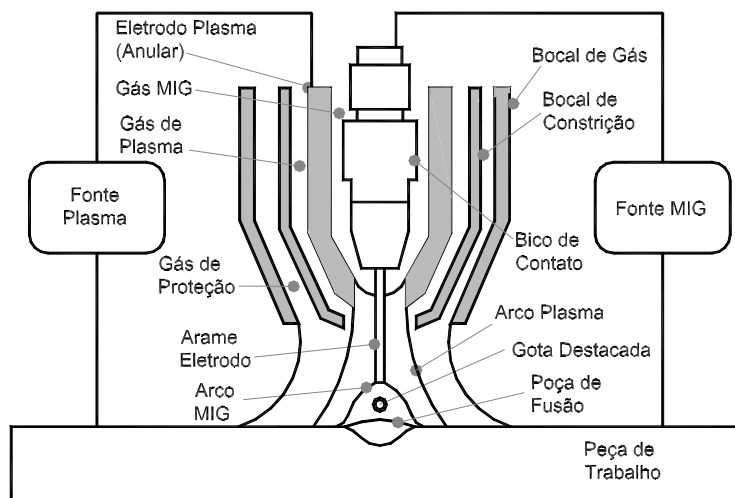


Figura 2.3 – Pistola de soldagem Plasma-MIG equipada com eletrodo anular de cobre (Essers, 1982)

As partes mais importantes da pistola de soldagem (bico de contato, eletrodo plasma e bocal constritor) devem ser constantemente arrefecidas com água. Como o cobre possui um alto coeficiente de condutividade térmica, o arrefecimento do eletrodo plasma garante a manutenção de sua temperatura em níveis baixos. Isto impede seu excessivo desgaste mesmo com a utilização de altas correntes em polaridade reversa – reconhecidamente melhor para a transferência metálica no processo MIG/MAG – e de gases ativos como CO_2 e suas misturas com Ar. Além destas vantagens, esta pistola equipada com eletrodo anular é mais compacta e simétrica e apresenta maior praticidade na manutenção. Por estas razões, no presente trabalho, apenas pistolas com eletrodos anulares foram utilizadas.

2.3 Fontes de soldagem para o processo Plasma-MIG

Vários arranjos de fontes de soldagem foram testados e até especialmente desenvolvidos para o processo Plasma-MIG, principalmente nas décadas de 60 e 70. Neste item é descrita de forma breve, uma pequena lista destes arranjos.

Como estruturados no trabalho de Kusch (Kusch, 2003), estes arranjos podem ser divididos em três grupos, como segue:

a) Utilização de apenas uma fonte de energia

A utilização de apenas uma fonte é vantajosa somente no sentido de economia de espaço e maior simplicidade no controle da energia. Para viabilizar a abertura e estabilidade dos dois arcos voltaicos, utilizando-se apenas uma fonte de energia, Liefkens et al (Liefkens, 1969), propõem a utilização de uma resistência elétrica entre os circuitos plasma e MIG, como mostra a Figura 2.4. A falta de independência no controle da forma de onda da corrente nos dois arcos é a principal desvantagem deste arranjo.

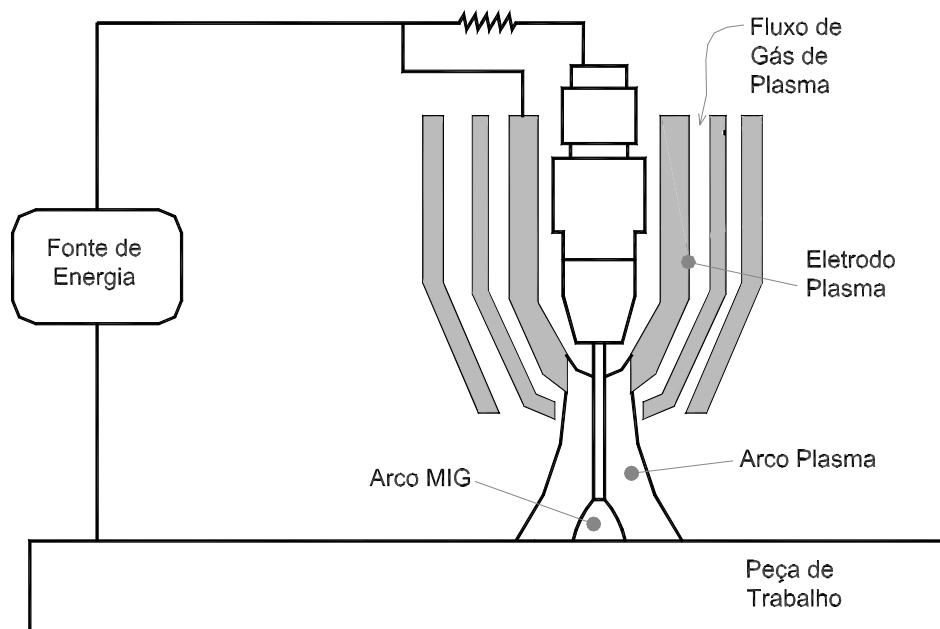


Figura 2.4 – Processo Plasma-MIG com apenas uma fonte de energia (Liefkens, 1969)

No trabalho de Kusch também são citados arranjos que utilizam um arame não energizado (Kusch, 2003). Neste caso, o arame é fundido somente pelo arco plasma, que pode ser transferido (aberto entre o eletrodo e a peça de trabalho), ou não transferido (aberto entre o eletrodo e o bocal constritor) (Essers, 1972). Entretanto, este arranjo não deveria ser denominado de Híbrido, pois não existem dois arcos para caracterizá-lo como tal.

b) Utilização de duas fontes de energia

Neste caso, o arco plasma e o arco MIG são alimentados por duas fontes de energia independentes. É o arranjo mais utilizado na soldagem Plasma-MIG e será abordado com maiores detalhes ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Em função de trabalhar com um eletrodo permanente, a fonte Plasma deve apresentar característica estática de corrente constante. Já a fonte MIG pode ser de característica estática de corrente ou de tensão constante.

A corrente pulsada pode ser utilizada tanto no arco MIG quanto no arco Plasma, e pode ser uma importante ferramenta na estabilização dos arcos e da transferência metálica, para determinados materiais de adição e tipos de junta.

c) Utilização de três fontes de energia

O arranjo que utiliza três fontes de energia foi experimentado basicamente com o objetivo de melhorar a potência, velocidade de soldagem ou taxa de fusão de material. A terceira fonte de soldagem pode ser utilizada, por exemplo, para alimentar um segundo arame-eletrodo (Jelmorini, 1979), no caso da necessidade de maiores taxas de deposição, ou para alimentar um segundo eletrodo permanente (Essers, 1979), quando se deseja apenas aumentar a capacidade de fundir o metal de base.

2.4 Acendimento do arco plasma

2.4.1 Acendimento do arco por alta frequência

O acendimento do arco plasma pode ser conduzido pela da técnica popularmente conhecida como “acendimento por alta frequência”. Nesta técnica são utilizados pulsos de alta tensão, normalmente entre 4 e 20 kV, com curta duração, que são capazes de ionizar o gás entre os eletrodos e permitir a passagem de corrente elétrica através desse. Esta técnica é bastante utilizada no acendimento do arco TIG, quando não é possível o acendimento por curto-circuito, e também na ignição do arco no processo PLASMA convencional. A fonte responsável pela geração destes pulsos é conhecida como “ignitor de alta frequência”.

A ignição do arco plasma utilizando-se alta frequência pode ser realizada de duas formas:

a) Acendimento direto do arco plasma

No acendimento direto do arco plasma, o ignitor de alta frequência é conectado ao eletrodo plasma e à peça de trabalho, conforme ilustra a figura 2.5.

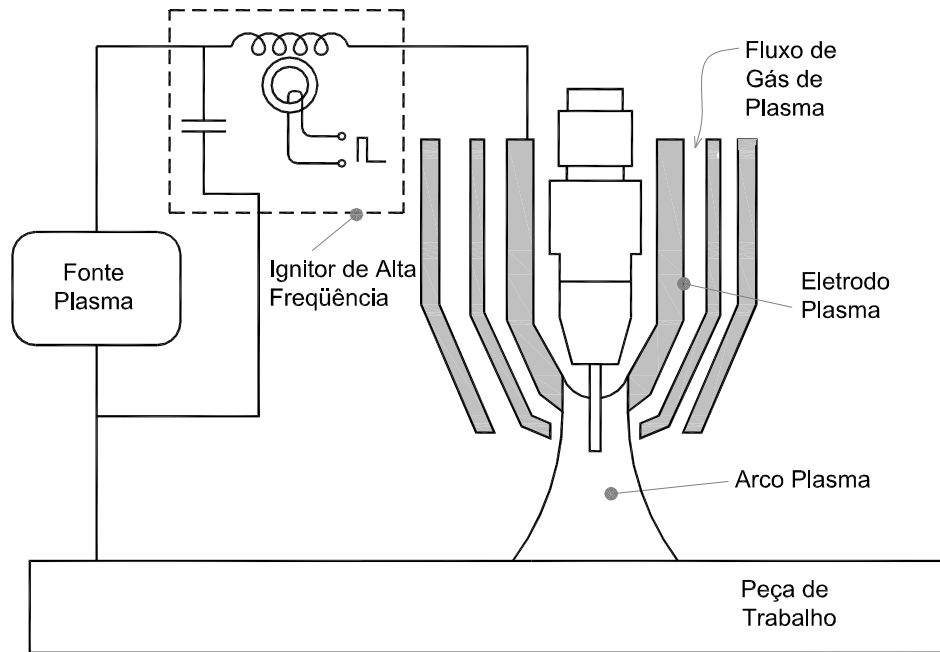


Figura 2.5 – Desenho esquemático da abertura do arco plasma por alta frequência

b) Acendimento do arco utilizando-se um arco piloto

O acendimento do arco plasma utilizando-se arco piloto é uma técnica amplamente utilizada na soldagem plasma convencional. Nesta forma de acendimento, o ignitor de alta frequência é conectado ao eletrodo plasma e ao bocal constritor, entre os quais ocorre o acendimento de um arco de baixa potência, mas capaz de ionizar o gás que envolve estas peças. O fluxo deste gás ionizado cria um caminho condutor elétrico entre o eletrodo plasma e a peça de trabalho, permitindo o acendimento do arco plasma principal – figura 2.6.

O acendimento por alta frequência gera, entretanto, um elevado nível de ruído eletromagnético, que pode causar interferências em sistemas eletrônicos que se encontram nas periferias das fontes de soldagem plasma-MIG. Este problema é agravado quando se utiliza um eletrodo plasma com formato circular. Nos eletrodos pontiagudos (caso do processo TIG), observa-se que a energia gerada pelos pulsos de alta tensão se concentra exatamente na extremidade do eletrodo, o que provoca maior aquecimento de sua ponta, facilitando a abertura do arco voltaico. Já em

eletrodos anulares, não existe esta região preferencial para a abertura do arco, o que exige um ignitor de alta frequência com potência mais elevada. Conseqüentemente a emissão de ruídos eletromagnéticos ao meio adjacente também é intensificada.

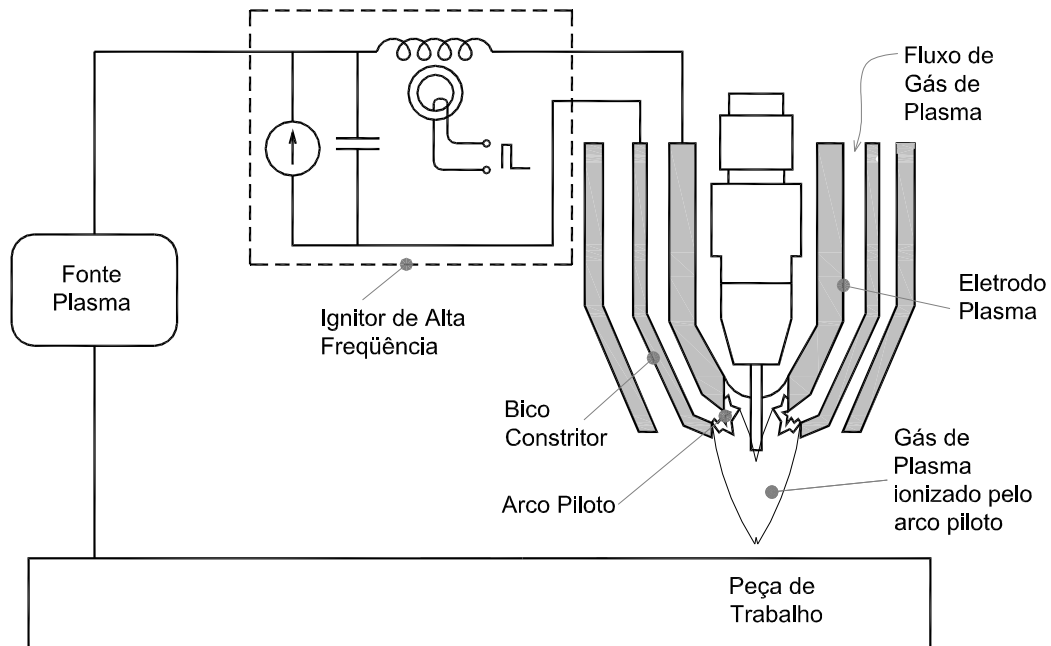


Figura 2.6 – Abertura do arco plasma utilizando-se arco piloto

2.4.2 Acendimento do arco plasma realizado com o auxílio do arco MIG.

Um procedimento alternativo de abertura, semelhante ao “Lift-Arc” utilizado no TIG, foi desenvolvido por Essers et al (Essers, 1981) e denominado de “Soft Start”. Nesta forma de acendimento do arco, o arame-eletrodo é utilizado para gerar um arco de baixa intensidade, através do qual ocorre a formação do arco plasma.

O “Soft Start” é explicado com o auxílio da figura 2.7.

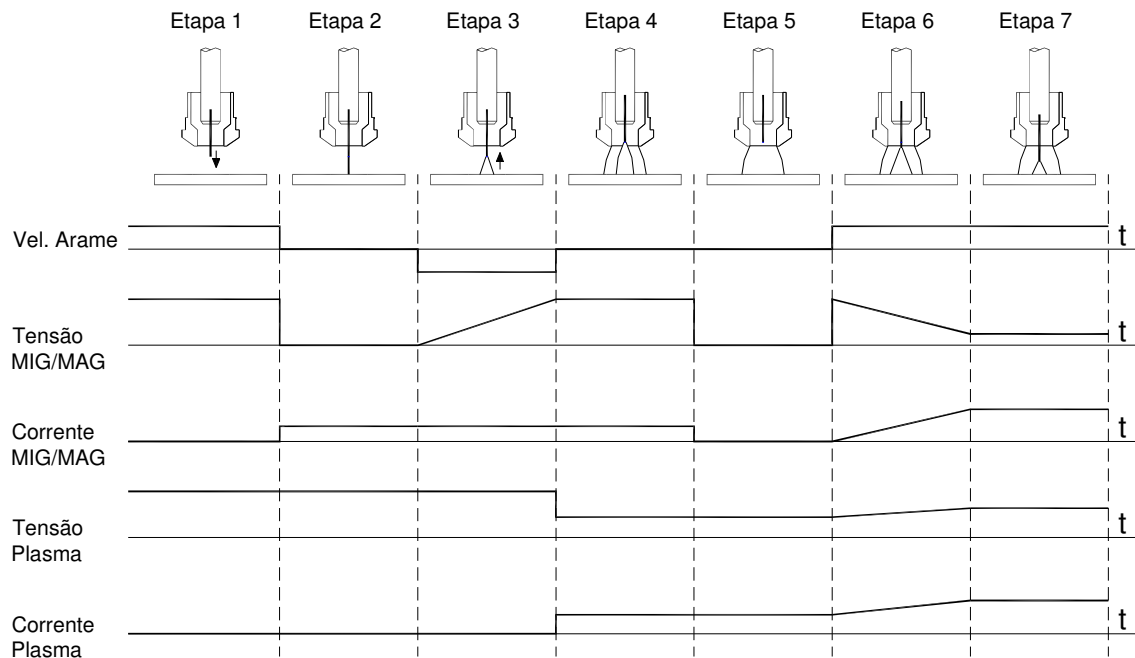


Figura 2.7 – Sequência de acendimento do arco plasma pelo método "Soft Start" (Draugelates, 2001)

Etapa 1 – No início do processo de acendimento do arco, as duas fontes apresentam tensão em vazio, e o arame avança em direção à peça de trabalho.

Etapa 2 – A etapa 2 inicia no momento em que o arame toca a peça de trabalho. A partir deste momento, o movimento do arame é interrompido e a fonte MIG/MAG passa a impor uma corrente de baixo valor (~ 20 A).

Etapa 3 – O arame retrocede em direção à pistola de soldagem, provocando a abertura de um arco com correntes da ordem de 20 A entre sua ponta e a peça de soldagem, sem fusão considerável do arame. O arame recua até que este arco piloto atinja as proximidades do eletrodo plasma, quando se inicia a etapa 4.

Etapa 4 – Como a fonte plasma já possui tensão em vazio, ocorre o acendimento imediato do arco plasma no momento em que a atmosfera ionizada pelo arco MIG de baixa potência entra em contato com o eletrodo plasma.

Etapa 5 – Após o acendimento do arco plasma, o arco MIG é extinto, com o objetivo de impedir transferência metálica e proporcionar um pré-aquecimento no início da junta somente com a energia do arco plasma.

Etapa 6 – O arame volta a se deslocar em direção à peça de trabalho. A fonte MIG apresenta novamente tensão em vazio. No momento em que a ponta do arame entra em contato com a atmosfera ionizada pelo arco plasma, ocorre reacendimento espontâneo do arco MIG, sem necessidade de curto-circuito.

Etapa 7 – Soldagem com parâmetros de regime.

Na figura 2.8 é apresentada uma seqüência de fotos do acendimento do arco plasma utilizando-se “Soft-start”, enquanto que a figura 2.9 apresenta o reacendimento do arco MIG/MAG e o destacamento de gotas (ISF/ISAF, 2002).

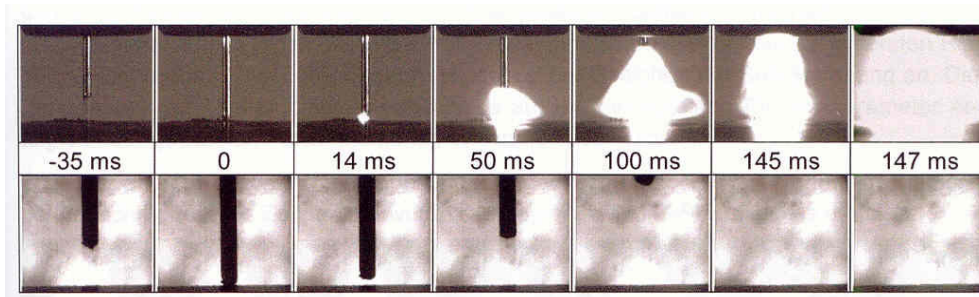


Figura 2.8 – Seqüência de fotos do acendimento do arco plasma (ISF/ISAF, 2002)

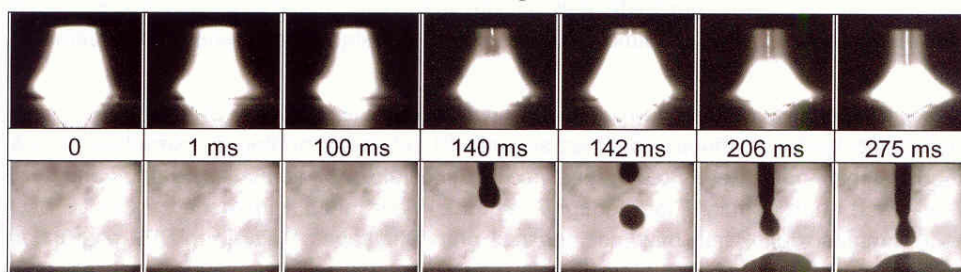


Figura 2.9 – Seqüência de fotos do reacendimento do arco MIG/MAG (ISF/ISAF, 2002)

Como pode ser observado na Figura 2.9, a reabertura do arco MIG pode ser conduzida sem a necessidade de curto-circuito entre o arame-eletrodo e a peça de trabalho, o que garante um início de cordão de solda livre de respingos.

O “Soft-start” funciona adequadamente com arames-eletrodo de alumínio. Entretanto, nos experimentos conduzidos para o presente trabalho, esta forma de abertura apresentou problemas na soldagem com arame-eletrodo de aço carbono. Estas observações serão melhor discutidas na seção 7.1.

2.5 Características físicas dos arcos voltaicos e da transferência metálica

2.5.1 Arame não conectado a uma fonte de energia

Inicialmente são apresentadas algumas considerações do processo quando o arame de adição não é conectado a uma fonte de energia. Esta configuração seria a mesma utilizada pelos processos Plasma e TIG com alimentação automática, não fosse a disposição do arame, que é adicionado no centro da coluna plasma.

Essers et al (Essers, 1972-2) afirmam que quando o arame de adição não é conectado a uma fonte de energia, ele assume o potencial da parte mais negativa do plasma em que está em contato. Em polaridade direta (eletrodo plasma negativo), isto ocorre logo que o arame entra em contato com o plasma (ponto A da figura 2.10). Isto faz com que a ponta do arame, ponto B, tenha uma diferença de potencial relativamente grande em relação ao plasma a sua volta. O restante do arame possui, também, um potencial negativo em relação ao plasma a sua volta, o que faz que íons positivos sejam neutralizados em sua superfície. Os elétrons necessários para esta neutralização são fornecidos ao arame pelo plasma no ponto mais negativo do contato. Se esta diferença de potencial atingir magnitude suficiente, uma parte da corrente pode passar através do arame, formando um pequeno arco entre sua ponta aquecida e a poça de fusão.

Três formas de transferência metálica podem ocorrer nesta condição, dependendo da velocidade do arame. Uma espécie de transferência por curto-circuito ocorre se a velocidade do arame é ajustada de forma que as gotas fundidas tocam a peça de fusão antes de serem destacadas. Esta transferência apresenta boa regularidade, e a frequência de transferência das gotas fica em torno de 3 Hz. Se a velocidade do arame é reduzida, as gotas passam a ser transferidas por vôo livre. Se o arame for alimentado em velocidades ainda menores, a fusão ocorre em uma região do arco, onde a energia do plasma é mais concentrada. Gotas finas são observadas, e a transferência passa a ser na forma de spray (Essers, 1972-2).

A taxa de deposição é dependente de vários fatores, não só da magnitude da corrente do arco plasma, mas também do diâmetro do arame, do diâmetro e comprimento do orifício constritor e do comprimento da coluna do arco plasma.

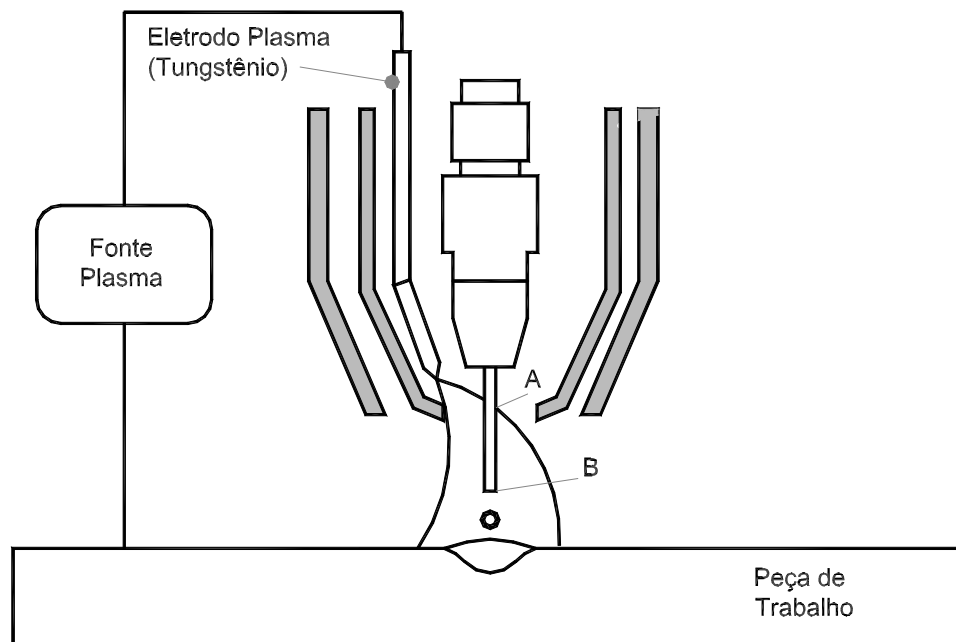


Figura 2.10 – Soldagem Plasma-MIG com arame não energizado

Em polaridade reversa, a parte mais negativa do arco em contato com o arame se localiza no ponto B da figura 2.10. Os elétrons utilizados para neutralizar os íons do plasma ao longo da superfície do arame são coletados neste ponto. Não há formação de arco entre o eletrodo de tungstênio e o arame, pois no ponto “A” a temperatura do arame, que é constantemente alimentado, é muito baixa para que ocorra uma emissão de elétrons nesta região (Essers, 1972-2).

Menor taxa de fusão do arame ocorre nesta condição, pois uma corrente de menor valor flui através do arame entre os pontos A e B e, portanto, o aquecimento por efeito joule é menor (Essers, 1972-2).

2.5.2 Arame conectado a uma fonte de energia

Quando os dois eletrodos são energizados em polaridade positiva (Figura 2.11), a corrente através do arame é nula quando a tensão na ponta do arame é inferior ou igual à do plasma no ponto B. Com o aumento da tensão, a corrente no arame flui por um arco próprio e aumenta proporcionalmente.

A taxa de fusão do arame-eletrodo aumenta significativamente, comparada à taxa de fusão quando o arame não é conectado a uma fonte de energia. O arame não é somente aquecido pelo plasma, mas também por efeito joule e pelo calor gerado na mancha anódica, em função da passagem da corrente MIG.

A constrição do arco plasma, normalmente provocada por sua passagem pelo orifício constritor, é ainda mais forte, devido às forças de Lorentz exercidas pela passagem de corrente através do arame no eixo do arco plasma (Essers, 1972-2).

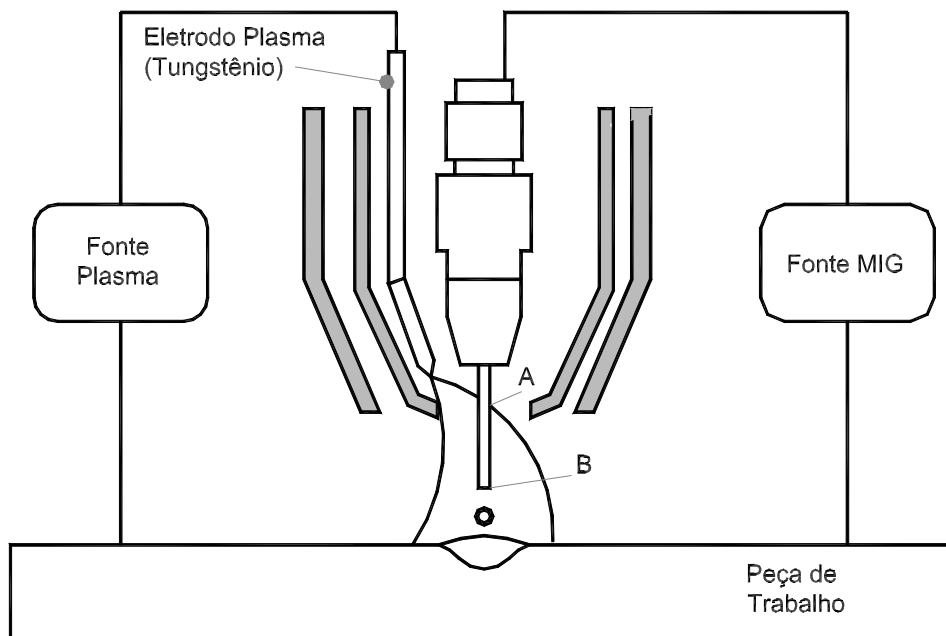


Figura 2.11 – Plasma-MIG com Polaridade Reversa

O gráfico da figura 2.12 apresenta as curvas características da tensão em função da corrente que flui através do arame eletrodo, para os processos MIG/MAG e Plasma-MIG, com corrente plasma de 90 A e arame-eletrodo de aço de 0,9 mm de diâmetro. Em baixas correntes, o processo MIG é instável, em função da formação e transferência de gotas de grande diâmetro. No processo Plasma-MIG esta forma de transferência não afeta a estabilidade da corrente que passa pelo arame (Jelmorini, 1975).

Segundo Essers (Essers, 1972-2) o mecanismo de transferência metálica nesta condição é dependente da corrente elétrica que passa através do arame-eletrodo, da tensão do arco MIG, do diâmetro do arame-eletrodo e da natureza e vazão do gás de proteção. Não foram encontradas informações a respeito da influência da corrente plasma sobre a forma de transferência metálica. Todos os trabalhos fazem comparações entre o processo MIG/MAG e o processo Plasma-MIG tomando sempre como referência a corrente que passa através do arame, e com corrente plasma fixa.

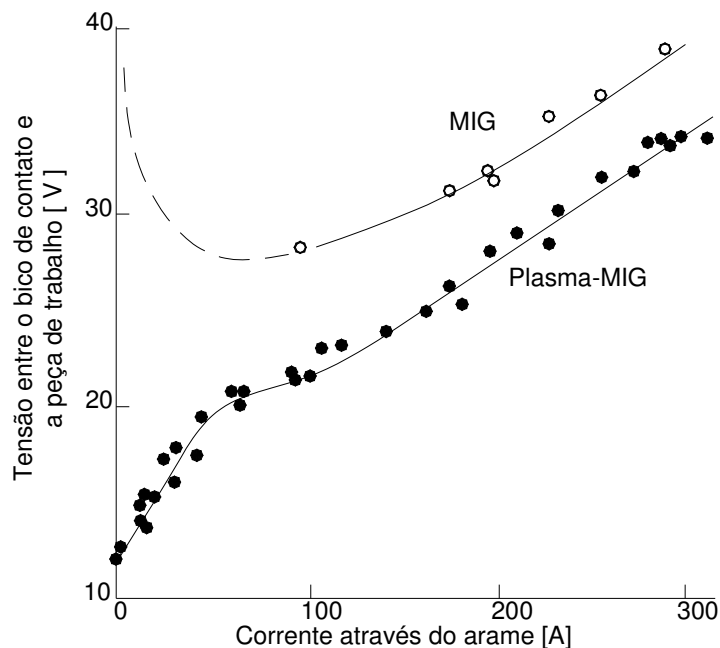


Figura 2.12 – Características Tensão x Corrente dos processos Plasma-MIG e MIG convencional, para arame de 0,9 mm, extensão do eletrodo de 25 mm e comprimento do arco de 7 mm, corrente plasma de 90 A (Jelmorini, 1975).

A transferência por curto circuito foi mencionada em apenas um dos trabalhos encontrados. Matthes e Kusch (Kusch, 2001) tentaram utilizar esta forma de transferência na soldagem de chapas finas de alumínio, entretanto, foram observadas instabilidades nos arcos e na transferência metálica. Em experimentos conduzidos para o presente trabalho, foi possível a soldagem de aço carbono com transferência estável por curto-circuito, utilizando-se apenas argônio como gás de proteção. Quando foram utilizadas misturas ativas, observaram-se fortes instabilidades. Resultados e considerações sobre a transferência por curto-circuito são abordados no item 7.2.

Duas formas de transferência por vôo livre foram observadas por Essers (Essers, 1972-2). Até certo nível de corrente e de velocidade do arame, é observada a transferência goticular axial (fig. 2.13). Esta forma de transferência é caracterizada pela formação e destacamento de gotas com boa regularidade. A partir de certa corrente de transição, a transferência metálica passa a ocorrer de forma rotacional (fig. 2.14).

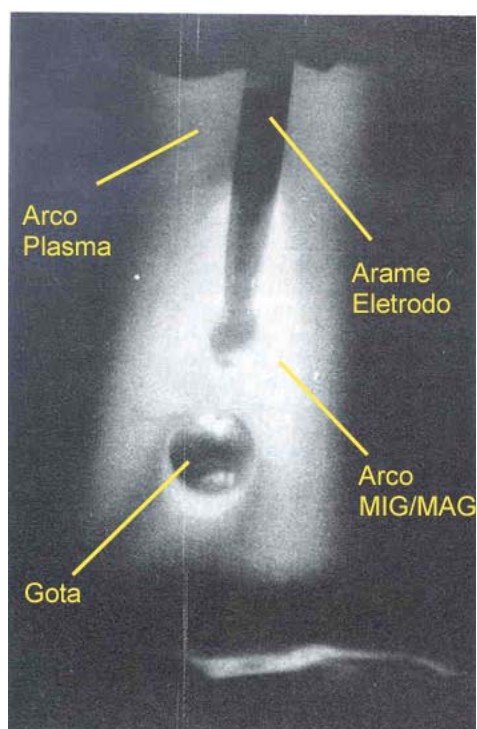


Figura 2.13 – Transferência goticular axial (Essers, 1972-2)



Figura 2.14 – Transferência rotacional no processo Plasma-MIG (Essers, 1972-2)

O gráfico da figura 2.15 “A” mostra a corrente de transição do modo goticular axial para rotacional em função do comprimento do eletrodo para o processo MIG/MAG. Observa-se que a área em que a transferência rotacional pode ser usada sem a formação excessiva de respingos é relativamente pequena. O gráfico da figura 2.15 “B” mostra a corrente de transição para o processo Plasma-MIG, e pode-se observar que, além da corrente de transição ser menor que a do processo MIG/MAG, a área de utilização sem a formação de respingos é maior. A

transferência rotacional tem aplicação quase que exclusiva em operações de revestimento (Essers, 1972-2).

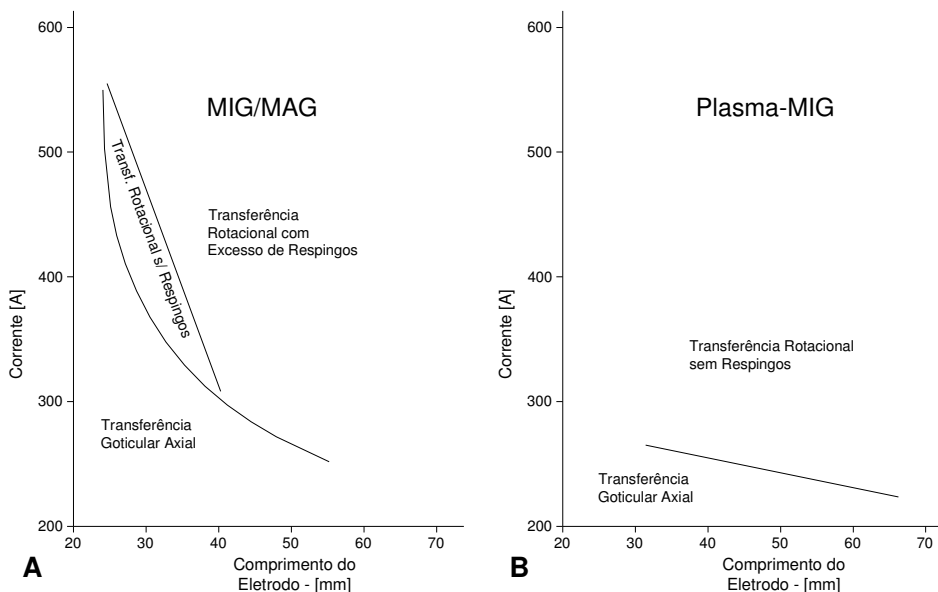


Figura 2.15 – Corrente de transição entre os modos de transferência goticular axial e rotacional para os processos MIG/MAG (A) e Plasma-MIG (B). Arame-eletrodo de Aço, 1,2 mm de diâmetro (Essers, 1972-2).

2.6 Transferência de Calor e Mecanismos de Penetração

No processo de soldagem Plasma-MIG podem ser consideradas três formas de transferência de calor para a peça de trabalho:

a) O fenômeno que gera calor na região catódica (superfície da peça de trabalho, com polaridade reversa), como emissão termo-iônica e a interação de íons positivos com a superfície da poça de fusão;

b) A energia transferida do arco para a peça, por condução, radiação e convecção;

c) O calor contido nas gotas de metal fundido, que foi gerado por efeito joule no arame-eletrodo e na região anódica.

No processo MIG/MAG, radiação, convecção e condução são responsáveis por 34% do calor total entregue a peça. O calor gerado na região catódica é responsável por 41%, enquanto que o calor transferido pelas gotas contribui com 25% (Essers, 1981-2). O calor transferido por radiação, convecção e condução e o calor gerado na região catódica influenciam a largura do cordão de solda e o ângulo de contato entre o cordão e a superfície da peça de trabalho. Mesmo que a soma destas formas de transferência de calor represente 75% do total

da energia transferida para a peça, elas não exercem forte influência sobre a penetração da solda. Já o calor contido nas gotas, e a energia cinética das gotas, contribuem decisivamente para o perfil de penetração (Essers, 1981-2).

Makarenko (2003) apresenta uma distribuição da densidade do fluxo de calor transferido para a peça de soldagem, “ q ”, expressa em W/cm^2 . Quando somente o arco plasma é aberto entre um eletrodo anular de 8 mm de diâmetro interno e 2 mm de parede, ele afirma que “ q ” alcança um valor máximo de $400 W/cm^2$ a uma distância “ r ” de 3,5 mm do eixo do eletrodo anular. Estes dados foram obtidos com corrente plasma de 180 A e tensão de arco de 44 V (curva 1 da figura 2.16). Na soldagem somente com arco MIG, o valor máximo de “ q ” é de aproximadamente $1000 W/cm^2$, exatamente no eixo central da pistola - $r=0$ (curva 2 da figura 2.16). Estes valores foram obtidos com corrente de 280 A e tensão de 23 V. A distribuição de potência pode ser ajustada, então, em função das correntes utilizadas no arco plasma e no arco MIG, resultando na curva 3 da figura 2.16.

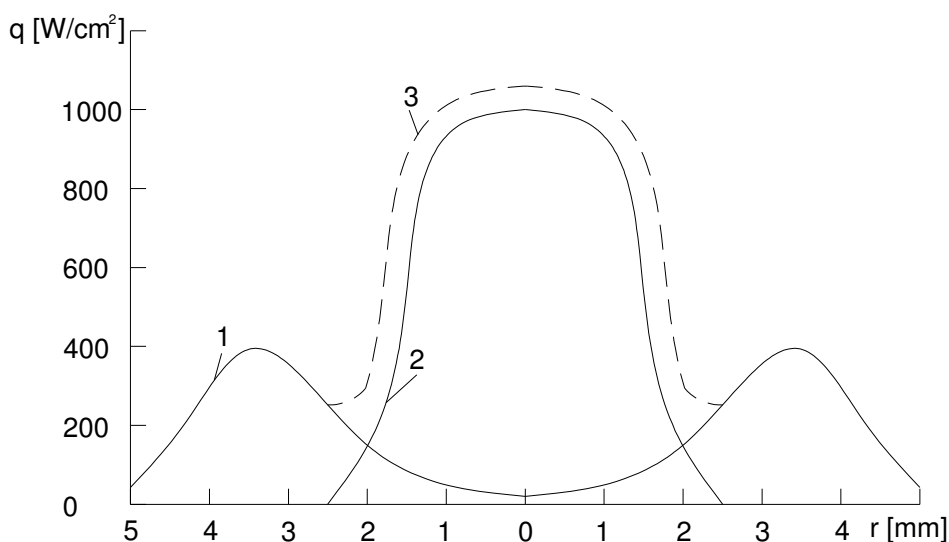


Figura 2.16 – Distribuição da densidade de potência transferida para a peça de soldagem para o processo Plasma-MIG (Makarenko, 2003).

Makarenko (Makarenko, 2003) ainda apresenta ciclos térmicos produzidos pelo arco híbrido Plasma-MIG, obtidos a partir da medição da temperatura com três termopares, dispostos perpendicularmente à direção de soldagem, a 2 mm da superfície do corpo de prova a ser soldado. O primeiro termopar “a” foi posicionado exatamente no centro da trajetória de soldagem, 2 mm abaixo da superfície do corpo de prova. Os termopares “d” e “e” foram dispostos a 4 e 8 mm, respectivamente, de

distância do termopar “a”, também a 2 mm da superfície do corpo de prova. Os ciclos térmicos obtidos por Makarenko são apresentados na figura 2.17. A 0,5 s do tempo inicial, o termopar “a” atinge uma temperatura de aproximadamente 800 °C. Em seguida a temperatura tende a estabilizar, mas sofre novamente um repentino aumento, atingindo aproximadamente 1200 °C após 1 segundo do tempo inicial. O autor afirma que o primeiro aumento de temperatura (800 °C) é provocado pelo arco Plasma e o segundo aumento (1000 °C) é provocado pelo arco MIG (Makarenko, 2003). Ainda na figura 2.17, as linhas tracejadas representam a fase de resfriamento em um ciclo térmico de processos de soldagem com uma única fonte de calor. O que causa surpresa nestes ciclos térmicos apresentados por Makarenko é o fato de que, após dois segundos no tempo inicial, a região mais afastada do centro do cordão de solda, onde se localiza o termopar “e”, apresenta maior temperatura que a região central. Um fato de difícil explicação, já que a maior potência do arco é transferida justamente pela região central do arco, conforme a figura 2.16.

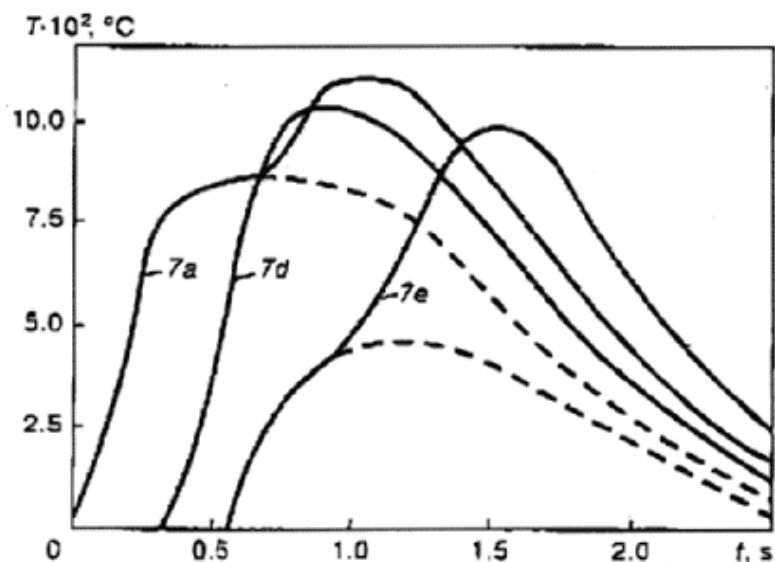


Figura 2.17 – Ciclos térmicos do processo Plasma-MIG (Makarenko, 2003).

2.7 Eficiência Térmica

A eficiência térmica, calculada pela parcela de calor absorvida pela peça dividida pela energia total gerada, é uma importante característica dos processos de soldagem. Para o processo Plasma-MIG, a eficiência térmica foi determinada como

sendo em torno de 65% (Essers, 1981-2). A figura 2.18 mostra uma comparação das eficiências térmicas entre vários processos de soldagem (Dupont, 1995) e (Ewans, 1998).

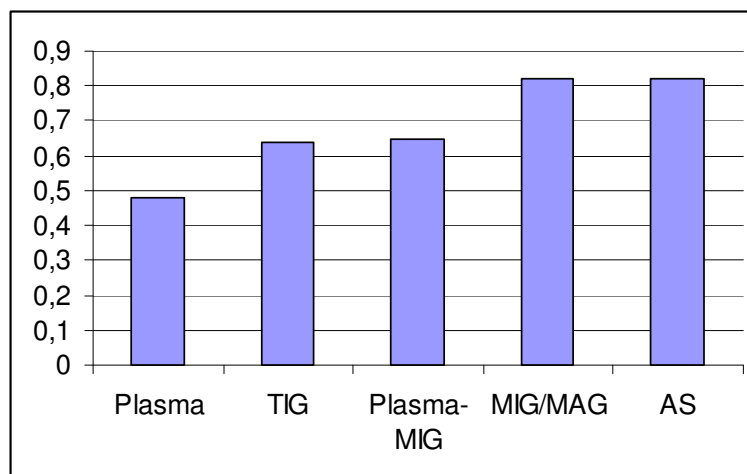


Figura 2.18 – Eficiência Térmica dos processos de soldagem ao arco voltaico – Plasma; TIG; Plasma-MIG; MIG/MAG e Arco Submerso.

2.8 Distribuição de temperatura e composição química dos arcos Plasma e MIG/MAG no processo híbrido Plasma-MIG

No processo Plasma-MIG, um arco interno com forte luminosidade e um plasma externo menos brilhante podem ser visualizados (figuras 2.13 e 2.14). Apesar da existência de dois arcos distintos não ser fisicamente evidente, Ton (Ton, 1975) identifica a fronteira entre os dois arcos em função uma forte mudança na luminosidade. A partir desta definição, utilizando espectroscopia óptica, Ton fez medições da temperatura e composição química dos arcos Plasma e MIG, com arame de Aço carbono de 1,2 mm de diâmetro, corrente plasma de 100 A e corrente MIG de 170 A, argônio como gás de plasma e Ar + 20% de CO₂ como gás de proteção.

Nestas condições, o arco plasma apresentou somente linhas espectrais de argônio. Já o arco MIG apresentou uma grande quantidade de argônio (97,6%) e pequenas quantidades de metal na forma de vapor (1,7% Fe, 0,5% Mn, 0,2% Cu e 0,02% Ca). Com exceção do argônio, os outros elementos contidos no arco MIG são provenientes de evaporação das gotas em transferência e do arame (Ton, 1975).

Nesse trabalho, foi medida também a densidade de corrente elétrica dos dois arcos. Segundo Ton, a maior parte da corrente total do processo flui através do arco Plasma, e apenas uma pequena parcela da corrente flui através do arco MIG (dos 170 A que fluem através do arame, somente 5 A fluem pelo centro dos dois arcos). A maior luminosidade no centro dos dois arcos é explicada pela existência dos vapores metálicos no arco MIG.

A medição da distribuição de temperatura confirma este fato. Ton observou que o arco interno apresenta uma temperatura da ordem de 6.800 K, enquanto que o arco externo apresenta uma temperatura em torno de 13.200 K (Ton, 1975).

2.9 Tamanho e Temperatura das Gotas

As gotas formadas no processo Plasma-MIG atingem menor temperatura durante a transferência do que as formadas no processo MIG/MAG, segundo van den Heuvel (van den Heuvel, 1978) – figura 2.19.

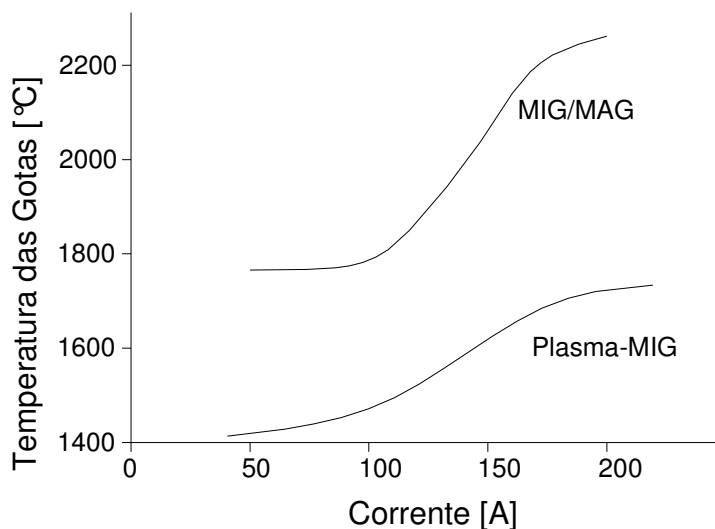


Figura 2.19 – Temperatura das Gotas em função da corrente através do arame-eletrodo para os processos Plasma-MIG e MIG/MAG. Corrente Plasma = 100 A. Arame-eletrodo: AlSi5, 1,6 mm de diâmetro (van der Heuvel, 1978).

Van den Heuvel et al também apresentam neste artigo uma comparação entre os processos Plasma-MIG e MIG/MAG do tamanho e frequência das gotas destacadas em função da corrente no arame-eletrodo (fig. 2.20).

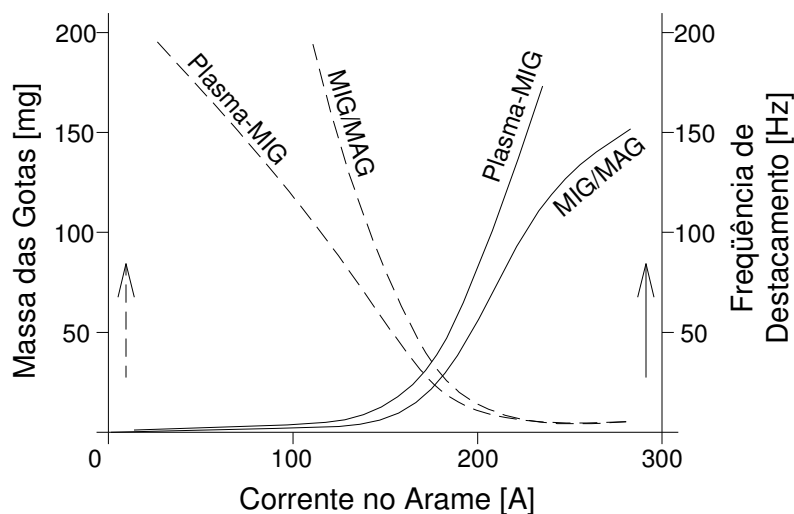


Figura 2.20 – Frequência de Destacamento e Massa das Gotas em função da Corrente através do arame para os processos Plasma-MIG e MIG/MAG em atmosfera de CO₂. Arame-Eletrodo: Aço Carbono, diâmetro = 1,2 mm. Corrente Plasma = 100 A (van der Heuvel, 1978).

Nos ensaios realizados para o presente trabalho, não foi observada influência significativa da corrente plasma sobre o diâmetro das gotas destacadas. Estes resultados são apresentados na seção 7.7.

2.10 Forças envolvidas no destacamento e influência da vazão de gás sobre o tamanho das gotas

As forças envolvidas no destacamento de gotas podem ser classificadas em quatro tipos (Waszink, 1983):

F_G – Força gravitacional;

F_A – Força de arraste, causada pelo fluxo de gás ionizado;

F_{em} – Força eletromagnética causada pela corrente que passa através do arame;

F_γ – Força causada pela tensão superficial.

Quando a soldagem é realizada na posição plana, o destacamento ocorre quando, no mínimo a soma das forças da gravidade, de arraste e eletromagnética vencem a força causada pela tensão superficial existente entre a gota fundida e a ponta do arame-eletrodo – Eq. 2.1.

$$F_{\gamma} = F_G + F_A + F_{em}$$

Equação 2.1

A força F_{γ} é proporcional à tensão superficial do metal fundido e do raio do arame, enquanto que a força de arraste F_a é diretamente proporcional à velocidade do gás ionizado. Já a força eletromagnética F_{em} é proporcional ao quadrado da corrente que passa através do arame-eletrodo (Graat, 1979).

Analisando-se o artigo apresentado por Graat e Waszink, conclui-se que o tamanho das gotas, e conseqüentemente o período de destacamento são inversamente proporcionais ao quadrado da velocidade do plasma que flui em torno das gotas (fig. 2.21). Esta informação é de relevante importância para o processo Plasma-MIG, pois a velocidade do gás pode ser alterada com mudanças no diâmetro do bocal constritor, e não só a partir da vazão do gás.

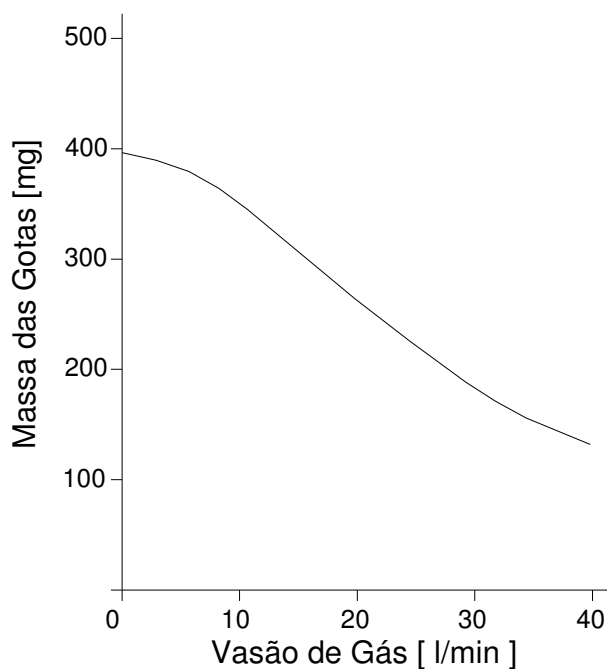


Figura 2.21 – Massa das Gotas em função da Vazão de Gás para o processo Plasma-MIG, sem corrente através do arame. Arame de Aço carbono, 1,6 mm de diâmetro e corrente Plasma de 100 A – Polaridade Reversa (Graat, 1979).

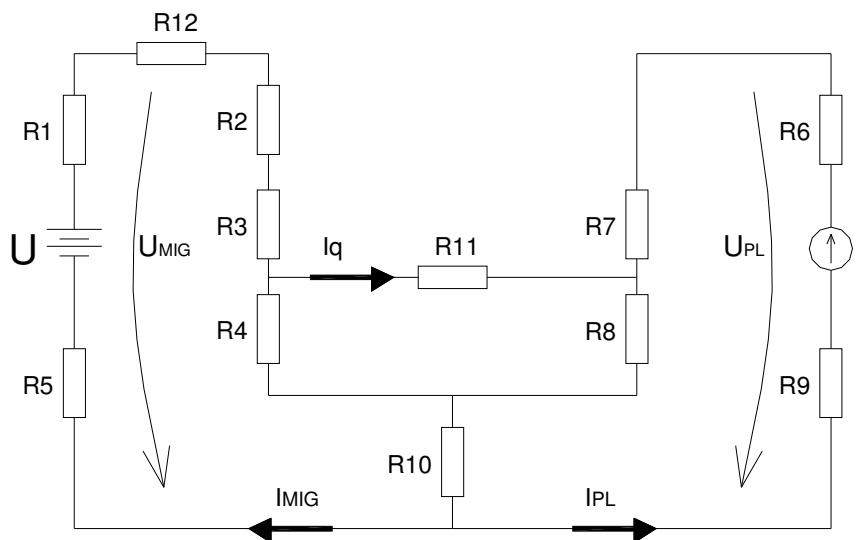
2.11 Modelo Elétrico para o processo Plasma-MIG

A estabilidade do processo Plasma-MIG, que segundo os autores estudados é formado por dois arcos distintos, é um ponto complexo a ser estudado. A coexistência de dois arcos voltaicos de diferentes naturezas, do arame-eletrodo e

do fluxo de gases ionizados constitui-se em um complexo sistema, em que fenômenos elétricos e físicos dificultam um melhor entendimento sobre a estabilidade do processo.

Um dos fatores que influenciam a estabilidade do processo é o fluxo de correntes transversais entre a parte MIG/MAG e a parte Plasma. Estas correntes transversais podem ocorrer de um arco para outro, ou mesmo do eletrodo plasma para o bico de contato ou arame-eletrodo.

Na figura 2.22 é apresentado um modelo elétrico simplificado para o processo Plasma-MIG, proposto por Matthes e Kohler (Matthes, 2002), com o qual as correntes transversais podem ser estimadas. Neste modelo, a fonte MIG é de tensão constante, enquanto que a fonte plasma de corrente constante. Os arcos MIG e Plasma são representados pelos resistores R3 e R4; R7 e R8, respectivamente. O resistor R11 representa a impedância para a passagem de correntes transversais do centro da coluna de um arco para o outro.



R1 – Resist. interna da fonte MIG/MAG
 R2 – Resist. do arame-eletrodo (Stick-out)
 R3 – Resist. da parte superior do arco MIG/MAG
 R4 – Resist. da parte inferior do arco MIG/MAG
 R5 – Resist. do cabo terra MIG
 R7 – Resist. da parte superior do arco Plasma

R8 – Resist. da parte inferior do arco Plasma
 R9 – Resist. do cabo terra Plasma
 R10 – Resist. da peça de trabalho
 R11 – Resist. de compensação entre os arcos
 R12 – Resist. de contato entre o arame e o bico de contato.

Figura 2.22 – Modelo Elétrico do processo de soldagem Plasma-MIG (Matthes, 2002).

Em ensaios realizados no presente trabalho, no SLV-München, na soldagem de aço carbono com mistura de Ar + 18% CO₂, observou-se que, muitas vezes ocorre o acendimento de um arco entre o eletrodo plasma e o bico de contato MIG, sendo que a corrente do arco plasma passa a fluir através do arame. Esta instabilidade gera irregularidades na geometria do cordão e destruição de peças internas da pistola de soldagem.

Gohr Jr. desenvolveu um outro modelo elétrico para simular o arco voltaico MIG/MAG, onde considera que o arco, além de ser uma carga resistiva, apresenta características de uma força contra eletromotriz (figura 2.23). Com este modelo, Gohr Jr. obteve oscilogramas simulados muito próximos aos medidos em arcos voltaicos reais, utilizando-se transferência por curto circuito (Gohr Jr. 2002).

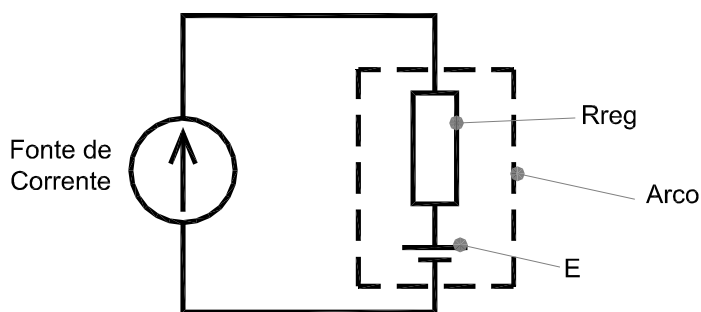


Fig. 2.23 – Modelo elétrico para o arco voltaico MIG/MAG (Gohr Jr, 2002).

Considerando-se estes resultados, decidiu-se realizar um modelo elétrico para o processo Plasma-MIG, baseado no modelo concebido por Gohr Jr. Este modelo é apresentado na seção 7.5.

3 A CORRENTE PULSADA E SUA UTILIZAÇÃO NO PROCESSO PLASMA-MIG

3.1 Possíveis melhorias viabilizadas pela corrente pulsada

Um dos principais avanços viabilizados pela utilização de fontes eletrônicas na soldagem foi a possibilidade de obtenção de variadas formas de onda de corrente. Principalmente as fontes eletrônicas transistorizadas permitem uma eficiente atuação na forma de onda da corrente elétrica. Este advento trouxe novas alternativas, principalmente para os processos TIG, Plasma e MIG/MAG.

A pulsação de corrente pode ser definida como a variação da corrente entre dois ou mais patamares, de forma repetitiva de acordo com uma determinada frequência. A corrente pulsada com pulsos retangulares é a forma mais utilizada e difundida atualmente, sendo definida por 4 variáveis básicas (Figura 3.1):

- $t_p \rightarrow$ tempo de pulso
- $t_b \rightarrow$ tempo de base
- $I_p \rightarrow$ corrente de pulso
- $I_b \rightarrow$ corrente de base

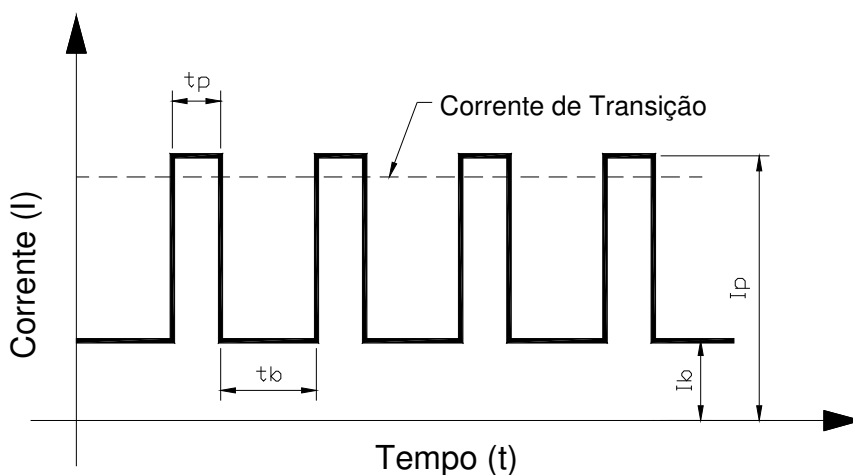


Figura 3.1 – Corrente pulsada de onda retangular

Nos processos que utilizam eletrodos permanentes, como o TIG e o Plasma, os benefícios da pulsação são dependentes da faixa de frequência utilizada. Frequências baixas, da ordem de 1 a 5 Hz, oferecem possibilidades como um melhor controle na geometria da solda, mesmo em operações manuais e fora da posição plana, e atuação metalúrgica na formação e crescimento de grãos da zona

fundida. Já frequências elevadas, superiores a 1 kHz, podem melhorar a "rigidez" e concentração de energia do arco voltaico, permitindo, por exemplo, a soldagem plasma de chapas extremamente finas com correntes reduzidas (Street, 1990).

No processo MIG/MAG, a utilização de corrente pulsada tem por objetivo a modificação do modo de transferência metálica de sua forma natural, quando esta ocorre por meio de curtos-circuitos ou na forma globular. Com esta modificação, altera-se também a relação Potência x Taxa de Fusão. Em função do alto número de variáveis sua interação mútua, algumas teorias foram desenvolvidas para definir correlações, reduzindo o número de parâmetros de entrada. Este conjunto de correlações pode ser denominado de "comando sinérgico".

Este capítulo se concentra, principalmente, em apresentar um estudo da corrente pulsada na soldagem MIG/MAG, visando sua utilização no processo Plasma-MIG.

3.2 A corrente pulsada no processo MIG/MAG

Antes de abordar o assunto "corrente pulsada" propriamente dito, se faz necessário um entendimento prévio sobre as diferentes formas de transferência metálica do processo MIG/MAG, e sobre o papel que a corrente elétrica desempenha neste fenômeno.

Quatro formas de transferência metálica no processo MIG/MAG podem ser citadas: transferência por curto-circuito, transferência globular, transferência goticular axial ou "spray" e transferência rotacional. Esta última forma de transferência não será aqui abordada, em função de sua pouca utilização prática.

A forma da transferência metálica no processo MIG/MAG é dependente da corrente, do diâmetro e composição do arame-eletrodo, do gás de proteção e da extensão e polaridade do eletrodo (Rhee, 1992). Em baixos níveis de corrente, quando se utiliza uma fonte de tensão constante, a transferência ocorre por curto circuito, onde a ponta fundida do arame toca a poça de fusão e é transferida devido à atuação da tensão superficial e da força eletromagnética causada pelo pico de corrente. A figura 3.2 mostra um oscilograma esquemático da corrente na transferência por curto circuito, que é dividido em 5 etapas:

- 1- O arame eletrodo se aproxima da peça a ser soldada com a corrente e a tensão com valores estáveis;
- 2- O arame eletrodo encosta na peça, a tensão cai rapidamente e a corrente começa a crescer. A taxa de aumento da corrente é dependente da indutância do circuito de soldagem.
- 3- O arame eletrodo está em contato com a peça e está transferindo o material fundido. Neste instante, duas forças atuam para promover a transferência metálica: a força causada pela tensão superficial e a força eletromagnética (efeito pinch) causada pela corrente que passa através do arame-eletrodo;
- 4- O aumento da corrente causa aumento na força eletromagnética, promovendo estriccionamento do material fundido, rompendo a ponte metálica existente entre a ponta do arame e a poça fundida. A taxa de subida da corrente deve ser suficientemente alta para promover, em tempo hábil, o aquecimento do eletrodo e da gota fundida, bem como promover o “efeito pinch”. Entretanto, a taxa deve ser suficientemente baixa para minimizar a formação de respingos, causada pelo destacamento muito rápido de metal fundido. Esta taxa de subida da corrente é ajustada pelo efeito indutivo das fontes de soldagem (AWS, 1991).
- 5- Após a separação, o arco voltaico reacende-se. A corrente e a tensão diminuem até atingirem os valores iniciais.

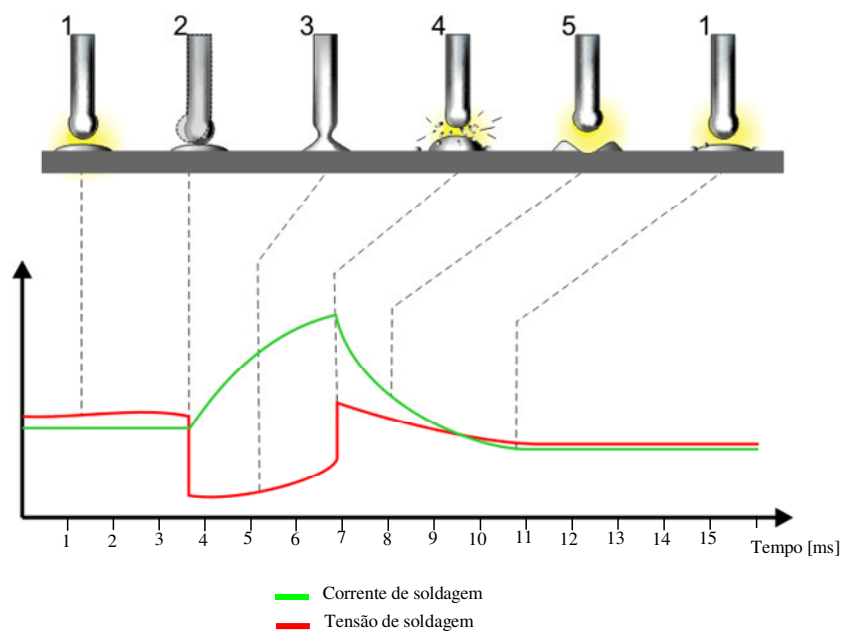


Figura 3.2 – Esquema da transferência por curto-circuito no processo MIG/MAG (Gonçalves e Silva, 2005)

Esta forma de transferência oferece boas características para a soldagem de chapas finas, em todas as posições de soldagem. Entretanto, para certos materiais como alumínio, aços inoxidáveis e determinados arames tubulares, esta forma de transferência provoca a formação excessiva de respingos e poros e pode até se tornar instável.

A transferência globular ocorre em baixas densidades de corrente (porém ainda mais elevadas que na transferência por curto circuito) e é predominantemente promovida pela aceleração da gravidade e pela tensão superficial, além de uma pequena influência da força de arraste do gás. As gotas possuem normalmente diâmetros bem superiores ao do eletrodo e a frequência de transferência é relativamente pequena.

Como a densidade de corrente que flui através do eletrodo é baixa, a força causada pelo “efeito pinch” é menor que a força causada pela tensão superficial na interface entre o metal líquido e eletrodo sólido, o que dificulta o destacamento de material fundido. Além disto, a área passagem de corrente através da região anódica é menor que a área transversal da gota fundida, o que provoca a estrição das linhas de corrente (fig. 3.3) e surgimento de uma força resultante na direção do eletrodo sólido. Quando se utiliza gás de proteção rico em CO_2 ou He, observa-se que esta força de repulsão é ainda mais intensa. A área de contato entre o arco e o metal fundido é ainda menor, em função do maior potencial de ionização no caso do He, e da maior condutividade térmica no caso do CO_2 , quando comparado ao argônio. Esta redução de área de contato promove uma força resultante mais intensa, causando a formação de respingos e instabilidades na transferência metálica, no processo MIG/MAG (figura 3.4).

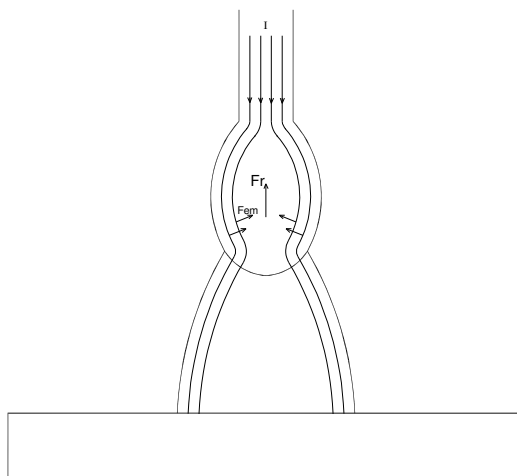


Figura 3.3 – Forças eletromagnéticas resultando em uma força contrária ao destacamento, em transferência globular.

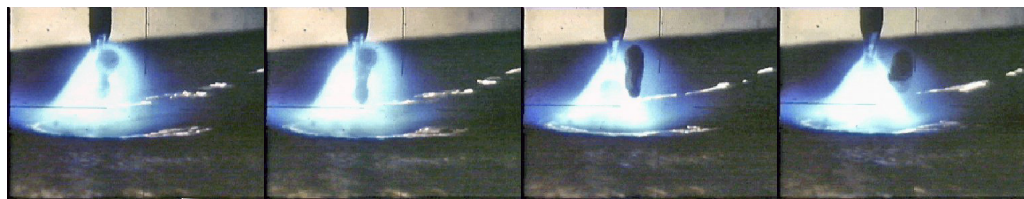


Figura 3.4 – Seqüência de imagens mostrando a repulsão de uma gota de metal fundido em transferência globular (AGA Welding Training Package)

Utilizando-se misturas gasosas ricas em argônio, é possível produzir um modo de transferência livre de respingos e com excelente estabilidade, denominado de goticular axial (denominação utilizada pelo LABSOLDA) ou “spray”. Para que esta transferência ocorra, é necessário que a corrente esteja acima de um determinado nível, denominado de “corrente de transição”. Abaixo da corrente de transição, ocorre a transferência globular, anteriormente descrita. Acima da corrente de transição, ocorre a formação de uma seqüência contínua de pequenas gotas, que são destacadas axialmente do eletrodo (AWS, 1991 e Quites, 1979). Nestas condições, o arco voltaico envolve a gota metálica, fazendo com que as linhas de corrente não sofram alteração de direção ao saírem do metal fundido, o que cria uma força resultante em direção à poça de fusão. Segundo Waszink (Waszink, 1982), a transição de transferência globular para spray ocorre quando o somatório das forças eletromagnéticas com a força causada pela geração de líquido a partir do eletrodo sólido ultrapassa a força de sustentação provocada pela tensão superficial.

A transição do modo de transferência globular para goticular axial é caracterizada por um repentino aumento na freqüência de destacamento e repentina redução no volume das gotas. Neste ponto é definida a corrente de transição (Lesnewich, 1958) (figura 3.5).

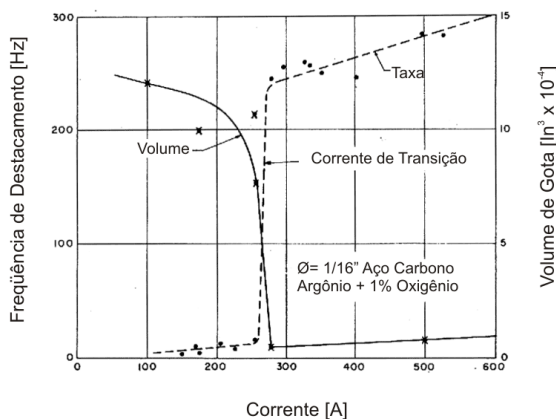


Figura 3.5 – Definição da corrente de transição no processo MIG/MAG (Lesnewich, 1958)

Além do diâmetro e composição química do eletrodo, a corrente de transição é dependente do tipo de gás de proteção e do comprimento do eletrodo, como ilustrado nas figuras 3.6 e 3.7 (Rhee, 1992).

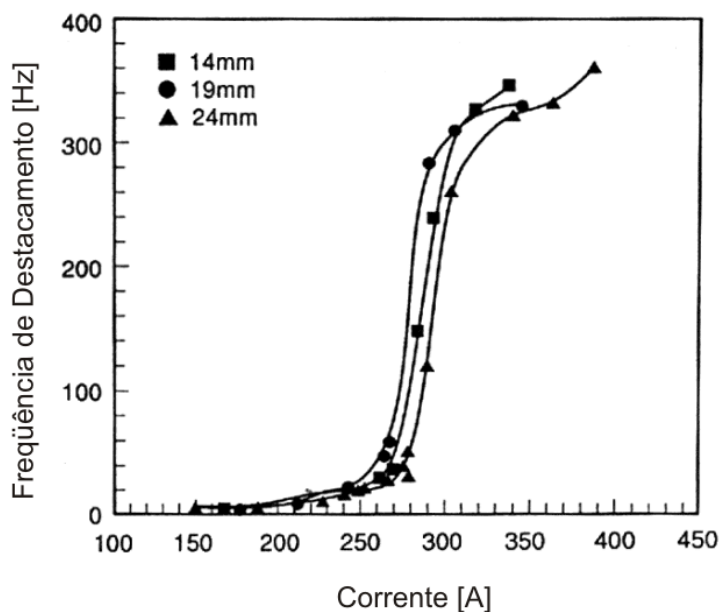


Figura 3.6 – Variação da Corrente de Transição em função do comprimento do eletrodo. Arame de aço carbono, 1,6 mm de diâmetro (Rhee, 1992)

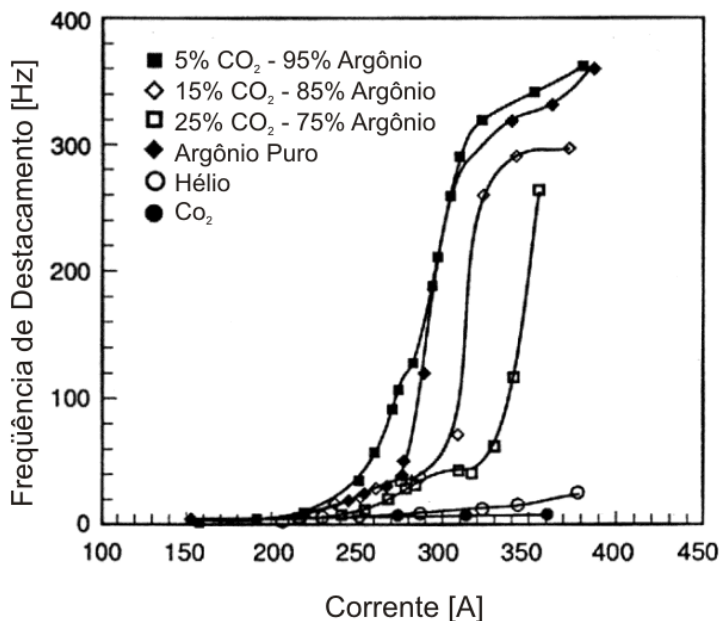


Figura 3.7 – Variação da Corrente de Transição em função do gás de proteção. Arame de aço carbono, 1,6 mm de diâmetro (Rhee, 1992)

A soldagem com correntes acima da transição, com transferência goticular axial, ou “spray”, é caracterizada por boa estabilidade e reduzida formação de respingos, mesmo na soldagem de alumínio, aço inoxidável e alguns eletrodos tubulares. Entretanto, em função da alta potência do arco, sua utilização é limitada à soldagem de chapas espessas na posição plana.

A corrente pulsada no processo MIG/MAG foi concebida com o objetivo de promover a transferência goticular axial, em correntes médias abaixo da corrente de transição. A proposta é promover a transferência metálica durante um determinado intervalo de tempo, denominado de tempo de pulso, com corrente acima da transição. Em seguida, a corrente é reduzida para um nível mínimo que permita a manutenção de um arco estável com baixa fusão do arame e sem destacamento de material. Um dos registros mais antigos sobre utilização de corrente pulsada na soldagem MIG/MAG, encontrado durante a redação deste trabalho, é o artigo de Agnew e Daggett (Agnew, 1966). Nesse trabalho, os autores utilizaram duas fontes eletromagnéticas em paralelo à pistola de soldagem. Uma das fontes, responsável pela manutenção da corrente de base, era equipada com um retificador de onda completa, e alimentada por uma rede trifásica de 460 V e 60 Hz. A segunda fonte, responsável apenas pela geração do pulso de corrente, era alimentada por uma rede monofásica, também de 460V e 60 Hz, entretanto equipada por um retificador de meia onda. Assim, sempre que a segunda fonte estivesse no semi-ciclo positivo, sua corrente se sobrepunha à corrente da primeira fonte, caracterizando o tempo e a corrente de pulso. Durante o semi-ciclo negativo da segunda fonte, o arco era mantido apenas pela primeira fonte, caracterizando o tempo e a corrente de base.

No final dos anos 60 surgiram as primeiras fontes tiristorizadas, que eram capazes de gerar corrente pulsada somente em freqüências múltiplas da rede de alimentação (Dutra, 1989). Entretanto, mesmo com este advento, a estabilidade da transferência metálica e do arco voltaico nem sempre era garantida, principalmente para aços inoxidáveis e materiais não ferrosos.

Com o avanço da eletrônica de controle e potência surgiram as fontes de soldagem transistorizadas, que permitem a geração de formas de ondas totalmente independentes da freqüência da rede, de formato retangular, trapezoidal, triangular, etc., com controle direto da corrente.

Como mencionado anteriormente, a corrente pulsada com pulsos retangulares é a forma de onda mais utilizada e difundida. Durante um determinado

período de tempo (tempo de base – t_b) é mantida uma corrente de baixo valor (corrente de base – I_b), responsável pela manutenção de um arco voltaico estável entre a ponta do arame-eletrodo e a peça de trabalho. Após este período, a corrente é elevada a um patamar acima da corrente de transição (corrente de pulso – I_p), por um determinado intervalo de tempo (tempo de pulso – t_p), quando a gota de metal fundido deve ter sua formação completada e destacada.

Um dos problemas enfrentados para a utilização prática da corrente pulsada é o elevado número de variáveis de soldagem, e sua interação mútua. Para uma soldagem estável, os parâmetros " I_p ", " t_p ", " I_b ", " t_b " e a velocidade do arame " V_a " devem ser corretamente selecionados. O levantamento destes parâmetros pode se tornar um trabalho exaustivo com resultado não satisfatório, se não for conduzido de forma sistemática. Vários autores têm proposto procedimentos para identificar e quantificar a interação, ou sinergismo, entre estes parâmetros, com o objetivo final de criar algoritmos de predeterminação dos mesmos. O conjunto destes algoritmos é denominado de "Comando Sinérgico".

Subramaniam et al (Subramaniam, 1999), por exemplo, combinou experimentos fatoriais com projetos experimentais D-Optimal para propor um correlacionamento empírico entre estas variáveis. Smati (Smati, 1986) fez um apanhado de formulações e experimentos estatísticos utilizando técnicas de "shadowgrafia" para identificar os melhores parâmetros de pulso. Ele afirma que a fusão do arame e a transferência metálica ocorrem de forma mais suave quando a gota é destacada durante o tempo de base. Entretanto, os trabalhos publicados por Amin em 1981 (Amin, 1981) e 1983 (Amin, 1983) continuam sendo propostas que oferecem bons resultados de forma relativamente simples e coerente, utilizando equações analíticas e empíricas, onde a premissa fundamental é de que apenas uma gota deve ser destacada no final de cada pulso. Em função desta análise, e da consolidada experiência que o LABSOLDA/UFSC possui na aplicação prática destas teorias, os trabalhos de Amin foram escolhidos como base para o desenvolvimento de um comando sinérgico para a soldagem Plasma-MIG com pulsação da corrente MIG.

3.3 Determinação do comando sinérgico

Neste item é descrito o procedimento para a construção de um comando sinérgico seguindo a metodologia proposta pelos trabalhos apresentados por Amin (Amin, 1981 e Amin, 1983). Ao longo desta descrição são feitos comentários referentes à possível utilização desta teoria na formulação de um comando sinérgico para o processo Plasma-MIG.

3.3.1 Relação entre corrente média e velocidade do arame

A primeira premissa a ser considerada na construção de um comando sinérgico é de que a taxa de alimentação de arame deve equilibrar a taxa de fusão, para manter um comprimento de arco constante. Nos sistemas em que este equilíbrio não é inerente (fontes de corrente constante), para atender a esta exigência, é necessário conhecer a relação entre a corrente de soldagem e a taxa de fusão de material. Lesnewich (Lesnewich, 1958-1), um dos pioneiros no estudo do controle da taxa de fusão de arame no processo MIG/MAG, afirma que a taxa de fusão de material é dependente não só da corrente de soldagem, mas também do diâmetro do arame e do comprimento de eletrodo. Após uma série de ensaios realizados com diferentes diâmetros e comprimento do eletrodo, Lesnewich propôs a seguinte equação, que define a velocidade do arame:

$$V_a = (a + b \cdot D_e)I + C \cdot \rho_e \left(\frac{L_e}{A} \right) I^2 \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde “a”, “b” e “c” são constantes obtidas experimentalmente; ρ_e é a resistividade elétrica do material do eletrodo; “I” é a corrente de soldagem e “A” e “ L_e ” representam a área e comprimento do eletrodo, respectivamente.

A primeira parcela da equação se refere ao calor gerado na interface entre o arco elétrico e o eletrodo (região anódica, quando o eletrodo possui polaridade positiva) e a segunda parcela se refere ao calor gerado ao longo do eletrodo sólido em função do “Efeito Joule”.

Waszink (Waszink, 1982) também considera que os mecanismos predominantes para gerar o calor necessário para fundir o arame são “Efeito Joule” e calor proveniente da superfície do ânodo que flui através do metal fundido na ponta do eletrodo. Em modo de transferência metálica globular, o calor absorvido pelo metal fundido na ponta do arame é transferido para o arame sólido por convecção: o

metal líquido do centro da gota fundida é acelerado em direção à interface arco/metal líquido, por forças eletromagnéticas. Na interface com o arco, o metal é aquecido e flui através da periferia da gota. Uma parte deste metal aquecido atinge a frente de fusão no eletrodo sólido, transmitindo calor por convecção. Na transferência por Spray, o calor é conduzido do arco até o eletrodo sólido por condução (Waszink, 1982).

Smati (Smati, 1986) afirma que a potência gerada no arco voltaico e no eletrodo responsável pela fusão do arme-eletrodo é composta pelos seguintes elementos:

a) Aquecimento resistivo do arame (Efeito Joule): $\frac{\rho \cdot L_E \cdot I^2}{A}$

b) Queda de tensão na região anódica: $U_a \cdot I$

c) A energia térmica transportada pelos elétrons, ao se chocarem com a superfície do eletrodo. Esta energia é proporcional à corrente, e portanto pode ser representada como uma queda de tensão:

$$\frac{3}{2} k \frac{T_e}{e} = V_T \cdot I$$

onde “k” é a constante de Boltzmann, “ T_e ” é a temperatura dos elétrons e “e” é a carga elementar.

d) Função de trabalho anódico φ_a . É a energia potencial convertida por elétrons quando eles entram no ânodo: $\varphi_a \cdot I$.

A energia total necessária para fundir e destacar um volume unitário de arame (H_f) pode também ser expressa como a energia requerida para aquecer este volume a partir da temperatura ambiente até seu ponto de fusão, fundir esta quantidade de arame (entalpia de fusão), fazer com que uma parte do metal fundido chegue à temperatura de evaporação e ainda evaporar uma pequena parte do líquido (Smati, 1986). Segundo Willgoss, (1983) e Lund, (1979), apud Smati (1986), esta energia total, necessária para fundir um determinado volume de arame de aço carbono, 1,2 mm de diâmetro, pode ser considerada como $1,75 \times 10^{10} \text{ J/m}^3$.

Para garantir que a taxa de alimentação de arame seja igual à taxa de fusão, o seguinte balanço pode ser escrito (Smati, 1986):

$$A \cdot V_a \cdot H_f = (\varphi_a + U_a + U_T) I + \frac{\rho \cdot L_E \cdot I^2}{A}$$

$$V_a = \frac{(\varphi_a + U_a + U_T) I}{A \cdot H_f} + \frac{\rho \cdot L_E \cdot I^2}{A^2 \cdot H_f}$$

Onde:

A : Área transversal do eletrodo $\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)$

V_a : Velocidade do arame

Hf : Calor total para fundir um volume de arame;

ϕ_a : Função de trabalho anódico

U_a : Queda de tensão na região anódica

U_T : Tensão térmica eletrônica

I : Corrente de soldagem

ρ : Resistividade elétrica do arame eletrodo;

L_E : Comprimento do Arame-eletrodo

Todas as variáveis listadas acima podem ser consideradas constantes, com exceção do Comprimento do Arame-eletrodo e da própria corrente de soldagem. Assim, para a soldagem com corrente contínua constante, esta correlação entre corrente de soldagem e velocidade do arame, para que o arco permaneça com comprimento constante, pode ser definida pela equação 3.2:

$$V_a = C_1 \cdot I + C_2 \cdot L_E \cdot I^2 \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde as constantes C_1 e C_2 podem ser obtidas experimentalmente.

Este modelo apresenta bons resultados experimentais em uma ampla faixa de corrente contínua e constante para o processo MIG/MAG. Entretanto, quando o valor médio da corrente assume valores muito diferentes de seu valor instantâneo (como no caso da corrente pulsada), discrepâncias podem tornar-se significativas (Dutra, 1989), principalmente pelo fato da segunda parcela da equação (efeito joule) ser dependente do quadrado da corrente.

Para se obter um resultado fiel, os valores instantâneos da equação 3.2 deveriam ser considerados da seguinte forma:

$$V_a = \frac{1}{T} \int_0^T V_a(t) dt$$

Em corrente pulsada de onda retangular, a equação pode ser apresentada como segue:

$$V_a = \frac{V_{ap} \cdot t_p + V_{ab} \cdot t_b}{t_p + t_b} \quad \text{Equação 3.3}$$

$$V_{ap} = C_1 \cdot I_p + C_2 \cdot L_e \cdot I_p^2 \quad \text{Equação 3.4}$$

$$V_{ab} = C_1 \cdot I_b + C_2 \cdot L_e \cdot I_b^2 \quad \text{Equação 3.5}$$

Substituindo as equações 3.4 e 3.5 em 3.3:

$$V_a = \frac{(C_1 \cdot I_p + C_2 \cdot L_e \cdot I_p^2) \cdot t_p + (C_1 \cdot I_b + C_2 \cdot L_e \cdot I_b^2) \cdot t_b}{T}$$

$$V_a = \frac{C_1(I_p \cdot t_p + I_b \cdot t_b)}{T} + \frac{C_2 \cdot L_e(I_p^2 \cdot t_p + I_b^2 \cdot t_b)}{T}$$

$$V_a = C_1 \cdot I_m + C_2 \cdot L_e \cdot I_{ef}^2 \quad \text{Equação 3.6}$$

Para a soldagem MIG/MAG convencional, pode-se assumir na maioria das vezes que a corrente média é igual ao valor da corrente eficaz, o que facilita a utilização e inversão da equação 3.6. Entretanto, para valores típicos de corrente pulsada no processo MIG/MAG, sabe-se que o valor da corrente eficaz pode ser até 30% maior que a corrente média (Correa, 1999).

Segundo Dutra (1989), pode-se considerar que o aquecimento ôhmico durante a fase de base seja desprezível comparado com aquele da fase de pulso, isto é:

$$I_p^2 \cdot t_p \gg I_b^2 \cdot t_b$$

Assim, a equação 3.6 pode ser escrita como segue:

$$V_a = C_1 \cdot I_m + C_2 \cdot L_e \frac{I_p^2 \cdot t_p}{T} \quad \text{Equação 3.7}$$

O período necessário para se obter um diâmetro de gota d_g é dado por:

$$T_d = \frac{40 \cdot d_g^3}{d_a^2 \cdot V_a}$$

Substituindo-se a equação acima em 3.7, obtém-se

$$V_a = \frac{C_1 \cdot I_m}{1 - \frac{C_2 \cdot L_e \cdot I_p^2 \cdot t_p \cdot d_a^2}{40 \cdot d_g^3}}$$

Como a única variável da equação acima é a corrente média, ela pode ser apresentada da seguinte forma (Dutra, 1988 e Smati, 1986).

$$V_a = K \cdot I_m$$

Equação 3.8

Amin (Amin, 1983) chega a esta mesma conclusão, utilizando procedimentos experimentais para vários eletrodos de diferentes diâmetros. Em seu trabalho, todas as curvas obtidas experimentalmente que relacionam I_m com V_a são retas que interceptam a origem, com exceção do arame NG 21, de 1,0 mm de diâmetro, em atmosfera de argônio. Experimentos realizados no LABSOLDA para a construção de comandos sinérgicos para arames sólidos e tubulares no processo MIG/MAG também apresentaram correlações com o mesmo comportamento (LABSOLDA, 1995).

O gráfico da figura 3.8 mostra os resultados obtidos por Amin (1986), para diversos materiais de adição e gases de proteção.

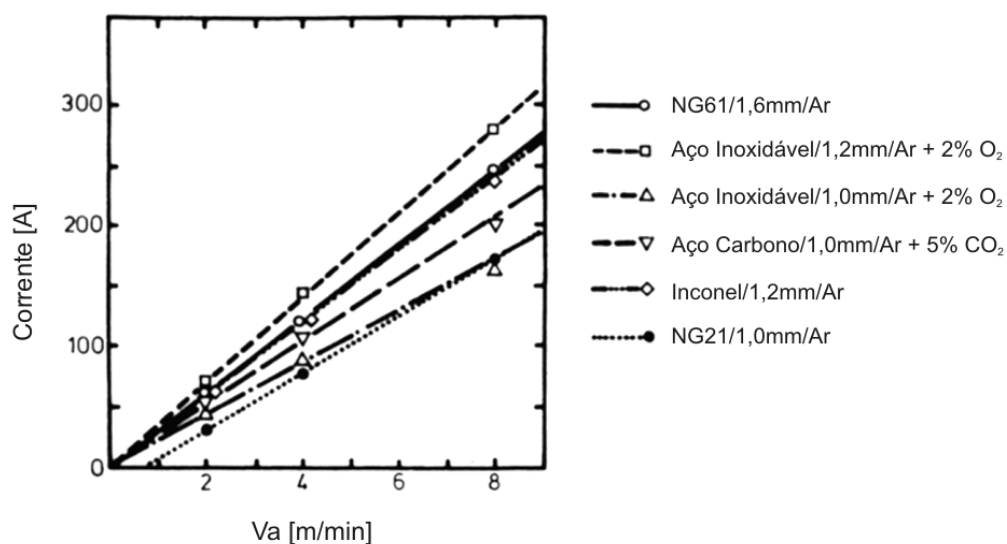


Figura 3.8 – Corrente média em função da velocidade do arame para o processo MIG/MAG pulsado (Amin, 1982)

Para a aplicação desta primeira premissa ao processo Plasma-MIG, a corrente plasma “ I_{PL} ” também deve ser considerada neste equacionamento. Em ensaios preliminares, observou-se que incrementos somente na “ I_{PL} ” também provocam aumentos na taxa de fusão do arame. Assim, a velocidade do arame se torna uma função de duas variáveis, conforme a equação 3.9.

$$V_a = f(I_{MIG}, I_{PL}) \quad \text{Equação 3.9}$$

3.3.2 Determinação dos parâmetros de pulso: *Corrente de Pulso “ I_p ” e Tempo de Pulso “ t_p ”*

Uma segunda premissa estipulada por Amin (Amin, 1983) diz respeito ao dimensionamento do pulso de corrente: A combinação entre corrente de pulso e tempo de pulso deve ser dimensionada de modo que ocorra a formação e destacamento de apenas uma gota ao final de cada pulso. Smati et al (1986) afirma que, para uma transferência de material suave, a gota deve ser destacada durante o período de base. Zhang et al (2001 e 1998) desenvolveram um sistema que atua com dois pulsos subseqüentes, abaixo da corrente de transição, para garantir um destacamento livre de respingos. O primeiro pulso (pré-pulso) é utilizado para formar e causar uma “excitação” na ponta do metal fundido. O segundo pulso serve para promover o destacamento, sincronizando a força eletromagnética gerada pela corrente de pulso com o movimento oscilatório da porção fundida do arame gerado pelo pré-pulso.

A experiência do LABSOLDA na soldagem MIG/MAG com corrente pulsada, fora da posição plana, reforça a premissa estipulada por Amin, de que a gota deve ser destacada ao final do pulso de corrente. Isto se deve ao fato de que durante o pulso a força eletromagnética gerada pela corrente mais intensa garante que a gota seja “arremessada” em direção à poça de fusão, vencendo inclusive a influência da aceleração da gravidade.

Para atender a esta premissa é necessário, em um primeiro passo, quantificar a influência que a corrente exerce sobre o diâmetro e o intervalo de destacamento de gotas, para um determinado arame e gás de proteção.

Várias técnicas têm sido utilizadas para a quantificação da relação entre I_p e t_p para a manutenção da formação e destacamento de uma gota por pulso (UGPP). É possível, por exemplo, detectar o momento de destacamento de uma

gota, utilizando-se um osciloscópio com memória a partir da leitura do sinal de tensão (Nixon, 1988 apud Bálamo, 2000). A técnica de “Shadowgrafia” é também uma importante ferramenta para estudar fenômenos dinâmicos associados à transferência metálica (Scotti, 1998). Bálamo et al (Bálamo, 2000) apresentam um sistema que associa a “shadowgrafia” com os sinais de corrente e tensão do arco, denominado de “Shadowgrafia Sincronizado”, obtendo-se resultados mais confiáveis que os apresentados pelas técnicas supracitadas. Miranda et al (Miranda, 2004) desenvolveram um sistema que identifica o destacamento de gotas em função da variação da energia luminosa emitida pelo arco voltaico. Com este sistema é possível identificar o destacamento de gotas ou ajustar, de forma prática e rápida os parâmetros de pulso.

No presente trabalho, será descrito com maiores detalhes apenas o procedimento proposto por Amin (Amin, 1983).

Com experimentos conduzidos com corrente contínua constante acima da de transição é possível observar que, para cada nível de corrente, pode-se associar um *Diâmetro de Gota* “ d_g ” e um intervalo de tempo para formação e destacamento de gota, denominado de *Período de Destacamento* “ T_d ”. O destacamento de gota pode ser identificado por meio oscilogramas de tensão. Normalmente ocorre um pequeno pico de tensão cada vez que uma gota é destacada, como é ilustrado de forma esquemática na figura 3.9. Para que a determinação do destacamento de gotas seja confiável é necessária a utilização de fontes de soldagem com baixa variação de corrente. Normalmente, fontes chaveadas podem trabalhar com oscilação de corrente na ordem de 5 a 10 % do valor ajustado (ripple). Esta variação pode causar também oscilações no valor da tensão, causando problemas na identificação de picos de tensão associados ao destacamento de gota. Entretanto, em ensaios realizados para o presente trabalho, mesmo com fontes chaveadas foi possível identificar os picos de tensão causados pelo destacamento no processo Plasma-MIG.

Com o auxílio de um programa computacional, pode-se identificar os picos de tensão, medir o intervalo de tempo entre dois destacamentos e determinar, estatisticamente, um *Período Modal de Destacamento* “ T_{md} ”. A figura 3.10 apresenta um histograma típico de intervalos de destacamento e o intervalo modal de destacamento.

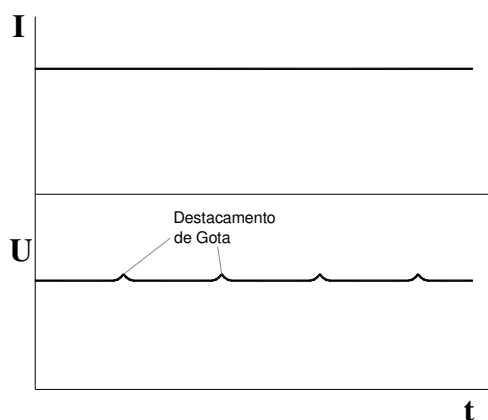


Figura 3.9 – Oscilograma esquemático do destacamento de gotas

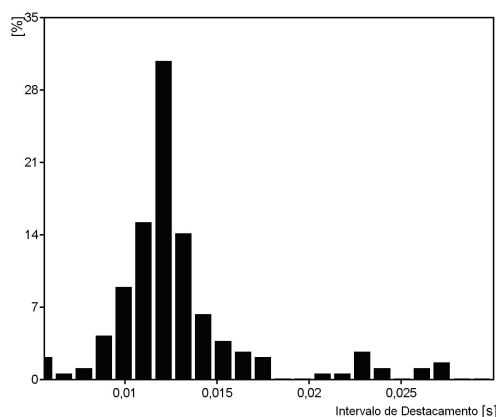


Figura 3.10 – Histograma dos intervalos de destacamento

Quando T_{md} é determinado, pode-se calcular um *Diâmetro Modal de Gota* “ d_{mg} ”, utilizando-se a equação 3.10:

$$d_{mg} = \sqrt[3]{\frac{V_a \cdot d_a^2 \cdot T_{md}}{40}} \quad \text{Equação 3.10}$$

Onde V_a é a velocidade do arame; d_a o diâmetro do arame e T_{md} é o intervalo modal de destacamento.

Para um determinado diâmetro de gota é possível relacionar a corrente e tempo modal de destacamento, necessários para formar e destacar uma gota. Amin (Amin, 1983) propõe uma equação empírica para relacionar T_{md} com a corrente de soldagem (equação 3.11). Esta equação foi levantada experimentalmente com ensaios com vários arames de diferentes diâmetros.

$$I^{2,3} \cdot T_{md} = K_v$$

Equação 3.11

Pode-se afirmar que K_v (constante de destacamento) representa a energia necessária para formar e destacar uma gota com diâmetro d_g . A tabela 3.1 apresenta uma serie de valores de K_v para arames de diferentes composições químicas e diâmetros, com diferentes volumes de gota.

Tabela 3.1 – Valores de K_v para diferentes materiais e volumes de gota (Amin, 1983)

Arame		v = 1,0 [mm ³]			v=1,5 [mm ³]		
Material	Diâm. Do Arame [mm]	Im [A]	Tmd [ms]	K_v	Im [A]	Tmd [ms]	K_v
NG21	1,2	140	7,8	$6,7 \times 10^2$	118	15	$8,7 \times 10^2$
Aço Inox.	1,2	171	11,80	$1,61 \times 10^3$	161	19,40	$2,31 \times 10^3$
Aço Carbono	1,0	219	9,10	$2,19 \times 10^3$	205	20,00	$4,15 \times 10^3$

Na soldagem com corrente pulsada, idealiza-se que a formação e destacamento de uma gota devem ser conduzidos durante um pulso de corrente. Teoricamente, fusão e destacamento de gota durante o tempo de base não devem ocorrer.

Finalmente, para um determinado diâmetro de gota e corrente de pulso é possível calcular o tempo de pulso pela equação 3.11, que modificada para a soldagem com corrente pulsada assume a forma da equação 3.12:

$$t_p = K_v \cdot I_p^{-2,3}$$

Equação 3.12

Para o processo plasma-MIG deve-se avaliar a influência da corrente plasma sobre a formação e destacamento das gotas. Além disto, deve-se avaliar a contribuição do arco plasma na taxa de fusão do arame-eletrodo, mesmo durante o período de base na corrente MIG.

3.3.3 Determinação dos parâmetros de soldagem MIG/MAG pulsada utilizando-se apenas uma variável de entrada, utilizando os equacionamentos do comando sinérgico

Inicialmente deve-se escolher um diâmetro de gota e determinar a constante de destacamento para este diâmetro. Amin (1983) recomenda que o diâmetro de gota não seja muito diferente do diâmetro do arame. Com este

parâmetro deve-se calcular “ I_p ” e “ t_p ”, que permanecerão constantes para qualquer condição de soldagem.

O parâmetro escolhido para ser a variável de entrada no comando sinérgico é a corrente média “ I_m ”. A Corrente Média deve ser dimensionada de acordo com a espessura da chapa a ser soldada e velocidade de soldagem.

Com “ I_m ” é possível calcular “ V_a ” utilizando-se a equação 3.8. Com “ V_a ” determinada, é possível calcular o intervalo de destacamento, utilizando-se a equação 3.13:

$$T_d = \frac{40 \cdot d_g^3}{V_a \cdot d_a^2} \quad \text{Equação 3.13}$$

Com os parâmetros “ I_m ”, “ T_d ”, “ I_p ” e “ t_p ”, pode-se calcular I_b , com o auxílio da equação 3.14. Assim, todos os parâmetros para a soldagem MIG/MAG com corrente pulsada foram determinados.

$$I_m = \frac{I_p \cdot t_p + I_b \cdot t_b}{T_d} \quad \text{Equação 3.14}$$

Para a soldagem Plasma-MIG, será desenvolvido neste trabalho um procedimento similar ao proposto acima, para a determinação dos parâmetros de soldagem. Para tanto, será quantificada a influência da corrente plasma sobre as equações aqui desenvolvidas.

4 APARATO EXPERIMENTAL

4.1 Introdução

Para a execução dos ensaios necessários ao desenvolvimento do presente trabalho, três bancadas de soldagem independentes foram utilizadas. Duas destas bancadas foram utilizadas durante a parte do trabalho desenvolvida no SLV-Muenchen – Schweisstechnische Lehr- und Versuchsanstalt (Instituto para o Ensino e Pesquisa da Tecnologia da Soldagem de Munique - Alemanha). A terceira bancada de soldagem foi desenvolvida e montada no LABSOLDA/UFSC.

As bancadas devem permitir a soldagem mecanizada ou automática, para manutenção de velocidade de soldagem controlada, seleção e controle de correntes ou tensões de soldagem, velocidade de alimentação do arame e vazão de gás. Além disso, as bancadas devem ser equipadas com instrumentos para medição e registro de corrente e tensão, na forma de oscilogramas. Com a interpretação destes oscilogramas a bancada deve possibilitar, por exemplo, a identificação do destacamento de gota e a forma de transferência metálica. Além disso, com tratamento estatístico posterior desses oscilogramas, deve ser possível identificar tempos modais de destacamento de gota e determinar o volume modal de material transferido em função das correntes MIG e Plasma.

São descritos a seguir os instrumentos a serem utilizados, bem como seus dados técnicos necessários para que atendam as necessidades de medição e aquisição de dados de uma bancada de soldagem.

Para a maioria dos processos de soldagem a arco, incluindo-se o Plasma-MIG, o instrumento de medição de tensão deve permitir a aquisição de sinais entre 0 e 60 V ou mais, quando utilizada corrente contínua. A medição deve ser realizada conectando-se cabos sensores diretamente aos eletrodos, no ponto mais próximo ao arco voltaico, subtraindo-se, desta forma, a leitura da queda de tensão dos cabos provocada pela passagem de elevadas correntes. Estes cabos são conectados na entrada do instrumento, que deve filtrar o sinal para evitar a interferência causada por ruídos eletromagnéticos, e em seguida transformar este sinal analógico em um sinal digital por meio de um conversor A/D, para que possa ser utilizado por um software de aquisição de dados. A frequência de aquisição e conversão deste sinal

analógico deve ser, no mínimo, em torno de 5 kHz, para que se obtenha uma resolução adequada, que permita a identificação de variações na tensão referentes aos fenômenos de transferência metálica, curtos-circuitos ou instabilidades no arco voltaico.

A medição de corrente pode ser realizada por um sensor de efeito Hall, que gera um sinal de tensão proporcional ao campo magnético gerado em torno dos cabos condutores. Este sinal passa por uma unidade de tratamento de sinais, onde deve ser filtrado, amplificado e, por fim digitalizado para ser utilizado em um software de aquisição de dados. Para as bancadas do presente trabalho, sensores de efeito Hall com corrente máxima de 600 A foram utilizados – valor máximo de corrente fornecido pelas fontes de soldagem utilizadas. A frequência de aquisição também não deve ser menor do que 5 kHz.

No caso da soldagem Plasma-MIG, estes instrumentos devem ser duplicados, em função da utilização de duas fontes de soldagem independentes.

Os demais aspectos construtivos das bancadas, seu funcionamento e avaliação serão descritos neste capítulo.

4.2 Bancada N. 1

4.2.1 Fontes de Soldagem

A bancada N. 1 é equipada com duas fontes eletrônicas de soldagem (uma para o arco plasma e outra para o arco MIG), modelo PU 400 RS, fabricadas pela empresa MERKLE (Fig. 4.1). As duas fontes utilizam tecnologia de chaveamento no primário (inversoras) e são totalmente comandadas por microcontroladores.

A fonte plasma conta com um ignitor de alta frequência e uma fonte auxiliar para acendimento e manutenção do arco piloto entre o bocal constritor e o eletrodo plasma (vide item 2.4.1-b). Esta fonte é comandada por um painel remoto, onde a corrente do arco plasma pode ser regulada. Não é possível a utilização de corrente pulsada com esta fonte Plasma.

Os parâmetros do arco MIG são regulados para a segunda fonte de energia (fonte MIG), por um computador com o auxílio do software “Prodoc”. Com este software é possível programar todos os parâmetros da corrente pulsada, inclusive rampas de subida e descida da corrente.

As fontes de soldagem contam ainda com um sistema de monitoramento dos parâmetros de baixa frequência de aquisição (20 Hz) para controle de qualidade, capaz de medir corrente média, tensão média, a vazão de gás em três circuitos independentes e a circulação de água de arrefecimento.



Figura 4.1 – Fontes de soldagem da bancada n. 1.

4.2.2 Programação dos Parâmetros

Os parâmetros de soldagem são previamente programados em um software por um computador ligado por porta serial com um console de comando das duas fontes. Neste software são programados os parâmetros MIG do processo. A fonte permite a soldagem com corrente pulsada, com corrente constante, imposição de corrente ou controle de tensão e curto circuito com controle de corrente.

Os parâmetros do arco Plasma são regulados a partir do console de comando. Esta bancada não permite pulsação do arco plasma.

O console de comando e o computador para regulagem dos parâmetros são apresentados na figura 4.2.

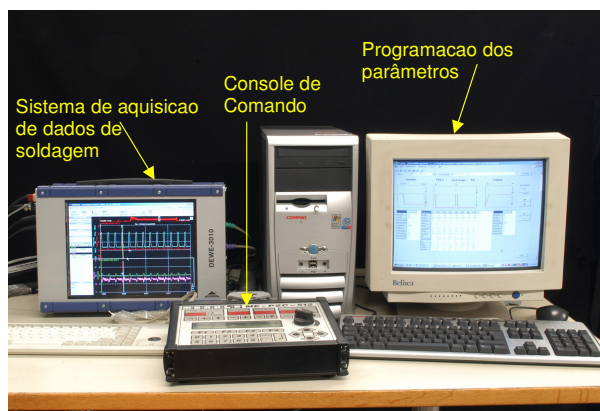


Figura 4.2 – Sistema de aquisição de dados, console de comando da fonte Plasma e software para comando dos parâmetros MIG.

4.2.3 Pistola de Soldagem Plasma-MIG

A pistola de soldagem PLASMA-MIG da bancada N. 1, também desenvolvida pela empresa MERKLE (figura 4.3), é equipada com um sistema push-pull de tracionamento, assim como desentortadores de arame que garantem velocidade de arame estável, com direcionamento regular do arame em direção à junta de soldagem.



Figura 4.3 – Pistola de soldagem e sistema de deslocamento da peça de trabalho.

O eletrodo anular desta pistola possui um formato cônico, como mostra a figura 4.4. Os eletrodos originais fornecidos pelo fabricante possuem inserto de tungstênio, que é brasado à base do eletrodo de cobre. Para o presente trabalho, foram especialmente usinados eletrodos sem o inserto de tungstênio. Os dois tipos de eletrodo foram testados. Para os ensaios realizados em laboratório, o eletrodo sem inserto apresentou melhor desempenho, nas operações de soldagem e de brasagem. O processo apresentou maior estabilidade e a transferência metálica ocorreu com boa repetibilidade.

Os eletrodos de tungstênio apresentam maior resistência a altas temperaturas, em função de seu elevado ponto de fusão, quando comparados aos eletrodos de cobre. Entretanto, o cobre possui condutividade térmica muito superior à do tungstênio, o que garante a manutenção de baixas temperaturas, mesmo nas regiões que entram em contato direto com o arco voltaico. Esta manutenção de baixas temperaturas em todas as regiões dos eletrodos de cobre, além de reduzir o desgaste do eletrodo, permite a utilização de gases ativos, sem oxidação significativa da superfície do eletrodo. Respingos originários de instabilidades na transferência metálica também não aderem ao cobre, em função da manutenção da baixa temperatura. Já as regiões dos eletrodos com inserto de tungstênio que entram em contato com o arco voltaico são submetidas a temperaturas extremas. Mesmo que a base dos eletrodos seja arrefecida com água, a baixa condutividade térmica do tungstênio não permite o resfriamento efetivo da ponta do eletrodo. Em função da elevada temperatura, a ponta do eletrodo é oxidada na presença de gases ativos e os respingos aderem fortemente à sua superfície.

Além de apresentar melhor desempenho nos ensaios realizados para este trabalho, os eletrodos de cobre sem inserto são significativamente mais baratos. Entretanto, uma comparação de resistência e durabilidade entre os dois tipos de eletrodo não foi realizada, e pode ser um importante parâmetro na definição do melhor eletrodo para utilização industrial.

Os bocais constritores utilizados na pistola Plasma-MIG da bancada N. 1 possuem geometria similar a dos utilizados na soldagem plasma convencional (figura 4.5). Os orifícios constritores testados possuem diâmetros de 5, 6, 7 e 8 mm. Os melhores resultados, em termos de estabilidade do processo, foram obtidos com os eletrodos com orifícios de 6 e 7 mm de diâmetros. Com orifício de 5 mm de diâmetro, qualquer desvio no direcionamento do arame provoca curto-circuito com o bocal constritor, causando fortes instabilidades nos arcos plasma e MIG. Outro

problema observado foi um aumento da tensão do arco plasma, causado pela excessiva constrição do arco. Sob determinadas condições, isto provoca a extinção do arco. Já os bocais com orifício constritor de 8 mm também não promoveram boa estabilidade durante os ensaios realizados. A adequada constrição do arco plasma é indispensável para garantir sua estabilidade no processo Plasma-MIG, principalmente quando se utiliza eletrodo de geometria circular. Em eletrodos pontiagudos, o arco voltaico arde preferencialmente na ponta do eletrodo. Já em eletrodos circulares, não existe uma região preferencial para a localização da mancha anódica, o que provocaria mobilidade do arco ao longo da superfície do eletrodo, não fosse a concentração provocada pela sua passagem através do orifício constritor. Em função destas considerações, acredita-se que o orifício constritor de 8 mm não apresenta ação eficaz para estabilizar o posicionamento do arco voltaico.



Figura 4.4 – Eletrodo anular de cobre, equipado com inserto de tungstênio.

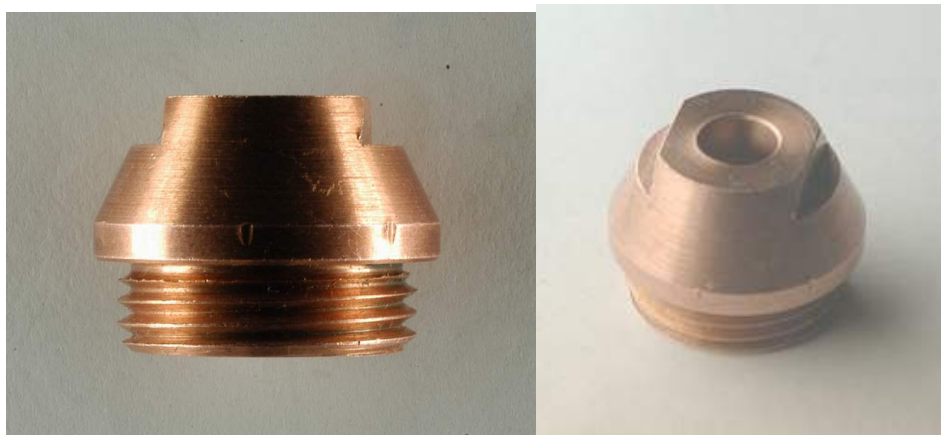


Figura 4.5 – Bocal Constritor

4.2.4 Acendimento do Arco

O acendimento do arco plasma nesta bancada é conduzido por meio de alta frequência e arco piloto (item 2.4.1-b). Problemas com interferência, causada pela emissão de radiação eletromagnética foram constantemente observados durante a condução do trabalho. Sistemas eletrônicos, como robôs, sistemas de aquisição de dados e computadores eram instabilizados durante os procedimentos de abertura do arco voltaico. Conforme citado anteriormente, a geometria circular do eletrodo não possui um ponto capaz de concentrar a energia gerada pelos pulsos de alta tensão do ignitor de alta frequência. Assim, para uma abertura de arco confiável é necessário um aumento de potência do ignitor, o que conseqüentemente gera um maior nível de ruído para os equipamentos periféricos à bancada de soldagem.

4.2.5 Controle da vazão de gás

A vazão dos gases central, periférico e de proteção é regulada no console de comando e controladas por válvulas eletrônicas, localizadas no interior das fontes de soldagem. Estas válvulas eletrônicas controlam a vazão mássica de gás, o que garante a manutenção de um fluxo regular de gás, independente da pressão disponível na rede de alimentação ou no cilindro de gás, bem como da perda de carga provocada pelo circuito de mangueiras que conduz o gás até a ponta da pistola de soldagem.

4.2.6 Sistema de arrefecimento de água

Toda a água para arrefecimento da pistola de soldagem é fornecida por um sistema de arrefecimento de circuito fechado. A água é constantemente alimentada a uma temperatura máxima de 20 °C. A durabilidade do bico de contato MIG, do eletrodo plasma e do bocal de constrição, na pistola de soldagem utilizada na bancada de N. 1 (item 4.1.2), depende do arrefecimento. Para minimizar o risco de inutilização de componentes da pistola de soldagem, a bancada é equipada com sensores de fluxo e temperatura de água, não permitindo a soldagem caso o sistema não apresente condições de operação.

4.2.7 Sistema de deslocamento

Nesta bancada a peça de trabalho é movimentada durante a condução da soldagem, sendo que a pistola de soldagem permanece parada. O deslocamento da peça de trabalho é feito por uma mesa XY, onde é possível programar a velocidade de soldagem e o comprimento da solda. A velocidade de soldagem pode variar de 0,05 a 5 m/min.

4.2.8 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados utilizado é fabricado pela empresa “DEWETRON”, modelo DEWE-3010. A aquisição de dados pode ser feita em 10 canais com frequência máxima de aquisição de 50 kHz por canal. Durante os experimentos foram feitas aquisições da corrente e tensão dos dois arcos. A corrente foi medida com a utilização transdutores de efeito Hall. Este equipamento funciona com sistema operacional Windows 98, e permite a exportação dos dados adquiridos na forma de tabelas em arquivos de texto, para posterior impressão ou tratamento estatístico.

4.3 Bancada de Soldagem N. 2

A bancada de soldagem N. 2 (figura 4.6) é formada pelos seguintes componentes:

4.3.1 Fontes de Soldagem

As fontes de soldagem da bancada N. 2 são fabricadas pela empresa AMT. São fontes eletrônicas, transistorizadas, também chaveadas no primário. São comandadas por um único painel remoto, onde todos os parâmetros de soldagem podem ser regulados.

Com esta bancada é possível soldar com imposição de corrente ou controle de tensão no arco MIG, e com imposição de corrente constante ou pulsada no arco Plasma. No arco MIG somente é possível a utilização de corrente pulsada no modo misto, isto é, imposição de corrente durante o tempo de base e controle de tensão durante o tempo de pulso. Além disto, a bancada permite uma regulagem da dinâmica de variação da corrente entre os tempos de pulso e de base. Os ensaios com corrente pulsada nesta bancada não apresentaram resultados satisfatórios, pois

a operação em modo misto não garante um nível repetitivo na corrente de pulso, causando falta de repetibilidade na transferência metálica.

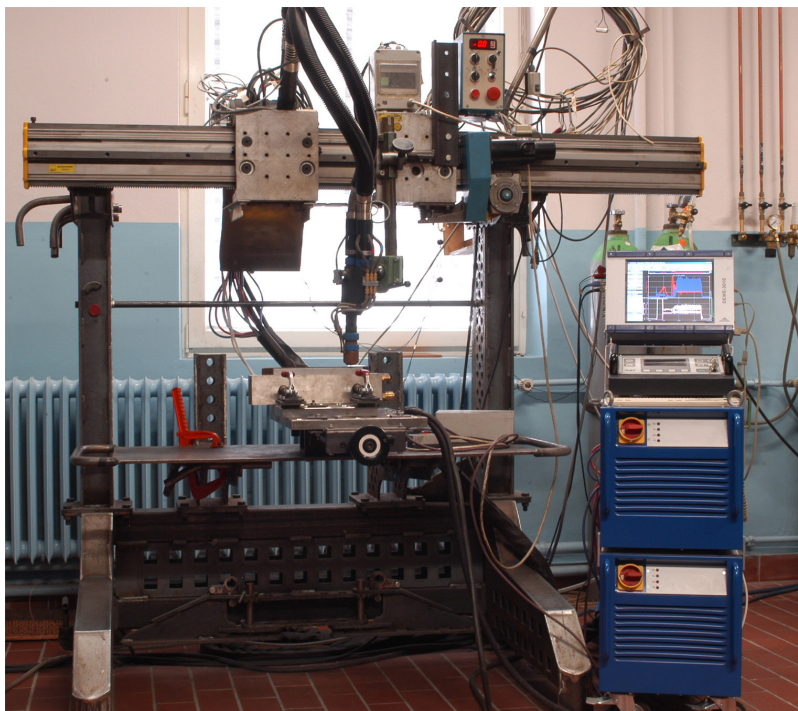


Figura 4.6 – Bancada de soldagem n. 2

4.3.2 Pistola de Soldagem

A pistola de soldagem da bancada n. 2 é fabricada pela empresa TBi-Industries (figura 4.7). Apesar de ser um protótipo, esta pistola apresentou boas características de durabilidade e praticidade de manutenção.

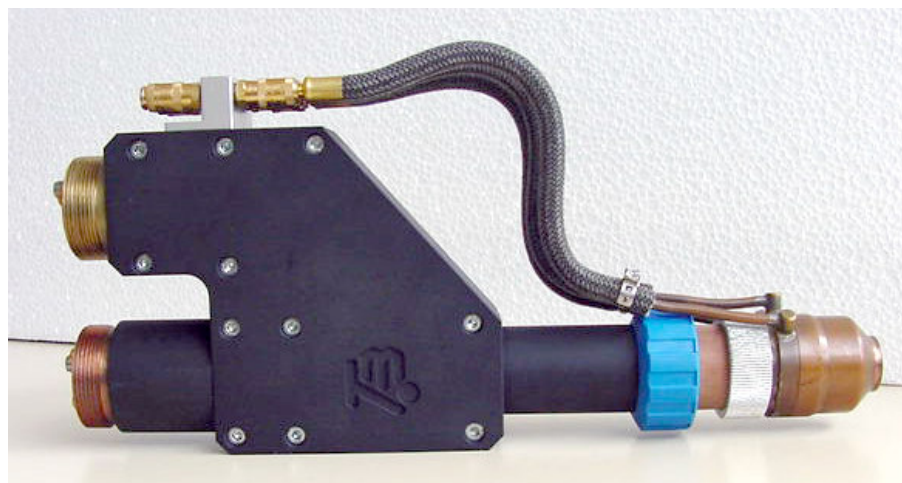


Figura 4.7 – Pistola Plasma-MIG fabricada pela empresa Tbi.

O Eletrodo anular utilizado pelas tochas TBI tem um formato levemente cônico, como mostra a figura 4.8. É fabricado em cobre e não apresenta inserto de tungstênio.



Figura 4.8 – Eletrodo Anular Plasma

O bocal constritor das tochas TBI é parte integrante bocal de gás de proteção (figura 4.9). O orifício constritor pode ter diâmetros entre 7 a 13 mm.

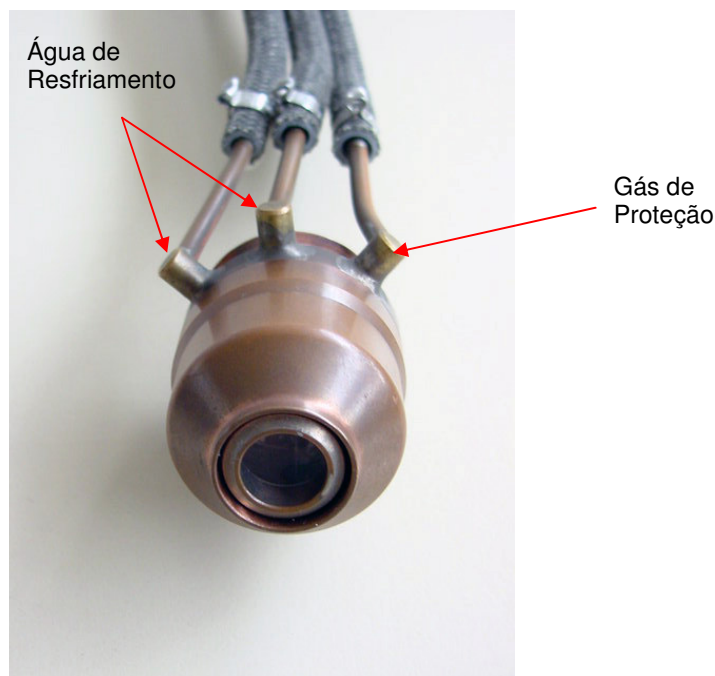


Figura 4.9 – Bocal constritor integrado ao bocal de gás de proteção

4.3.3 Acendimento do Arco Plasma

Esta bancada usa o procedimento “Soft Start” (vide item 2.4.2) para conduzir o acendimento do arco plasma.

4.3.4 Controle da vazão de gás

O controle da vazão de gás, para os gases de proteção, plasma e MIG é realizado com o auxílio de fluxímetros tipo rotâmetro, localizados na saída do sistema central de gases disponível no SLV-München.

4.3.5 Sistema de arrefecimento de água

O fornecimento de água para arrefecimento da pistola de soldagem é realizado por uma central em circuito fechado, existente no SLV-Muenchen. A água é alimentada constantemente a 10° C.

4.3.6 Sistema de deslocamento

Nesta bancada automática, a pistola de soldagem é movimentada ao longo da junta a ser soldada. A velocidade de deslocamento varia de 0 a 3,2 m/min. A bancada conta ainda com sistemas de fixação de corpos de prova e cobre-junta, todos confeccionados em cobre.

4.3.7 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição é o mesmo utilizado na bancada de N. 1.

5 DESENVOLVIMENTO DA BANCADA PLASMA-MIG NO LABSOLDA

5.1 Motivação para a construção da bancada no LABSOLDA

Desde a retomada do interesse pelo processo Plasma-MIG, os equipamentos de soldagem (fontes e pistolas) ainda se encontram em franco desenvolvimento. Ainda não existem equipamentos exclusivamente dedicados e projetados para o processo, que apresentem um nível de desenvolvimento de produto para aplicação industrial. O aparato para soldagem Plasma-MIG, oferecido por diversos fabricantes, é composto por duas fontes eletrônicas de soldagem, já utilizadas para outros processos, integradas em uma bancada por um computador ou microprocessador de controle.

O LABSOLDA/UFSC possui condições de fabricar variados equipamentos e periféricos destinados à soldagem ao arco voltaico, com tecnologia comparável à utilizada nos grandes centros mundiais de pesquisa e desenvolvimento. Este laboratório possui uma experiente equipe multidisciplinar, composta por engenheiros eletricitas e engenheiros mecânicos, além de profissionais de outras áreas, como física, automação e tecnologia da informação, capaz conduzir rapidamente adaptações nos equipamentos já existentes, bem como novos desenvolvimentos. Assim, o LABSOLDA integra um restrito grupo de instituições no mundo capazes de interferir diretamente nas características dos equipamentos de soldagem, para obter resultados independentes do que a tecnologia comercialmente disponível oferece.

Tradicionalmente, o LABSOLDA não encara seus desenvolvimentos técnico-científicos somente como meios para publicações ou obtenção de títulos, mas também tem a visão de disponibilizar, para a comunidade científica e industrial, os avanços obtidos com a pesquisa, na forma de produtos, como equipamentos e softwares. Desta forma, sempre foi meta do LABSOLDA, que o desenvolvimento do processo de soldagem Plasma-MIG deveria ter continuidade no Brasil, após o período de desenvolvimento da presente tese na Alemanha. Assim, o objetivo geral deste trabalho não ficou restrito à execução de experiências para compreender fenômenos físicos do processo, apesar de sua fundamental importância, mas também ao objetivo de desenvolver a tecnologia da soldagem Plasma-MIG e disponibilizá-la para a indústria brasileira.

Em função destas considerações, após o período de permanência na Alemanha, iniciou-se o desenvolvimento de uma bancada Plasma-MIG no Brasil que apresenta flexibilidade total na mudança de software e hardware de controle, para servir aos experimentos deste trabalho, com vistas ao desenvolvimento de equipamentos e posterior aplicação industrial.

Para a construção desta bancada, foram considerados os mesmos requisitos técnicos expostos no item 4.1, onde as principais variáveis a serem medidas são os oscilogramas de corrente e tensão. Com a análise destes oscilogramas é possível realizar a identificação do instante da transferência metálica e, utilizando-se de métodos estatísticos, avaliar a estabilidade da transferência metálica.

Uma das principais características próprias da bancada do LABSOLDA é a possibilidade de efetuar modificações conceituais do modo de operação dos equipamentos. Somente em função desta potencialidade, foi possível desenvolver um novo método para iniciar o processo através de uma modificação na técnica “soft-start”, o que se constitui em um dos principais avanços atingidos pela construção desta bancada, em relação aos equipamentos utilizados na Alemanha. Este avanço é melhor discutido a seguir, no item 6.2.

5.2 Fontes de Soldagem

As fontes de soldagem utilizadas na bancada brasileira foram totalmente desenvolvidas no LABSOLDA, em trabalhos anteriores (Gohr Jr; 1992 e 2002).

Para o circuito MIG foi utilizada a fonte MTE Digitec 600 (figura 5.1). Trata-se de uma fonte chaveada no secundário, utilizando-se transistores IGBT, com controle de corrente realizado pela comparação de valores extremos. Este tipo de tecnologia permite que a máquina tenha dinâmica suficiente para corrigir a corrente do arco, frente a eventuais mudanças na impedância do circuito. A Digitec permite a soldagem com imposição de corrente contínua, controle de tensão e corrente pulsada no modo convencional e misto. O controle da corrente de soldagem, velocidade do arame e outros dispositivos como a unidade de refrigeração de pistola e tempos de pré e pós-gás são controlados por uma placa microprocessada e software integrado ao equipamento. Esta fonte permite a soldagem com os processos MIG/MAG, TIG, Eletrodo Revestido e Plasma.

Todas as variáveis do processo da Digitec também podem ser comandadas por um microcomputador, desde que equipado com entradas e saídas analógicas e digitais. Para tanto, é necessária a utilização de uma placa eletrônica responsável pelo interfaceamento fonte / computador e de software apropriado.

Para o arco PLASMA foi utilizada uma fonte Inversal 300 (figura 5.2), também desenvolvida pelo LABSOLDA a partir do desenvolvimento de uma dissertação de mestrado (Gohr Jr, 1992). A fonte Inversal 300 permite todas as possibilidades oferecidas pela fonte MTE Digitec 600, além de efetuar soldagens com corrente alternada de onda retangular. Com a Inversal também é possível o comando e controle de variáveis de soldagem por um computador.



Figura 5.1 – Fonte de soldagem MTE Digitec 600.

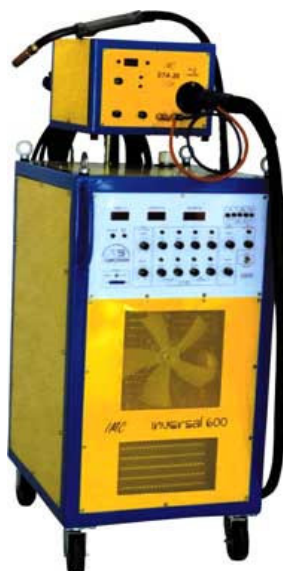


Figura 5.2 – Fonte de Soldagem INVERSAL 300

5.3 Sistema de controle e aquisição de parâmetros de soldagem

O processo Plasma-MIG, em função da complexidade gerada pela coexistência dos dois arcos voltaicos em uma mesma pistola, apresenta certas particularidades na regulagem e controle das variáveis, principalmente no procedimento de inicialização da solda. Para se obter um procedimento confiável da abertura de arco utilizando-se procedimento “Soft Start”, manutenção dos arcos durante a soldagem e controlar a transferência metálica foi necessário o desenvolvimento de um sistema capaz de comandar as duas fontes de forma simultânea. Além disto, a bancada deveria contar com um sistema para proceder a aquisição e armazenamento de dados de soldagem para os dois arcos necessários ao processo.

O sistema de controle da bancada é baseado em um microcomputador PC, equipado com duas placas de aquisição e comando de sinais analógicos e digitais, denominada de “Interdata” (Desenvolvimento do LABSOLDA – Fig. 5.3). Esta placa possui um conector compatível com o barramento de 16 bits de microcomputadores da linha PC e é equipada com as seguintes unidades:

- a) Um conversor A/D de 16 canais, com 14 dos quais plenamente disponíveis para aquisição de dados. Dois deles são utilizados com alimentação interna de 0 V e 9 V para uma autocalibração;
- b) Um conversor D/A de 8 canais;
- c) Um freqüencímetro;
- d) Uma porta digital com 8 entradas e 8 saídas

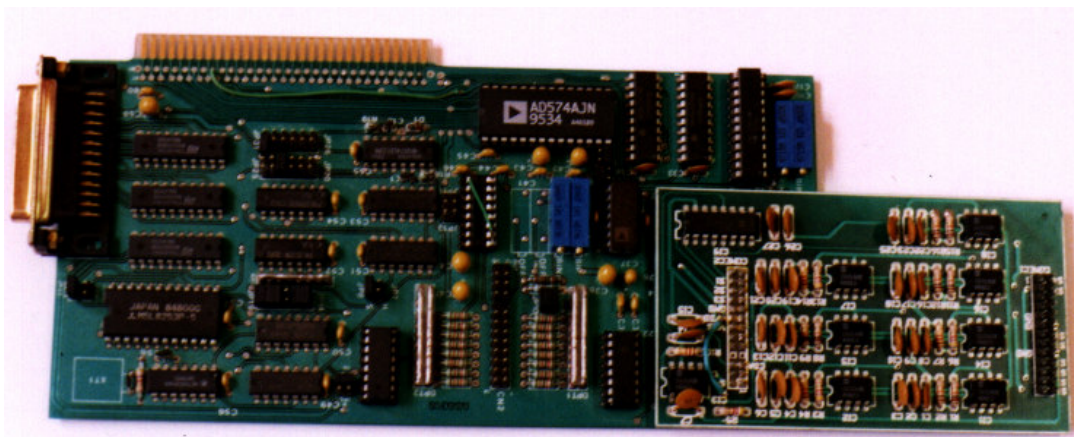


Figura 5.3 – Placa de aquisição e controle de sinais INTERDATA

A utilização de duas destas placas foi necessária em função da limitação da placa em trabalhar em alta velocidade com três sinais de saída analógicos. Estes três sinais são utilizados para comandar a) a corrente MIG; b) a velocidade do arame e c) a corrente plasma. A alta velocidade de processamento é exigida, pois foi previsto a utilização de corrente pulsada nos dois circuitos, com regulagens nos tempos de pulso e base com resolução de 0,0001 s, permitindo ainda defasagem de pulsos entre as correntes Plasma e MIG.

Para controlar todos os parâmetros de soldagem, por uma interface simples e prática, foi necessário o desenvolvimento de um software especialmente projetado para este trabalho. Este programa, denominado de “P-MIG” concentra as atribuições de controlar as duas fontes de soldagem (fonte MTE Digitec 600 e Inversal 300) simultaneamente. O PMIG possibilita regular os seguintes parâmetros:

- a) Corrente MIG de Pulso;
- b) Corrente MIG de Base;
- c) Tempo de Pulso;
- d) Tempo de Base (Os tempos de pulso e de base são iguais para os dois arcos voltaicos);
- e) Corrente Plasma de Pulso;
- f) Corrente Plasma de Base;
- g) Tempo de defasagem entre os pulsos de corrente Plasma e MIG
- h) Velocidade do Arame;
- i) Corrente Plasma de Pré-Aquecimento;

j) Tempo de Pré-Aquecimento – o software permite que, no início da soldagem, seja possível conduzir um pré-aquecimento da junta utilizando-se somente o arco Plasma.

l) Corrente de abertura;

m) Velocidade de aproximação e retrocesso do arame (Estes dois últimos parâmetros são relativos ao procedimento de abertura “Soft-Start” - vide item 2.4.2).

O software P-MIG também faz a monitoração da abertura do arco plasma: Em determinadas situações, o Soft-Start pode falhar no procedimento de abertura do arco plasma. Quando isto ocorre, o arame pode ser tracionado para dentro da pistola de soldagem indefinidamente, se o sistema não contar com este monitoramento. O P-MIG tem um limite de tempo pré-determinado para que ocorra a abertura do arco plasma. Na figura 5.4 é apresentada a interface do PMIG com o usuário.

Para fazer o monitoramento das variáveis elétricas de soldagem durante os ensaios, é necessária a utilização de um segundo computador, também equipado com uma placa “Interdata”. Neste caso, a placa é somente utilizada para fazer a aquisição de sinais analógicos, que são capturados diretamente das saídas das fontes de soldagem. Também foi desenvolvido um software de aquisição de dados dedicado ao Plasma-MIG. Com este software, denominado de OSCILOS-PM (figura 5.5), é possível fazer a medição e armazenamento das correntes e tensões dos arcos Plasma e MIG simultaneamente, em 5 kHz por canal. O OSCILOS-PM possui uma interface gráfica capaz de apresentar os dados coletados de duas variáveis, na forma de oscilogramas, e pode exportar os dados dos quatro canais na forma de tabela para posterior tratamento gráfico e estatístico.

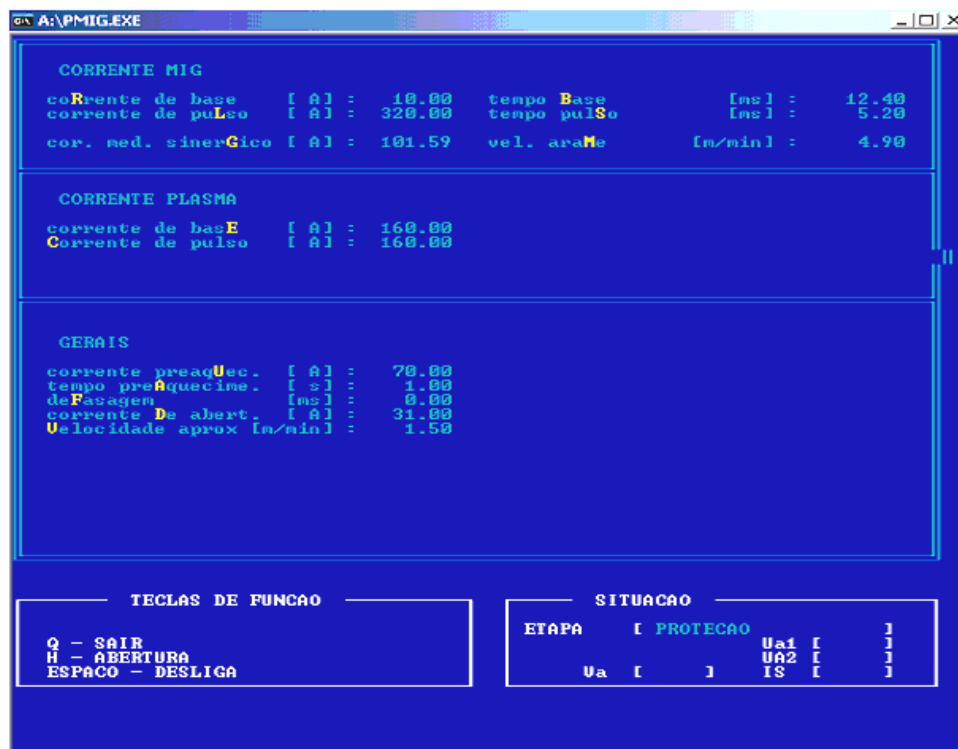


Figura 5.4 – Interface do software PMIG, para controle da bancada do LABSOLDA

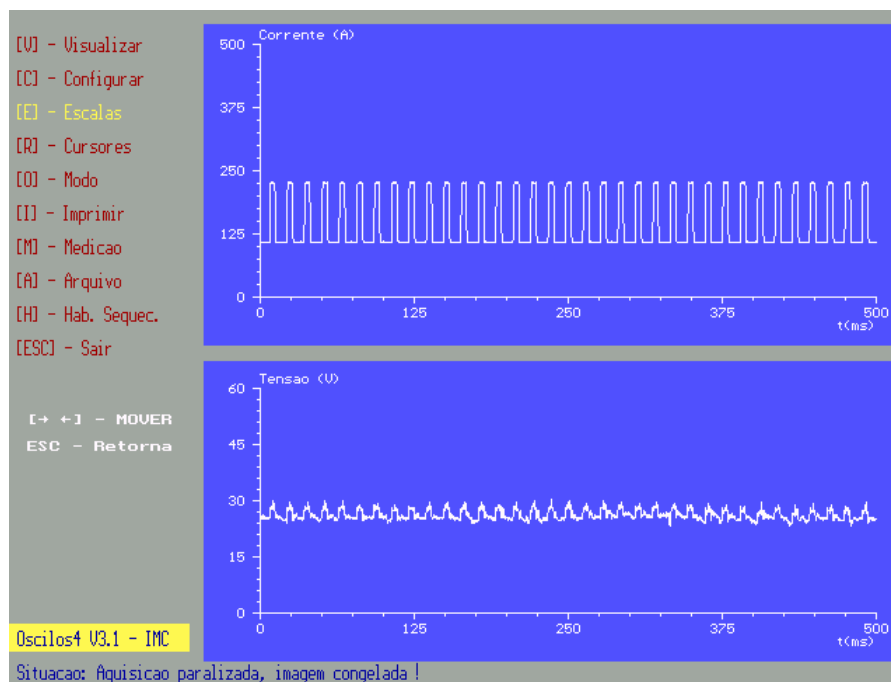


Figura 5.5 – Interface do sistema de aquisição de dados desenvolvido para o Plasma-MIG

A figura 5.6 mostra os dois computadores utilizados para controle e aquisição de dados e a figura 5.7 mostra a central de controle e aquisição, cilindros

de gases e as duas fontes de soldagem utilizadas. Na figura 5.8 é apresentado um desenho esquemático da bancada de controle.



Figura 5.6 – Computadores de controle e aquisição de dados



Figura 5.7 – Central de controle e aquisição e fontes de soldagem

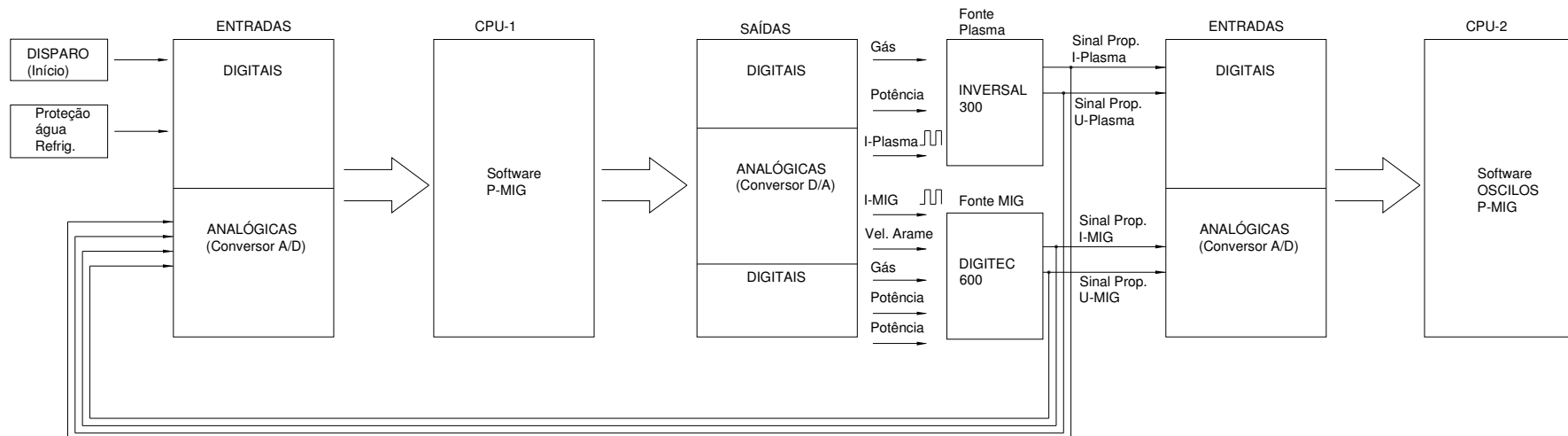


Figura 5.8 – Esquema da bancada Plasma-MIG desenvolvida no LABSOLDA

5.4 Circuito Hidráulico (água de refrigeração)

Como mencionado anteriormente, a refrigeração é um fator primordial para a integridade das peças da pistola de soldagem. Os três pontos críticos que devem ser constantemente arrefecidos durante a execução de uma solda são: a) o eletrodo plasma; b) o bico de contato MIG e c) o bocal constritor. A pistola utilizada nesta bancada conta com três circuitos independentes de água para o resfriamento destas peças e exige, portanto, três sistemas de refrigeração independentes.

As fontes de soldagem DIGITEC e INVERSAL já possuem unidade de refrigeração integrada. Para compor o terceiro sistema de refrigeração de água, foi escolhida a UPR 7500, uma unidade de arrefecimento de água fabricada pela empresa IMC-Soldagem.

Cada unidade de refrigeração é composta pelos seguintes itens:

- Um reservatório de água, com capacidade para 2,5 l de água;
- Um radiador com área de troca de 300 x 300 mm;
- Uma bomba de água, com capacidade de bombeamento de 2 l/min.

Qualquer falha do sistema de refrigeração pode causar danos irreparáveis na pistola de soldagem. Em função disto, foi utilizado um sensor de fluxo de água em cada um dos circuitos de refrigeração. Estes sensores são conectados ao microcomputador de controle, e são monitorados pelo software P-MIG. Se eventuais falhas na circulação de água forem detectadas, o P-MIG suspende toda a operação de soldagem, extinguindo os arcos voltaicos e cortando a alimentação de arame, ou simplesmente não permitindo que o processo seja iniciado.

Na figura 5.9 é apresentado um diagrama esquemático do circuito de refrigeração de pistola.

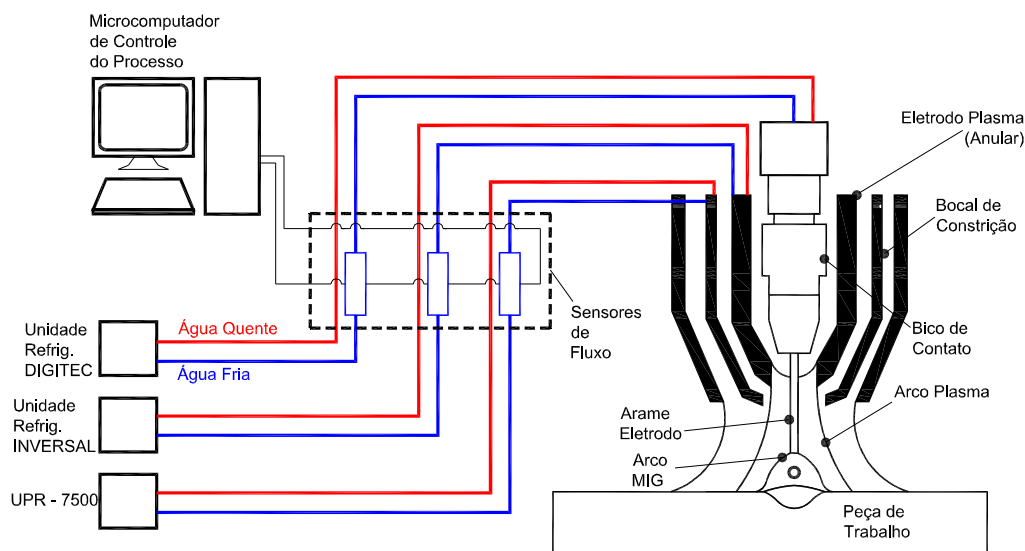


Figura 5.9 – Diagrama Esquemático do circuito de refrigeração da pistola Plasma-MIG

5.5 Robô de 6 eixos e mesa rotativa para a realização de soldagens automáticas

A bancada conta com um robô de 6 eixos, modelo UP-6, fabricado pela empresa MOTOMAN (figura 5.10). Este robô apresenta 8 entradas e 8 saídas digitais e 3 saídas analógicas, que servem para comunicação com periféricos e foram utilizadas para diversas funções, como permitir a comunicação entre o robô e o software P-MIG, nos procedimentos de abertura e finalização do procedimento de soldagem.

Este robô foi adaptado para que fosse possível a condução de ensaios com o processo Plasma-MIG. A primeira adaptação necessária foi a construção e montagem de um cabeçote, que foi instalado sobre o terceiro eixo do robô, como mostra a figura 5.11. Além de ser equipado com o motor e sistema mecânico para desentortar e tracionar o arame, este cabeçote possui todas as conexões elétricas, de água e de gás necessárias para o funcionamento do processo Plasma-MIG. O rolo de arame também foi fixado junto ao robô, com o objetivo de reduzir problemas de flutuação da velocidade do arame causados pelos movimentos durante a soldagem. A segunda adaptação necessária foi a construção de uma garra projetada para que o robô pudesse sustentar uma pistola plasma-MIG na extremidade do sexto eixo (figura 5.12).

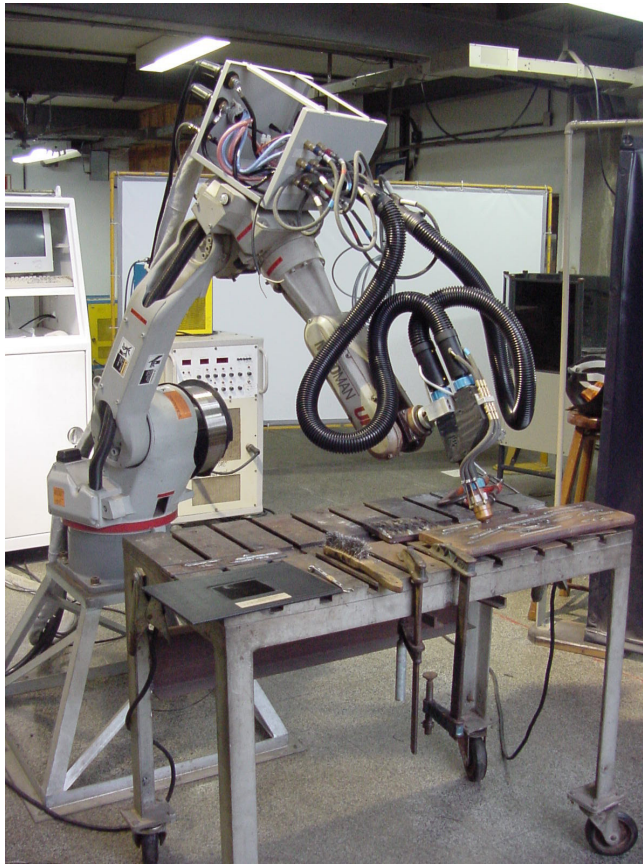


Figura 5.10 – Robô UP-6 adaptado para a soldagem Plasma-MIG

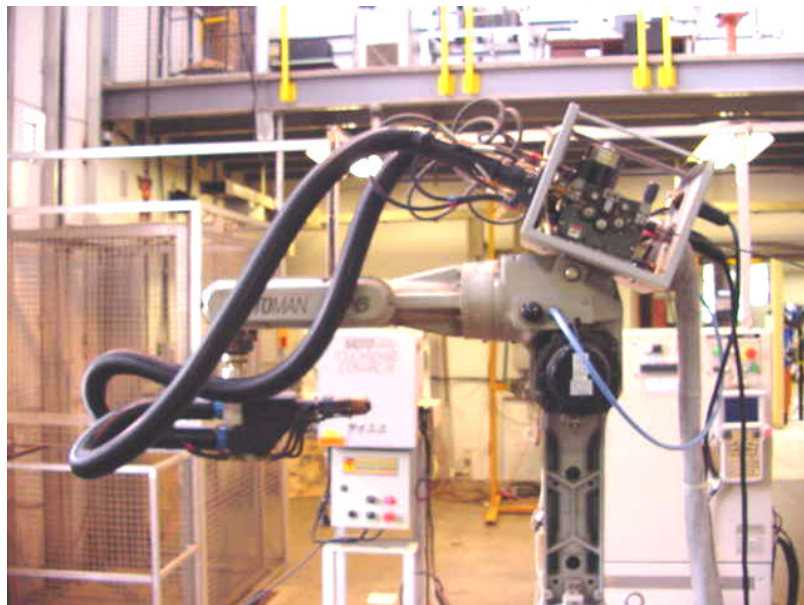


Figura 5.11 – Adaptação do Cabeçote para tracionamento do arame e conexões elétricas, de gás de proteção e de água de refrigeração



Figura 5.12 – Adaptação da extremidade do sexto eixo para suportar a pistola Plasma-MIG

A bancada também conta com uma mesa rotativa, fabricada pela empresa TECNISOLDA (figura 5.13). A velocidade de rotação da mesa é controlada por um inversor de frequência, e pode variar de valores abaixo de 1 até 15 RPM. Suporta até 400 kg e possui base articulada, que permite inclinação da peça entre 0° e 115°. O início e finalização do movimento, sobreposição no final da soldagem e final de curso, bem como a velocidade de rotação podem ser controlados pelo robô, utilizando-se suas portas digitais e analógicas.

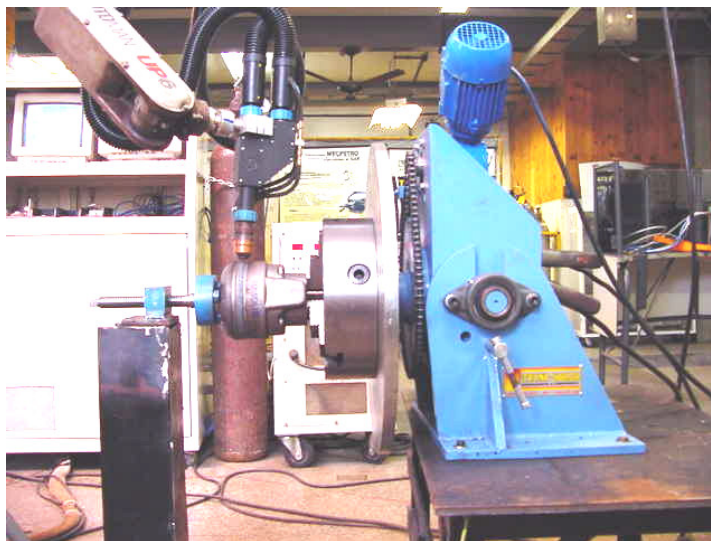


Figura 5.13 – Mesa rotativa comandada pelo robô UP-6

5.6 Pistola de Soldagem

A pistola de soldagem empregada nesta bancada é fabricada pela empresa TBI-Industries (figura 5.14). Esta pistola foi selecionada em função de sua durabilidade e praticidade, que foram características observadas durante a fase alemã do desenvolvimento.

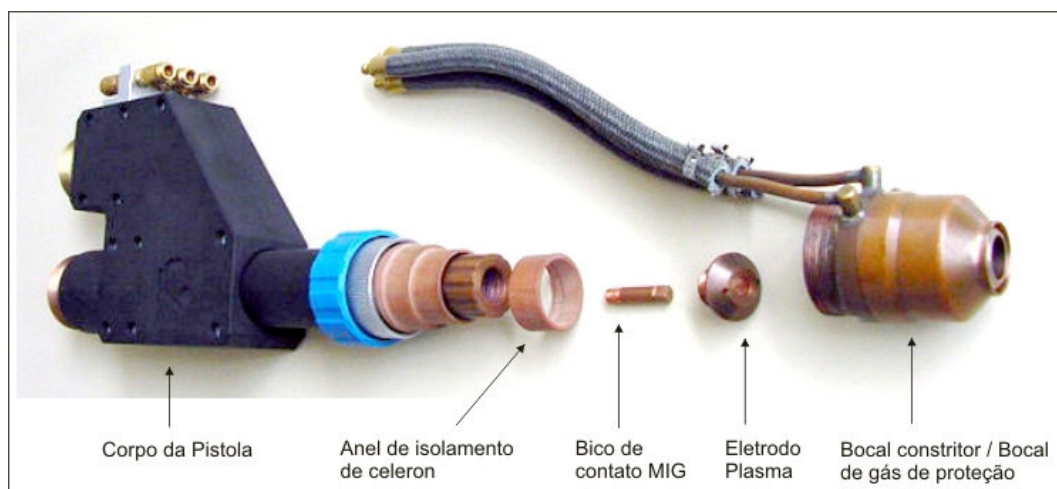


Figura 5.14 – Pistola de soldagem Plasma-MIG, marca TBI.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados dos experimentos realizados bem como melhoramentos tecnológicos que contribuem para o melhor funcionamento do processo Plasma-MIG.

Inicialmente apresenta-se um estudo para identificar os principais problemas relativos ao acendimento do processo através do sistema “Soft-Start”. Após a identificação de causas de falta de repetibilidade neste processo, são propostas e realizadas melhorias, com o objetivo de melhorar o desempenho do processo em sua inicialização.

Em seguida são apresentados resultados referentes a um estudo realizado sobre a falta de estabilidade do arco plasma quando ocorrem curtos-circuitos no arco MIG, utilizando-se a análise oscilográfica de tensão e corrente dos arcos. Além disso, são apresentados levantamentos de curvas de característica estática do processo e interações existentes entre os arcos plasma e MIG e um modelo que descreve a influência das correntes MIG e Plasma sobre as tensões dos dois arcos.

Também são propostas equações capazes de calcular a taxa de alimentação de material de adição em função das correntes Plasma e MIG e são realizados experimentos para identificar a influência destes dois parâmetros sobre o destacamento e transferência de gotas. Com estes resultados são criadas as condições para a formulação de um comando sinérgico para o processo Plasma-MIG.

Após o estudo destas características do processo, foram conduzidos experimentos para identificar a influência das correntes Plasma e MIG sobre as características geométricas de cordões depositados sobre chapa.

6.2 Refinamento do sistema SOFT-START para abertura do arco plasma.

A abertura do arco plasma, no processo Plasma-MIG, pode ser efetuada utilizando-se ignição por alta frequência, ou pelo sistema denominado de “Soft-Start” (descritos no item 2.4). Conforme mencionado anteriormente, uma das bancadas

alemãs trabalha com o acendimento por alta frequência e a outra pelo método “Soft-Start”.

Observou-se que a utilização do acendimento por alta frequência causa uma série de problemas provocados pela emissão de fortes ruídos eletromagnéticos, já que a potência dos pulsos de alta tensão tem de ser bastante elevada, em função da geometria circular do eletrodo plasma. Interferências foram observadas em vários componentes da bancada de soldagem e em bancadas vizinhas à do Plasma-MIG.

Na própria bancada Plasma-MIG observa-se, por repetidas vezes, que durante o procedimento de abertura do arco plasma, os microprocessadores das fontes de soldagem sofrem interferência. Neste caso, o ruído provoca o desligamento das fontes de soldagem ou, em casos mais drásticos, o sistema de controle de corrente é afetado. As correntes de soldagem e a velocidade do arame ficam então descontroladas, causando a destruição (fusão) do eletrodo plasma, bocal constritor e bico de contato MIG.

Os computadores da bancada, responsáveis pelo controle e aquisição de dados também são eventualmente afetados pelo ruído, que pode causar travamento do sistema operacional ou mesmo o desligamento das máquinas. Além disto, o ruído afeta as bancadas vizinhas, chegando a causar interferência em robôs utilizados em outros experimentos.

Já a bancada alemã de n. 2 utiliza o sistema de abertura do arco plasma “Soft Start”. Este método não causa nenhum tipo de ruído ou interferência ao meio adjacente, em função de sua própria natureza, pois o arco plasma é aberto por uma espécie de “lift arc” na parte MIG do processo.

Na soldagem de alumínio, o “Soft Start” funciona muito bem, proporcionando a abertura do arco sem qualquer instabilidade ou respingo. Entretanto, na soldagem de aço carbono problemas foram constantemente observados. Conforme explicado anteriormente (item 2.4), no início do procedimento de abertura, o arame avança em direção à peça de soldagem, toca a peça e em seguida é retrocedido em direção ao bico de contato, mantendo-se uma corrente de arco baixa. Já na soldagem de aço carbono, observa-se que imediatamente após o curto-circuito, o arame adere à peça de soldagem, não retornando em direção ao bico de contato. Por vezes, esta aderência não é tão intensa. Entretanto, quando o arame se desprende da peça, é violentamente puxado para cima, causando extinção do arco de baixa potência e prendendo o arame ao bico de contato.

O oscilograma da figura 6.1 mostra um procedimento “Soft Start” interrompido pela aderência do arame à superfície da peça a ser soldada. No momento em que o arame toca a peça de soldagem, a fonte deveria impor a corrente de abertura em torno de 20 A. Entretanto, o que realmente ocorre é um pico de corrente, que atinge quase 200 A, e causa um pequeno faiscamento no momento do contato, fusão da ponta do arame e conseqüente aderência na superfície da peça. Este pico de corrente é provocado em função do sistema de controle de corrente da fonte utilizada na bancada de n. 2, que é baseado no monitoramento dos valores médios de corrente (Unitrode, 1986). Neste sistema, a medição da corrente do arco é realizada pela média de um conjunto de valores instantâneos. Se ocorrer alguma variação da corrente durante a medição deste conjunto de valores, a fonte de soldagem só vai corrigir este desvio no intervalo de pontos subseqüente.

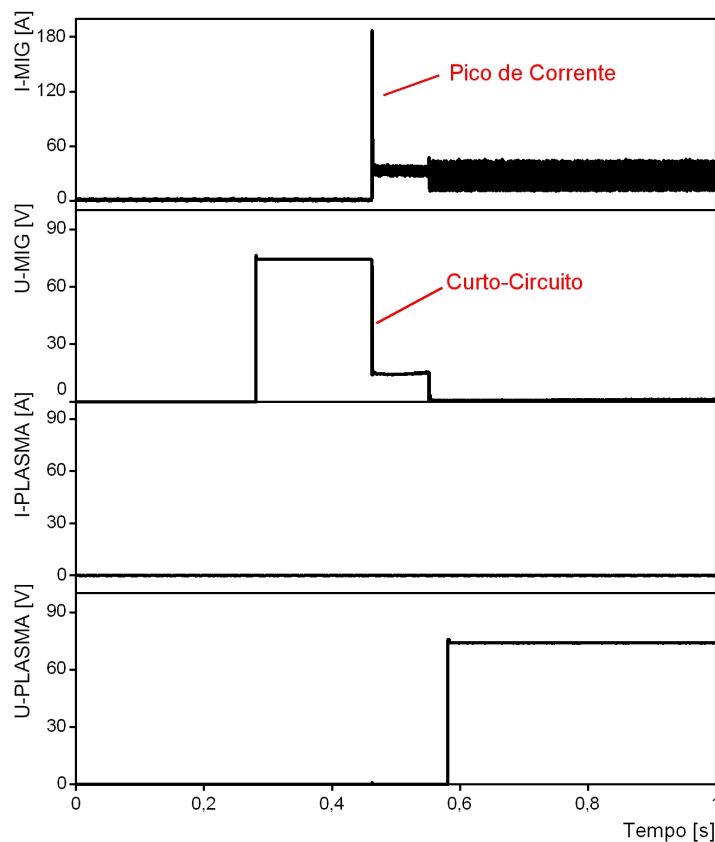


Figura 6.1 – Aderência do arame na peça, durante o procedimento de soft start.

Na soldagem de alumínio, este pico de corrente também foi observado, entretanto o arame não adere à peça de soldagem, provavelmente pelo fato do alumínio possuir baixa resistência elétrica e elevada condutividade térmica, quando

comparado com o aço. Estas propriedades provocam menor geração de energia por efeito joule na ponta do arame e rápida dissipação do calor gerado, não criando condições para a fusão da ponta do arame e conseqüente aderência na peça de soldagem.

Na bancada LABSOLDA o problema do pico de corrente foi naturalmente eliminado (figura 6.2), pois as fontes utilizadas controlam a corrente de valores extremos (Gohr Jr, 2002). Nesta forma de controle, a corrente é monitorada constantemente e as correções são efetuadas instantaneamente no caso de variações de carga.

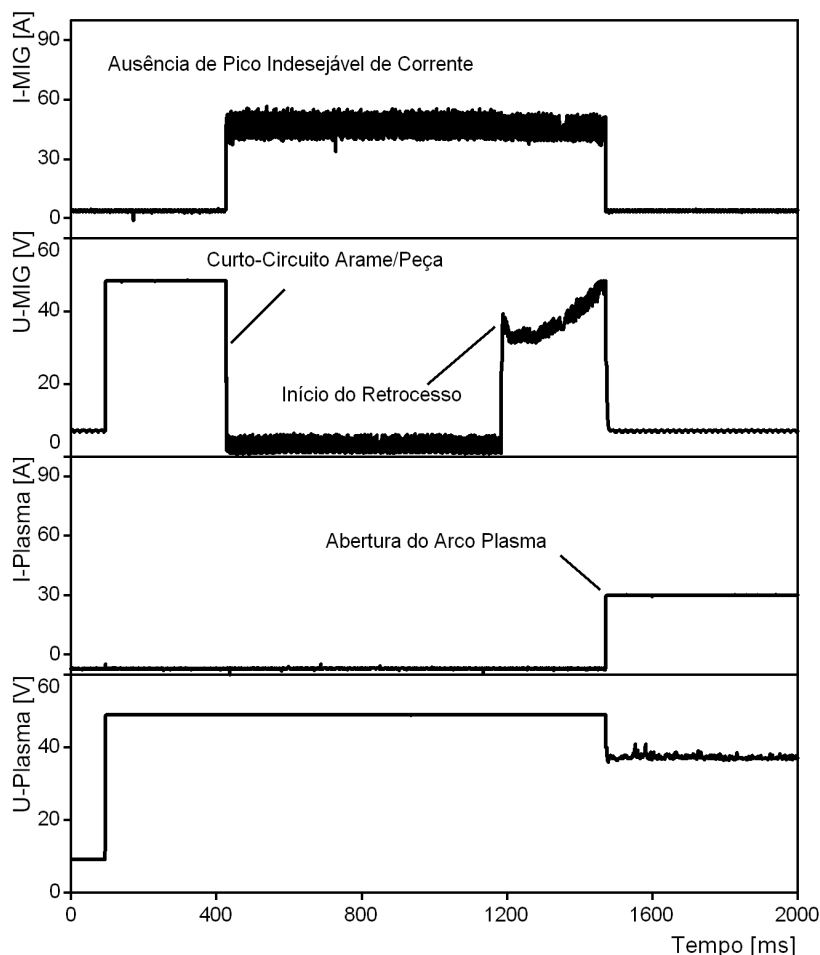


Figura 6.2 – Procedimento de abertura Soft-Start na bancada LABSOLDA

Apesar do melhor controle da corrente no início do procedimento de abertura do arco, o arame eventualmente ainda aderiria à peça de soldagem. Uma redução na corrente de abertura foi testada, com o objetivo de reduzir a energia disponível durante o tempo em que o arame permanece em contato com a peça.

Esta medida eliminou o risco de aderência do arame, mas o nível muito baixo de corrente não permitiu o acendimento de um arco piloto estável durante o retrocesso do arame em direção ao bico de contato.

A solução encontrada foi a utilização de dois níveis de corrente. O primeiro nível com correntes na ordem de 10 A foi utilizado durante o tempo de contato arame/peça. Assim que o arame começa a ser retrocedido e a fonte detecta que o contato foi rompido, em função do aumento súbito da tensão, um segundo nível de corrente da ordem de 30 A é imposto (figura 6.3). Desta forma não ocorre fusão da ponta do arame durante o contato com a peça e é garantida a manutenção da estabilidade do arco piloto durante a fase de retrocesso. Esta estratégia melhorou sensivelmente o desempenho do “soft start”, sendo que os problemas de abertura foram praticamente eliminados. Este resultado é considerado um dos pontos relevantes deste trabalho, pois viabiliza a utilização do “Soft Start” em aplicações totalmente automatizadas.

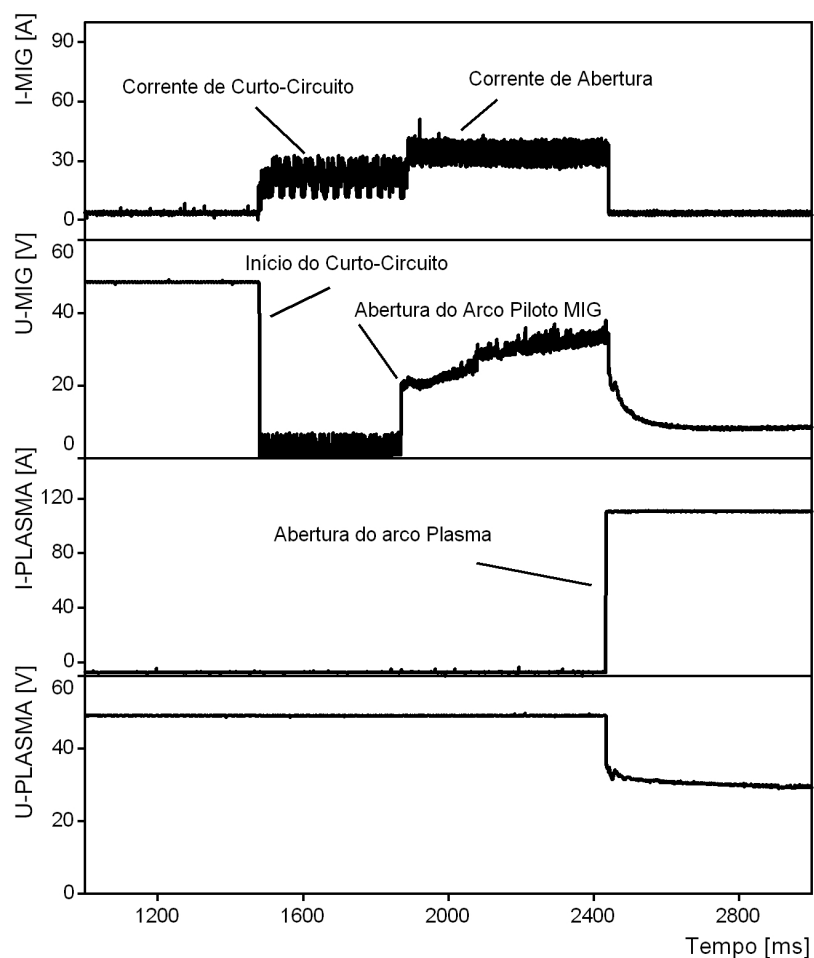


Figura 6.3 – Abertura por "Soft Start" Modificado – Oscilograma real obtido durante um procedimento de abertura utilizando-se arame de aço carbono.

6.3 Instabilidades Causadas por Curtos-Circuitos entre o arame-eletrodo e a peça de trabalho

Os primeiros ensaios realizados para este trabalho com o processo Plasma-MIG foram conduzidos na bancada de N. 2, utilizando-se controle de tensão para a fonte MIG e imposição de corrente para a fonte Plasma. Utilizando-se argônio puro nos três gases do processo, observou-se certa estabilidade dos arcos voltaicos, na transferência por curto-circuito, na soldagem de alumínio e de aço carbono. Entretanto, os cordões realizados em aço carbono com argônio puro apresentaram falta de molhabilidade e altura excessiva do reforço. Este fato também ocorre no processo MIG convencional, quando se utiliza argônio puro para a soldagem de aço carbono. Normalmente utiliza-se CO_2 ou misturas deste com argônio para contornar este problema. Assim, uma tentativa de utilização de misturas de $\text{Ar} + \text{CO}_2$ foi conduzida, com o objetivo de melhorar a geometria do cordão de solda.

Inicialmente foi observado que a utilização de misturas de até 25% de CO_2 no gás de proteção ou no gás de plasma não traz benefício visível ao aspecto geométrico do cordão e exerce pouca influência sobre a estabilidade dos arcos voltaicos. Já quando se utiliza apenas 4% de CO_2 no gás MIG, a molhabilidade do cordão melhora sensivelmente. Todavia, nestas condições a estabilidade dos arcos piora quando ocorrem curtos-circuitos entre o arame-eletrodo e a peça de trabalho. O oscilograma da figura 6.4 ilustra estas instabilidades.

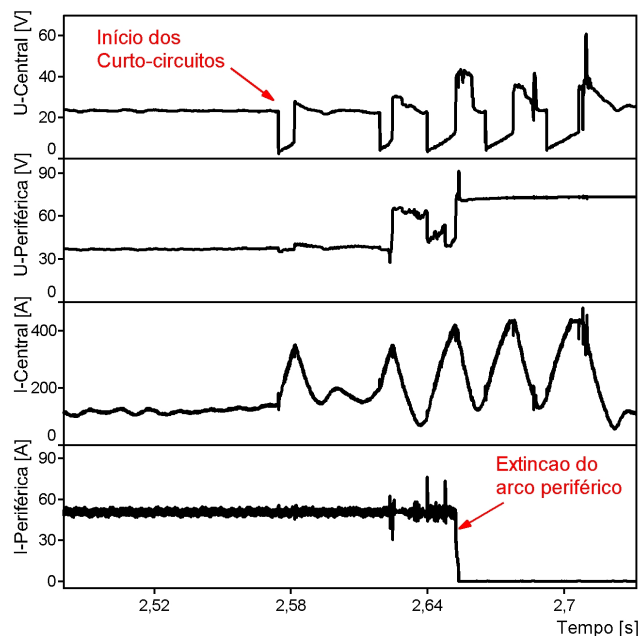


Figura 6.4 – Instabilidades no arco Plasma causadas por curtos-circuitos arame-eletrodo/peça

No início do oscilograma observa-se que a soldagem vem se mantendo relativamente estável. Em seguida, uma pequena oscilação na velocidade do arame causa o primeiro curto circuito. Neste instante, observa-se apenas uma pequena oscilação na tensão plasma, mas após o curto circuito o arco plasma continua estável. No final do segundo curto circuito observa-se uma repentina queda da tensão plasma. Neste instante, acredita-se que o arco plasma deixa de circular entre o eletrodo anular e a peça de soldagem, e passa a circular entre o eletrodo anular e o bico de contato (figura 6.5), pois o arame em curto com a peça de trabalho se constitui em um caminho de menor impedância para a passagem da corrente plasma. Outro fator que contribui para a migração do cátodo do arco plasma para o bico de contato é o aumento da força eletromagnética causada pelo pico de corrente MIG, o que provavelmente comprime o arco Plasma em direção ao arame. No momento em que o cátodo do arco Plasma migra para o bico de contato, as duas correntes passam a circular pelo arame-eletrodo, o que explica um aumento instantâneo da tensão Plasma, que se mantém em um patamar mais elevado. Mesmo após a reabertura do arco MIG, a corrente plasma continua circulando através do arame, pois a tensão não cai aos valores anteriores aos curtos-circuitos. No terceiro curto-circuito, observa-se que o arco plasma ainda se mantém aceso, pois a corrente plasma continua circulando. Entretanto, imediatamente após a reiginição do arco MIG, observa-se que a tensão plasma sofre um pico muito elevado, causando a extinção do arco plasma. A partir deste ponto, uma série de curtos-circuitos ocorre, e o processo é totalmente instabilizado.

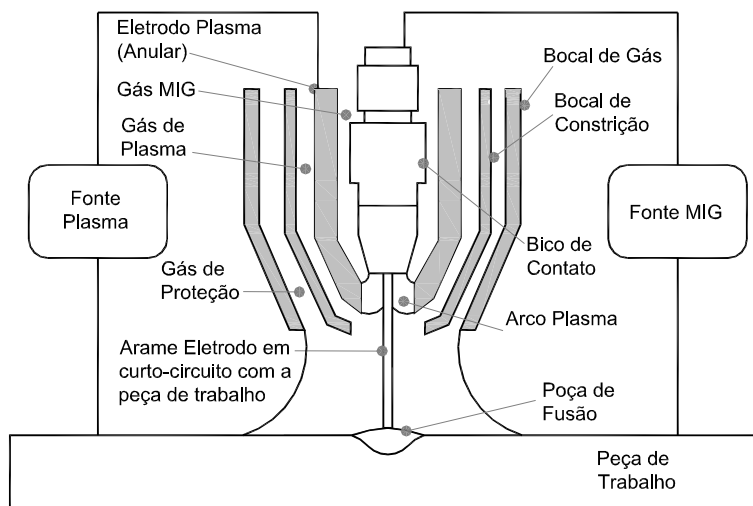


Figura 6.5 – Migração do arco Plasma para o bico de contato e arame MIG

Com o objetivo de impedir a migração do cátodo do arco plasma para o bico de contato durante a ocorrência de curtos-circuitos, foi utilizado um bocal cerâmico de isolamento, inserido no interior da pistola, entre o eletrodo plasma e o bico de contato. Entretanto, este bocal cerâmico não impede esta migração, pois não restringe completamente o espaço entre o eletrodo plasma e o arame e bico de contato MIG. A passagem do arco plasma nas proximidades deste bocal cerâmico causa sua fusão, como mostra a figura 6.6.

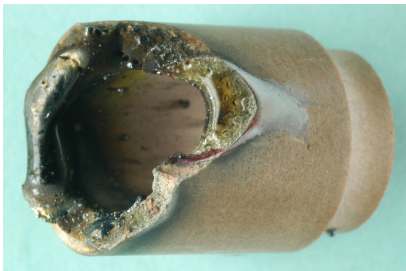


Figura 6.6 – Bocal de isolamento cerâmico danificado pelo arco plasma

Uma bucha de isolamento de nylon foi então projetada, para ocupar todo o espaço existente entre o eletrodo plasma e o bico de contato, conforme ilustrado na figura 6.7. Esta bucha impede que o arco plasma chegue até o bico de contato MIG, inviabilizando assim a migração de seu cátodo. Foi possível, então, transferência de baixa regularidade por curto-circuito, mesmo utilizando-se CO_2 no gás MIG, conforme mostra o oscilograma da figura 6.8. Todavia o nylon, por se tratar de um material de baixo ponto de fusão, não resiste a um tempo de soldagem considerável (figura 6.9), e também acaba sendo avariado pelo calor.

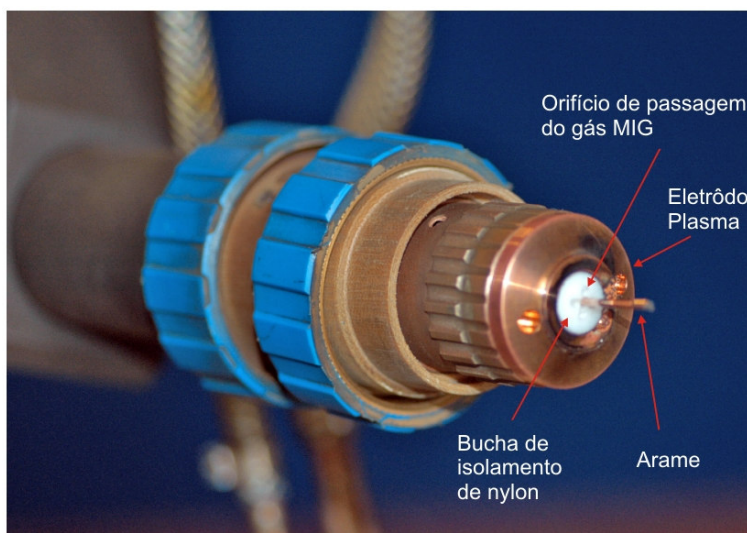


Figura 6.7 – Pistola Plasma-MIG adaptada com bucha de isolamento de nylon

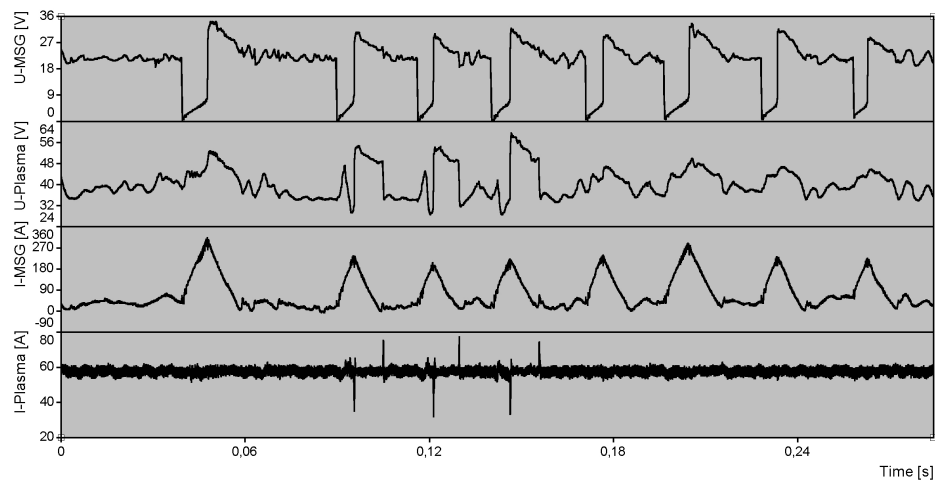


Figura 6.8 – Oscilograma de soldagem Plasma-MIG com curto transferência metálica por curto-circuito em atmosfera de Ar + CO₂ sem extinção do arco plasma.



Figura 6.9 – Bucha de Nylon danificada pela ação do arco plasma

Durante os ensaios, observou-se também que a região anódica do arco plasma, quando o processo é estável, se localiza sobre a superfície do eletrodo plasma mais próxima do arame-eletrodo. Provavelmente, isto ocorre em função da força de atração eletromagnética. A geometria interna real do eletrodo plasma utilizado inicialmente é apresentada na figura 6.10 (o bocal de gás de proteção e bocal constritor foram omitidos nesta figura, para simplificar a visualização do eletrodo plasma). Observa-se que esta geometria apresenta uma superfície cilíndrica

ao redor do arame-eletrodo. Em função de análise de eletrodos anulares utilizados em diversos ensaios, observou-se que a região anódica do arco plasma se localiza exatamente sobre esta superfície cilíndrica, e que esta geometria deixa o arco plasma muito próximo do bico de contato MIG.

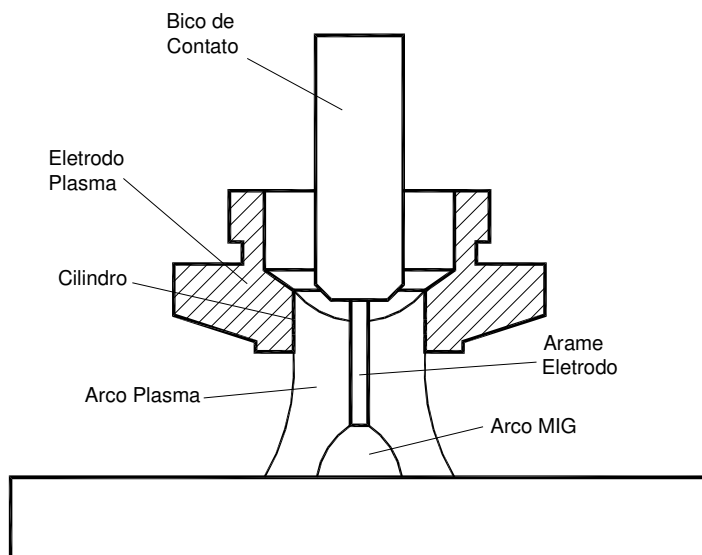


Figura 6.10 – Projeto Original do Eletrodo Plasma / Pistola

Na figura 6.10 observa-se também que o projeto original do eletrodo plasma apresenta uma aresta que se localiza muito próximo ao bico de contato MIG. Este tipo de aresta normalmente concentra maiores temperaturas, favorecendo que a região anódica se localize nesta região. Desta forma, a região anódica do arco plasma provavelmente se concentra nas proximidades desta aresta, no interior do eletrodo plasma.

Com o objetivo de afastar o arco plasma do bico de contato MIG e deslocar a região anódica para uma região mais próxima da peça de soldagem, foi projetado e fabricado para o desenvolvimento do presente trabalho, um eletrodo plasma com a geometria apresentada na figura 6.11. Observa-se que todas as arestas internas do eletrodo plasma foram eliminadas e que o bico de contato MIG foi afastado do arco plasma.

Os resultados obtidos, em relação à estabilidade do arco plasma foram muito satisfatórios, pois este projeto de eletrodo dificulta a sua migração para o bico de contato MIG, fazendo com que o processo apresente maior resistência à eventual ocorrência de curtos-circuitos.

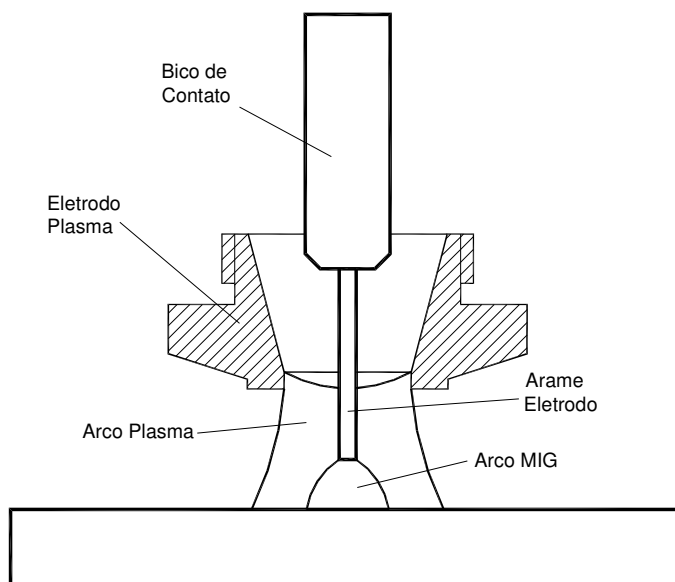


Figura 6.11 – Eletrodo Plasma Modificado

Apesar destas melhorias realizadas no projeto da pistola, não foi possível a soldagem Plasma-MIG de aço carbono com transferência por curto-circuito, utilizando-se misturas ativas no gás MIG, que apresentassem estabilidade satisfatória.

Na soldagem Plasma-MIG de alumínio, a estabilidade do processo com transferência por curto-circuito é dependente no nível de potência que se utiliza. Somente em baixas velocidades do arame é possível a soldagem com este tipo de transferência.

6.4 Característica Estática do Processo Plasma-MIG

Experimentos de soldagem de simples deposição sobre chapa foram conduzidos, as tensões MIG e Plasma foram mensuradas, para diferentes níveis de corrente, com o objetivo de avaliar a interação existente entre os arcos.

Inicialmente, um experimento foi conduzido para observar o comportamento da característica estática do arco Plasma, quando este é formado entre um eletrodo anular de cobre e uma superfície de alumínio, em atmosfera de argônio, sem a presença do arco MIG. Este ensaio foi realizado com a bancada de n. 2, com orifício constritor de 11 mm de diâmetro e eletrodo anular de 9 mm de diâmetro.

No gráfico da figura 6.12 observa-se que a curva Tensão X Corrente possui forma típica dos arcos voltaicos gerados por eletrodos permanentes, e que para um comprimento de arco de 12 mm, a tensão medida apresenta valores entre 25 e 30 V. Quando são utilizadas correntes plasma abaixo de 80 A, sem a presença do arco MIG, com a pistola da bancada n. 2, o arco plasma não se distribui uniformemente sobre a superfície do eletrodo anular, e muda constantemente de posição. Na medida em que a corrente aumenta, observa-se que o arco começa a se distribuir integralmente sobre a superfície do eletrodo, apresentando melhor estabilidade. Quando é utilizado bocal constritor com diâmetro de orifício de 9 mm, a estabilidade do arco melhora sensivelmente. A bancada n. 2 apresenta melhor estabilidade do arco plasma em baixas correntes, quando comparada à bancada n. 1, fato provavelmente causado pela geometria cônica do eletrodo e pela utilização de orifícios constritores de menor diâmetro (5 a 8 mm).

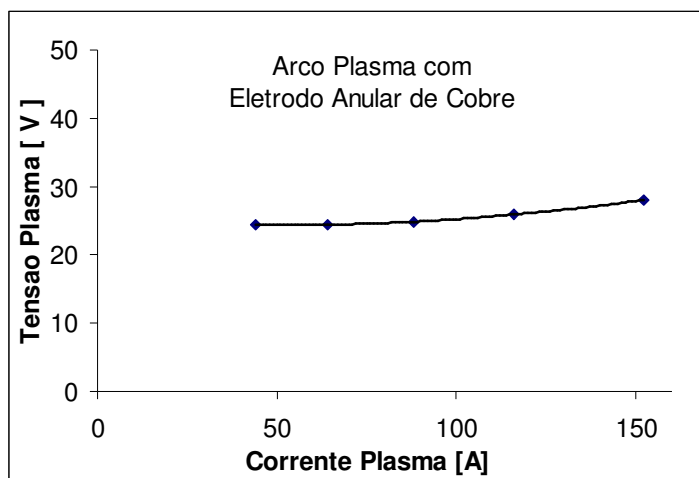


Figura 6.12 – Curva característica constante para o arco Plasma com eletrodo anular de cobre, 6 mm de diâmetro. Argônio puro como gás interno, externo e de proteção, com vazões de 5; 5 e 10 l/min respectivamente. Comprimento do arco: 12 mm.

O gráfico da figura 6.13 mostra uma curva Tensão x Corrente do arco MIG, para cinco níveis de corrente Plasma. Observa-se que somente quando a corrente Plasma é igual a zero, diferenças na tensão do arco MIG tornam-se perceptíveis. Este resultado indica que a tensão MIG não é significativamente afetada pela corrente Plasma, quando os dois arcos são utilizados simultaneamente. A literatura consultada (Jelmorini, 1975) também apresenta resultados semelhantes, sendo que a tensão do arco MIG no processo Plasma-MIG é menor quando comparada à tensão de um arco MIG/MAG para as mesmas condições de soldagem

(corrente, diâmetro do eletrodo, comprimento do arame-eletrodo e comprimento do arco).

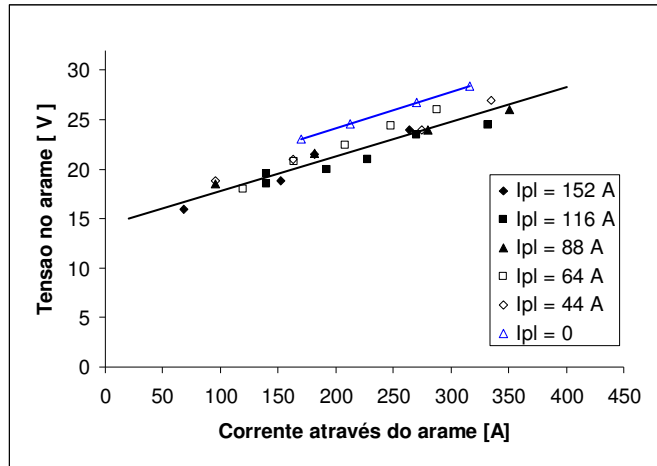


Figura 6.13 – Influência das correntes MIG e Plasma sobre a tensão MIG. Arame: AISi5, 1,6 mm de diâmetro. Argônio como gás MIG, Plasma e de proteção, com vazões de 5; 5 e 10 l/min respectivamente. Distância eletrodo plasma-peça: 12 mm. Distância bico de contato – peça: 16 mm. Distância ponta do eletrodo – peça: 4 mm.

Algumas hipóteses podem ser formuladas, na tentativa de esclarecer esta queda da tensão MIG, quando em presença do arco Plasma:

a) o arco plasma influencia as características da região anódica do eletrodo MIG, reduzindo a queda de tensão nesta região;

b) A atmosfera ao redor do arame-eletrodo já se encontra aquecida e ionizada pelo arco Plasma, o que reduz a tensão necessária para que a corrente MIG se estabeleça;

c) As características físicas da região catódica também são influenciadas pela presença do arco plasma, reduzindo a energia necessária para a emissão dos elétrons da peça para a corrente MIG.

O gráfico da figura 6.14 apresenta o resultado da medição das tensões MIG e Plasma em função da corrente que flui através do arame. Este experimento foi conduzido com arame de alumínio AISi5, 1,2 mm de diâmetro, corrente plasma de 64 A e argônio nos três gases do processo. Observa-se que a tensão MIG apresenta uma relação linear com a corrente MIG, e mesmo mantendo-se a corrente Plasma constante, a tensão Plasma também apresenta uma dependência linear crescente com a corrente MIG.

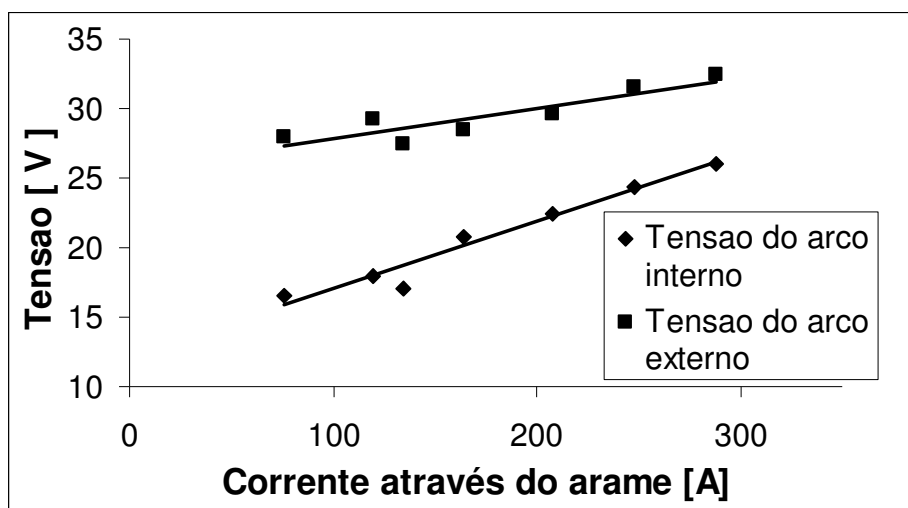


Figura 6.14 – Influência de I-MIG sobre U-MIG e U-Plasma. Arame: AISi5, 1,2 mm de diâmetro. Argônio puro como nos três gases do processo e I-Plasma = 64 A.

Este comportamento também é observado na soldagem de aço carbono, conforme mostra o gráfico da figura 6.15. O experimento foi conduzido com arame de 1,2 mm de diâmetro, utilizando-se uma mistura de Ar + 4% CO₂ no gás MIG e Ar puro nos gases plasma e de proteção, com quatro níveis de corrente plasma: 80, 120, 140 e 160 A. Pode-se afirmar que a corrente plasma exerce pouca influência sobre a tensão dos dois arcos.

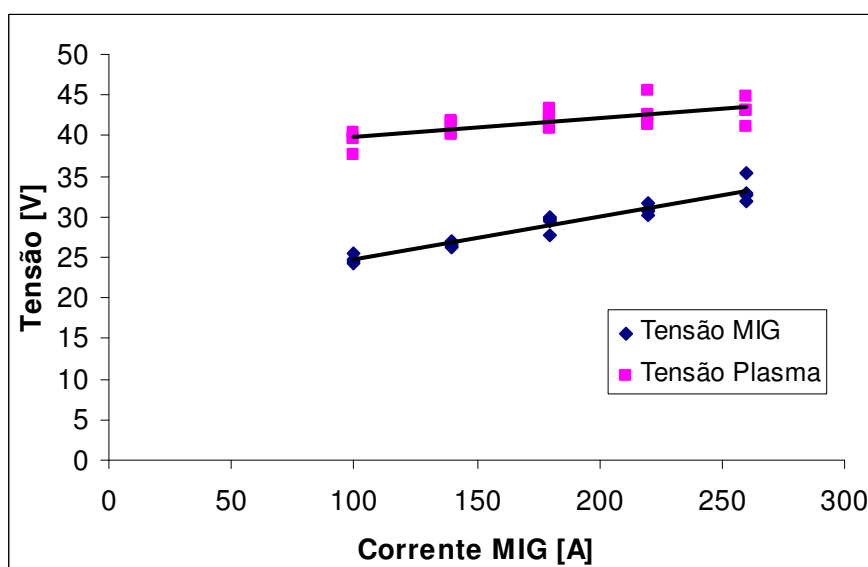


Figura 6.15 – Comportamento da tensão dos arcos plasma e MIG, em função das correntes Plasma e MIG.

Baixo [1999] também apresenta equações lineares para a corrente e a tensão de arco aberto para o processo MIG/MAG e não relaciona nenhum significado físico com os coeficientes linear e angular, obtidos por regressão linear. O comportamento estático do processo Plasma-MIG continuará sendo abordado na seqüência deste trabalho.

6.5 Características Dinâmicas do Processo Plasma-MIG

6.5.1 Correntes Constantes

Para avaliar a característica dinâmica do processo foram conduzidos ensaios iniciais, mantendo-se as correntes Plasma e MIG constantes. A velocidade do arame foi ajustada para manter uma distância de 4 mm entre a ponta sólida do arame-eletrodo e a superfície do corpo de prova, para os diversos níveis de corrente Plasma e MIG utilizados. Os ensaios foram realizados com arame de alumínio, 1,2 mm de diâmetro, utilizado-se argônio puro nos três gases do processo. Estes ensaios foram realizados na bancada brasileira.

Nestas condições, os resultados indicam que as tensões MIG e Plasma sofrem modificações instantâneas provocadas pelo modo de transferência metálica. O oscilograma da figura 6.16 mostra os sinais de corrente e tensão de um experimento realizado com corrente MIG e Plasma de 80 A. A transferência metálica ocorre em função do curto-circuito de gotas que atingem diâmetros de duas a três vezes maiores que o diâmetro do eletrodo, e é provocada principalmente pela tensão superficial quando a gota toca a poça de fusão. Apesar de a transferência ocorrer na forma de gotas grandes, não é observado a formação de respingos. A frequência de destacamento, identificado pela queda brusca da tensão MIG, é relativamente estável.

Na figura 6.17 apresenta-se um detalhe do oscilograma da figura 6.16. Em determinados curtos-circuitos, ocorre também uma redução da tensão plasma. Este fenômeno não é observado em todos os curtos-circuitos (figura 6.18), mas quando ocorre, a queda de tensão plasma é normalmente atrasada em relação á queda de tensão MIG. Porém, sempre que ocorre o aumento da tensão MIG, instantaneamente a tensão plasma também se eleva.

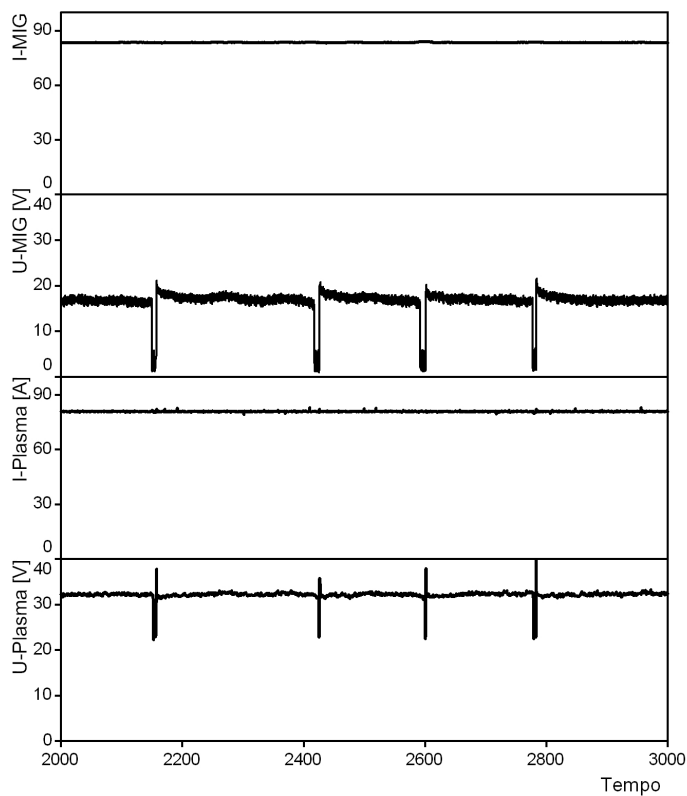


Figura 6.16 – Variação das tensões plasma e MIG em função dos curtos-circuitos arame/poça de fusão – I-MIG e I-Plasma = 80 A. Velocidade do Arame ($V_a=7\text{m/min}$). Argônio em todos os gases do processo.

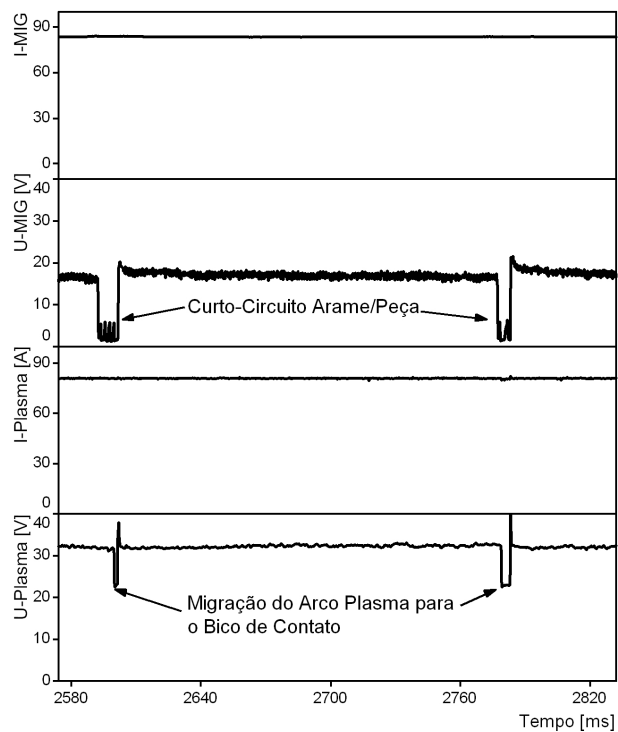


Figura 6.17 – Detalhe mostrando o comportamento das tensões durante o curto-circuito.

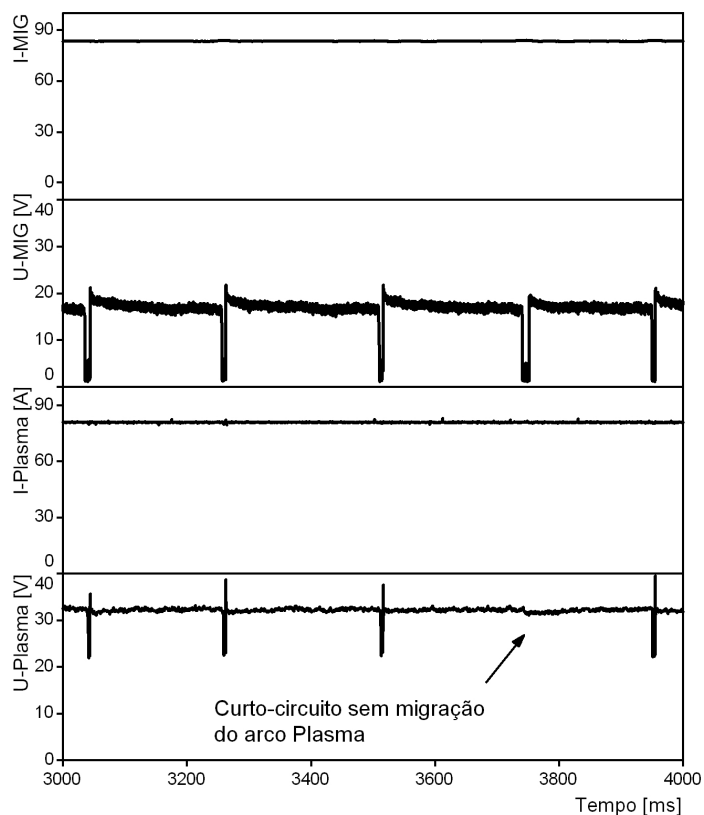


Figura 6.18 – Plasma-MIG com transferência por curto-circuito, mostrando uma transferência metálica sem migração do arco plasma

Estas observações reforçam a teoria descrita no item 6.2 de que ocorre a migração do cátodo do arco plasma, que deixa de ser a peça de trabalho e passa a ser o bico de contato MIG, enquanto o arame fica em curto-circuito. Quando ocorre a reignição do arco entre a ponta do arame e a peça de trabalho, a tensão plasma sofre um aumento repentino, ultrapassando o valor da tensão antes do curto-circuito. Uma explicação para este fato, é que neste instante a corrente plasma percorre o eletrodo anular, passa para o bico de contato através de um arco, circula através do arame-eletrodo e forma novamente um arco entre a ponta do arame e a poça de fusão. O somatório das impedâncias de todos os segmentos deste circuito é, provavelmente, maior que a impedância total do arco plasma entre o eletrodo anular e a peça de trabalho. Este aumento da impedância provoca, portanto, uma nova migração do cátodo do arco plasma, que deixa de ser o bico de contato MIG para se localizar novamente sobre a peça de trabalho.

Um aumento na corrente MIG de 80 para 120 A provocou a mudança do modo de transferência, que deixou de ser por curto-circuito e passou a ser por vôo livre, conforme oscilograma apresentado na figura 6.18.

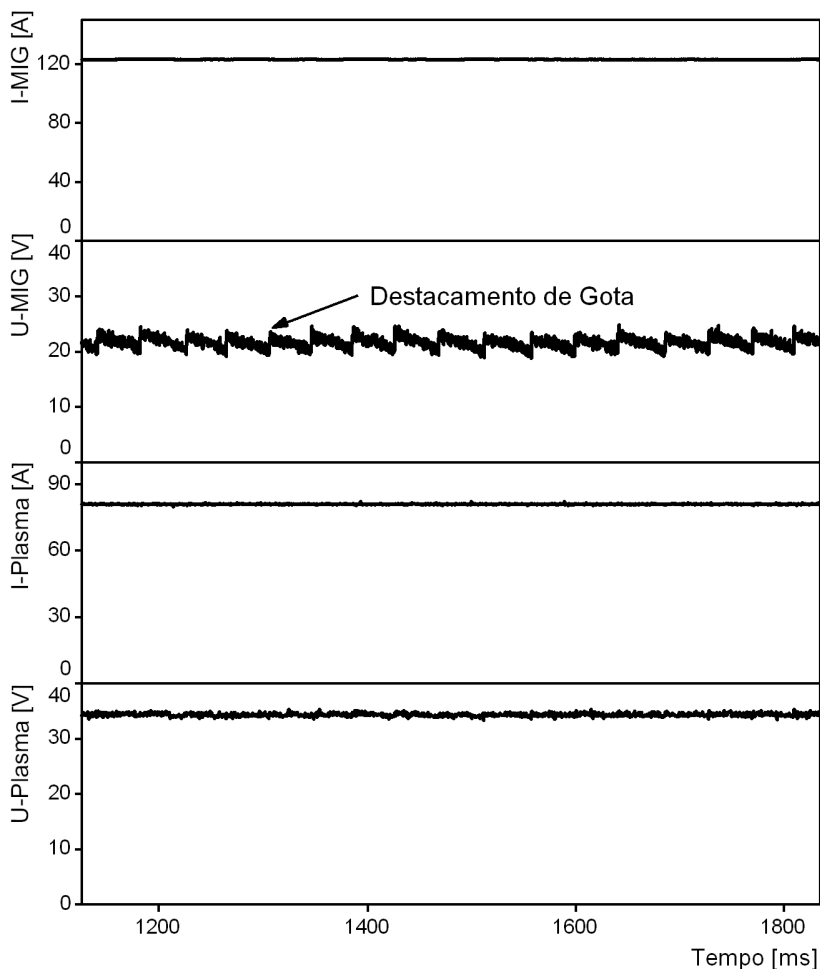


Figura 6.19 – Oscilograma do modo de transferência globular no processo Plasma-MIG Alumínio

O intervalo médio de destacamento é de aproximadamente 40 ms. Utilizando-se a equação 3.10, pode-se estimar que o diâmetro de gota destacada durante este experimento é de 2,3 mm. Visto que o arame-eletrodo possui 1,2 mm de diâmetro, pode-se classificar o modo de transferência metálica como globular. Tradicionalmente, a transferência globular no processo MIG/MAG é considerada instável, com formação excessiva de respingos. No Plasma-MIG, entretanto, a transferência globular apresenta excelente estabilidade, isenção total de respingos e boa regularidade na frequência de destacamento.

Teoricamente, o destacamento de uma gota neste experimento aumenta a distância da ponta do arame em relação à peça em 2,3 mm, fato que pode explicar o repentino aumento da tensão em até 5 V. De acordo com a literatura consultada, a tensão do arame não depende apenas da distância da ponta do arame até a peça de trabalho, mas também do valor da tensão do arco plasma na região em que a

ponta do arame se localiza. Não foram identificadas variações significativas na tensão Plasma.

A diferença da estabilidade do modo de transferência globular do processo Plasma-MIG em relação ao MIG/MAG convencional é notável. No MIG/MAG, conforme já mencionado no item 3.1, as instabilidades são provocadas pelo fato de que a região anódica possui diâmetro bem menor que o diâmetro da gota de metal fundido preso ao arame, o que causa uma força eletromagnética contrária ao destacamento. No Plasma-MIG, o material fundido que forma esta gota presa ao arame é envolvido pela atmosfera aquecida e ionizada pelo arco plasma. Desta forma, a corrente MIG – no processo Plasma-MIG - teria maior facilidade para fluir por uma área maior da superfície de metal fundido, eliminando o efeito repulsivo causado pelas forças eletromagnéticas. Este efeito pode ser melhor esclarecido com o auxílio da figura 6.20.

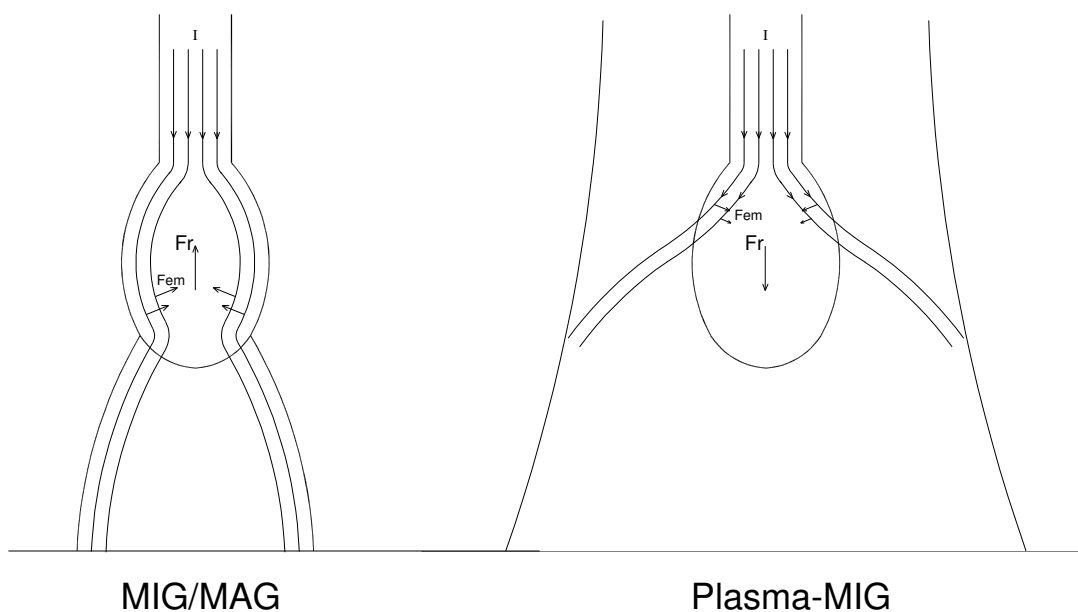


Figura 6.20 – Comparação da distribuição de corrente na gota fundida para os processos Plasma-MIG e MIG/MAG

Mantendo-se a corrente plasma em 80 A e elevando-se a corrente MIG para 200 A observou-se que a transferência metálica passa para o modo “Spray” (figura 6.20). Com um comportamento semelhante ao do processo MIG/MAG, o “Spray” do Plasma-MIG é caracterizado pelo destacamento de gotas de pequeno diâmetro com excelente estabilidade. Entretanto no processo MIG, a poça de fusão sofre intensa influência da pressão do arco voltaico, o que provoca uma depressão

no centro do metal fundido. No Plasma-MIG, este efeito é aparentemente atenuado em função da menor densidade de corrente no centro da coluna. A variação da tensão MIG na transferência por spray é muito menor, quando comparada à variação de tensão provocada pela transferência globular.

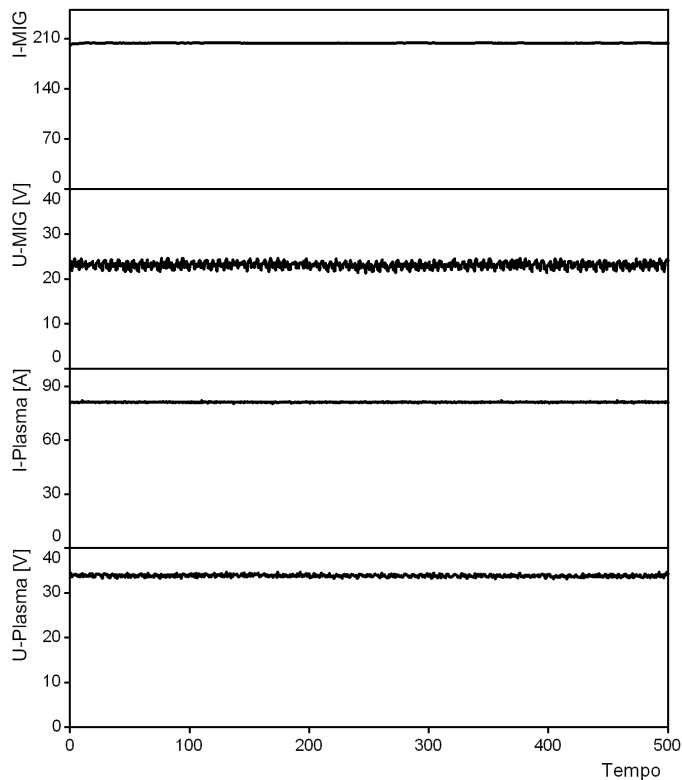


Figura 6.21 – Modo de transferência "Spray" no processo Plasma-MIG. Arame de Alumínio, 1,2 mm de diâmetro. $I_{\text{Plasma}} = 80$ A; $I_{\text{MIG}} = 200$ A. $V_a = 11,5$ m/min.

6.5.2 Corrente MIG Pulsada

A figura 6.22 apresenta um oscilograma real da soldagem Plasma-MIG com arame NiFe 6040, 1,2 mm, utilizando-se corrente MIG pulsada. Os parâmetros de soldagem utilizados para este experimento são apresentados na tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Parâmetros de soldagem para arame NiFe 6040, 1,2 mm de diâmetro

I_{PL}	[A]	100
V_a	[m/min]	5
I_p	[A]	320
t_p	[ms]	5,2
I_b	[A]	10
t_b	[ms]	12,4

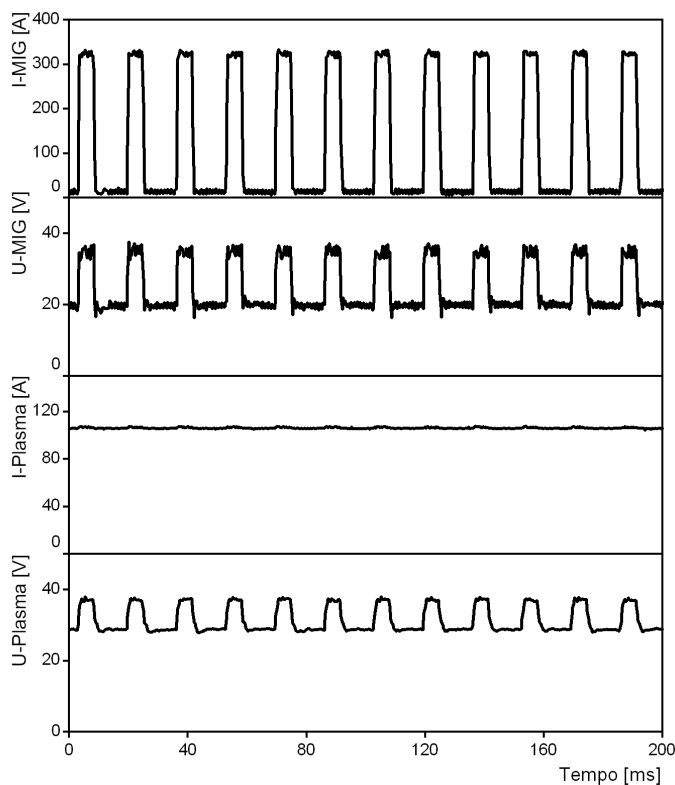


Figura 6.22 – Soldagem Plasma-MIG com pulsação de I-MIG

Observa-se que a pulsação de I_{MIG} provoca também uma característica pulsada nas tensões U_{MIG} e U_{PL} , mesmo que I_{PL} permaneça constante. Este comportamento já era esperado, em função do comportamento estático do processo Plasma-MIG, mostrado nas figuras 6.14 e 6.15, e esquematicamente representado na figura 6.23.

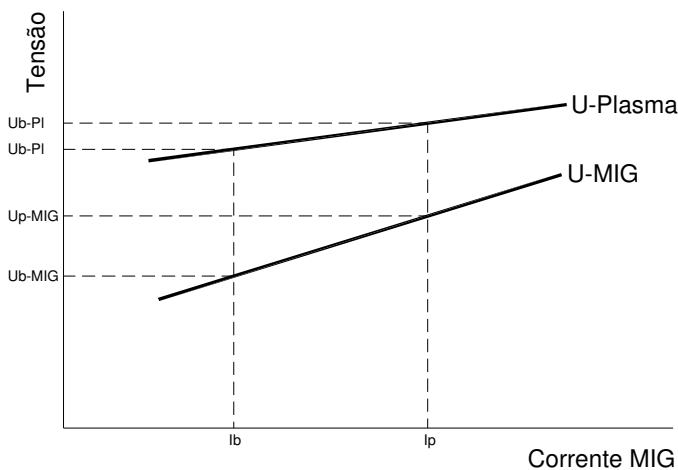


Figura 6.23 – Diagrama Esquemático da Característica Estática do Processo Plasma-MIG. I_b = Corrente MIG de Base; I_p = Corrente MIG de Pulso; U_b designa tensão de base e U_p designa tensão de pulso.

6.6 Elaboração de um modelo elétrico para o processo Plasma-MIG

Com as informações coletadas dos experimentos para determinação dos comportamentos estático e dinâmico do processo Plasma-MIG, é possível a proposição de um modelo elétrico, capaz de representar o processo.

O desenvolvimento do modelo elétrico de um processo pode ser justificado pelos seguintes fatores:

- a) auxílio na compreensão de fenômenos físicos que desempenham importante papel na estabilidade do processo;
- b) utilização dos modelos em simulações eletrônicas, o que facilita o projeto de sistemas e softwares de controle para fontes de soldagem, facilitando a depuração de inconsistências, antes mesmo de sua fabricação.

O modelo elétrico para o processo de soldagem Plasma-MIG proposto por Mathes e Kohler (Mathes, 2002) e descrito no item 2.11 deste trabalho é composto pelas fontes de energia e um conjunto de resistências, que representam os cabos, resistência interna das fontes, resistências de contato e, inclusive, os arcos voltaicos. O modelo ainda prevê uma “resistência transversal”, através da qual uma parte da corrente MIG passa a circular pelo arco plasma. Na figura 6.24 é apresentado um detalhe do modelo apresentado por Mathes e Kohler.

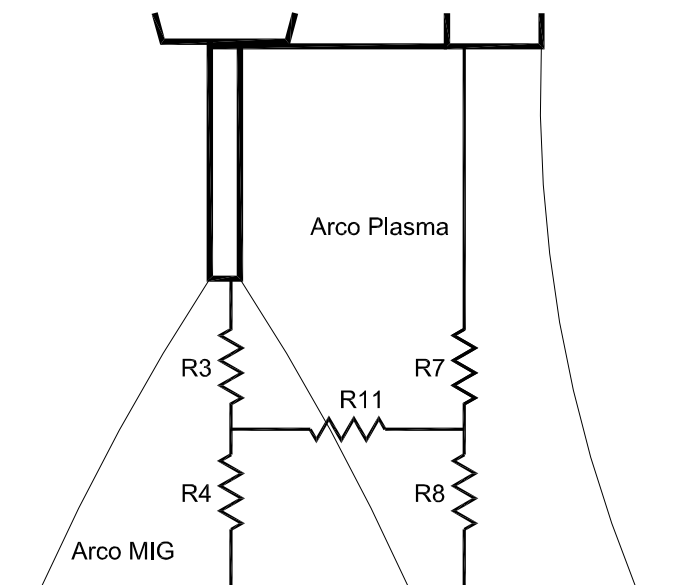


Figura 6.24 – Modelamento elétrico dos arcos voltaicos, segundo Mathes e Kohler (Mathes, 2002)

Neste modelo, os arcos plasma e MIG são apresentados separadamente como dois circuitos pelos quais as correntes I_{MIG} e I_{PL} podem circular paralelamente. O arco MIG é representado por R_3 e R_4 e o arco Plasma é representado por R_7 e R_8 . A “resistência transversal” R_{11} representa a resistência à circulação de corrente entre os dois arcos.

A desvantagem do modelo elétrico resistivo consiste na exigência da resolução de um sistema de equações para cada ponto de trabalho a ser utilizado, ou seja, para cada conjunto de parâmetros (I_{MIG} , I_{PL} , U_{MIG} e U_{PL}), as resistências do sistema devem ser recalculadas.

A proposta de modelar eletricamente o arco voltaico associando seu efeito resistivo a uma força contra eletromotriz (Gohr Jr, 2002), aparenta ser bem apropriada para o processo Plasma-MIG, principalmente quando são analisadas as curvas de característica estática levantadas durante a execução deste trabalho (figura 6.25). U_{MIG} e U_{PL} podem ser descritas de acordo com as equações 6.1 e 6.2:

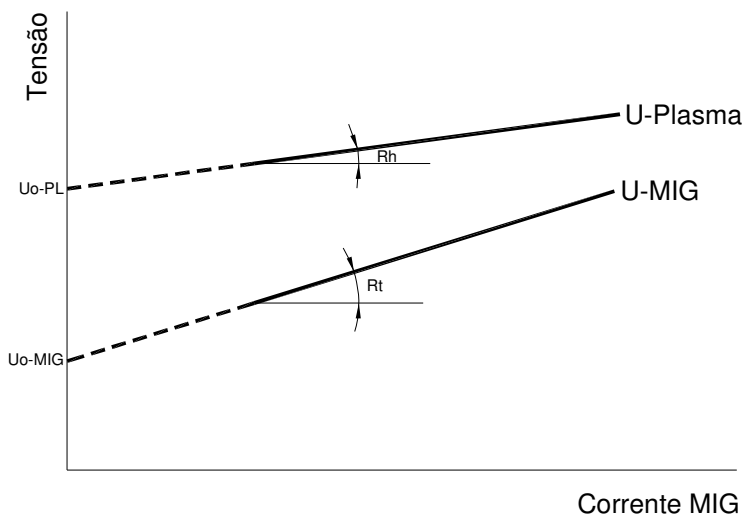


Figura 6.25 – Características Estáticas do processo Plasma-MIG

$$U_{PL} = U_{0PL} + R_h \cdot I_{MIG} \quad \text{Equação 0.1}$$

$$U_{MIG} = U_{0MIG} + R_t \cdot I_{MIG} \quad \text{Equação 0.2}$$

Os resultados obtidos indicam que, abaixo da extremidade do arame-eletrodo, uma separação física dos arcos voltaicos não é evidente. Este indício é reforçado pela análise das características estáticas do processo e dos oscilogramas com corrente pulsada, onde se observa que a corrente MIG exerce influência significativa sobre a tensão plasma. Os resultados de Ton (1975) para o processo

Plasma-MIG (item 2.8 deste trabalho) também apontam que somente uma pequena parcela da corrente total do processo circula no centro da coluna do arco, sendo que a maior parte da corrente total passa pela periferia do arco plasma.

Em função destas considerações, para a formulação do modelo elétrico do processo Plasma-MIG, assume-se que, abaixo da extremidade sólida do arame-eletrodo, a corrente MIG passa a circular totalmente através do arco plasma após deixar a região anódica. Desta forma, o arco plasma somente é denominado como tal acima da extremidade do arame-eletrodo. Abaixo deste ponto, forma-se um arco híbrido, por onde circulam as correntes Plasma e MIG sem distinção, atingindo a superfície da peça de trabalho sobre a mesma região catódica (figura 6.26).

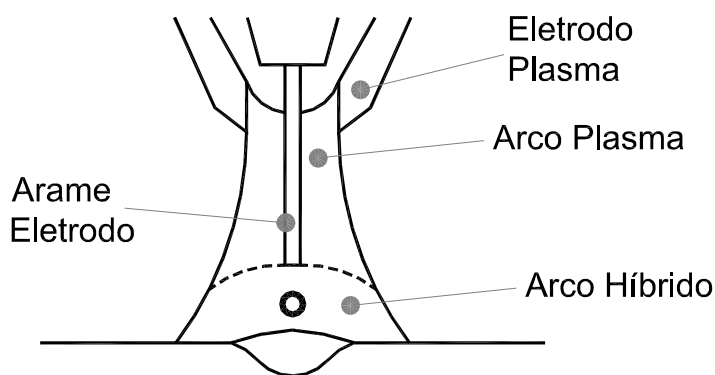


Figura 6.26 – Desenho esquemático do processo Plasma-MIG com arco Plasma e arco Híbrido

Acima da extremidade do arame-eletrodo, assume-se que o arco plasma não apresenta nenhum comportamento resistivo, com a característica de um arco mantido por eletrodos permanentes. Portanto, nesta região, o arco plasma pode ser modelado apenas como uma força contra eletromotriz, e representado por uma fonte de tensão, com polaridade contrária ao sentido da corrente. A tensão desta fonte (U_{fp}) pode ser calculada como a diferença entre U_{0PL} e U_{0MIG} (identificadas na figura 6.25), conforme a equação 6.3.

$$U_{FP} = U_{0PL} - U_{0MIG} \quad \text{Equação 6.3}$$

O “Arco Híbrido”, localizado entre a extremidade do arame-eletrodo e a superfície da peça de trabalho, através do qual circulam as correntes I_{MIG} e I_{PI} , deve apresentar uma característica similar à de um arco MIG/MAG. Assim, este arco pode ser modelado por uma força contra eletromotriz (U_{fh}) associada a uma característica resistiva, representada por R_h (figura 6.25).

Já tensão U_{MIG} deve ser influenciada pelos seguintes fatores:

- a) Queda de tensão provocada pela resistência de contato entre o arame e o bico de contato;
- b) Queda de tensão ao longo do arame-eletrodo – efeito puramente resistivo;
- c) Queda de tensão na região anódica – neste trabalho assume-se que esta região pode ser modelada, de forma simplificada, como uma carga resistiva;
- c) Queda de tensão no arco híbrido.

A soma da resistência de contato, resistência do arame eletrodo e da resistência da região anódica é representada por R_{MIG} , que é calculada pela equação 6.4:

$$R_{MIG} = R_t - R_h \quad \text{Equação 6.4}$$

Onde R_t é a resistência total do sistema, calculada pela inclinação da curva U_{MIG} e R_h é a resistência do arco híbrido, calculada pela inclinação da curva U_{Pl} .

Assim, a tensão U_{MIG} pode ser calculada pela equação 6.5:

$$U_{MIG} = U_{fh} + R_h \cdot (I_{pl} + I_{MIG}) + R_{MIG} \cdot I_{MIG} \quad \text{Equação 6.5}$$

Para $I_{MIG} = 0$, obtém-se a equação 7.6

$$U_{fh} = U_{0MIG} - R_h \cdot I_{pl} \quad \text{Equação 6.6}$$

A tensão Plasma pode ser calculada pela equação 6.7

$$U_{pl} = U_{fh} + U_{fp} + R_h \cdot (I_{pl} + I_{MIG}) \quad \text{Equação 6.7}$$

Onde U_{fp} é calculada pela equação 6.3.

O circuito elétrico proposto para o processo Plasma-MIG, que resume as afirmações acima é apresentado na figura 6.27. Neste modelo, as resistências internas das fontes e dos cabos condutores foram desprezadas.

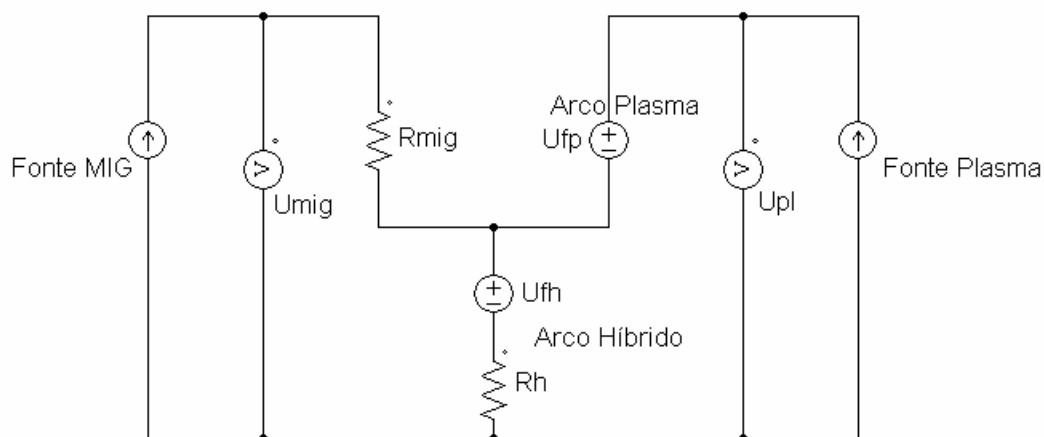


Figura 6.27 – Modelo elétrico proposto para o processo Plasma-MIG

Para testar a funcionalidade do modelo acima proposto, foi realizado um experimento, utilizando-se arame de alumínio, 1,2 mm de diâmetro, Ar puro nos gases MIG, plasma e de proteção. Os parâmetros utilizados para este experimento são apresentados na tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Parâmetros para validação do modelo que simula o processo Plasma-MIG estaticamente

Arame		AISi-5
Diâmetro do Arame	[mm]	1,2
Comprimento do Eletrodo Livre	[mm]	18
Distância entre a ponta sólida do arame-eletrodo até a superfície da peça de trabalho	[mm]	4
Distância Eletrodo Plasma / Superfície da peça de trabalho	[mm]	14
Corrente Plasma	[A]	116
Corrente MIG	[A]	70 – 330 A

Nestas condições, as seguintes curvas para U_{Pl} e U_{MIG} foram ajustadas experimentalmente (figura 6.28):

$$U_{Pl} = 27,006 + 0,0127 \cdot I_{MIG}$$

$$U_{MIG} = 13,36 + 0,0351 \cdot I_{MIG}$$

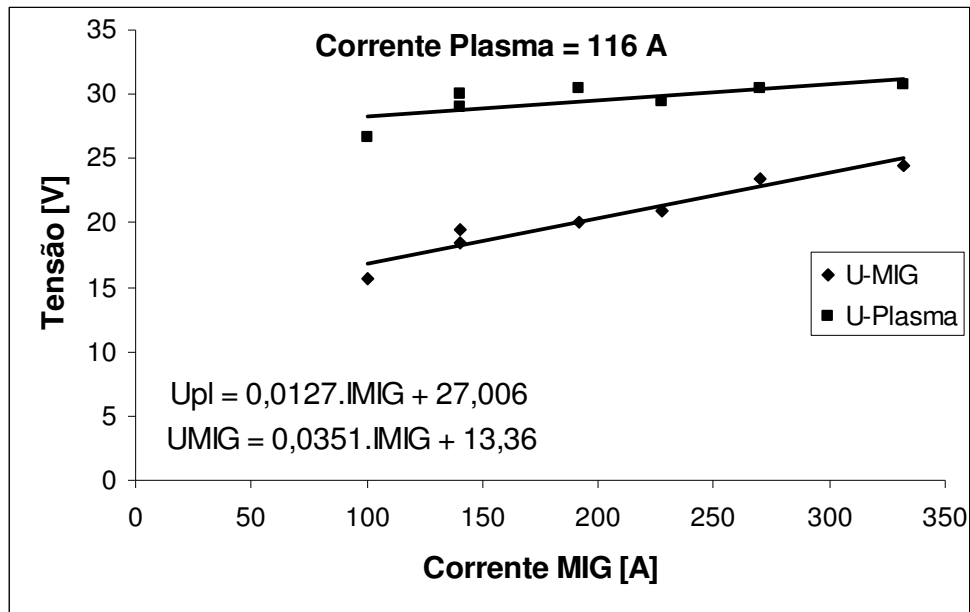


Figura 6.28 – Pontos do modelo proposto comparados aos pontos experimentalmente obtidos.

Com este resultado, os valores dos componentes do modelo elétrico podem ser calculados:

$$R_h = 0,0127 \quad [\Omega]$$

$$R_t = 0,0351 \quad [\Omega]$$

$$R_{MIG} = R_t - R_h = 0,0224 \quad [\Omega]$$

$$U_{fh} = U_{0MIG} - R_h \cdot I_{Pl} = 13,36 - 0,0127 \cdot 116 = 11,887 \quad [V]$$

$$U_{fp} = U_{0Pl} - U_{0MIG} = 13,646 \quad [V]$$

$$U_{Pl} = 11,887 + 13,676 + 0,0127 \cdot (I_{Pl} + I_{MIG}) \quad [V] \quad \text{Equação 6.8}$$

$$U_{MIG} = 11,887 + 0,0127 \cdot (I_{Pl} + I_{MIG}) + 0,0224 \cdot I_{MIG} \quad [V] \quad \text{Equação 6.9}$$

Com dos valores calculados acima, são determinados os termos das equações 6.5 e 6.7 e, assim, calcular as tensões U_{Pl} e U_{MIG} em função da corrente I_{MIG} , para qualquer corrente plasma utilizada.

A figura 6.29 apresenta os dados simulados pelas equações 6.8 e 6.9 e os dados medidos para a soldagem nas mesmas condições descritas na tabela 6.2, entretanto utilizando corrente média plasma de 152 A.

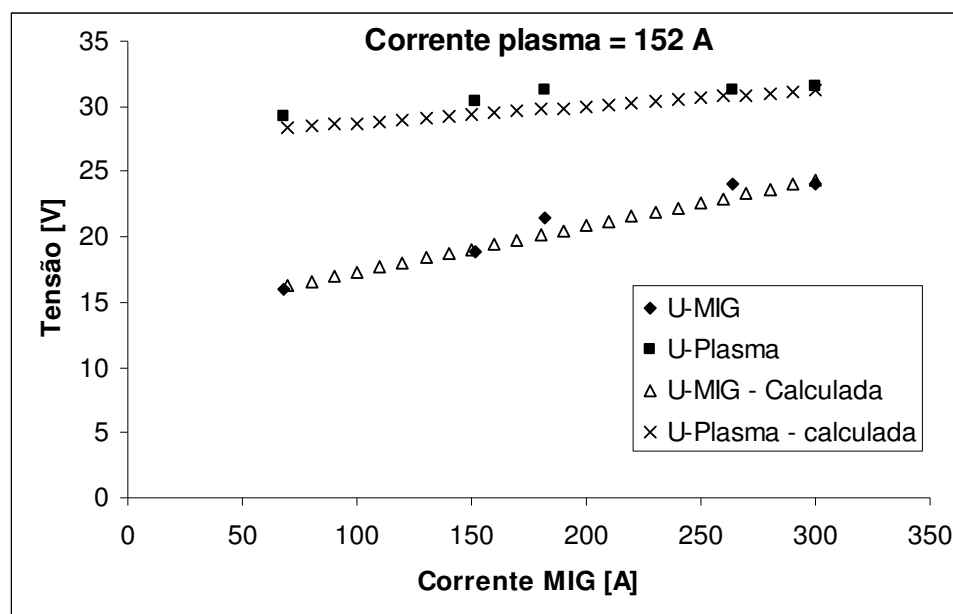


Figura 6.29 – Característica estática do processo Plasma-MIG - Comparação dos resultados calculados pelo modelo proposto e resultados medidos.

A funcionalidade do modelo também foi testada para a soldagem com corrente pulsada. Na figura 6.30 pode-se fazer uma comparação entre os sinais calculados pelo modelo e medidos durante a soldagem Plasma-MIG de alumínio, 1,2 mm de diâmetro em atmosfera de argônio.

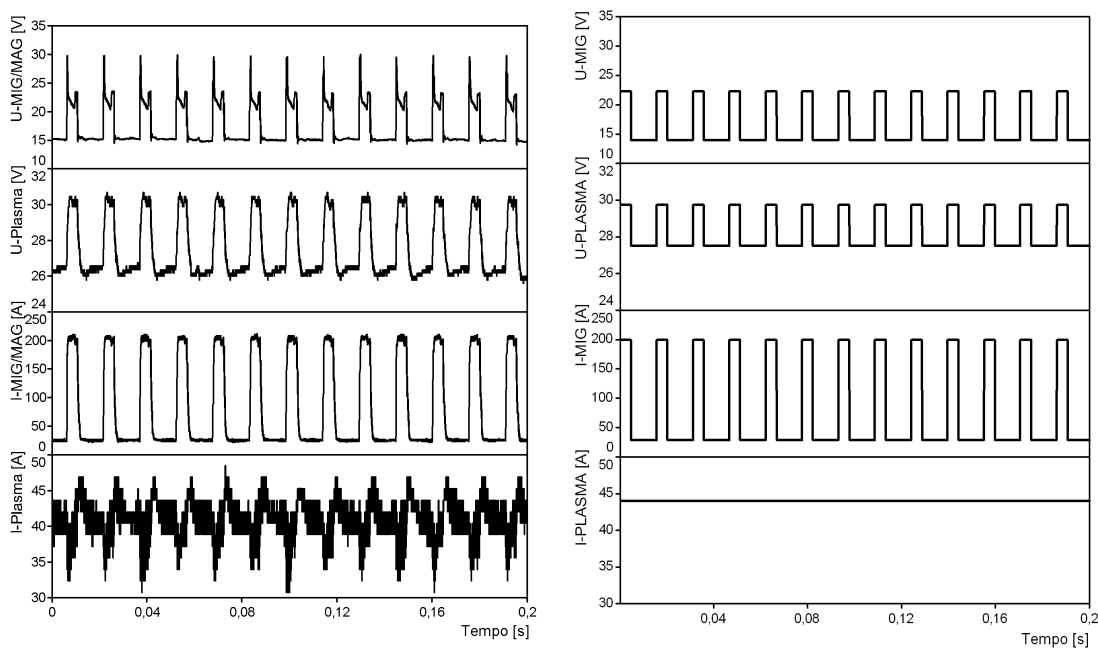


Figura 6.30 – Comparação entre um oscilograma da soldagem Plasma-MIG pulsada medido e calculado pelo modelo desenvolvido.

Não é objetivo deste trabalho, fazer o relacionamento dos componentes do modelo elétrico com características físicas do arco voltaico. Entretanto, algumas considerações podem ser feitas, em relação ao comportamento dos componentes do modelo elétrico proposto.

O valor da força contra eletromotriz do arco plasma U_{fp} deve apresentar uma relação direta de proporcionalidade com o comprimento do arco plasma – distância entre o eletrodo anular e a extremidade do arame. Outro fator que deve influenciar a magnitude de U_{fp} é o recuo do eletrodo, definido como a distância entre o eletrodo anular e o bocal de constrição (Oliveira, 2001). Diâmetro do eletrodo plasma, vazão e natureza do gás pelo qual circula a corrente plasma também exercem, provavelmente, influência sobre U_{fp} .

Conforme escrito anteriormente, R_{MIG} representa o efeito resistivo que provoca a queda de tensão durante a passagem de corrente pelo circuito MIG. O efeito dos cabos condutores e da resistência interna da fonte pode ser subtraído, quando a medição da tensão é realizada em um ponto mais próximo possível do bico de contato MIG. Nos resultados apresentados, o valor de R_{MIG} encontrado se localiza em torno de $0,022 \Omega$, para os experimentos realizados com arame de alumínio 1,2 mm em atmosfera de argônio puro. Para que esta resistência elétrica do modelo seja associada a um efeito resistivo do circuito MIG, seria necessário o dimensionamento dos efeitos resistivos causados pelo contato bico/arame (R_C), pela resistência elétrica do arame eletrodo (R_E) e pelo efeito resistivo da região anódica (R_A). R_C depende basicamente de fatores geométricos e superficiais do arame e do bico de contato. R_E depende do comprimento do eletrodo livre (L_E), da área de sua seção transversal (A) e da resistividade elétrica do material do eletrodo (ρ). A resistividade elétrica do material é dependente da temperatura. Para o processo MIG/MAG, Waszink (1982) apresenta um modelo para a distribuição da temperatura no eletrodo sólido, em função do calor gerado por efeito joule e do calor transmitido da região anódica para o eletrodo sólido pelo metal líquido. Para o processo Plasma-MIG, as variáveis de contorno para o cálculo da distribuição de temperatura e de “ p ” são mais numerosas, pois dependem da transferência de calor para o arame-eletrodo, a partir do arco plasma que o envolve. Os experimentos realizados para o presente trabalho não são suficientes para se confirmar uma relação entre R_{MIG} e R_C , R_E e R_A .

O Arco Híbrido, proposto no presente trabalho, concentra as correntes I_{PL} e I_{MIG} , sendo modelado pela associação de uma força contra eletromotriz (U_{fh}) e uma

carga resistiva (R_h). Os experimentos realizados neste trabalho também são insuficientes para revelar a origem de R_h . Entretanto, em uma análise inicial, esta carga resistiva pode estar associada à queda de tensão na região catódica, o que esclareceria a interação existente entre U_{MIG} , U_{PL} , I_{MIG} e I_{PL} .

6.7 Influência das correntes MIG e Plasma sobre a taxa de fusão de arame

As experiências de soldagem realizadas com o processo Plasma-MIG mais bem sucedidas foram realizadas com imposição de corrente no circuito MIG. Observou-se que quando se utiliza controle de tensão no circuito MIG, flutuações na corrente e, por conseqüência, na freqüência de destacamento e tamanho de gota podem ocorrer em algumas situações em elevada velocidade de soldagem. Este fato dificulta principalmente a união de chapas com pequenas espessuras (até 3 mm) em altas velocidades de soldagem (V_s), pois qualquer variação na taxa de transferência metálica instantânea pode causar defeitos localizados de falta de material na junta.

Uma desvantagem de se soldar com imposição de corrente é a necessidade de se conhecer de antemão a relação entre corrente média e taxa de fusão, pois nestas condições o processo não apresenta o mecanismo conhecido por “controle interno”. No processo MIG/MAG, por exemplo, com controle de tensão, a corrente varia em função do comprimento do eletrodo livre e do arco voltaico, até que a tensão do circuito seja igual a uma tensão de referência ajustada no equipamento. Assim, é determinado automaticamente um ponto de trabalho estável, que equilibra a potência do processo com a taxa de fusão, mantendo constante o comprimento do arco voltaico. No processo MIG/MAG com imposição de corrente, pode-se trabalhar com uma estratégia de controle conhecida como “controle externo”, onde a velocidade do arame é constantemente ajustada pela fonte de soldagem, com o objetivo de manter a tensão do arco igual a um valor pré-ajustado.

No processo Plasma-MIG, a taxa de fusão de material em função das correntes deve ser bem conhecida, para manter constante a distância da extremidade do arame-eletrodo até a superfície da peça de trabalho dentro de uma faixa em que o processo apresente estabilidade. Se esta distância for muito pequena, pode provocar a ocorrência de curtos-circuitos, o que instabiliza o processo. Os experimentos também mostraram que se a distância da ponta do eletrodo à superfície da peça for muito extensa, de modo que a extremidade do

arame-eletrodo fique muito próxima do eletrodo plasma, as gotas de metal fundido não são transferidas para a poça de fusão, mas ficam aderidas à superfície do eletrodo plasma. Desta forma, é necessário estabelecer correlações para manter o comprimento do arco híbrido, em função das correntes I_{MIG} e I_{PL} e da velocidade do arame V_a . A literatura referente ao processo Plasma-MIG não traz informações a respeito destas relações, pois a maioria dos autores trabalhou com fontes de tensão constante para alimentar o circuito MIG, o que automaticamente controla a distância arame-eletrodo / peça pela seleção correta da tensão de referência. Esta escassez de informações determinou a necessidade de realização dos experimentos descritos a seguir.

Para avaliar a influência de I_{MIG} e I_{PL} sobre a taxa de fusão, foram realizados experimentos com arames de aço carbono (ER 70 S-6), de alumínio (AISI-5) e a base de cobre (CuSi-3).

Inicialmente, apresenta-se uma comparação da curva de velocidade do arame em função da corrente entre os processos MIG/MAG e Plasma-MIG, com corrente contínua constante (fig 6.31). Este ensaio foi realizado com arame de 1,2 mm de diâmetro, Ar + 10% de CO_2 e comprimento do eletrodo de 17 mm. Tanto o ensaio MIG/MAG quanto o Plasma-MIG foram realizados na bancada n.2, com a mesma pistola de soldagem.

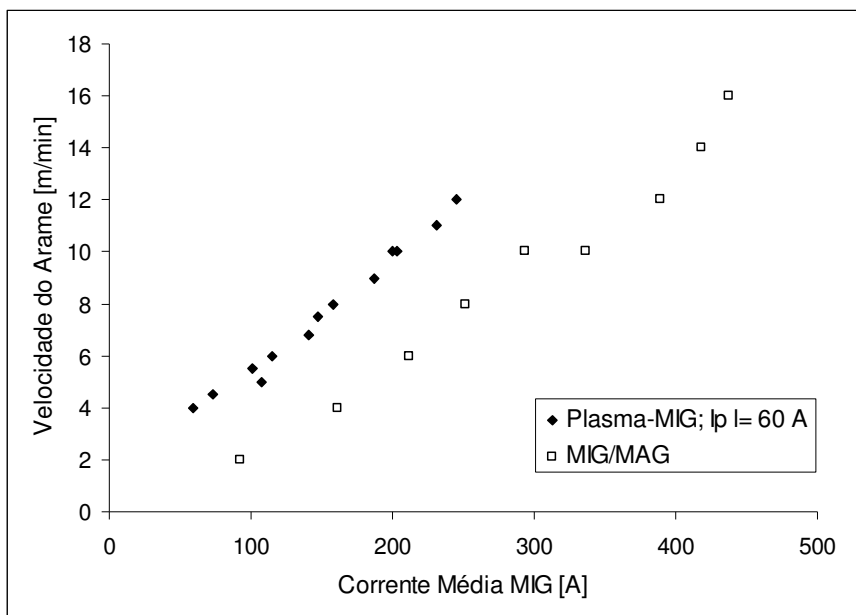


Figura 6.31 – Comparação entre um oscilograma da soldagem Plasma-MIG pulsada medido e calculado pelo modelo desenvolvido.

Observa-se que uma corrente plasma de 60 A provoca um aumento de aproximadamente 3 m/min na velocidade do arame, comparando-se com o processo MIG/MAG. Nos ensaios realizados, não foi possível atingir velocidades de arame superiores a 13 m/min com o Plasma-MIG, em função de limitações na estabilidade do processo. As bancadas utilizadas não ofereceram suficiente estabilidade na velocidade do arame para evitar a ocorrência de curtos-circuitos nestas condições.

Os resultados obtidos com o arame de alumínio de 1,6 mm de diâmetro são apresentados na figura 6.32. Este experimento foi realizado na bancada de n. 2, com a utilização de argônio puro nos três gases do processo. O comprimento do arame-eletrodo sólido foi mantido em 22 mm, e a distância bico de contato / peça em 26 mm. Conforme mostra o gráfico da figura 6.32, a variação de V_a em função de I_{MIG} , para os quatro níveis de I_{PL} estudados, pode ser ajustada por uma reta, representada pela equação 6.8.

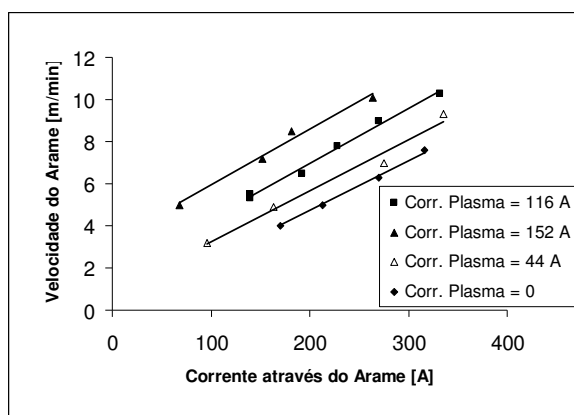


Figura 6.32 – Influência de I_{MIG} e I_{PL} sobre V_a . Arame: AlSi-5, 1,6 mm de diâmetro. Argônio como gás central, periférico e de proteção, com vazões de 5; 5 e 10 l/min.

$$V_a = a \cdot I_{MIG} + b \quad \text{Equação 6.8}$$

Analisando-se os coeficientes angulares “a” da equação 6.8, para as quatro curvas ajustadas da figura 6.32, observa-se apenas uma pequena variação crescente do coeficiente angular “a” em função de I_{PL} . Estes dados são apresentados na tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Influência de I_{PL} sobre o coeficiente linear das curvas $V_a \times I_{MIG}$.

I_{PL} [A]	a [m/min.A]
0	0,0237
44	0,0243
116	0,0263
152	0,0264

Já o coeficiente linear “b” é influenciado I_{PL} , como pode ser observado no gráfico da figura 6.33.

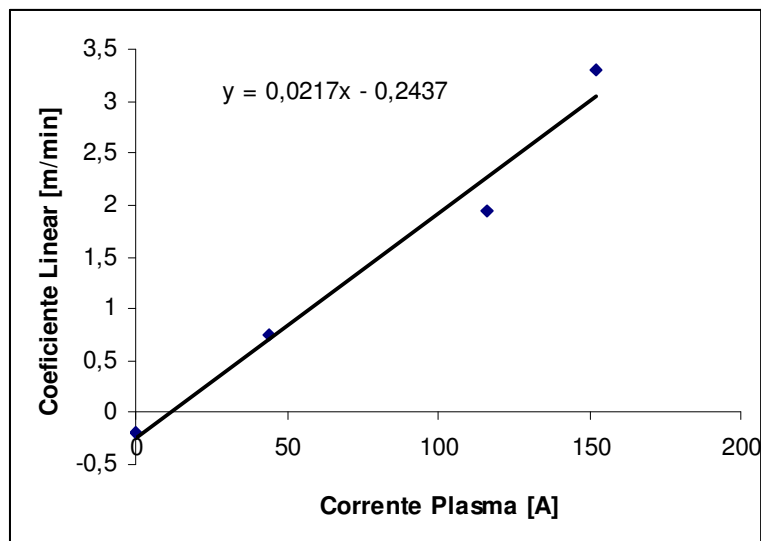


Figura 6.33 – Influência da corrente plasma sobre o coeficiente linear da equação 7.8

A influência de I_{PL} sobre “b” pode ser considerada linear. A regressão linear dos pontos do gráfico 6.32 é apresentada na equação 6.9.

$$b = 0,0217 \cdot I_{PL} - 0,2437 \quad \text{Equação 6.9}$$

O coeficiente angular da equação 6.8 apresenta um leve acréscimo em função do aumento da corrente Plasma. Entretanto, esta variação pode ser desprezada, para os valores de corrente e velocidade de arame utilizados neste trabalho. Desta forma, “a” é considerado independente da corrente plasma e assumido como o valor médio dos valores apresentados na tabela 6.3. Já o coeficiente linear pode ser calculado pela equação 6.9. Assim a velocidade do arame V_a , para arame de alumínio, 1,6 mm em atmosfera de argônio puro, pode ser calculada pela equação 6.10.

$$V_a = 0,025 \cdot I_{MG} + 0,022 \cdot I_{PL} - 0,24 \text{ [m/min]} \quad \text{Equação 6.10}$$

Este modelo foi testado na soldagem de cordão sobre chapa e apresentou resultados satisfatórios. A mesma metodologia foi utilizada para a determinação desta correlação para o arame de alumínio de 1,2 mm de diâmetro – equação 6.11.

$$V_a = 0,053 \cdot I_{MIG} + 0,017 \cdot I_{PL} + 0,91 \text{ [m/min]} \quad \text{Equação 6.11}$$

O arame a base de cobre (CuSi-3) de 1,2 mm de diâmetro apresentou resultados equivalentes (figura 6.34) e o modelo que relaciona as duas correntes com a velocidade do arame é apresentado na equação 6.12.

$$V_a = 0,041 \cdot I_{MIG} + 0,0182 \cdot I_{PL} - 0,152 \text{ [m/min]} \quad \text{Equação 6.12}$$

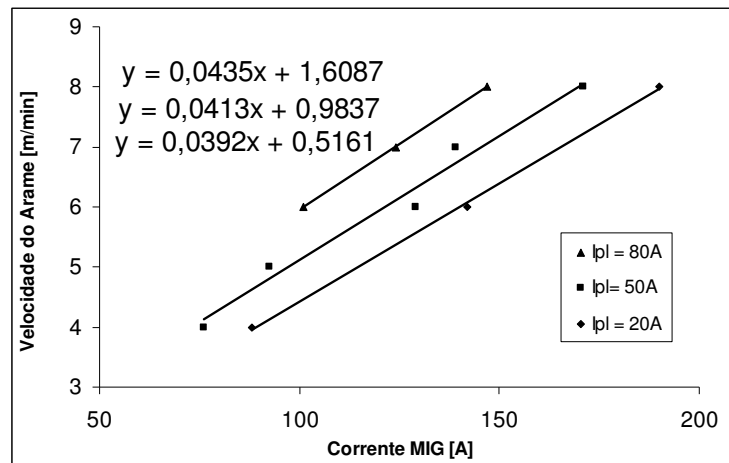


Figura 6.34 – Influência de I_{MIG} e I_{PL} sobre a velocidade do arame CuSi-3, 1,2 mm de diâmetro.

A influência de I_{MIG} e I_{PL} sobre a taxa de fusão do arame de aço carbono, 1,2 mm de diâmetro, apresentou um comportamento diferente dos demais arames estudados. O gráfico da figura 6.35 apresenta os resultados de um experimento realizado com argônio como gás de plasma e de proteção, e uma mistura de argônio com 4% de CO_2 como gás MIG. O comprimento do arame-eletrodo foi mantido em 17 mm e a distância bico de contato/peça em 21 mm. Observou-se que quanto maior o valor de I_{MIG} , menor é a contribuição de I_{PL} para a taxa de fusão do arame. O modelo com melhores resultados numéricos para relacionar as correntes do processo com a velocidade do arame é apresentado na equação 6.13. Este modelo é válido para I_{MIG} máxima de 260 A.

Para avaliar a influência do comprimento do eletrodo livre sobre a taxa de fusão, o experimento descrito acima foi repetido com as mesmas variáveis, mantendo-se I_{PL} em 120 A e aumentando L_E de 12 para 16 mm. A comparação entre os resultados dos dois experimentos é apresentada na figura 6.36. A velocidade do

arame apresentou um aumento médio de 1,8 m/min, com um aumento de L_E de 4 mm.

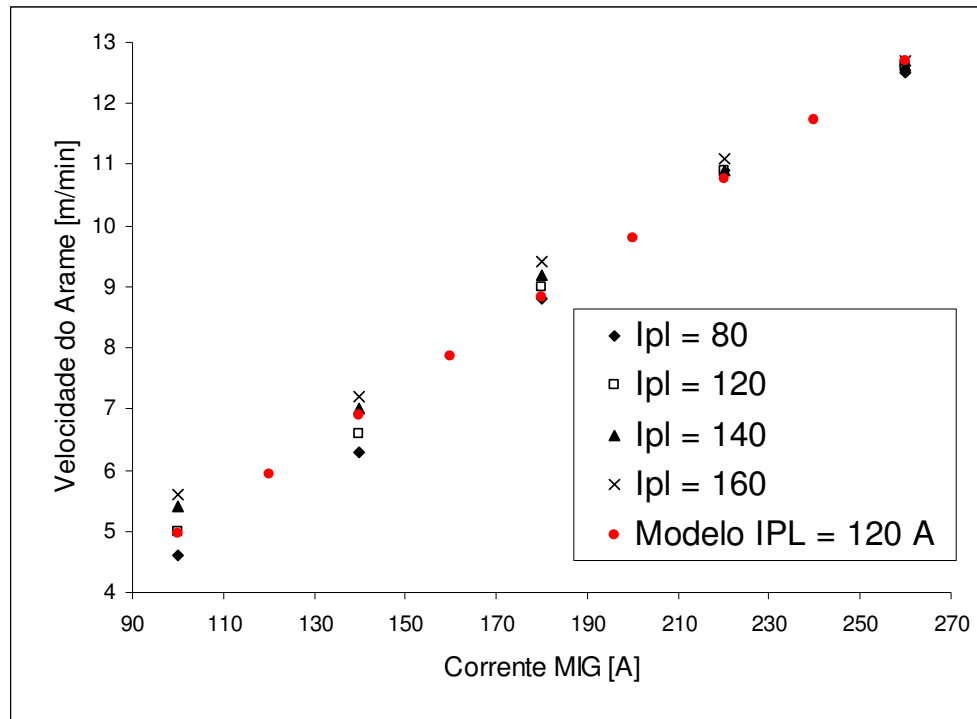


Figura 6.35 – Influência de IMIG e IPL sobre a velocidade do arame ER 70 S-6, 1,2 mm de diâmetro

$$V_a = 0,0618 \cdot I_{MIG} + (-0,00011321 \cdot I_{MIG} + 0,027792) \cdot I_{PL} - 3,1865$$

Equação 6.13

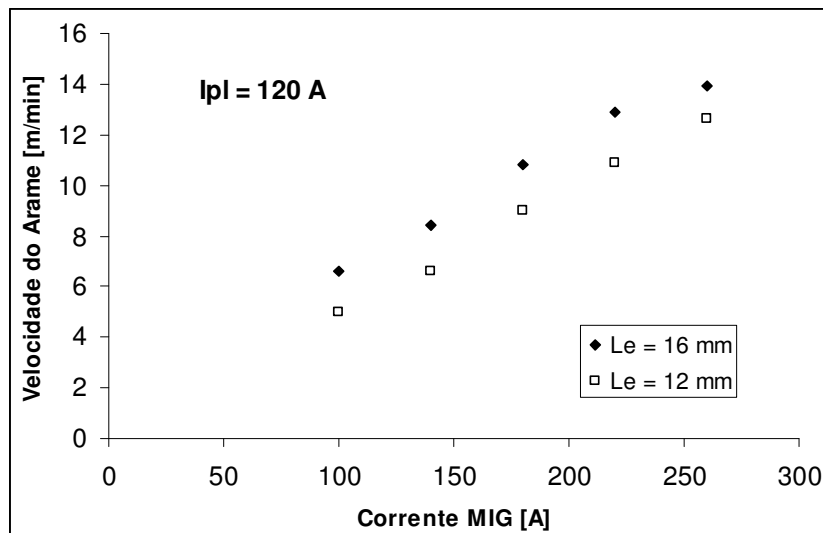


Figura 6.36 – Influência de LE sobre a taxa de fusão do arame.

Com a análise dos resultados apresentados nesta seção, uma avaliação qualitativamente da influência de cada componente do processo sobre a taxa de fusão é apresentada a seguir.

6.7.1 Influência da corrente Plasma Sobre a Taxa de Fusão

Os resultados indicam que a corrente plasma não é responsável pela geração de calor no interior do arame-eletrodo. Este fato pode ser confirmado pela análise do comportamento estático do processo, apresentado na seção 6.3, onde variações na corrente plasma não causam variações significativas na tensão do circuito MIG, o que indica que não ocorre circulação de I_{PL} pelo arame-eletrodo. Além disto, o modelo proposto na seção 6.5 também indica que a corrente plasma não circula através do arame-eletrodo, não contribuindo para a geração de calor por efeito joule.

O incremento na taxa de fusão do arame causado pelo arco plasma depende, portanto, da capacidade do arame-eletrodo em absorver a energia disponibilizada pelo arco plasma. Nestas condições, pode-se considerar que o arame absorve energia pelos três mecanismos de transferência de calor: radiação, convecção e condução.

Estes três mecanismos dependem, basicamente, dos seguintes itens:

- a) fatores geométricos – como área de troca de calor;
- b) propriedades termodinâmicas do arame-eletrodo e do plasma – como condutividade térmica, refletividade e absorvância;
- c) condições do fluxo de plasma sobre a superfície do arame-eletrodo, que determinam as formas de transferência por convecção.

Além de ser uma tarefa extremamente trabalhosa, não é objetivo desta tese quantificar cada um dos mecanismos de transferência de calor do arco plasma para o arame-eletrodo. Pode-se, entretanto, apresentar algumas constatações em virtude dos resultados apresentados, correlacionando-as com determinadas propriedades físicas dos materiais envolvidos nos experimentos.

Analisando-se as equações 6.14 e 6.15, calculadas a partir das equações 6.10 e 6.11, observa-se que para o arame de alumínio de 1,6 mm, o coeficiente que

relaciona a corrente plasma com a taxa de fusão, denominado de “ β ”, é de 0,00451 kg/h.A, enquanto que para o arame de 1,2, este coeficiente é de 0,00311 kg/h.A.

$$T_f = 0,00512 \cdot I_{MIG} + 0,00451 \cdot I_{PL} - 0,0492 \text{ [kg/h] } [\varnothing=1,6] \quad \text{Equação 6.14}$$

$$T_f = 0,00970 \cdot I_{MIG} + 0,00311 \cdot I_{PL} + 0,166 \text{ [kg/h] } [\varnothing=1,2] \quad \text{Equação 6.15}$$

Com estes resultados, pode-se afirmar que a contribuição do arco plasma para a taxa de fusão, é proporcional à I_{PL} e à área de contato entre o arame-eletrodo e o arco plasma. Esta área é calculada pelo perímetro multiplicado pela extensão do arame-eletrodo que entra em contato com o arco plasma ($\pi d \cdot L_{cp}$).

Na faixa de valores de correntes e velocidade do arame estudados, observa-se que a influência de I_{PL} sobre a taxa de fusão é aproximadamente constante nos arames de alumínio e a base de cobre. Já para o arame de aço carbono nota-se que, quanto maior a velocidade do arame, menor a contribuição do arco plasma para a taxa de fusão (fig. 6.34), sendo que o efeito causado pela corrente MIG torna-se predominante para maiores taxas de fusão. Como o arame de aço possui menor condutividade térmica que os arames de cobre e alumínio, o tempo de exposição ao arco plasma deve ser maior, para que o calor absorvido pela superfície do arame seja conduzido para o seu interior. Quanto maior a velocidade do arame, menor é o tempo que um determinado volume de material fica em exposição ao arco plasma, o que reduz a sua contribuição para a taxa de fusão. Esta constatação se traduz em uma limitação do processo Plasma-MIG, em termos de taxa de fusão do material de adição na soldagem de aço carbono, quando comparado a outros processos como o MIG/MAG Duplo Arame. Isto indica que o processo pode não apresentar resultados competitivos quando utilizado em operações de revestimento, utilizando-se arames de baixa condutividade térmica, onde a taxa de fusão é uma importante característica econômica do processo. Entretanto, na soldagem de união de peças, esta característica do processo pode se tornar economicamente vantajosa, pois é possível um maior aporte de calor para a peça, garantindo boas condições para a fusão do material de base, com menor consumo de material de adição.

6.7.2 Influência da corrente MIG sobre a taxa de fusão

Conforme a literatura consultada referente ao processo MIG/MAG convencional, a correlação entre a taxa de fusão do arame e a corrente, quando esta não apresenta variações instantâneas, pode ser expressa pela equação 3.2, onde C_1 representa a queda de tensão na região anódica, enquanto que C_2 é proporcional à resistência linear do eletrodo sólido.

$$V_a = C_1 \cdot I + C_2 \cdot L_E \cdot I^2 \quad \text{Equação 3.2}$$

Para o processo Plasma-MIG, os pontos experimentais obtidos apontam para uma correlação linear entre a corrente I_{MIG} e a velocidade do arame ou taxa de fusão, dentro da faixa de valores estudados. Não é possível, entretanto, associar separadamente esta correlação linear com a queda de tensão na região anódica ou com o efeito resistivo do arame-eletrodo. Supõe-se que o coeficiente angular “ α ” associado à corrente I_{MIG} , nos modelos ajustados experimentalmente, é o resultado conjunto de todos os eventos que causam a queda de tensão durante a passagem da corrente pelo circuito MIG.

Com a análise das equações 6.14 e 6.15, nota-se que “ α ” é inversamente proporcional ao diâmetro do arame e, por conseqüência, à área de sua seção transversal “ A ”. A figura 6.35 mostra que a taxa de fusão também é dependente do comprimento do arame-eletrodo, em uma relação de proporcionalidade direta. Estas constatações confirmam a relação entre a taxa de fusão com a resistência elétrica do eletrodo no processo Plasma-MIG.

6.8 Influência das correntes I_{MIG} e I_{PL} sobre o diâmetro de gota e determinação dos parâmetros de pulso I_p e t_p

Os experimentos realizados para o estudo das características dinâmicas do processo revelaram que é possível estabelecer uma correlação entre a variação instantânea da tensão U_{MIG} com o destacamento de gota (figura 6.19, item 6.4.1). Esta característica permitiu identificar o tempo modal de destacamento utilizando-se o oscilograma de U_{MIG} , já que as bancadas utilizadas não contam com sistema de filmagem para a utilização da técnica de “Shadowgrafia”.

Na figura 6.37 é possível identificar o destacamento de gota e o tempo entre destacamentos. Inicialmente, uma tensão de referência U_R é escolhida. Assume-se então que, cada vez que U_{MIG} ultrapassa a tensão de referência, ocorre o destacamento de uma gota. Para calcular o tempo modal de destacamento (T_{md}), foi construída uma rotina dentro do software FlexPro 6.0, que identifica e armazena os tempos entre destacamentos e, em seguida, constrói um histograma destes intervalos, onde posteriormente é identificado T_{md} (figura 6.38). Com esta técnica foi possível medir um tempo modal mínimo de destacamento de 3,5 ms. Abaixo deste valor, a leitura da variação da tensão U_{MIG} começa a ser prejudicada pelo ruído provocado pela fonte de corrente.

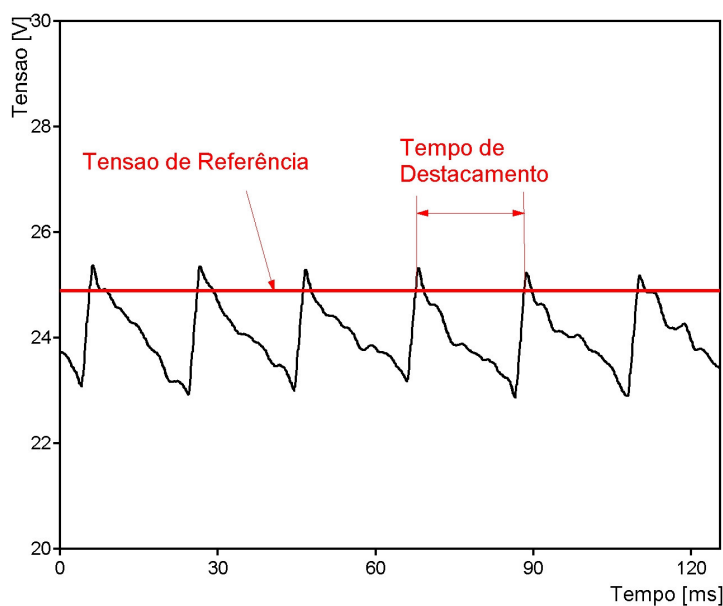


Figura 6.37 – Identificação do tempo entre destacamentos utilizando-se oscilograma da tensão MIG.

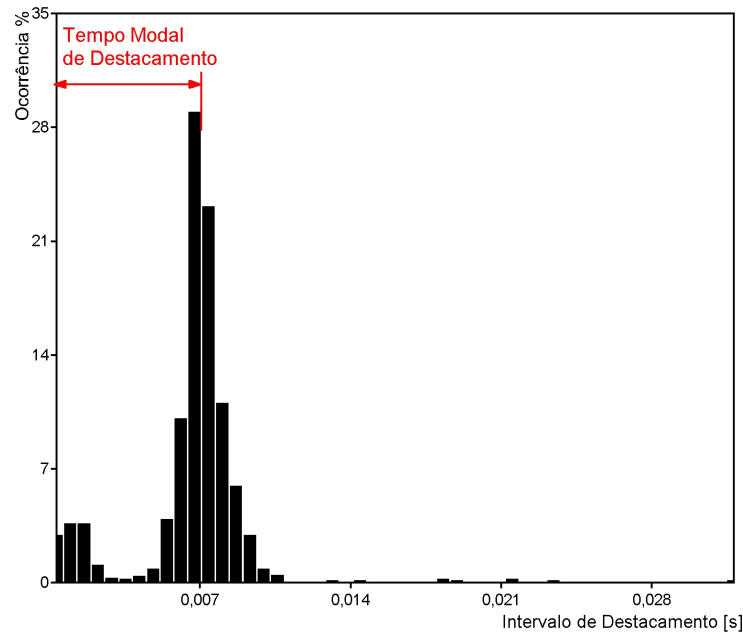


Figura 6.38 – Determinação do Tempo Modal de Destacamento utilizando-se um histograma

Com os dados dos parâmetros velocidade do arame (V_a) e diâmetro do arame-eletrodo (d_a) e com a determinação experimental de T_{md} é possível calcular o diâmetro modal de gota “ d_{mg} ”, pela equação 3.10:

$$d_{mg} = \sqrt[3]{\frac{V_a \cdot d_a^2 \cdot T_{md}}{40}} \quad [\text{mm}] \quad \text{Equação 3.10}$$

Experimentos para a determinação de d_{mg} em função das correntes I_{PL} e I_{MIG} foram realizados para os seguintes arames:

- ER 70 S-6, 1,2 mm de diâmetro em atmosfera de argônio com 10% de CO_2 .
- AlSi-5, 1,2 mm, em atmosfera de argônio puro e de argônio com 50% de hélio;
- CuSi-3, 1,0 de diâmetro, em atmosfera de argônio puro.

Como os experimentos realizados apresentaram resultados equivalentes, somente os ensaios realizados com os arames de alumínio serão mais detalhadamente relatados.

Inicialmente apresenta-se o resultado de um ensaio realizado com AlSi-5, 1,2 mm de diâmetro, utilizando-se argônio puro nos três gases do processo. Este

ensaio foi realizado com imposição de corrente no circuito Plasma e controle de tensão no circuito MIG. Quatro níveis de corrente plasma foram regulados: 40, 60, 80 e 100 A, assim como quatro níveis de velocidade do arame: 7, 8, 9 e 10 m/min. A velocidade do arame foi limitada a 10 m/min em função da dificuldade de se manter uma velocidade estável acima deste limite, quando a soldagem é conduzida com arame de alumínio de 1,2 mm de diâmetro. A tensão de referência do circuito MIG ($U_{MIG-REF}$) foi regulada, com o objetivo de manter a distância entre a extremidade sólida do arame e a superfície da peça de trabalho (comprimento do arco híbrido) em aproximadamente 4 mm. Após a estabilização do comprimento do arco híbrido, os oscilogramas de tensões e correntes foram gravados, do qual foram posteriormente extraídos os valores de corrente média MIG e os valores de T_{md} . A distância bico de contato / peça foi fixada em 28 mm.

O gráfico da figura 6.39 apresenta os valores de d_{mg} , em função de I_{MIG} e de I_{PL} , enquanto que o gráfico da figura 6.40 apresenta os valores de T_{md} em função das mesmas correntes.

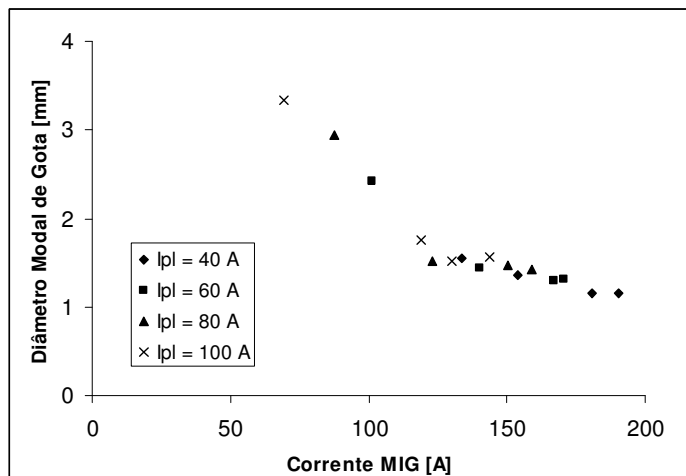


Figura 6.39 – Influência das correntes IMIG e IPL sobre o diâmetro modal de gota. Arame AISi-5, 1,2 mm de diâmetro em atmosfera de argônio.

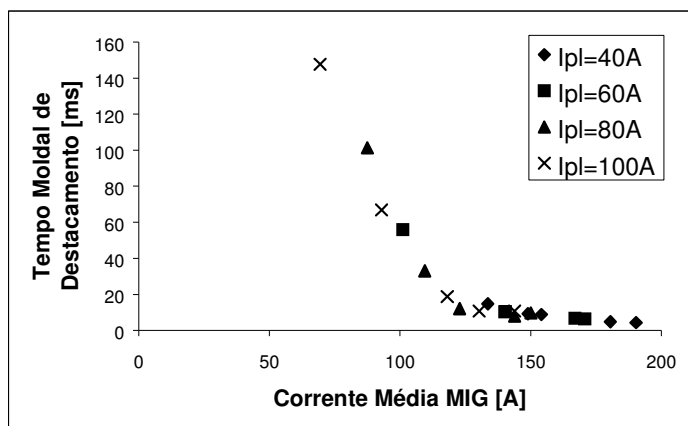


Figura 6.40 – Influência das correntes IMIG e IPL sobre o tempo modal de destacamento

O diâmetro modal de gota (d_{mg}) diminui com o aumento da corrente I_{MIG} , com um comportamento similar ao do processo MIG/MAG. Não é possível, entretanto, identificar uma variação brusca no diâmetro de gota, com a qual se pode associar uma corrente de transição. Pelo menos na faixa de valores de corrente estudada.

Não foi identificada influência da corrente I_{PL} sobre d_{mg} . Este fato indica que a corrente I_{MIG} e, por consequência, as forças de origem eletromagnéticas são as principais responsáveis pelo destacamento de gota.

Após a obtenção destes resultados, um experimento similar foi conduzido com o mesmo arame de alumínio, utilizando-se Ar + 50% He nos gases MIG e Plasma e Ar puro como gás de proteção. A primeira constatação é de que houve um aumento de aproximadamente 30% na velocidade do arame, utilizando-se a mistura gasosa, em comparação com os resultados obtidos com argônio puro, para os mesmos valores de corrente I_{PL} e I_{MIG} .

O gráfico da figura 6.41 mostra uma comparação entre os valores de diâmetro modal de gota obtidos com a soldagem com argônio puro e com a mistura de argônio com hélio. Nenhuma variação significativa pode ser associada à adição de hélio aos gases MIG e de plasma.

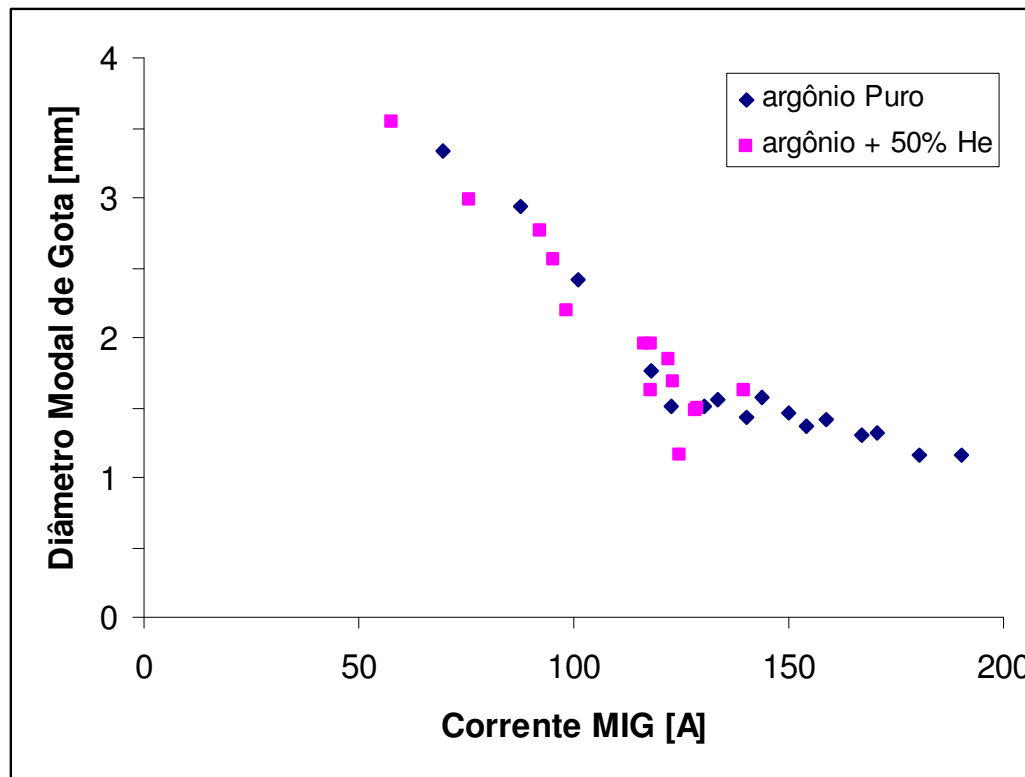


Figura 6.41 – Influência da mistura de hélio aos gases MIG e Plasma sobre o diâmetro de gota destacada.

Seguindo os modelos propostos por Amin (1983), é possível associar um determinado diâmetro ou volume de gota a um valor de corrente e a um determinado tempo de destacamento. Este relacionamento pode ser expresso pela equação 3.12.

$$t_p = K_v \cdot I_p^{-2,3}$$

Equação 3.12

Em seguida os valores de K_v foram calculados para cada diâmetro de gota. O gráfico da figura 6.42 mostra a relação entre K_v e d_g .

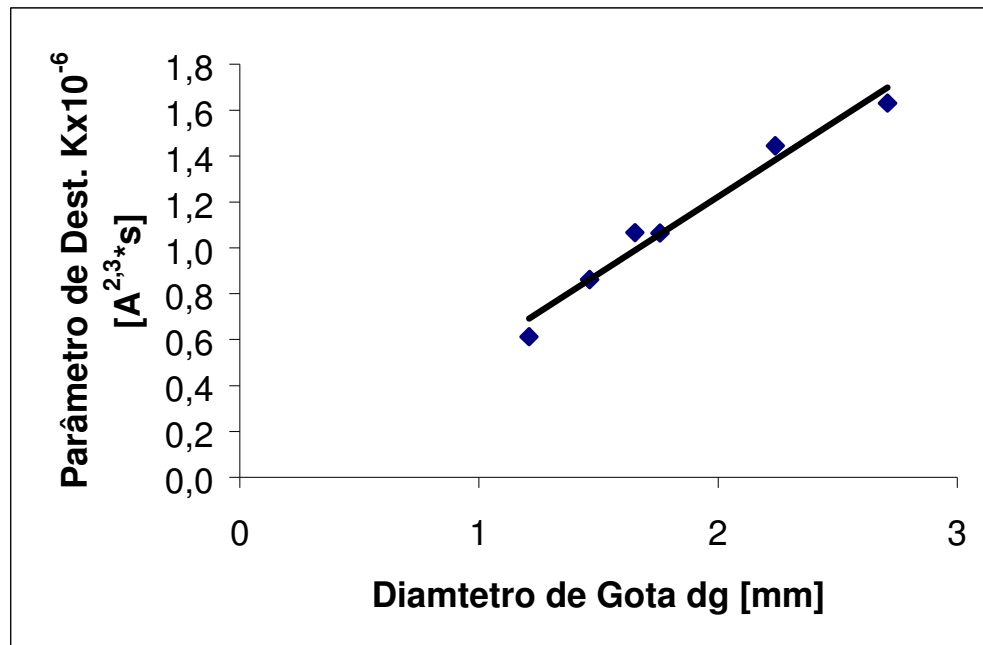


Figura 6.42 – Parâmetro de destacamento Kv de Amin [A^{2,3}. ms] em função do diâmetro modal de gota, para arame de alumínio, 1,2 mm de diâmetro em atmosfera de argônio puro.

O ajuste de uma reta a estes pontos resulta na equação 7.16.

$$K = 1.023.000 \cdot d_g - 627500 \quad \text{Equação 6.16}$$

Substituindo 6.16 em 3.12, obtém-se a equação empírica que correlaciona o diâmetro de gota, o tempo de pulso e a corrente de pulso:

$$tp = (1023000 \cdot dg - 627500) \cdot I_p^{-2,3} \quad \text{Equação 6.17}$$

Para avaliar o desempenho deste modelo empírico, que deriva dos modelos propostos por Amin (1983), quatro ensaios foram realizados, com os parâmetros da tabela 7.4. A velocidade do arame foi calculada com o auxílio da equação 6.11. O período foi calculado pela equação 3.13 e a corrente de base pela equação 3.14. Os respectivos oscilogramas de I_{MIG} e U_{MIG} são apresentados na figura 6.43.

Tabela 6.4 – Experimentos com diferentes valores de d_g e I_p , para testes de estabilidade

Experimento	A	b	c	d
I_{PI} [A]	70	70	70	70
Diâmetro de Gota [mm]	1,4	1,8	1,4	1,45
Diâmetro do Arame [mm]	1,2	1,2	1,2	1,2
I_p [A]	300	300	300	200
t_p [ms]	1,6	2,4	1,6	4,4
V_a [m/min]	9,8	9,8	11	11,5
t_b [ms]	6,2	14,1	9,4	3,7
I_b [A]	110	124	132	151

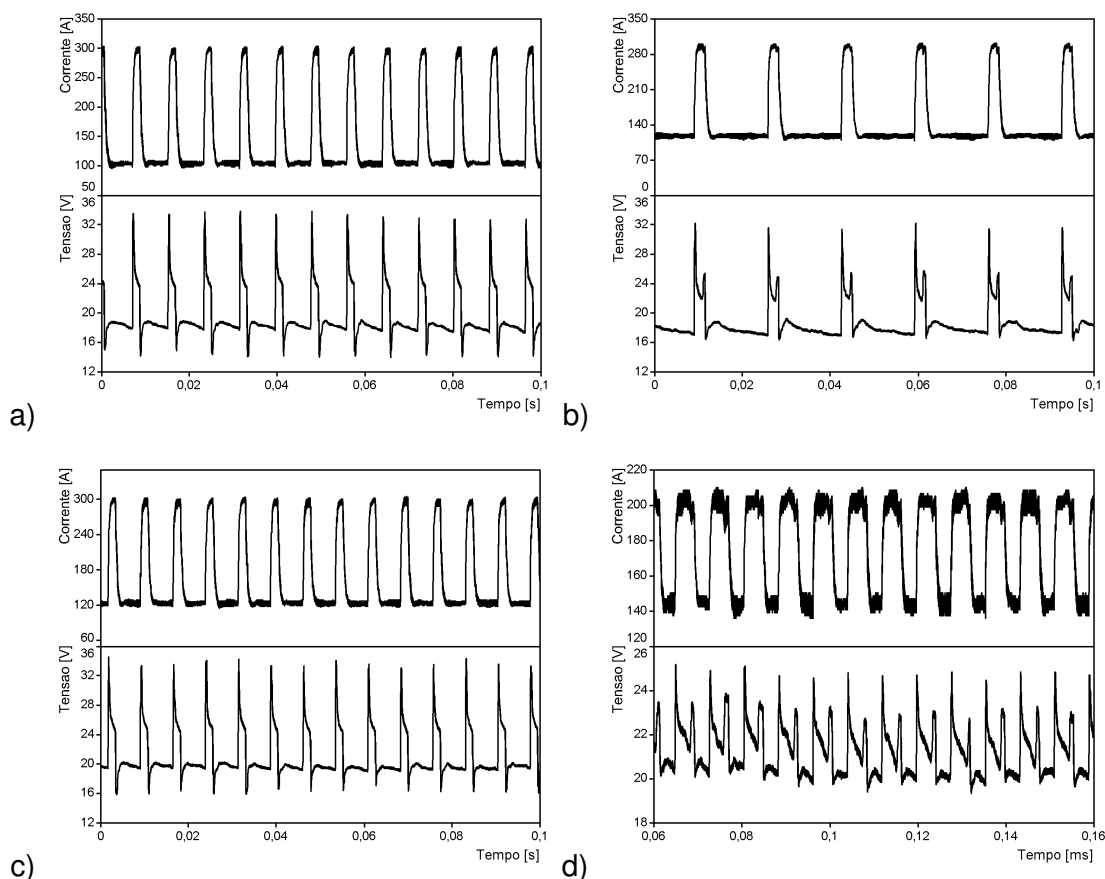


Figura 6.43 – Oscilogramas dos parâmetros U_{MIG} e I_{MIG} Na soldagem com arame de alumínio, 1,2 mm de diâmetro, realizada com o processo Plasma-MIG, com corrente MIG pulsada. Parâmetros: Tabela 7.3

Nos oscilogramas “b” e “d” da figura 6.43 pode-se observar um pico de tensão no início e no final de cada pulso. Supõe-se que o pico do início do pulso está relacionado a uma característica indutiva do arco voltaico, não tendo nenhuma ligação com o destacamento de gota. Na soldagem TIG pulsada, este tipo de comportamento também é observado no início dos pulsos. No final de cada pulso, observa-se um outro pico de tensão. Este sim é associado ao destacamento de gota,

pois repete exatamente o comportamento da tensão durante um destacamento no modo de transferência globular, apresentado no item 6.4.1. Nenhum pico de tensão é identificado durante o tempo de base nestes dois oscilogramas, o que indica que não está ocorrendo destacamento na base. Se estas considerações estão corretas, a equação ajustada que calcula o pulso t_p , em função de um determinado diâmetro de gota d_g e de uma corrente de pulso I_p (equação 6.10), funcionou de maneira satisfatória nestes dois experimentos representados pelos oscilogramas “b” e “d”.

No caso dos oscilogramas “a” e “c” da figura 6.43, não pode ser observado o pico de tensão ao final de cada pulso. Entretanto a queda de tensão logo após o final do pulso é muito mais acentuada que a observada nos oscilogramas “b” e “d”. Acredita-se que o destacamento de gota está ocorrendo exatamente neste instante. A queda de tensão é explicada pela aproximação da gota fundida à peça de trabalho, antes do destacamento. Logo que a gota é destacada, a tensão aumenta até atingir o patamar de base. Todavia estas afirmações só podem ser comprovadas utilizando-se filmagem em alta velocidade, sincronizada com um sistema de aquisição de dados. Apesar destas diferenças, os quatro experimentos foram realizados com excelente nível de estabilidade dos arcos, atestada pela qualidade dos oscilogramas, e com isenção total de respingos.

O mesmo procedimento foi realizado para a determinação dos parâmetros de pulso utilizando-se arames de aço (ER 70 S-6) e à base de cobre (CuSi-3). A tabela 6.5 apresenta os parâmetros utilizados em testes de soldagem com corrente I_{MIG} pulsada para estes dois arames. A figura 6.44 apresenta o oscilograma de uma brasagem com o arame CuSi-3, 1,0 mm e a figura 6.45 apresenta o oscilograma de uma soldagem com o arame ER 70 S-6.

Os dois experimentos descritos na tabela 6.5 apresentaram boa estabilidade, sem ocorrência de respingos e formação de cordões com boa regularidade. Os oscilogramas das figuras 6.44 e 6.45 apresentam boa repetibilidade, o que reflete a estabilidade do processo. Esta análise indica que os modelos propostos para a predeterminação dos parâmetros de pulso apresentam funcionalidade satisfatória. Todavia, estes modelos ainda devem ser confirmados pela técnica de filmagem de alta velocidade.

Tabela 6.5 – Experimentos com corrente MIG pusada, na soldagem de aço e brasagem de chapas galvanizadas

Experimento		CuSi-3	ER 70 S-6
I_{p1}	[A]	50	35
Diâmetro de Gota	[mm]	1,33	1,5
Diâmetro do Arame	[mm]	1,0	1,2
I_p	[A]	450	400
t_p	[ms]	1,4	1,6
V_a	[m/min]	9,5	6
t_b	[ms]	8,4	13,5
I_b	[A]	36	145

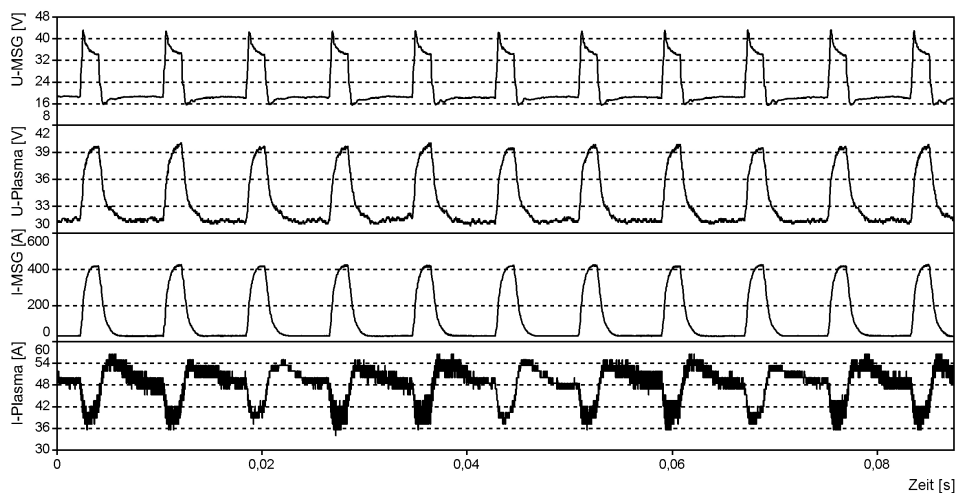


Figura 6.44 – Oscilograma de brasagem realizada com arame de CuSi-3 – Parâmetros: Tabela 6.5.

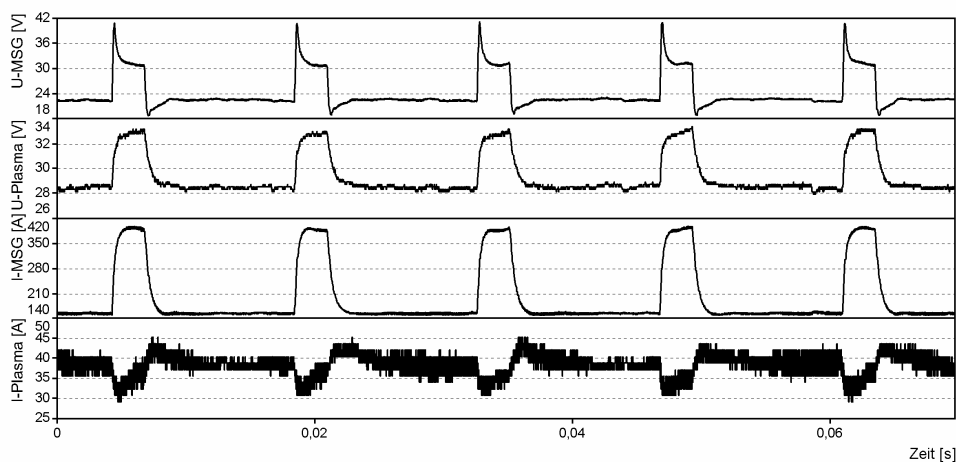


Figura 6.45 – Oscilograma de soldagem realizada com arame ER 70 S-6. Parâmetros: Tabela 6.5.

6.9 Influência do balanço de correntes I_{PL} e I_{MIG} sobre a geometria do cordão de solda.

Os experimentos realizados no item 6.6 deste trabalho mostram que a taxa de fusão é influenciada, predominantemente, pela corrente I_{MIG} , principalmente para o arame de aço carbono, mas não é independente da corrente I_{PL} . Isto sugere que, para uma determinada taxa de fusão, diferentes potências totais do processo podem ser empregadas. Os modelos obtidos experimentalmente para o cálculo da velocidade do arame em função das correntes do processo, também mostram que é possível manter a taxa de fusão para diferentes balanços entre as correntes I_{PL} e I_{MIG} . Dois experimentos são relatados a seguir, para ilustrar o efeito dos diferentes balanços de corrente sobre a geometria da zona fundida da solda, mantendo-se a taxa de fusão de arame constante.

O primeiro experimento a ser apresentado, foi realizado com chapas de aço carbono, espessura de 6,35 mm, que tiveram sua superfície esmerilhada para ensaios de simples deposição. Para este experimento, foi utilizado o arame maciço denominado “Union X 96 / M21”, que também apresenta a denominação G Mn4Ni2,5CrMo, com 1,2 mm de diâmetro. Estes experimentos foram realizados na bancada de n. 1, no SLV-München. Argônio puro foi utilizado nos gases de plasma e de proteção, enquanto que uma mistura de Ar + 10% CO₂ foi utilizada como gás MIG. Três níveis de I_{PL} foram utilizados: 40; 60 e 80A. A corrente I_{MIG} de cada ensaio foi ajustada para que a taxa de fusão do arame permanecesse constante. A velocidade de soldagem foi mantida em 0,3 m/min para os três ensaios realizados. Os demais parâmetros, apresentados na tabela 6.6, foram calculados utilizando-se os modelos propostos para velocidade do arame e determinação dos parâmetros de pulso, descritos nos itens 6.6 e 6.7.

Tabela 6.6 – Ensaios com diferentes balanços entre IPL e IMG para observar variações da geometria de soldas em aço carbono

Parâmetro	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
I_{PI} [A]	40	60	80
Diâmetro de Gota [mm]	1,5	1,5	1,5
Diâmetro do Arame [mm]	1,2	1,2	1,2
I_p [A]	380	380	380
t_p [ms]	2,4	2,4	2,4
V_a [m/min]	5,3	5,3	5,3
t_b [ms]	15,3	15,3	15,3
I_b [A]	72	66	61

Na figura 6.46 são apresentadas as seções transversais dos três ensaios descritos na tabela 6.6. Quanto maior a corrente I_{PL} , maior a largura do cordão, mantendo-se a taxa de fusão de arame e a velocidade de soldagem constantes. Também ocorreu uma leve mudança na geometria na zona fundida do metal de base, onde observa-se uma leve redução da penetração com a redução de I_{MIG} .

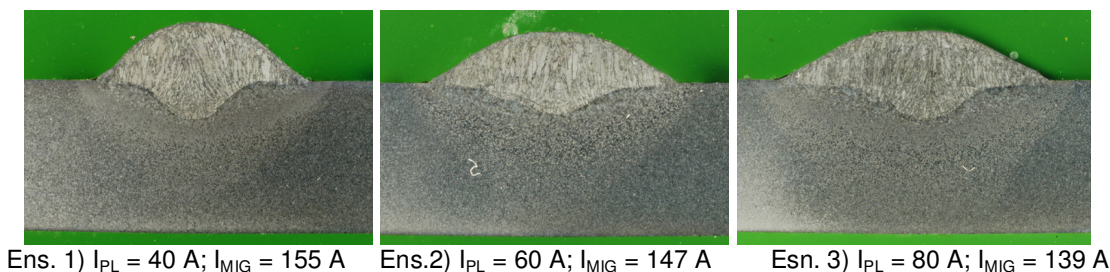


Figura 6.46 – Influência do balanço de correntes sobre a geometria do cordão de solda. $V_S = 0,3$ m/min e $V_a = 5,3$ m/min para os três ensaios. Demais parâmetros: Tabela 6.6.

Outra experiência sobre chapa de aço de 3 mm de espessura foi realizada, com o objetivo de quantificar a influência de I_{PL} sobre a largura do cordão de solda. O resultado é apresentado no gráfico da figura 6.47.

A figura 6.48 apresenta um ensaio realizado sobre chapa de alumínio de 5 mm de espessura, utilizando-se arame AISi-5, de 1,2 mm de diâmetro, também com três níveis de corrente plasma, mantendo-se as velocidades do arame e de soldagem constantes. Argônio puro foi utilizado nos três gases do processo. Os demais parâmetros são apresentados na tabela 6.7. Observa-se a redução da penetração, conforme a corrente I_{MIG} é reduzida, mantendo-se a velocidade do arame e de soldagem constantes.

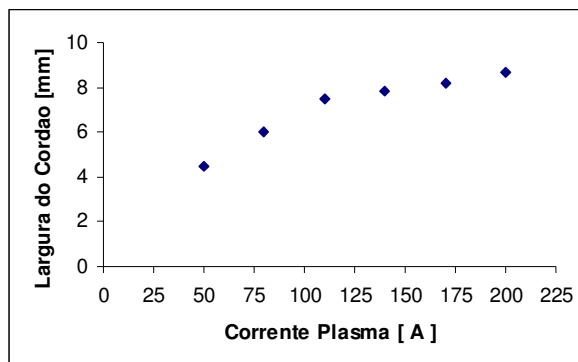
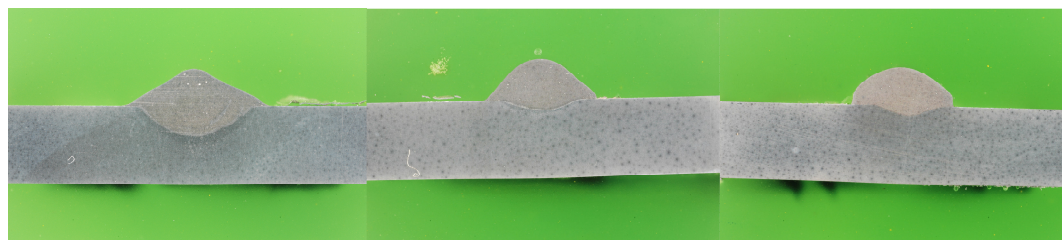


Figura 6.47 – Largura do Cordão em função da corrente plasma no processo Plasma-MIG em atmosfera de Ar + 4% CO_2 . Arame-eletrodo de aço, 1,2 mm de diâmetro. Velocidade do arame: 4 m/min. Velocidade de soldagem: 50 cm/min. Material de base: Aço carbono, 3 mm de espessura.

Tabela 6.7 – Ensaio com diferentes balanços entre IPL e IMG para observar variações da geometria de soldas em alumínio

Parâmetro		Ensaio a	Ensaio b	Ensaio c
I_{PI}	[A]	40	70	100
Diâmetro de Gota	[mm]	1,6	1,6	1,6
Diâmetro do Arame	[mm]	1,2	1,2	1,2
I_p	[A]	240	240	240
t_p	[ms]	3,5	3,5	3,5
V_a	[m/min]	6,1	6,1	6,1
t_b	[ms]	16,4	16,4	16,4
I_b	[A]	48	36	25



a) IPL = 40 A; IMG = 82 A b) IPL = 70 A; IMG = 72 A c) IPL = 100 A; IMG = 63 A

Figura 6.48 – Influência do balanço das correntes IMG e IPL sobre a geometria do cordão de solda. $V_s = 1,5$ m/min; $V_a = 6,1$ m/min. Demais parâmetros: tabela 6.7.

7 A UTILIZAÇÃO DO PROCESSO PLASMA-MIG NA UNIÃO DE CHAPAS POR SOLDAGEM E BRASAGEM

7.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada a utilização do processo Plasma-MIG para a união de chapas de diversos materiais, utilizando-se os conhecimentos desenvolvidos e relatados no Capítulo 6. Os testes foram realizados na soldagem e brasagem de chapas de aço carbono, alumínio, ferro fundido nodular e chapas de aço galvanizado.

Em função do maior envolvimento com os aspectos relacionados à estabilidade e repetibilidade, características de fundamental importância para a aplicação industrial do processo Plasma-MIG, não foi possível uma análise metalúrgica aprofundada sobre os resultados obtidos em tempo hábil para este trabalho. Entretanto as juntas soldadas de ferro fundido nodular foram submetidas a ensaios metalográficos, medição do perfil de microdureza e medição de ciclos térmicos, apesar desta caracterização não fazer parte dos objetivos do trabalho. Estes resultados serão resumidamente apresentados ao final deste capítulo.

7.2 Soldagem de Alumínio

Utilizando-se o conhecimento desenvolvido neste trabalho, como modelos para o cálculo da velocidade do arame e determinação dos parâmetros de pulso, foi conduzida a soldagem de chapas de alumínio em juntas de topo. Inicialmente apresentam-se os resultados obtidos com chapa de 5 mm de espessura sem preparação de chanfro. Para exemplificar a potencialidade do processo, são apresentadas as seções transversais de duas soldas, nas quais foram utilizadas as mesmas velocidades de arame e de soldagem, com diferentes combinações de correntes I_{PL} e I_{MIG} . A primeira solda (figura 7.1 - a) foi realizada com $I_{PL} = 80$ A e $I_{MIG-MÉDIA} = 90$ A, enquanto que a segunda solda (figura 7.1 - b) foi feita com $I_{PL} = 40$ A e $I_{MIG-MÉDIA} = 120$ A. Argônio puro foi utilizado nos três gases do processo. A velocidade de soldagem foi mantida em 0,55 m/min e a velocidade do arame em 7 m/min para os dois ensaios.

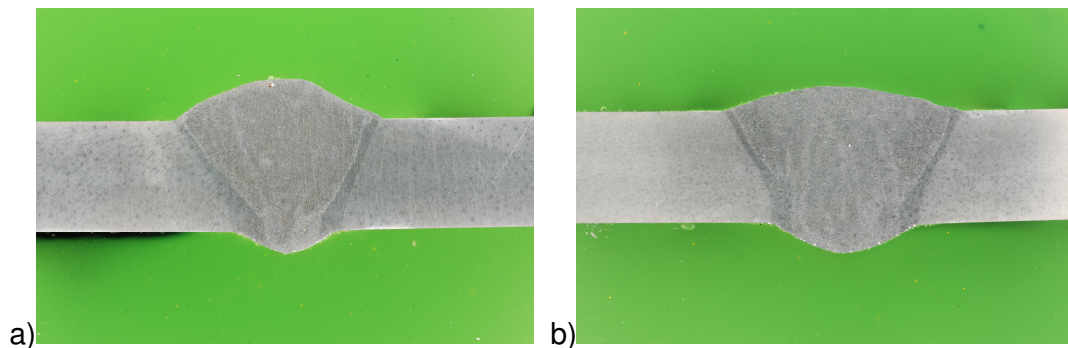


Figura 7.1 – Soldagem de chapas de alumínio. Espessura: 5 mm. Arame: AISi5, 1,2 mm de diâmetro. Velocidade de soldagem: 0,55 m/min. Junta de topo, sem preparação de chanfro.

O ensaio representado pela figura 7.1-a apresentou um menor reforço da raiz e alguns poros superficiais. Os ensaios não apresentaram repetibilidade satisfatória, pois eventualmente ocorreu falta de penetração na raiz.

O aumento da corrente I_{MIG} proporcionou um reforço da raiz mais largo (fig. 7.1-b), melhorando também a repetibilidade dos resultados. Os poros superficiais também foram eliminados neste segundo ensaio.

A figura 7.2 mostra a seção transversal obtida de uma junta soldada, com chapas de alumínio de 2 mm de espessura. Foi utilizado argônio puro nos três gases do processo e a velocidade de soldagem atingida foi de 2,7 m/min. Os demais parâmetros são apresentados na tabela 7.1.



Figura 7.2 – Soldagem de chapas de alumínio. Espessura: 2 mm. Arame: AISi5, 1,2 mm de diâmetro. Velocidade de soldagem: 2,7 m/min. Demais parâmetros: Tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Parâmetros de pulso para a soldagem de chapa de 2 mm de espessura de alumínio

I_{PI}	[A]	80
Diâmetro de Gota	[mm]	1,5
Diâmetro do Arame	[mm]	1,2
I_p	[A]	340
t_p	[ms]	1,4
V_a	[m/min]	6,1
t_b	[ms]	13,9
I_b	[A]	43,5

Este experimento exemplifica a potencialidade do processo Plasma-MIG na soldagem de união de chapas de alumínio de espessura relativamente pequena. A elevada velocidade de soldagem atingida também se constitui em uma característica favorável do processo, entretanto a proteção gasosa deve ser aprimorada para estas condições. Conforme mostra a figura 7.3, o deslocamento da pistola em elevada velocidade faz com que parte da poça de fusão ainda líquida entre em contato com a atmosfera, causando oxidação e formação de poros na superfície dos cordões.

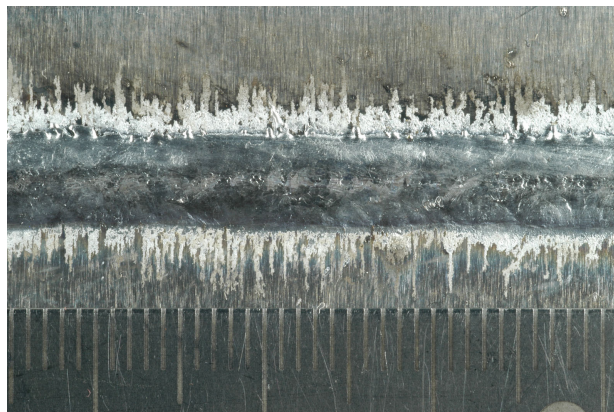


Figura 7.3 – Soldagem Plasma-MIG de chapa de alumínio 2 mm de espessura. $V_s = 2,7$ m/min. Demais parâmetros: Tabela 7.1.

Com estes experimentos constatou-se que a soldagem Plasma-MIG realmente apresenta algumas vantagens na soldagem de alumínio, por exemplo: isenção de respingos, soldagem em elevadas velocidades e possibilidade de pré-aquecimento da junta pelo arco plasma, o que garante um início de cordão livre de defeitos. Todavia, o processo exige adequado dimensionamento dos parâmetros de soldagem, para que a fusão e transferência metálica ocorram de forma estável e com boa repetibilidade.

7.3 Soldagem Plasma-MIG de Aços

A soldagem de aço carbono com o processo Plasma-MIG foi realizada em chapas de 2 mm de espessura, com junta de aresta, utilizando-se arame ER 70 S-6 de 1,2 mm de diâmetro. A meta era alcançar velocidade de soldagem de 3 m/min. Inicialmente foram conduzidos ensaios com controle de tensão, onde a velocidade do arame atingiu mais de 8 m/min, com correntes acima de 250 A. Nesta faixa de corrente, utilizando-se Ar + 10% CO₂ como gás MIG, a transferência metálica já pode ser caracterizada como Spray, o que permitiria uma soldagem estável e livre de respingos. O que foi observado na prática, no entanto, é que em elevadas velocidades de soldagem ocorrem variações instantâneas da impedância do circuito de soldagem, promovendo flutuações na corrente I_{MIG} e, conseqüentemente, variações na freqüência de destacamento, diâmetro de gota e taxa de fusão. Além de oferecerem risco de ocorrência de curtos-circuitos, estas variações provocam defeitos no cordão de solda, pois em elevada velocidade de deslocamento, qualquer flutuação na taxa de transferência metálica pode provocar trechos onde o material depositado não é suficiente para preencher a junta.

Na tentativa de controlar melhor a taxa de transferência metálica, soldagens com corrente pulsada no circuito MIG foram conduzidas, mesmo com correntes médias elevadas, situação na qual a utilização desta técnica não seria justificável. Entretanto os resultados foram bastante satisfatórios, permitindo a soldagem de chapas de 2 mm com elevadas velocidades.

A figura 7.4 mostra a seção transversal de uma junta soldada com corrente MIG pulsada, e velocidade de soldagem de 4 m/min. Foi utilizada uma mistura de Ar + 10% CO₂ nos gases MIG e Plasma. Argônio puro foi utilizado como gás de proteção. Os demais parâmetros são listados na tabela 7.2.



Figura 7.4 – Seção transversal de soldagem Plasma-MIG em chapas de aço carbono 2 mm de espessura. $V_s = 4$ m/min. Demais parâmetros: Tabela 7.2.

Tabela 7.2 – Parametros de Pulso para a soldagem de chapas de aço carbono de 2 mm de espessura

I_{PI}	[A]	80
Diâmetro de Gota	[mm]	1,42
Diâmetro do Arame	[mm]	1,2
I_p	[A]	400
t_p	[ms]	1,8
V_a	[m/min]	9,3
t_b	[ms]	6,8
I_b	[A]	142

O processo Plasma-MIG também foi testado para a soldagem de chapas de aço de alta resistência, 6 mm de espessura, denominado de XABO 1100, cuja composição química é apresentada na tabela 7.3. Para a soldagem deste material foi utilizado um arame denominado de G Mn4 Ni2,5 Cr Mo (Union X 96 / M21), de 1,2 mm de diâmetro. Os ensaios de soldagem foram realizados no SLV-München, dentro do escopo do presente trabalho, a pedido de outra instituição, que se encarregou de realizar os ensaios destrutivos para a qualificação do procedimento (Gerster, 2004). Os parâmetros de soldagem do melhor resultado são descritos na tabela 7.4, enquanto que a seção transversal da solda é apresentada na figura 7.5.

Tabela 7.3 – Composição química do aço XABO 1100.

C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Cu	Mo	N	Nb	Ni
0,17	0,24	0,95	0,010	0,002	0,039	0,64	0,01	0,61	0,0052	0,026	1,91

Tabela 7.4 – Parametros de pulso para a soldagem do aço XABO 1100, 6 mm de espessura

I_{PI}	[A]	80
Diâmetro de Gota	[mm]	1,4
Diâmetro do Arame	[mm]	1,2
I_p	[A]	400
t_p	[ms]	2,5
V_a	[m/min]	5
t_b	[ms]	12,5
I_b	[A]	46

Na soldagem de aços, o processo Plasma-MIG oferece atuação mais efetiva no controle da geometria da solda, em função da corrente I_{PL} , sendo que quanto maior seu valor, maior a largura do cordão e maior ângulo de molhamento.

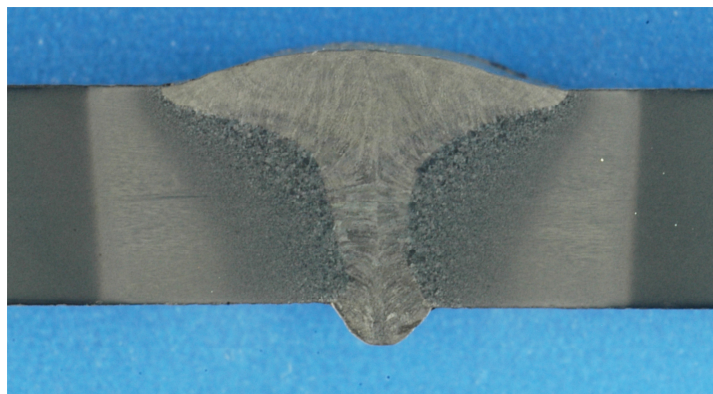


Figura 7.5 – Seção transversal de união soldada pelo processo Plasma-MIG, de aço de alta resistência XABO 1100. Material de Adição: Union X 92 / M 21, 1,2 mm de diâmetro. Espessura da chapa: 6 mm. Junta em V, nariz de 1 mm, com espessamento de 1 mm. Velocidade de soldagem: 0,4 m/min. Gases: MIG= Ar + 10 %CO₂; Plasma = Proteção = Ar Puro.

7.4 Brasagem de Chapas Galvanizadas

A brasagem de chapas galvanizadas em elevadas velocidades é um processo de interesse principalmente na indústria automobilística. Os ensaios aqui descritos fizeram parte de um amplo projeto realizado no SLV-Muenchen, que abordou vários procedimentos voltados a esta aplicação prática.

Os corpos de prova soldados foram chapas de aço carbono galvanizadas, com espessura de 1 mm, em junta sobreposta sem espessamento. Os ensaios foram realizados com um arame de CuSi-3, 1,0 mm de espessura, utilizando-se Argônio puro nos três gases do processo. A figura 7.6 mostra a aparência superficial e a figura 7.7 mostra a seção transversal do melhor resultado obtido, com velocidade de soldagem de 4 m/min. Os outros parâmetros utilizados são apresentados na tabela 7.5.



Figura 7.6 – Brasagem de chapa de aço galvanizado 1 mm de espessura, realizada pelo processo Plasma-MIG. Vs = 4 m/min. Demais parâmetros: Tabela 7.5.



Figura 7.7 – Seção transversal de brasagem realizada pelo processo Plasma-MIG. $V_s = 3$ m/min. Parâmetros: Tabela 8.5.

Tabela 7.5 – Parametros de pulso para a brasagem de chapas de aço galvanizado, 1 mm de espessura

I_{PI}	[A]	50
Diâmetro de Gota	[mm]	1,3
Diâmetro do Arame	[mm]	1,0
I_p	[A]	450
t_p	[ms]	1,4
V_a	[m/min]	9,5
t_b	[ms]	8,4
I_b	[A]	77

A utilização de corrente pulsada na brasagem pelo processo Plasma-MIG se mostrou uma importante ferramenta para a estabilidade do destacamento e para o direcionamento regular das gotas para a poça de fusão. Observou-se que com a soldagem com corrente I_{MIG} constante, as gotas são expulsas para fora da região de fusão, provavelmente pela ação de forças geradas pela evaporação da camada de zinco que se localiza sob o arco voltaico. A utilização de elevadas correntes de pulso, com tempo de pulso devidamente dimensionado, garante o destacamento e aceleração das gotas em direção à junta, vencendo estas forças causadas pela evaporação do revestimento das chapas.

8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

8.1 Conclusões

- A bancada de ensaios no Labsolda/UFSC foi construída e apresentou condições para a realização de experimentos científicos e desenvolvimento tecnológico utilizando-se o processo Plasma-MIG.

- Para fazer a abertura dos arcos através da técnica “soft-start” é necessário a utilização de baixas correntes de curto-circuito, que não causem a aderência do arame-eletrodo à peça de trabalho. Logo após o início do retrocesso do arame é necessário elevar a corrente para manter um arco piloto estável.

- A transferência por curto-circuito na soldagem Plasma-MIG, principalmente na presença de misturas ativas nos gases do processo é instável, provocando extinção do arco plasma.

- A soldagem com transferência globular ou por vôo livre apresenta boa estabilidade.

- A corrente plasma não exerce influência sobre o diâmetro de gota destacado na transferência por vôo livre.

- O modelo elétrico proposto, baseado na associação de uma força contra eletromotriz à uma carga resistiva para simular o arco voltaico apresentou bons resultados na simulação dos sinais de tensão em função das correntes MIG e Plasma.

- A corrente plasma exerce influência significativa e linear na taxa de fusão de arames de alumínio. Além disto, foi observado que quanto maior o diâmetro do arame-eletrodo, maior a quantidade de energia oriunda do arco plasma que é absorvida.

- Na soldagem com arames de aço carbono, a contribuição da corrente plasma para a taxa de fusão vai diminuindo, à medida que maiores velocidades do arame são utilizadas.

- Um comando sinérgico, baseado em um comando utilizado para a soldagem MIG/MAG para corrente pulsada, foi proposto e apresentou boa funcionalidade e estabilidade.

- Na soldagem de aço carbono, foi constatado que o aumento da corrente plasma promove a formação de cordões de solda mais largos, para a mesma taxa de fusão e velocidade de soldagem.

- Na soldagem de alumínio foi constatado que o aumento da corrente MIG, para uma mesma taxa de fusão e velocidade de soldagem, promove um aumento na penetração da solda.

- A soldagem Plasma-MIG de alumínio apresenta boa estabilidade e possibilidade de obtenção de diferentes geometrias da zona fundida, em função da seleção de diferentes balanços de correntes plasma e MIG, para uma mesma taxa de fusão.

- Velocidades de deslocamento de 2,7 m/min foram atingidas na soldagem de chapas de alumínio de 2 mm de espessura, formando zonas fundidas de geometria adequada.

- Velocidades da ordem de 3 m/min foram atingidas na soldagem de chapas de aço carbono de 2 mm de espessura. Bons resultados também foram obtidos na soldagem de chapas de aço de alta resistência.

- Velocidades de 4 m/min foram atingidas na brasagem de chapas de aço galvanizado de 1 mm de espessura, com excelente estabilidade, isenção total de respingos e reduzida degradação da camada de zinco.

8.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Utilizar técnicas de shadowgrafia para aprofundar o entendimento a respeito das instabilidades no arco plasma causadas por curtos-circuitos;

- Utilizar técnicas de shadowgrafia para averiguar a independência do diâmetro de gota destacada em relação à corrente plasma;

- Melhorar o entendimento da influência do comprimento e área transversal do arame-eletrodo nos modelos para o cálculo da taxa de fusão em função das correntes plasma e MIG.

- Melhorar o entendimento a respeito do comportamento físico dos componentes do modelo elétrico proposto para o processo Plasma-MIG.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(AGA, 1989) – The AGA MIG/MAG Welding Training Package – MIG/MAG Pulsed Arc. Video VHS.

(Agnew, 1966) – Agnew, S. A. e Daggett, E. H. **Introduction to pulsed-spray arc welding**. Welding Journal, abril 1966.

(Amin, 1981) – Amin, M. **Synergic pulse MIG welding**. Metal Construction. June 1981, p 349 – 353.

(Amin, 1983) – Amin, M. **Pulse current parameters for arc stability and controlled metal transfer in arc welding**. Metal Construction. May 1983, p 272 – 278.

(AWS, 1991) – American Welding Society. **Welding Handbook**. Eighth Edition. Miami, 1991.

(Baixo, 1999) – Baixo, C. E. I. **Estudo da soldagem MIG/MAG pela técnica hiperbárica a seco**. Tese de Doutorado. UFSC. Florianópolis, dezembro de 1999.

(Bálsamo, 2000) – Bálsamo, P. S. S; Vilarinho, L. O e Scotti, A. **Determinação criteriosa dos parâmetros de pulso para soldagem MIG pulsada em alumínio e aço inoxidável**. Soldagem & Inspeção, ano 6 – n. 2 – Suplemento Técnico, 2000, pp 1 – 9.

(Correa, 1999) – Correa, M. A. **Diretrizes de projeto e qualificação metrológica de sistemas de medição de grandezas elétricas em processos de soldagem a arco**. Dissertação de Mestrado. UFSC, Setembro de 1999.

(Dolles, 2002) – Dolles, M. **Untersuchungen von Verfahrenkombination Laser-Plasma-Auftragschweissen**. Diplomarbeit – Fachhochschule Amberg-Weiden. Amberg, Dez. 2002.

(Draugelates, 2001) – Draugelates, U; Bouaifi, B; Bartz, J. **Neue Entwicklungen beim Plasma-MIG-Hybridschweißen**. 7. Internationales Aachener Schweißtechnik Kolloquium, 03. – 04.05.2001. Band I, s.103 – 116.

(Dupont, 1995) – Dupont, J. N; Marder, A. R. **Thermal efficiency of arc welding process**. Welding Journal, Dez. 1995, v. 74, n 12, p. 406-s – 416-s.

(Dutra, 1989) – Dutra, J. C. **Procedimento computadorizado de determinação, seleção e controle de variáveis na soldagem MIG/MAG**. Tese de Doutorado. Pós-graduação em engenharia mecânica – UFSC. Agosto de 1989.

(El Rayes, 2004) – El Rayes, M; Walz, C and Sepold, G. **The influence of various hybrid welding parameters on bead geometry**. Welding Research, may 2004, p 147-s – 153-s.

(Essers, 1972) – Essers, W. G; Jelmorini, G; Tichelar, G. W. **Method of and Device for the Thermal Working and Processing of High-Melting-Point Materials**. United States Patent, Patent N. 3,830,997. Sep. 1972.

(Essers, 1972-2) – Essers, W. G; Jelmorini, G; Tichelaar, G. W. **Arc Characteristics and metal transfer with plasma-MIG welding.** Metal Construction and British Welding Journal. Dec. 1972, p.439 – 447.

(Essers, 1976) – Essers, W. G. **New process combines Plasma with GMA Welding.** Welding Journal, volume 55 – n. 5, may 1976, p. 394 – 400.

(Essers, 1979) – Essers, W. G; Jelmorini, G; Tichelar, G. W. **Method of and Device for Plasma MIG Welding.** United States Patent, N. 4,142,090. Feb. 1979.

(Essers, 1981) – Essers, W. G; Willems, G. A. M; Buelens, J. J. C; van Gompel, M. R. M. **Plasma-MIG welding – a new torch and arc starting method.** Metal Construction, january 1981, p. 36 – 42.

(Essers, 1981-2) – Essers, W. G; Walter, R. **Heat Transfer and Penetration Mechanisms with GMA and Plasma-GMA welding.** Welding Journal, feb. 1981, p. 37-s a 42-s.

(Ewans, 1998) – Ewans, D. M; McClure, J. C; Nunes, A. C. **Arc efficiency of plasma arc welding.** Welding Journal, Feb. 1998, v 77, n 2, p. 53-s – 58-s.

(Gerster, 2004) – Gerster, P. und Wegmann, H. **Besonderheiten beim Schneiden und Schweißen hochfester Feinkornbaustähle bis 1100 N/mm² Mindeststreckgrenze.** Schweißen im Anlagen- und Behälterbau 2004 32. Sondertagung vom 11. bis 13.02.2004 in München. DVS-Berichte Band 228.

(Gohr Jr, 1992) – Gohr Jr, Raul. **Projeto e realização de uma fonte de energia para soldagem multiprocessor.** Dissertação de Mestrado. UFSC, 1992.

(Gohr Jr. 2002) – Gohr Jr, Raul. **Novos métodos de controle da soldagem MIG/MAG.** Tese de Doutorado. UFSC – Florianópolis, 2002.

(Gonçalves e Silva, 2005) – Gonçalves e Silva, R. H. **Soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito controlado aplicada ao passe de raiz.** Dissertação de Mestrado. UFSC – Florianópolis, 2005.

(Graat, 1979) – Graat, L; Waszink, J. **Der Einfluss der Gasströmung beim Plasma-MIG-Schweissen.** DVS Berricht 50. Düsseldorf, 1979, s. 198 – 202.

(IFS/ISAF, 2002) – IFS-Chernitz – Technische Universität – Institut für Fertigungstechnik/Schweißtechnik; ISAF-Clausthal – Technische Universität Clausthal – Institut für Schweißtechnik und Trennende Fertigungsverfahren. **Plasma-MIG-Schweißen von Aluminium und seinen Legierungen.** Abschlussbericht, Mai 2002.

(Iversen, 1998) – Iversen, Klaus. **Plasma-MIG Schweißen von Aluminium.** Dünoblechverarbeitung. Neues zum Schweißen von Leichtbauwerkstoffen. Vorträge der Gleichnamigen Tagung in Erding. 24. und 25. März 1998.

(Jelmorini, 1975)– Jelmorini, G; Tichelaar, G. W; Essers, W. G. **Welding characteristics of the plasma-MIG process.** Metal Construction, november 1975, p. 568 – 572.

(Kusch, 2003) – Kusch, M. **Anlagentechnische Aspekte der Plasma-MIG-Technologie**. Dissertation. Technische Universität Chemnitz. Schaker Verlag. Aachen 2003.

(LABSOLDA, 1995) – Relatório interno LABSOLDA. **Aplicação do processo MIG/MAG pulsado com pulsação térmica em reparos de cavitação**. Florianópolis, 1995.

(LABSOLDA, 2002) – **Manual da Interdata** – LABSOLDA/UFSC 2002.

(Lambert, 1990) – Lambert, J. A; Gilston, P. F. **Hot-Wire GTAW for Nuclear Repairs**. Welding Journal, Set. 1990, p 45 – 52.

(Lesnewich, 1958) – Lesnewich, A. **Control of melting rate and metal transfer in gas-shielded metal-arc welding. Part 1 – Control of electrode melting rate**. Welding Research Supplement, Aug. 1958, p 343-s – 353-s.

(Lesnewich, 1958-2) – Lesnewich, A. **Control of melting rate and metal transfer in gas-shielded metal-arc welding. Part 2 – Control of metal transfer**. Welding Research Supplement, Sep. 1958, p 418-s – 425-s.

(Liefkens, 1969) – Liefkens, A; Essers, W. G. **Method of and Device for Plasma Arc Welding**. United States Patent, Patent N. 3,612,807. Dec, 1969.

(Lund, 1979) – Lund, R. A. **Multivariable computer control of a gas metal arc welding process**. PhD Thesis, University of Wisconsin – Madison, 1979.

(Makarenko, 2003) – Makarenko, N. A. and Nevidomsky, V. A. **Thermal cycles in plasma-mig surfacing**. The Paton Welding Journal, 1/2003. pp 43 – 45.

(Matthes, 2001) – Matthes, K. –J; Kusch, M. **Plasma-MIG – ein Verfahren auch für dünne Aluminiumbleche?** Der Praktiker, Juni 2001, s. 220 – 223.

(Matthes, 2002) – Matthes, K; Kohler, T. **Electrical effects and influencing quantities in the case of the hybrid plasma-MIG welding process**. Welding and Cutting, feb. 2002, p. 87 – 90.

(Miranda, 2004) – Miranda, H. C; Ferraresi, V. A; Scotti, A. **Luminiscence sening system for welding**. US Patent 2004/0034608 A1. International Publication Number WO 03/082508 A2, de 09/10/2003.

(Nixon, 1988) – Nixon, J. H; Norrish, J. **Determination of pulsed MIG process parameters**. Welding and Metal Fabrication, 1988, pp 1 – 20.

(Oliveira, 2001) – Oliveira, M. A. **Estudo da soldagem plasma com alimentação automática de arame para aplicação em revestimentos metálicos**. UFSC, Dissertação de Mestrado. Florianópolis, 2001.

(Quites, 1979) – Quites, A. M. e Dutra, J. C. **Tecnologia da soldagem a arco voltagem**. EDEME, Florianópolis, 1979.

- (Rhee, 1992) – Rhee, S. and Kannatey-Asibu, Jr. **Observation of metal transfer during gas metal arc welding.** Welding Research supplement, october, 1992.
- (Scotti, 1998) – Scotti, A; Clark, D. E e Kenney, K. **Mapeamento da transferência metálica em MIG com aço inoxidável.** XXIV ENTS, Fortaleza, Setembro de 1998.
- (Smati, 1986) – Smati, Z. **Automatic pulsed MIG welding.** Metal Construction, Jan. 1986, p 38R – 44R.
- (Street, 1990) – Street, J. A. **Pulsed Arc Welding.** Abington Publishing Special Report, 1990.
- (Subramaniam, 1999) – Subramaniam, S; White, D. R; Jones, J. E; Lyons, D. W. **Experimental approach to selection of pulsing parameters in pulsed GMAW.** Welding Research Supplement, May 1999, p. 166-s – 172-s.
- (Sykes, 1995) – Sykes, I; Digiacomo, J. **Automatic Hot Wire GTA welding of pipe offers speed and increased deposition.** Welding Journal, Jul. 1995, p. 53 – 56.
- (Swart, 1981) – Swart, J. **Mechanised Plasma-MIG welding – successful application to aluminium tube cover joints for a nuclear project.** Metal construction, April 1981, pp 216 – 220.
- (Ton, 1975) – Ton, H. **Physical properties of the plasma-MIG welding arc.** Journal of Physics D: Applied Physics. Vol. 8, 1975, p. 922 – 933.
- (Unitrode, 1986) – Unitrode Corporation. – **Power Supply Design Seminar.** Lexington, MA, 1986.
- (van der Heuvel, 1978) – van der Heuvel, G. M; Jelmorini, G; Tichelaar, G. W. **Messung der Tropfentemperatur im Schweisslichtbogen und ihre Bedeutung in der Praxis.** DVS Bericht 50. Düsseldorf, 1978, s. 165 – 171.
- (Waszink, 1982) – Waszink, J. H. and Van Den Heuvel, G. J. P. M. **Heat generation and heat flow in the filler metal in GMA welding.** Welding Research Supplement. August, 1982, pp 269-s – 282-s.
- (Waszink, 1983) – Waszink, J. H. and Graat, L. H. J. **Experimental Investigation of the Forces Acting on a drop of weld metal.** Welding research Supplement. April 1983, pp 108-s – 116-s.
- (Willgoss, 1983) – Willgoss, R. A. **A mathematical model of the MIG process: equilibrium conditions with spray transfer.** Cegb Report TPRD/M/1193/N83, 1983.
- (Yenni, 1958) – Yenni, D. M. **High Pressure Arc Process and Apparatus.** United States Patent Office, Patent N. 2,847,555. Aug. 1958.
- (Zhang, 1998) – Zhang, Y. M; Liguó, E. **Active metal transfer control by monitoring excited droplet oscillation.** Welding Journal, Set. 1998, pp 388-s – 395-s.

(Zhang, 2001) – Zhang, Y. M; Li, P. J. **Modified active control of metal transfer and pulsed GMAW of titanium.** Welding Journal, Feb. 2001, pp 54-s – 61-s.