

ANDRÉ ALVES DE RESENDE

ESTUDO DE CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DO
PROCESSO "PLASMA-MIG" COM ARCOS
CONCÊNTRICOS



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2013

ANDRÉ ALVES DE RESENDE

**ESTUDO DE CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DO PROCESSO
"PLASMA-MIG" COM ARCOS CONCÊNTRICOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Américo Scotti

UBERLÂNDIA - MG

2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU , MG, Brasil

R433e Resende, André Alves de, 1982-
2013 Estudo de características operacionais do processo “Plasma-MIG” com
 arcos concêntricos / André Alves de Resende. - 2013.
 115 f. : il.

Orientador: Américo Scotti.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Soldagem MIG - Teses. 3.
Soldagem a plasma - Teses. 4. Soldagem – Teses. I. Scotti, Américo. II.
Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

ANDRÉ ALVES DE RESENDE

ESTUDO DE CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DO PROCESSO
"PLASMA-MIG" COM ARCOS CONCÊNTRICOS

Tese _____ pelo Programa de
Pós-graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia.

Área de Concentração: Materiais e Processos de
Fabricação.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Américo Scotti – UFU – Orientador

Prof. Dr. Volodymir Ponomarov – UFU – Co-orientador

Dr. Moises Alves de Oliveira - Embraco

Prof. Dr. Paulo Cesar Okimoto - UFPR

Prof. Dr. Valtair Antônio Ferraresi - UFU

Prof. Dr. Ruham Pablo Reis - UFU

Uberlândia, 11 de outubro de 2013

Aos meus pais, Joaquim Carlos e Maria Aparecida.

À minha namorada, Katriane.

À minha irmã, Tatiana.

AGRADECIMENTOS

- A Deus pela vida e pelas oportunidades concedidas;
- Ao meu orientador, Prof. Américo Scotti, pela orientação decisiva para tornar realidade este trabalho, além do profissionalismo e amizade que em muito contribuiu para o meu aperfeiçoamento profissional e pessoal;
- Ao Prof. Volodymir Ponomarov pela contribuição na discussão dos resultados, apoio e amizade;
- À FEMEC/UFU pela oportunidade de realizar o curso, em especial ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da UFU;
- Ao CNPq pela bolsa de estudos;
- À FAPEMIG pelo suporte financeiro através do projeto TEC-PPM-00089-08;
- À FAPEG pelo suporte financeiro;
- À CAPES;
- Ao Laprosolda/UFU pelo apoio técnico e laboratorial, sem os quais não seria possível a realização deste trabalho. Agradecimento especial ao Eng. Diandro Bailoni Fernandes e sua equipe;
- Aos Professores Valtair Antonio Ferraresi, Louriel Oliveira Vilarinho e Ruham Pablo Reis pelo apoio a realização deste trabalho, incentivo e amizade;
- Aos alunos de graduação, estagiários, mestrandos e doutorandos do grupo Laprosolda, que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho;
- A Universidade Federal de Goiás pelo incentivo à realização do trabalho;
- Agradecimento especial aos meus pais e a todos os familiares pelo incentivo e apoio;
- Aos técnicos da oficina: Lazinho, Passarinho, Rodrigo e Daniel.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xxiii
Lista de Símbolos	xxv
Resumo	xxvii
Abstract	xxviii
 CAPÍTULO I - Introdução	 1
 CAPÍTULO II - Caracterização do Processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos	 7
2.1 Introdução	7
2.2 Histórico	8
2.3 Características do Processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos	13
 CAPÍTULO III - Bancada Experimental	 17
3.1 Bancada experimental	17
3.1.1 Robô	18
3.1.2 Fontes de soldagem para o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos	18
3.1.3 Tocha para soldagem "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos	19
3.1.4 Sistema de alimentação do arame eletrodo	21
3.1.5 Unidade de controle microprocessada (Cabeçote + Programa "P-MIG").	22
3.1.6 Sistema de refrigeração	24
3.1.7 Sistemas de aquisição e tratamento de dados	26
3.1.8 Sistema para filmagem a alta velocidade	28
3.1.9 Gases para o Processo.....	29
3.1.10 Metal de adição	30
3.1.11 Metal de base	30
3.1.12 Medidor de vazão de gás	30

CAPÍTULO IV - Influência da Vazão dos Gases Sobre o Aspecto Superficial do Cordão de Solda e da Composição Sobre a Integridade dos Componentes da

Tocha	31
4.1 Introdução	31
4.2 Avaliação da influência dos gases sobre o aspecto superficial do cordão de solda	40
4.2.1 Metodologia e Procedimento Experimental	40
4.2.2 Resultados e Discussões	42
4.3 Avaliação da influência do tipo de gás sobre a integridade dos componentes da tocha	49
4.3.1 Metodologia e Procedimento Experimental	49
4.3.2 Resultados e Discussão	50
4.4 Conclusões do Capítulo	57

CAPÍTULO V - Influência da Corrente no Arco Externo Sobre a Faixa de Corrente de Transição Globular-Goticular, Taxa de Fusão do Eletrodo Consumível e Parâmetros Cinemáticos das Gotas em Transferência

5.1 Introdução	59
5.2 Procedimentos Experimentais.....	69
5.3 Resultados e Discussões	73
5.3.1. Avaliação do diâmetro e frequência das gotas transferidas em função da corrente no arco externo	78
5.3.2 Variação da velocidade de alimentação do eletrodo consumível em função da corrente nos arcos externo e interno	84
5.4 Avaliação Cinemática da Transferência Metálica no Processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos	84
5.5 Conclusões do Capítulo	90

CAPÍTULO VI - Influências das Correntes no Arco Externo e no Eletrodo Consumível, Ângulo de Inclinação da Tocha e da Distância entre a Tocha e a Peça Sobre a Geometria do Cordão de Solda

6.1 Introdução	93
6.2 Procedimento Experimental	96
6.3 Resultados e Discussões	99
6.3.1 Análise dos parâmetros geométricos do cordão de solda em função da corrente no arco externo para diferentes níveis de corrente no eletrodo	

consumível (arco interno).....	104
6.3.2 Análise dos parâmetros geométricos do cordão de solda em função da corrente no arco externo para diferentes DTP (Distância da Tocha a Peça)	108
6.3.3 Análise dos parâmetros geométricos do cordão de solda em função da corrente no arco externo para diferentes inclinações da tocha	112
6.5 Conclusões do Capítulo	115
CAPÍTULO VII - Influência das Correntes no Arco Externo e no Eletrodo Consumível Sobre a Transição Goticular Axial e Goticular Rotacional	117
7.1 Introdução	117
7.2 Procedimentos experimentais	120
7.3 Resultados e Discussão	122
7.4 Conclusões do Capítulo	130
CAPÍTULO VIII - Investigação Sobre o Caminho Percorrido Pela Corrente Proveniente do Arco Externo	131
8.1 Introdução	131
8.2 Metodologia	131
8.3 Resultados e Discussão	134
8.4 Conclusões do Capítulo	137
CAPÍTULO IX - Conclusões	139
CAPÍTULO X - Propostas para Trabalhos Futuros	143
CAPÍTULO XI - Referências	145
APÊNDICE A - Programa Usado Para Análise de Transferência Metálica em Voo Livre	153
APÊNDICE B - Guia de Utilização do Programa Analisador de Transferência Metálica em Voo Livre	159
APÊNDICE C - Gráficos de Posição da Gota em Função do Tempo Para Experimentos do Capítulo 5	167
APÊNDICE D - Tabela para Composição dos Gráficos do Capítulo 5	179

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Desenho esquemático de uma tocha para soldagem "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos com destaque para os componentes principais (adaptado de: OLIVEIRA; DUTRA, 2007)	2
Figura 2.1	Esquema de um equipamento para soldagem a arco com alta pressão (adaptado de: YENNI; WILLIAMSVILLE, 1958)	8
Figura 2.2	Representação esquemática para um equipamento de soldagem Plasma-MIG. (ESSERS et al., 1974)	9
Figura 2.3	Diagrama esquemático de uma tocha "Plasma-MIG" utilizando o bocal da tocha como eletrodo não consumível (ESSERS, 1976)	9
Figura 2.4	Diagrama esquemático de uma tocha "Plasma-MIG" utilizando o bocal como eletrodo não consumível (ESSERS et al., 1981)	10
Figura 2.5	Esquematização do processo Super-MIG® (combinação dos processos Plasma e MIG/MAG em um único processo): 1 - Peça de Trabalho; 2 - Jato de Plasma; 3 - Bocal Plasma; 4 - Poça de fusão; 5 - Sentido da corrente Plasma; 6 - Sentido da corrente MIG/MAG; 7 - Ângulo entre os elétrodos; 8 - Eletrodo de tungstênio; 9 - Eletrodo MIG/MAG; 10 - Arco MIG/MAG; 11 – Plasma (adaptado de: Dykhno e Davis, 2006)	11
Figura 2.6	Tocha para soldagem "Plasma-MIG" de fabricação da empresa TBi (fonte: catalogo da tocha modelo PLM500, de 15/11/2006)	11
Figura 2.7	Sequência de imagens (registrada com câmera de alta velocidade) do acendimento do arco no processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos por curto-circuito: (a) arame movendo-se em direção a peça; (b) curto-circuito; (c) arame-se dobrando e inicio da fusão; (d) acendimento do arco MIG/MAG; (e) acendimento do arco externo (ESSERS et al., 1981)	13
Figura 2.8	Esquema de funcionamento do "Soft Start" (atualizada a partir de REIS; SCOTTI, 2007 p. 129)	14
Figura 2.9	Sequência de fotos do acendimento do arco externo com visualização preferencial do arco na parte superior e do arame na parte inferior (ISF/ISAF, 2002 <i>apud</i> OLIVEIRA, 2006)	14
Figura 2.10	Sequência de fotos do acendimento do arco interno com visualização preferencial do arco na parte superior e do arame na parte inferior (ISF/ISAF, 2002 <i>apud</i> OLIVEIRA, 2006)	15
Figura 3.1	Bancada experimental: Tocha "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos (1); Fonte conectada ao circuito MIG/MAG (2); Fonte	

	conectada ao circuito do arco externo (3); Unidade de água gelada (4); Gases para o processo (5); Sistema de controle para o processo (6); Sistema de aquisição de sinais de corrente e tensão (7); Medidores de vazão (8); Interface fonte-cabeçote alimentador (9); Cabeçote alimentador com capacidade de reverter a direção de alimentação do arame (10); Robô Motoman modelo HP20 (11)	16
Figura 3.2	Detalhe de fixação da tocha, suporte e sensor de impacto	17
Figura 3.3	Tocha utilizada para as soldagens "Plasma-MIG" com arcos concêntricos: 1 - Corpo da tocha; 2 – Bico de Contato; 3 - Eletrodo anular de cobre responsável pelo arco externo; 4 - Bocal constritor; 5 - Bocal externo; 6 - Mangueiras de refrigeração por água e para passagem da proteção gasosa externa	18
Figura 3.4	Vista esquemática dos principais elementos da tocha: 1 – Bico de contato MIG/MAG; 2 – Isolamento cerâmico; 3 – Eletrodo do arco externo; 4 – Bocal constritor do arco externo; 5 – Bocal Externo	19
Figura 3.5	Vista esquemática do posicionamento dos principais elementos da tocha: DTP - Distância da Tocha à Peça; RP - Recuo do eletrodo do arco externo; RM - Recuo do bico de contato MIG/MAG; DBCP - Distância do Bico de Contato MIG/MAG à Peça	19
Figura 3.6	Tocha para soldagem com o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos modelo PLM 900	20
Figura 3.7	Vista lateral (A) e vista frontal (B) do cabeçote alimentador (sem os cabos e mangueiras conectados): 1 – Rolos alimentadores; 2 – Motor de acionamento dos rolos alimentadores; 3 – Conector engate rápido 9 mm fêmea para o cabo do arco externo; 4 – Euro conector fêmea para o cabo MIG/MAG; 5 – Entradas e saídas de água para refrigeração da tocha; 6 – Saídas de gases de proteção e do arco externo	20
Figura 3.8	Vista frontal (A) e traseira (B) da interface do cabeçote alimentador: 1 - Potenciômetro de ajuste da velocidade de alimentação; 2 - Display indicativo da velocidade de alimentação, em m/min; 3 - Botões de avanço e retrocesso rápido do arame; 4 - Rampas de subida e descida do arame; 5 - Interface com o cabeçote alimentador; 6 - Interface com o sistema de controle (PC); 7 - Interface com a fonte MIG/MAG	21
Figura 3.9	Tela de apresentação do programa P-MIG, versão 2.21	22
Figura 3.10	Unidade Móvel de refrigeração de água, Fabricante Mecalor, Modelo: UMAG MAS-9-RI-220	24
Figura 3.11	Esquema de posição dos sensores de fluxo do circuito hidráulico da saída e retorno da unidade de refrigeração	24
Figura 3.12	Vista do "by-pass" com válvula de gaveta e engates rápidos para mangueiras de água	25

Figura 3.13	Placa de aquisição tipo “ <i>Plug and Play</i> ” da National Instruments modelo: NI USB-6009	26
Figura 3.14	Interface do sistema de aquisição de dados	26
Figura 3.15	Bancada experimental para filmagem. Conjunto de laser e lentes convergentes e divergentes (A); Mesa para movimentação dos corpos de prova (B); "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos (C); Câmera para filmagem a alta velocidade (D)	27
Figura 3.16	Espectro do arco TIG e do feixe de laser (OKADA et al., 1980)	28
Figura 3.17	Medidor de vazão de gás modelo MVG 03	29
Figura 4.1	Distribuição de velocidades do fluxo de gás argônio na soldagem MIG/MAG convencional, com diâmetro interno do bocal representado pelas duas linhas na margem superior da figura (HU; TSAI, 2007)	31
Figura 4.2	Representação esquemática da região do arco e da poça de fusão envolvida pelo gás de proteção	32
Figura 4.3	Vista esquemática dos principais elementos da tocha com destaque para os caminhos percorridos pelos gases Externo, Intermediário e Interno	32
Figura 4.4	Condutividade térmica de alguns gases em função da temperatura, adaptado de Suban e Tusek (2003)	35
Figura 4.5	Formato do arco para diferentes misturas do gás de proteção com o processo operando no modo corrente constante com velocidade de alimentação de 9 m/min e DCPB de 20 mm, na soldagem de aço carbono com eletrodo de 1,2 mm de diâmetro (ZIELINSKA et al., 2008)	38
Figura 4.6	Resultado de simulação numérica para a distribuição de temperatura durante a transferência metálica obtida por Xu, Hu e Tsai (2008)	38
Figura 4.7	Aparência dos cordões Vista de topo dos corpos de prova resultantes das diferentes combinações de vazão de gases e as correspondentes somatórias de notas atribuídas	44
Figura 4.8	Valores preditos e esperados (“Desirability”)	45
Figura 4.9	Aparência dos cordões resultantes dos experimentos para otimização do valor de vazão de gás Intermediário	46
Figura 4.10	Aparência dos cordões resultantes dos experimentos para otimização do valor de vazão de gás Interno	47
Figura 4.11	Aparência dos cordões resultantes dos experimentos para otimização do valor de vazão de gás Externo	48

Figura 4.12	Aspecto dos componentes da tocha em função do tempo de solda utilizando mistura de Ar+8%CO ₂ como gás Externo e Argônio como gases Interno e Intermediário	51
Figura 4.13	Aspectos dos componentes da tocha em função do tempo de solda utilizando Argônio para todos os gases do processo	53
Figura 4.14	Aspectos dos componentes da tocha em função do tempo de solda utilizando mistura de Ar+8%CO ₂ para todos os gases do processo ...	55
Figura 4.15	Aspecto do eletrodo não consumível após a sequência de 60 soldas e submetidos a limpeza manual com pano úmido	56
Figura 5.1	Modos de transferência em função da corrente para eletrodo ER70S-6, 1,2 mm, DBCP de 18 mm e Ar+CO ₂ (RESENDE; KEOCHEGUERIAN; VILARINHO, 2010)	60
Figura 5.2	Comparação entre valores previstos pela fórmula e encontrados na literatura (LOWKE, 2009)	61
Figura 5.3	Relação entre os números adimensionais da velocidade de destacamento da gota v_0 (razão entre a velocidade da gota no destacamento e velocidade de alimentação do arame) e diâmetro da gota D_0 (razão entre o diâmetro da gota e o diâmetro do eletrodo) (adaptado de Choi et al., 1999)	63
Figura 5.4	(A) Efeito da corrente e do gás de proteção e (B) Efeito da corrente e do comprimento energizado de eletrodo sobre a frequência de destacamento das gotas na soldagem de aço carbono com eletrodo de 1,6 mm de diâmetro (adaptado de Rhee e Kannatey-Asibu, 1992)	63
Figura 5.5	Curvas posição da gota em função do tempo para diferentes valores de corrente (RHEE; KANNATEY-ASIBU, 1992)	64
Figura 5.6	Acelerações médias das gotas durante a trajetória apresentadas por Rhee e Kannatey-Asibu (1992)	64
Figura 5.7	(A) Posição e (B) velocidade das gotas em função do tempo (adaptado de: JONES; EAGAR; LANG, 1998)	65
Figura 5.8	Influência do momentum efetivo sobre a penetração do cordão de solda: (A) soldagem de alumínio (SCOTTI; RODRIGUES, 2009b); e (B) soldagem de aço ao carbono (SCOTTI; RODRIGUES, 2009a)	66
Figura 5.9	Massa (A); frequência (B); e velocidade das gotas (C) em função da corrente no arame, polaridade e diâmetro do eletrodo, para a condição de 150 A de corrente no arco externo (ESSERS; WALTER, 1981)	67
Figura 5.10	Penetração do cordão de solda no metal de base em função da taxa de quantidade de movimento (ESSERS; WALTER, 1981)	67
Figura 5.11	Princípio da Perfilografia aplicada à soldagem (Vilarinho, 2000)	70

Figura 5.12	Detalhe do sistema laser-óptico utilizado para filmagem a alta velocidade da transferência metálica (Vilarinho, 2000)	70
Figura 5.13	Sequência de tratamento de imagens proposto por Araujo et al. (2011)	71
Figura 5.14	Oscilogramas de corrente e tensão para correntes de referência de 35 A no arco externo e 230 A no arco interno (as oscilações dos sinais, devido à alta frequência, são mais típicas de ruídos externos de medição do que do fenômeno)	74
Figura 5.15	Sequência de imagens para correntes de referência de 35 A no arco externo e 230 A no arco interno	74
Figura 5.16	Modelo elétrico para o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos, de acordo com Matthles e Kohler (2002): R3 e R4 = Resistências elétricas no topo e na base do arco interno; R7 e R8 = Resistências elétricas no topo e na base do arco externo; R11 = Resistência elétrica devido a corrente cruzada entre os dois arcos ...	75
Figura 5.17	Oscilogramas de corrente e tensão para correntes de referência de 35 A no arco externo e 250 A no arco interno (as oscilações dos sinais, devido à alta frequência, são mais típicas de ruídos externos de medição do que do fenômeno)	76
Figura 5.18	Sequência de imagens para correntes de referência de 35 A no arco externo e 250 A no arco interno	76
Figura 5.19	Variação do diâmetro da gota e da frequência de destacamento em função da corrente no eletrodo consumível: BDCP = 28 mm; DTP= 10 mm sem arco externo; arame eletrodo ER 70S-6 de 1,2 mm; Ar como gás interno a 5 l/min; Ar como gás intermediário a 8 l/min e Ar+8%CO ₂ como gás externo a 10 l/min	77
Figura 5.20	Variação da frequência de destacamento em função da corrente no eletrodo consumível para diferentes correntes pelo arco externo	78
Figura 5.21	Variação do diâmetro de destacamento das gotas em função da corrente no eletrodo consumível para diferentes correntes pelo arco externo	79
Figura 5.22	Variação do tipo de transferência metálica em função das correntes pelo arco externo e interno (destaque em pontilhado para a transição globular-goticular)	80
Figura 5.23	Velocidade de saída das gotas em função da corrente no arco interno para diferentes correntes no arco externo	81
Figura 5.24	Resultados de simulação da distribuição das variáveis físicas durante o crescimento da gota para a soldagem MIG/MAG com 175 A de corrente (WANG et al., 2003)	82
Figura 5.25	Resultados de simulação da distribuição das variáveis físicas antes do destacamento da gota para a soldagem MIG/MAG com 175 A de	82

corrente (WANG et al., 2003)

Figura 5.26	Varição da velocidade de alimentação em função da corrente no eletrodo consumível para diferentes correntes pelo arco externo	83
Figura 5.27	Posição da gota em relação ao topo da imagem em função do tempo (a) e distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo (b) para uma corrente de 230 A no arco interno e de 80 A no arco externo	84
Figura 5.28	Velocidade de chegada das gotas em função da corrente no arco interno para diferentes correntes no arco externo	86
Figura 5.29	Quantidade de movimento das gotas em função da corrente no arco interno para diferentes valores de corrente no arco externo	87
Figura 5.30	Taxa de quantidade de movimento atuante na poça devido o impacto das gotas em função da corrente no arco interno para diferentes valores de corrente no arco externo	88
Figura 5.31	Quantidade de movimento efetivo das gotas em função da corrente no arco interno para diferentes valores de corrente no arco externo ..	89
Figura 6.1	Penetração (a) e largura (b) do cordão em função da corrente no arco externo; arame eletrodo de aço carbono de 1,2 mm, 215 A de corrente no arco interno, comprimento livre do eletrodo de 40 mm e velocidade de soldagem de 0,35 m/min (ESSERS, 1976)	92
Figura 6.2	Largura do Cordão em função da corrente no arco externo (Plasma) no processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos 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 (OLIVEIRA, 2006)	92
Figura 6.3	Efeito da corrente no arco externo sobre a aparência e na seção transversal do cordão de solda: Velocidade de alimentação do arame de 10 m/min e velocidade de soldagem de 80 cm/min (ONO et al., 2009)	93
Figura 6.4	Calor imposto a peça (medido) em função da corrente total fornecida ao processo (ESSER; WATER, 1981)	94
Figura 6.5	Indicação das posições onde foram retiradas as seções transversais com relação a direção de soldagem	97
Figura 6.6	Indicação dos parâmetros geométricos medidos nos cordões: L = Largura; R = Reforço; P=Penetração; AF = Área Fundida e AD = Área Depositada	97
Figura 6.7	Largura do cordão de solda para o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos em função da corrente no arco externo para três condições de corrente no eletrodo consumível e uma DTP de 10 mm (alguns pontos foram levemente deslocados na horizontal para	

	permitir a visualização das barras de erro)	103
Figura 6.8	Reforço do cordão de solda para o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos em função da corrente no arco externo para três condições de corrente no eletrodo consumível e uma DTP de 10 mm (alguns pontos foram levemente deslocados na horizontal para permitir a visualização das barras de erro)	104
Figura 6.9	Penetração do cordão de solda para o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos em função da corrente no arco externo para três condições de corrente no eletrodo consumível e uma DTP de 10 mm (alguns pontos foram levemente deslocados na horizontal para permitir a visualização das barras de erro)	105
Figura 6.10	Área fundida no metal de base para o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos em função da corrente no arco externo para três condições de corrente no eletrodo consumível e uma DTP de 10 mm (alguns pontos foram levemente deslocados na horizontal para permitir a visualização das barras de erro)	106
Figura 6.11	Largura do cordão de solda para o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos em função da corrente no arco externo para três condições de Distância entre a Tocha e a Peça (DTP) e corrente no arco interno de 250 A (alguns pontos foram levemente deslocados na horizontal para permitir a visualização das barras de erro)	107
Figura 6.12	Reforço do cordão de solda para o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos em função da corrente no arco externo para três condições de Distância entre a Tocha e a Peça (DTP) e corrente no arco interno de 250 A (alguns pontos foram levemente deslocados na horizontal para permitir a visualização das barras de erro)	108
Figura 6.13	Penetração do cordão de solda para o processo MIG/MAG com "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos em função da corrente no arco externo para três condições de Distância entre a Tocha e a Peça (DTP) e corrente no arco interno de 250 A (alguns pontos foram levemente deslocados na horizontal para permitir a visualização das barras de erro)	109
Figura 6.14	Área fundida no metal de base para o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos em função da corrente no arco externo para três condições de Distância entre a Tocha e a Peça (DTP) e corrente no arco interno de 250 A (alguns pontos foram levemente deslocados na horizontal para permitir a visualização das barras de erro)	109
Figura 6.15	Largura do cordão de solda para o processo MIG/MAG com "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos em função da corrente no arco externo para três condições de Inclinação da tocha e corrente no arco interno de 250 A (alguns pontos foram levemente deslocados na horizontal para permitir a visualização das barras de erro)	110
Figura 6.16	Reforço do cordão de solda para o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos em função da corrente no arco externo para três	

	condições de Inclinação da tocha e corrente no arco interno de 250 A (alguns pontos foram levemente deslocados na horizontal para permitir a visualização das barras de erro)	111
Figura 6.17	Penetração do cordão de solda para o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos em função da corrente no arco externo para três condições de Inclinação da tocha e corrente no arco interno de 250 A (alguns pontos foram levemente deslocados na horizontal para permitir a visualização das barras de erro)	112
Figura 6.18	Área fundida no metal de base para o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos em função da corrente no arco externo para três condições de Inclinação da tocha e corrente no arco interno de 250 A (alguns pontos foram levemente deslocados na horizontal para permitir a visualização das barras de erro)	112
Figura 6.19	Seções transversais para soldagem com 250 A de corrente no arame e 40 A no arco externo para as condições empurrando (esquerda), tocha reta (centro) e puxando (direita)	113
Figura 7.1	(a) Transferência goticular rotacional na soldagem "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos com eletrodos na polaridade positiva (corrente no arco externo de 120 A à 45V e corrente MIG/MAG de 300A à 35V, com arame de aço inoxidável de 0,8 mm); (b) seção transversal do corpo de prova obtido em (a) (ESSERS; JELMORINI; TICHELAAR, 1972)	116
Figura 7.2	Corrente de transição de goticular axial para goticular rotacional e quantidade de respingos para goticular rotacional no processo MIG/MAG para eletrodo de aço ao carbono com 1,2 mm (ESSERS; JELMORINI; TICHELAAR, 1972)	116
Figura 7.3	Corrente de Transição de Goticular Axial para Goticular Rotacional no processo Plasma-MIG para eletrodo de aço ao carbono com 1,2 mm (ESSERS; JELMORINI; TICHELAAR, 1972)	117
Figura 7.4	Taxa de deposição para os processos "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos e MIG/MAG convencional em transferência goticular rotacional sem respingos em função do corrente através do arame para diversos comprimentos de eletrodo energizado, indicados para cada ponto (ESSERS; JELMORINI; TICHELAAR, 1972)	117
Figura 7.5	Visualização da transferência metálica para corrente no eletrodo de 340 A e corrente no arco externo de 100 A (Teste 1)	121
Figura 7.6	Visualização dos arcos para corrente no eletrodo de 340 A e corrente no arco externo de 100 A (Teste 1)	121
Figura 7.7	Visualização da transferência metálica para corrente no eletrodo de 360 A e corrente no arco externo de 100 A (Teste 2)	121
Figura 7.8	Visualização dos arcos para corrente no eletrodo de 360 A e corrente no arco externo de 100 A (Teste 2)	

		122
Figura 7.9	Visualização da transferência metálica para corrente no eletrodo de 380 A e corrente no arco externo de 100 A (Teste 3)	122
Figura 7.10	Visualização dos arcos para corrente no eletrodo de 380 A e corrente no arco externo de 100 A (Teste3)	122
Figura 7.11	Visualização da transferência metálica para corrente no eletrodo de 360 A sem corrente no arco externo (Teste 4)	123
Figura 7.12	Visualização do arco para corrente no eletrodo de 360 A sem corrente no arco externo (Teste 4)	123
Figura 7.13	Visualização da transferência metálica para corrente no eletrodo de 380 A sem corrente no arco externo (Teste 5)	123
Figura 7.14	Visualização do arco para corrente no eletrodo de 380 A sem corrente no arco externo (Teste 5)	124
Figura 7.15	Visualização da transferência metálica para corrente no eletrodo de 400 A sem corrente no arco externo (Teste 6)	124
Figura 7.16	Visualização do arco para corrente no eletrodo de 400 A sem corrente no arco externo (Teste 6)	124
Figura 7.17	(a) Largura e (b) Reforço do cordão de solda em função da corrente no arco interno para o processo MIG/MAG convencional e "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos com 100 A de corrente no arco externo	127
Figura 7.18	(a) Penetração e (b) Área Fundida do cordão de solda em função da corrente no arco interno para o processo MIG/MAG convencional e "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos com 100 A de corrente no arco externo	128
Figura 8.1	Adaptação de um eletrodo de tungstênio em substituição ao eletrodo consumível em uma tocha para soldagem "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos com destaque aos possíveis caminhos percorridos pela corrente do arco externo, pontilhado, quando exclusivamente pelo arco externo, e tracejado, quando percorre também o eletrodo de W (adaptado de: ROSSI, 2011)	130
Figura 8.2	Esquema de abertura do arco	131
Figura 8.3	Sequência de imagens com intervalos de 6 milissegundos para uma corrente do arco externo de 40 A e distância do eletrodo de tungstênio a peça de 8 mm	132
Figura 8.4	Variação da resistividade em função da temperatura	134
Figura B.1	Janela com tela graduada posicionada na região do eletrodo	156
Figura B.2	Janela para digitação da distância selecionada	156

Figura B.3	Janela para seleção da posição da chapa	157
Figura B.4	Janela para seleção do primeiro (esquerda) e ultimo (direita) arquivo	157
Figura B.5	Imagem original (esquerda) e tratada (direita) com destaque a região do arame e bocal, gota e metal de base	158
Figura B.6	Imagem com presença de ruídos	159
Figura B.7	Posição da gota para cada quadro analisado	161
Figura B.8	Comprimento do arco para cada quadro analisado	162
Figura B.9	Diâmetro da gota para cada quadro analisado	162
Figura C.1	Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 180 A no arco interno e de 0 A no arco externo	163
Figura C.2	Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 200 A no arco interno e de 0 A no arco externo	164
Figura C.3	Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 220 A no arco interno e de 0 A no arco externo	164
Figura C.4	Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 230 A no arco interno e de 0 A no arco externo	165
Figura C.5	Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 240 A no arco interno e de 0 A no arco externo	165
Figura C.6	Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 220 A no arco interno e de 40 A no arco externo	166
Figura C.7	Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 230 A no arco interno e de 40 A no arco externo	166
Figura C.8	Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 240 A no arco interno e de 40 A no arco externo	167
Figura C.9	Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 250 A no arco interno e de 40 A no arco externo	167
Figura C.10	Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 230 A no arco interno e de 60 A no arco externo	168

Figura C.11	Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 240 A no arco interno e de 60 A no arco externo	168
Figura C.12	Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 250 A no arco interno e de 60 A no arco externo	169
Figura C.13	Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 230 A no arco interno e de 80 A no arco externo	169
Figura C.14	Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 240 A no arco interno e de 80 A no arco externo	170
Figura C.15	Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 250 A no arco interno e de 80 A no arco externo	170
Figura C.16	Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 250 A no arco interno e de 100 A no arco externo	171
Figura C.17	Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 270 A no arco interno e de 100 A no arco externo	171
Figura C.18	Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 240 A no arco interno e de 120 A no arco externo	172
Figura C.19	Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 250 A no arco interno e de 120 A no arco externo	172
Figura C.20	Distância percorrida pela gota a partir do destacamento em função do tempo para uma corrente de 260 A no arco interno e de 120 A no arco externo	173

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	Levantamento de vazões de gases de soldagem usados por diferentes autores no processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos	34
Tabela 4.2	Propriedades dos gases de proteção (adaptado de: SUBAN; TESEK, 2003 e SCOTTI; PONOMAREV, 2008 p. 98)	36
Tabela 4.3	Planejamento experimental para estudar o efeito da vazão de cada parcela de gás sobre o aspecto superficial do cordão de solda	40
Tabela 4.4	Valores médios dos sinais de corrente e tensão monitorados para os circuitos dos arcos externo e interno	41
Tabela 4.5	Notas atribuídas por cada avaliador e média e desvio padrão das notas para cada teste	42
Tabela 4.6	Efeitos e " <i>p-values</i> " obtidos por ANOVA para a influência de cada gás na aparência do cordão de solda	43
Tabela 5.1	Modos de transferência metálica na soldagem MIG/MAG (Scotti et al., 2012)	59
Tabela 5.2	Condições de soldagem utilizadas na determinação da faixa de corrente de transição globular-goticular e taxa de fusão do eletrodo consumível	69
Tabela 5.3	Valores médios para corrente e tensão do arco externo e valores médios e eficazes (RMS) para o arco interno	73
Tabela 5.4	Corrente de transição globular-goticular em função da corrente no arco externo e corrente total no processo	79
Tabela 5.5	Parâmetros cinemáticos das gotas em transferência	85
Tabela 6.1	Condições de soldagem para verificação da influência das correntes no arco externo e no arco interno, DTP e inclinação da tocha sobre os parâmetros geométricos do cordão de solda	95
Tabela 6.2	Valores médios dos sinais de corrente e tensão monitorados para os circuitos do arco interno e do arco interno (DTP e inclinação da tocha variam conforme Tabela 6.1)	98
Tabela 6.3	Parâmetros geométricos medidos para os cordões de solda com desvio padrão relativo a duas medições (DTP e inclinação da tocha variam conforme Tabela 6.1)	101
Tabela 7.1	Condições de soldagem utilizadas na determinação da faixa de	

	corrente de transição goticular axial e goticular rotacional	119
Tabela 7.2	Condições de soldagem utilizadas para avaliar a geometria do cordão de solda e rendimento de deposição	119
Tabela 7.3	Valores médios dos sinais de corrente e tensão monitorados para os circuitos dos arcos externo e interno	120
Tabela 7.4	Parâmetros geométricos do cordão, diluição no metal de base, rendimento de deposição e imagens das seções transversais dos corpos de prova	125
Tabela 8.1	Imagens do arco externo em função da corrente e distância entre o eletrodo de tungstênio e a peça	132
Tabela B.1	Efeito do limiar sobre a identificação dos elementos da imagem	158
Tabela B.2	Exemplo de resultados apresentados na tela do Matlab®	159

LISTA DE SÍMBOLOS

A	- Amper;
Ar	- Argônio;
Bo	- Bond;
CC-	- Corrente constante polaridade negativa;
CC+	- Corrente constante polaridade positiva;
CO ₂	- Dióxido de carbono;
d	- Diâmetro médio das gotas;
DTP	- Distância da Tocha à Peça;
d _w	- Diâmetro do eletrodo;
f	- Frequência;
Fe	- Ferro;
g	- Gravidade;
g	- Tensão superficial;
GDL	- Graus de liberdade;
He	- Hélio;
I	- Corrente;
I _{Arco Externo}	- Corrente no arco externo;
I _{Arco Interno}	- Corrente no arco interno;
I _{EAI}	- Corrente eficaz monitorada no arco interno;
IIW	- International Institute of Welding;
I _{MAE}	- Corrente Média monitorada no arco Externo;
I _{MAI}	- Corrente Média monitorada no arco Interno;
I _{RAE}	- Corrente Regulada para o arco Externo;
I _{RAI}	- Corrente Regulada para o arco Interno;
l	- Litros;
m	- Metros;
m ₀	- Permeabilidade;
M _E	- Quantidade de Movimento Efetivo;
M _f	- Pesos das chapas de teste após a soldagem;
M _{gota}	- Quantidade de movimento;
M _i	- Pesos das chapas de teste antes da soldagem;
min	- Minutos;
mm	- Milímetros;
M _{rate}	- Taxa de quantidade de movimento;
MRUV	- Movimento retilíneo uniformemente variado;
ms	- Milissegundos;
N ₂	- Nitrogênio;
O ₂	- Oxigênio;

$^{\circ}\text{C}$	- Graus Celsius;
qps	- Quadros por segundo;
RM	- Recuo do bico de contato MIG/MAG;
RP	- Recuo do eletrodo do arco externo;
T_{ab}	- Tempo de arco aberto;
T_d	- Taxa de deposição de material sobre a chapa;
T_F	- Taxa de fusão do arame;
TIFF	- Tagged Image File Format;
TIG	- Tungsten Inert Gás;
U	- Tensão;
$U_{\text{Arco Externo}}$	- Tensão no arco externo;
$U_{\text{Arco Interno}}$	- Tensão no arco interno;
U_{EAI}	- Tensão Eficaz monitorada no arco Interno;
U_{MAE}	- Tensão Média monitorada no arco Externo;
U_{MAI}	- Tensão Média monitorada no arco Interno;
V	- Volts;
V_{alim}	- Velocidade de alimentação;
V_{cheg}	- Velocidade de chegada das gotas;
v_m	- Velocidade de fusão do eletrodo;
V_{sold}	- Velocidade de soldagem;
W	- Tungstênio;
We	- Weber;
η_d	- Rendimento de deposição;
ρ	- Densidade da gota;

RESENDE, A. A. 2013. **Estudo de Características Operacionais do Processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos**. 181p. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

RESUMO

Nos últimos anos, a demanda do setor produtivo por processos mais eficientes tem incentivado a pesquisa e o desenvolvimento de produtos e processos que permitam o aumento da produção a um custo compatível. Neste sentido, o processo de soldagem "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos, uma evolução do processo MIG/MAG convencional, tem surgido como uma opção promissora. Esse processo está à disposição do mercado desde a década de 70, no entanto, ainda é necessário consolidar uma base científica e tecnológica a respeito desse processo. Somente assim o mercado poderá decidir se o mesmo é aplicável, seja para substituir ou se tornar mais uma opção frente a outros processos. Desta forma, é no desafio de colaborar tanto com o meio científico como o produtivo que se enquadra o objetivo global deste trabalho, o qual é o de fornecer conhecimentos fundamentais sobre aspectos de funcionamento e parâmetros operacionais do processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos. Foram estudados experimentalmente a influência das vazões dos gases, principalmente o intermediário, sobre o aspecto superficial do cordão de solda, o efeito do arco externo sobre as correntes de transição globular-goticular e goticular axial-rotacional e sobre os parâmetros cinemáticos das gotas e a relação entre corrente do arco externo/ângulo de inclinação da tocha/distância da tocha a peça e a geometria do cordão. Os resultados apontam que a vazão governante sobre o acabamento do cordão é a do gás intermediário. A corrente de transição globular-goticular elevou-se e a goticular axial-rotacional ficou menor na presença do arco externo. A presença do arco externo também fez elevar o momentum das gotas atingindo a poça. A presença da corrente no arco externo em valores baixos reduz a penetração e parâmetros correlacionados (de forma direta ou inversamente proporcional), mas faz novamente crescer a ao ser aumentada. A geometria do cordão segue o comportamento similar ao do processo MIG/MAG convencional quanto ao ângulo de inclinação e distância da tocha à peça, mais intensificado quando se usa arco externo. Ao final, pode-se dizer que os conhecimentos gerados no presente trabalho sobre as características operacionais do processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos formam uma base para conceber a potencialidade aplicativa do processo.

Palavras-chave: Soldagem; MIG/MAG; arcos concêntricos; Plasma-MIG; parâmetros operacionais.

RESENDE, A. A. 2013. **Study of Operational Characteristics of the Process "Plasma-MIG" with Concentric Arcs**. 181p. Dr Thesis, Federal University of Uberlandia, Uberlandia - MG.

ABSTRACT

In recent years, the demand of the productive sector for more efficient processes has encouraged the research and development of products and processes to increase the production at a competitive cost. In this sense, the "Plasma-MIG" with Concentric Arcs process, being an evolution of the conventional MIG/MAG process, has emerged as a promising option. This process has been available to the market since the 70s. However, it is still necessary to consolidate a scientific and technological basis of that process. Only then the market will decide if it is applicable, either to replace or become an option instead of the other processes. Thus, the challenge is to collaborate with both the scientific and the production what actually is the overall goal of this work, that is to provide fundamental knowledge about functioning principles and operating parameters of the "Plasma-MIG" with Concentric Arcs. The influence of the gas flow, especially of the intermediate one on the weld bead surface appearance, the effect of external arc on the globular-spray transition current and on the axial spray-rotational transition current, as well as on the droplet kinematic parameters and the relation between the outer arc current/torch working angle/torch-piece distance and the weld geometry have been studied experimentally. The results showed that the intermediate arc gas flow rate was the very one which determined weld appearance. The globular-spray transition current rose and the axial spray-rotational transition current became lower in the presence of the outer arc. The presence of the outer arc also raised the momentum of the drops hitting the weld pool. The presence of current in the outer arc at low values reduces penetration and correlated parameters (either directly or inversely proportional), but causes their growing again when being increased. The bead geometry follows the similar behavior of the conventional MIG/MAG as regards to the torch working angle and the torch-piece distance, though being more intensified when using the outer arc. In conclusion, it is possible to say that the knowledge on the operational characteristics of the "Plasma-MUG" with Concentric Arcs welding process obtained in this work may serve as a basis for the perception of this process application potential.

Keywords: Welding, MIG/MAG, concentric arcs; Plasma-MIG; operating parameters.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Os recentes avanços tecnológicos, principalmente no tocante ao controle de fontes eletrônicas, têm incentivado e estimulado o desenvolvimento de novos processos de soldagem, que visam atender a uma demanda do setor produtivo por juntas soldadas de alta qualidade e custo reduzido. Estes avanços podem ser tanto provenientes de soluções inovadoras e/ou pela associação de processos já consolidados pelos meios produtivos.

Dentro desta tendência, o processo "Plasma-MIG" com dois arcos (concêntricos ou não), se apresentou ao mercado com a promessa de produzir cordões de solda com maior qualidade, menor quantidade de respingos, maior controle sobre a poça de fusão, maior produtividade, dentre outras. Trata-se de uma evolução do processo MIG/MAG, ao qual foi adicionado um segundo arco, e que está à disposição do mercado desde a década de 70, com a denominação de "Plasma-MIG". Apesar de ter sido relativamente estudado por pesquisadores da época, o processo "Plasma-MIG" não foi assimilado pelo mercado, principalmente por limitações tecnológicas inerentes à época. Com a evolução da eletrônica e dos demais equipamentos utilizados em soldagem, o processo começou novamente a ser estudado nos últimos anos e foi reapresentado ao mercado em 1995 pela empresa "Plasma Laser Technologies®" (PLT, 2013) e em 2003 pela empresa TBI® (TBI, 2013), ambas utilizando o termo Plasma-MIG para denominar seu produto, apesar de possuírem características construtivas e operacionais distintas.

Especificamente quanto à abordagem da empresa TBI®, a característica fundamental desse processo "Plasma-MIG" é que um arame-eletrodo e seu respectivo arco são envolvidos por um gás termicamente ionizado (Plasma), constituindo um segundo arco,

e juntos, formando um arco duplicado. Este processo, ilustrado pela Figura 1.1, é baseado no protótipo proposto por Essers et al. (1981).

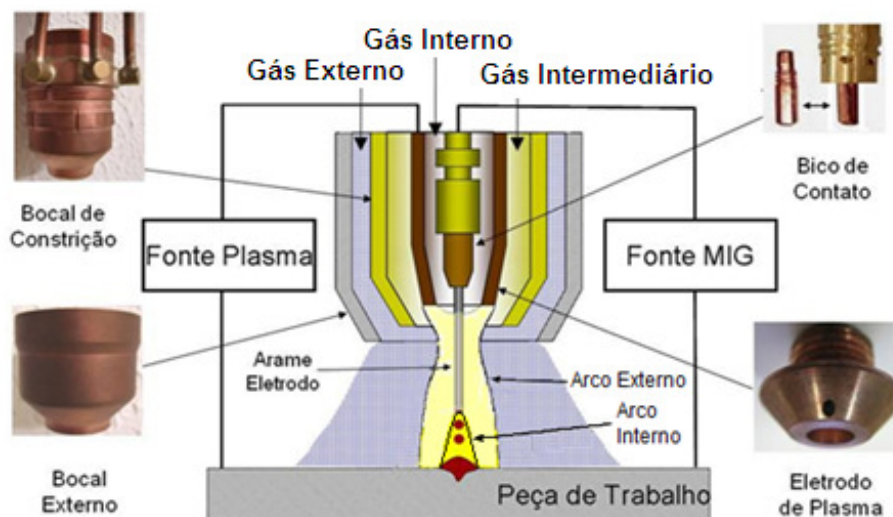


Figura 1.1 – Desenho esquemático de uma tocha para soldagem "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos com destaque para os componentes principais (adaptado de: OLIVEIRA; DUTRA, 2007)

Apesar de ser referenciado em artigos especializados e patentes como processo de soldagem Plasma-MIG, esse nome não é o mais adequado, uma vez que o arco externo não tem características do processo de soldagem Plasma. Para permitir a passagem concomitante do arco externo e do arame-eletrodo, o eletrodo plasma e seu bocal não fazem o efeito de constrição do arco (tal como no processo de soldagem a Plasma), mas apenas o direciona. Mas mesmo assim, por tradição, se manterá neste trabalho a denominação "Plasma-MIG", mas sempre "entre aspas".

Apesar de existir no mercado desde 2003 uma tocha comercial para processo de soldagem "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos, ainda não se têm notícias de utilização no Brasil do processo em nível industrial. As razões para a não utilização podem ser atribuídas principalmente à falta de informações consolidadas sobre suas aplicações, ajustes de parâmetros, a complexidade inerente ao processo e ao custo relativamente alto dos equipamentos (comparado ao MIG/MAG convencional).

Do ponto de vista de desenvolvimento nacional, o grupo Labsolda da UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina) foi o pioneiro a explorar este processo, desenvolvendo estudos fenomenológicos e das interações de suas variáveis, obtendo bons resultados tanto na soldagem de alumínio e aço carbono, quanto na brasagem de chapas galvanizadas. Estes resultados estão apresentados na tese de doutorado de Oliveira (2006). Em 2008, o grupo Laprosolda da UFU (Universidade Federal de Uberlândia), com apoio do

grupo Labsolda e da empresa TBi, iniciou sua linha de pesquisas em soldagem "Plasma-MIG", no sentido de também contribuir para o seu desenvolvimento. A partir deste momento foram iniciados estudos com o objetivo de identificar limitações e propor melhorias ao processo. Quanto a aspectos operacionais foram avaliadas a influência da corrente no arco externo sobre a geometria do cordão de solda e taxa de fusão do eletrodo consumível, além de investigar alguns aspectos na transferência goticular com corrente pulsada. Os resultados estão publicados na dissertação de mestrado de Resende (2009). Apesar de entendidos alguns fenômenos que governam o processo e algumas potencialidades, o processo de soldagem "Plasma-MIG" ainda necessita de informações mais detalhadas sobre o seu funcionamento.

Desta forma, a necessidade da formação de uma base científica e tecnológica acerca do processo, que ainda se encontra em fase de consolidação, justifica o estudo de aspectos fundamentais do mesmo, como, por exemplo, um estudo mais detalhado sobre os modos de transferência metálica, faixas de transição entre os modos de transferência metálica, estabilidade e cinemática da transferência metálica, dentre outros. Com o conhecimento mais aprofundado destes aspectos fundamentais é que o mercado vai decidir, com base em aspectos técnicos, operacionais e econômicos, se o processo pode ser aplicado pelo meio produtivo, seja para substituir ou para se tornar mais uma opção frente a outros processos tradicionais.

Assim, é no desafio de colaborar tanto com o meio científico como com o produtivo que se enquadra o objetivo global deste trabalho, que é o de fornecer conhecimentos fundamentais sobre aspectos de funcionamento e parâmetros operacionais do processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos. Como consequência, é esperado o fornecimento de mais subsídios para o processo de implementação e decisório da aplicação do processo no meio industrial.

Para atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram considerados:

- a) avaliar como as vazões dos três gases (externo, intermediário e interno) utilizados no processo influenciam no acabamento (aspecto superficial) do cordão de solda;
- b) avaliar como diferentes tipos de combinação de gases afetam o desgaste dos componentes da tocha de soldagem;
- c) identificar a faixa de transição entre os modos de transferência globular e goticular axial para o processo MIG/MAG e, posteriormente, para o "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos, para diferentes valores de corrente no arco externo;

- d) determinar os parâmetros cinemáticos (posição, aceleração e velocidade) das gotas em transferência e, a partir desses valores, avaliar o efeito da quantidade de movimento efetiva das gotas (associando os parâmetros cinemáticos das gotas em transferência com a geometria dos cordões de solda obtidos);
- e) verificar a influência das correntes de soldagem (arco interno e externo) sobre a geometria do cordão de solda;
- f) identificar a faixa de transição entre os modos de transferência goticular axial e goticular rotacional para o processo MIG/MAG e posteriormente para o "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos;
- g) comparar os rendimentos de deposição para condições de soldagem nos modos goticular axial e goticular rotacional.

Em função das etapas, essa redação exibe particularidades, como a de não apresentar os tradicionais capítulos de “revisão bibliográfica” e de “equipamentos e procedimento experimental”, que foram substituídos, respectivamente, por “caracterização do processo 'Plasma-MIG' com Arcos Concêntricos” e “bancada experimental”. Isto se fez necessário, uma vez que o objetivo geral de conhecer os aspectos de funcionamento e comportamento, apontando campos de aplicação e potencialidades do processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos, é bastante amplo, passando por objetivos específicos bastante distintos. No entanto, todos os elementos intrínsecos aos tradicionais capítulos estão presentes na introdução de cada capítulo de resultados.

Desta forma, o texto está assim estruturado:

Capítulo 1: é apresentada uma introdução com a contextualização do estudo, objetivos gerais e específicos que justificam a realização do trabalho, bem como a justificativa de um texto com padrões não convencionais de divisão de capítulos;

Capítulo 2: é apresentada uma caracterização do processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos, com seu contexto histórico, princípios de funcionamento e formatos que são apresentados ao mercado. Os assuntos deste capítulo são comuns a todo o texto, o que justifica a sua apresentação de forma separada dos capítulos subsequentes (por exemplo, os objetivos específicos “a” e “b” possuem princípios e fundamentos que podem ser tratados isoladamente, respeitando certos critérios, daqueles necessários ao entendimento dos objetivos específicos “c” e “d”);

Capítulo 3: é apresentada a bancada experimental utilizada (pelos mesmos motivos apresentados no parágrafo anterior, a metodologia experimental está inserida nos capítulos correspondentes);

Capítulo 4: neste capítulo é apresentada uma investigação da influência das vazões dos três gases utilizados no processo (externo, intermediário e interno) sobre o acabamento (aspecto superficial) do cordão de solda e desgaste dos componentes da tocha. Para o processo MIG/MAG convencional, na maioria das vezes, a vazão adequada de gases é definida pela experiência do usuário. No entanto, quando três gases são usados, a interação entre eles dificulta o ajuste correto das vazões, justificando um estudo detalhado sobre o tema. Completando este capítulo, também é avaliada a condição dos componentes da tocha em função do gás utilizado;

Capítulo 5: apresenta uma verificação da influência da corrente no arco externo sobre a faixa de transição entre os modos de corrente globular e goticular axial. Também são determinados, por meio de processamento digital de imagens, os parâmetros cinemáticos das gotas em movimento, tais como velocidade e aceleração. A partir desses parâmetros, as quantidades de movimento das gotas também são determinadas;

Capítulo 6: este capítulo relaciona a influência das correntes de soldagem, do ângulo de ataque da tocha e da distância entre a tocha e a peça sobre a geometria do cordão de solda;

Capítulo 7: apresenta a transição entre os modos de transferência goticular axial e goticular rotacional, no intuito de verificar o comportamento do processo em uma faixa de corrente pouco utilizada para o processo MIG/MAG convencional;

Capítulo 8: apresenta algumas investigações sobre o possível caminho percorrido pela corrente do arco externo;

Finalmente, o Capítulo 9 é dedicado às conclusões do trabalho, o Capítulo 10 às propostas para trabalhos futuros, enquanto o Capítulo 11 apresenta as referências bibliográficas utilizadas, que é seguido do Capítulo de Apêndices.

CAPÍTULO II

CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO "PLASMA-MIG" COM ARCOS CONCÊNTRICOS

2.1 Introdução

O processo de soldagem "Plasma-MIG" pode ser entendido como a combinação de dois processos em uma única tocha, que pode ser feita de diferentes formas, como será mostrado no item 2.2. A configuração do processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos, corresponde ao processo MIG/MAG convencional em que a atmosfera que envolve o arco (arco interno) é também ionizada, conforme esquema apresentado na Figura 1.1.

O processo de soldagem Plasma possui um arco concentrado e bastante estável, que favorece a penetração. No processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos, por sua vez, possui um dos arcos formado entre um eletrodo anular não consumível e a peça, o qual é forçado a passar por um orifício direcionador. No entanto, este direcionamento do arco não é suficiente para deixar o arco concentrado, assim como no processo de soldagem a Plasma.

No processo MIG/MAG convencional, a corrente que flui através do arame, do arco e do metal de base é necessariamente a mesma. Esta corrente possui múltiplas funções. No arame-eletrodo, é responsável pelo aquecimento do mesmo por efeito joule e pelo calor gerado no acoplamento arco-eletrodo que são as frações responsáveis pela taxa de fusão do arame. Também é responsável pelas forças eletromagnéticas que exercem importante papel no destacamento da gota, no diâmetro e velocidade com que as mesmas são transferidas à peça. No arco propriamente dito, conforme explanado por Liskeyvick et al. (2013), a corrente é a responsável pela manutenção do mesmo, pelo aquecimento por choques de elétrons com átomos constantemente desionizados devido à transferência de

calor para o meio ambiente e a chapa. Na peça, por sua vez, a mesma corrente é a principal responsável pela formação do cordão e do calor imposto à peça.

Essers (1976) cita que a necessidade de se criar um processo que permitisse que a corrente transferida pelo eletrodo fosse diferente daquela transferida à peça permitiu o desenvolvimento de um processo chamado na época de Plasma-MIG. De acordo com Essers et al. (1981), no processo Plasma-MIG, além da corrente que passa pelo arame, deve ser considerada a corrente responsável pela ionização da atmosfera que envolve o arame-eletrodo. A possibilidade de controlar de forma independente a corrente que flui pelo arco externo (ionização da atmosfera protetora) e a corrente que flui através do arame, de acordo com Harris (1994), é o que permite um melhor controle sobre o metal depositado, melhorando a produtividade e dando maior flexibilidade no controle do calor que é transferido à peça.

2.2 Histórico

O histórico do processo de soldagem "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos começa há algumas décadas, quando pesquisadores associaram mais de uma fonte de soldagem para obter características diferenciadas para os processos existentes na época. Yenni e Williamsville (1958) registraram uma das primeiras patentes (U.S. patent 2.847.555), denominando como "*High Pressure Arc Process*" – Processo a Arco com Alta Pressão, em que, como ilustrado pela Figura 2.1, eram associados um arco Plasma e uma alimentação externa de arame energizado direcionado ao arco Plasma e projetado em direção à peça de trabalho. Com esta associação, os autores relataram que a transferência de metal ocorreu de forma estável e também foi possível promover um maior controle sobre a penetração, por meio da variação da intensidade de corrente no circuito Plasma. Esta foi provavelmente a primeira experiência para envolver o arco de soldagem MIG/MAG em uma atmosfera já ionizada. Vale observar que o arame MIG/MAG era alimentado perpendicularmente ao arco Plasma e não concentricamente.

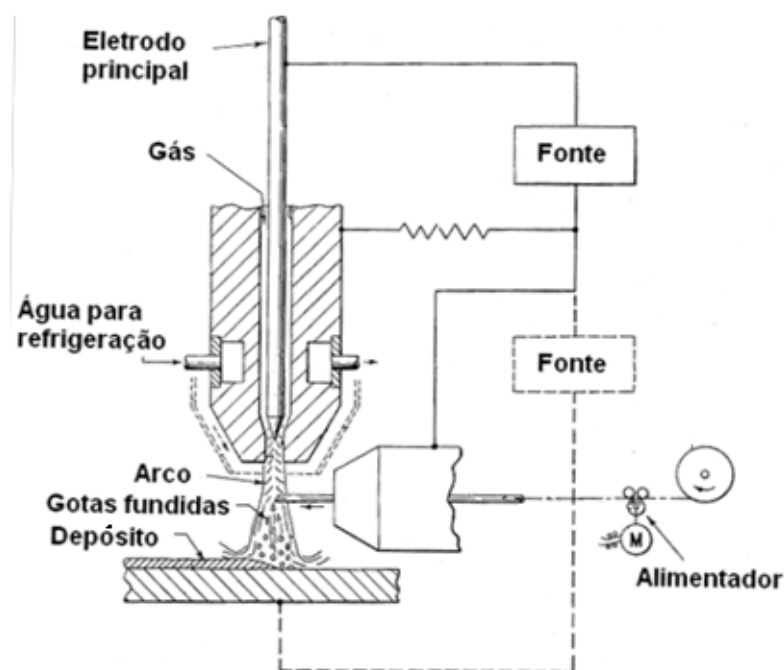


Figura 2.1 - Esquema de um equipamento para soldagem a arco com alta pressão
(Adaptado de YENNI; WILLIAMSVILLE, 1958)

De acordo com Liefkens e Essers (1969) *apud* Essers (1976), no ano de 1969, no laboratório de pesquisas da Philips em Eindhoven na Holanda, foi desenvolvido o processo de soldagem denominado "Plasma-MIG" (U.S. patent 3612807). Nos primeiros modelos de tocha, o eletrodo Plasma era posicionado lateralmente em relação ao eletrodo MIG/MAG, como mostrado na Figura 2.2. De acordo com Messler (2004), este foi provavelmente o primeiro processo híbrido de soldagem.

Na sequência, Essers (1976) apresentou a primeira alteração na arquitetura da tocha "Plasma-MIG", também chamada pelo autor de "Nozzle Plasma-GMA Welding" (Figura 2.3). Neste modelo, o bocal interno da tocha era utilizado como eletrodo não consumível, sendo responsável por manter um arco que envolvia o eletrodo consumível e seu respectivo arco. Este foi, provavelmente, o primeiro registro de um processo em que o arame eletrodo era alimentado concentricamente a uma atmosfera ionizada.

Finalmente, na década de 80, surgiu outro modelo de tocha Plasma-MIG (evolução do modelo apresentado na Figura 2.3), na qual, como ilustrado na Figura 2.4, foi introduzido um eletrodo anular de cobre com o objetivo de funcionar como eletrodo não consumível e produzir uma atmosfera ionizada que envolvia o eletrodo consumível. Este modelo foi apresentado por Essers et al. (1981). Segundo os autores, com o auxílio de um sistema de resfriamento da tocha era possível soldar com até 400 A de corrente passando pelo arame e 300 A de corrente passando pela atmosfera ionizada que envolvia o arame.

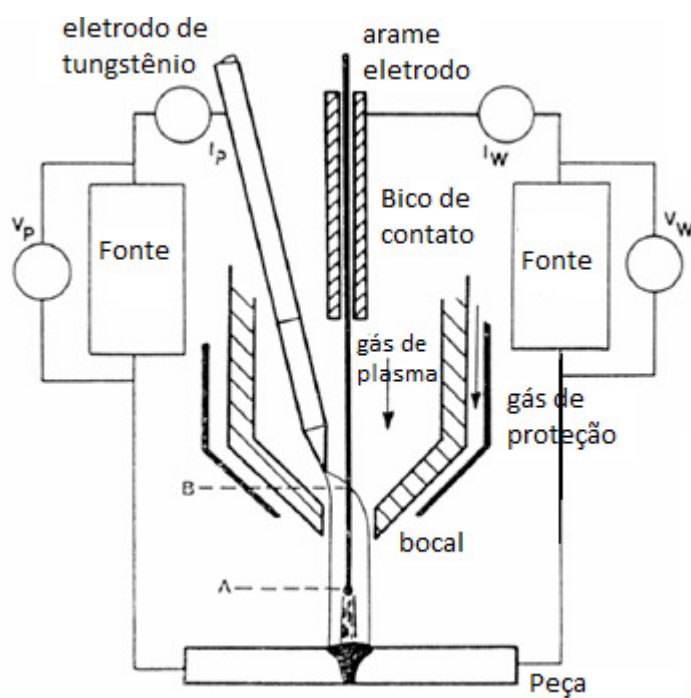


Figura 2.2 – Representação esquemática para um equipamento de soldagem Plasma-MIG.
(ESSERS et al., 1974)

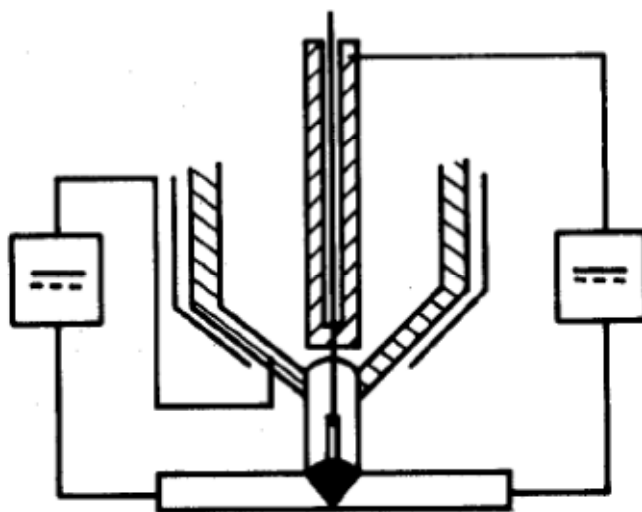


Figura 2.3 – Diagrama esquemático de uma tocha "Plasma-MIG" utilizando o bocal da tocha como eletrodo não consumível (ESSERS, 1976)

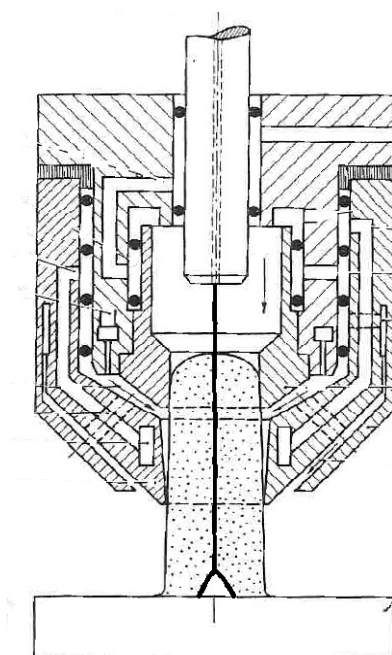


Figura 2.4 - Diagrama esquemático de uma tocha "Plasma-MIG" utilizando o bocal como eletrodo não consumível (ESSERS et al., 1981)

Os modelos de tocha com eletrodo anular de cobre (Figura 2.4) e os que utilizavam eletrodo maciço e pontiagudo de tungstênio de forma independente (Figura 2.2) foram amplamente utilizados em pesquisas durante as décadas de 70 e 80, mas, como citado por Oliveira (2006), a tecnologia de automatização/mecanização e de fontes então disponíveis foram, provavelmente, algumas das dificuldades que impediram a maior utilização dessa variante do processo "Plasma-MIG".

A partir da década de 90, com as dificuldades tecnológicas resolvidas, o processo despertou, então, o interesse de empresas. Foi assim que o processo Plasma-MIG reapareceu no mercado como um produto comercial. O processo Plasma-MIG foi estudado em duas vertentes distintas de tocha, que deram origem a dois produtos diferentes que estão no mercado atualmente. O primeiro modelo é comercializado pela empresa PLT (Plasma Laser Technologies) com o nome de Super-MIG® (Figura 2.5), que é descrito na patente WO 2004/043637 A1 (IGNATCHENKO; DYKHNO, 2004) como processo de soldagem Plasma-MIG. No entanto, apresenta características construtivas distintas das encontradas nas demais literaturas técnicas. O eletrodo MIG/MAG não é alimentado concentricamente ao bocal de constrição, tampouco ao eletrodo Plasma, mas sim atrás do eletrodo Plasma, além do que, o arco Plasma não mais envolve o eletrodo consumível, como nos casos anteriores. Neste caso, apenas o bocal externo é responsável por envolver e integrar as duas partes do processo. Dykhno e Davis (2006) apresentam como vantagens

do processo Super-MIG: maiores velocidades de soldagem; soldas com menos distorções; maiores penetrações e menor quantidade de respingos.

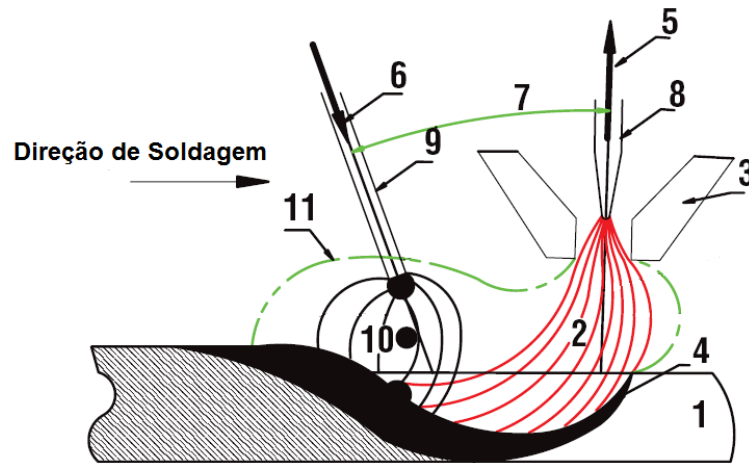


Figura 2.5 - Esquemática do processo Super-MIG® (combinação dos processos Plasma e MIG/MAG em um único processo): 1 - Peça de Trabalho; 2 - Jato de Plasma; 3 - Bocal Plasma; 4 - Poça de fusão; 5 - Sentido da corrente Plasma; 6 - Sentido da corrente MIG/MAG; 7 - Ângulo entre os eletrodos; 8 - Eletrodo de tungstênio; 9 - Eletrodo MIG/MAG; 10 - Arco MIG/MAG; 11 - Plasma (adaptado de DYKHNO; DAVIS, 2006)

O segundo modelo é comercializado pela empresa TBi como Plasma-MIG, cujo desenho esquemático já foi apresentado na Figura 1.1 e é baseado no esquema apresentado na Figura 2.4, desenvolvido por Essers et al. (1981). Conforme mencionado no Capítulo 1, esta abordagem, cuja tocha comercial é ilustrada pela Figura 2.6, será chamada neste trabalho de "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos.



Figura 2.6 – Tocha para soldagem "Plasma-MIG" de fabricação da empresa TBi (fonte: catalogo da tocha modelo PLM500, de 15/11/2006)

2.3 Características do Processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos

A característica fundamental do processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos é que o arame eletrodo e seu respectivo arco são envolvidos por um gás termicamente ionizado (Plasma), formando um arco híbrido. Isto é bastante diferente do processo MIG/MAG convencional, no qual o gás de proteção é alimentado ao redor do arame e do arco à temperatura ambiente.

Este processo, já ilustrado esquematicamente pela Figura 1.1, é baseado na tocha Plasma-MIG proposta por Essers et al. (1981). Esta configuração conferiu uma maior rigidez à coluna de Plasma e continua sendo utilizada atualmente, sendo que os insertos de carbono foram substituídos por tungstênio, ou simplesmente suprimidos, como é o caso da tocha utilizada atualmente.

Ainda de acordo com Essers et al. (1981), com este tipo de eletrodo, o gás intermediário não precisa ser totalmente inerte e pode usar a polaridade positiva tanto para o eletrodo consumível quanto para ionizar a atmosfera que envolve o eletrodo consumível, o que acaba garantindo maior estabilidade na transferência metálica. Naturalmente, o bocal constritor deve ter um orifício capaz de permitir a passagem, de forma concêntrica, do eletrodo e da atmosfera ionizada. A alta taxa de aquecimento da tocha, provocada pelos dois fluxos de corrente, passa a ser compensada por um eficiente sistema de refrigeração.

Uma característica interessante deste processo é a abertura dos arcos interno e externo. A abertura do arco pode ser conseguida basicamente de três maneiras, a saber, alta frequência, curto-circuito do eletrodo MIG/MAG e "Soft Start". A primeira maneira, como descrito por Essers et al. (1981), foi utilizada na versão original do processo. O equipamento iniciava o arco com o auxílio de uma descarga elétrica de alta frequência. No entanto, essa forma de ignição possui alguns inconvenientes, como:

- A tocha tem que ser construída de tal maneira que a descarga de alta frequência não atinja partes vitais da tocha;
- O sinal de alta frequência pode prejudicar o funcionamento de computadores, e os sinais de controle podem ser influenciados.

A segunda maneira, também citada por Essers et al. (1981), é a abertura através do arame do componente MIG/MAG por curto-circuito. Nesse modo de abertura, uma apreciável quantidade de respingos é gerada (Figura 2.7), podendo alcançar partes vitais da tocha, danificando a mesma. Por causa do calor da coluna de Plasma, respingos podem se aderir ao eletrodo não consumível de cobre. Se isto acontecer, podem ocorrer efeitos adversos na estabilidade da coluna de Plasma e nos mecanismos de limpeza da peça.

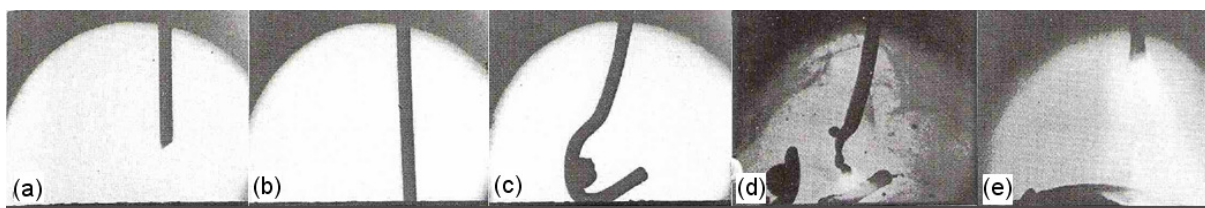


Figura 2.7 – Sequência de imagens (registrada com câmera de alta velocidade) do acendimento do arco no processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos por curto-circuito: (a) arame movendo-se em direção a peça; (b) curto-circuito; (c) arame-se dobrando e início da fusão; (d) acendimento do arco MIG/MAG; (e) acendimento do arco externo (ESSERS et al., 1981)

Tendo em vista as dificuldades apresentadas anteriormente, no início da década de 80 foi proposto por Essers et al. (1981) um novo método de acendimento do arco, chamado "Soft Start", conforme esquema da Figura 2.8. Nesta forma de acendimento do arco, o arame-eletrodo é utilizado para gerar um arco de baixa intensidade, através do qual permite a abertura posterior do arco externo. Tal procedimento foi detalhado por Oliveira (2006) e ocorre basicamente em seis etapas, a saber:

Etapa 1: A fonte responsável pelo arco externo apresenta tensão em vazio e a fonte responsável pelo arco interno apresenta uma tensão de referência ($\approx 6V$), que é responsável por identificar o momento em que o arame eletrodo toca a peça;

Etapa 2: Ao toque do arame na peça, o movimento do mesmo é interrompido e a fonte gera um arco de baixa intensidade de corrente (em torno de 30 A), sem fusão considerável do arame;

Etapa 3: O alimentador de arame inverte a rotação e o arame retrocede em direção à tocha de soldagem, trazendo progressivamente o seu arco para dentro da tocha, até que o mesmo se aproxime do eletrodo não consumível;

Etapa 4: Como a fonte responsável pelo arco externo já possui tensão em vazio, ocorre o acendimento imediato do arco-plasma, devido à atmosfera ionizada pelo arco interno, neste momento de baixa potência (neste momento, o movimento de recuo do eletrodo é interrompido);

Etapa 5: Após o acendimento do arco externo, o arco interno é extinto (corte de energia) com o objetivo de impedir a transferência metálica e de proporcionar um pré-aquecimento no início da junta somente com a energia do arco externo;

Etapa 6: O arame volta a se deslocar em direção à peça de trabalho e, como a fonte responsável pelo arco interno apresenta novamente tensão em vazio e o meio está ionizado pelo arco externo, ocorre o re-acendimento espontâneo do arco interno, sem

necessidade de curto-circuito (isso garante um início de cordão de solda livre de respingos), mas já com as correntes reguladas para a operação de soldagem.

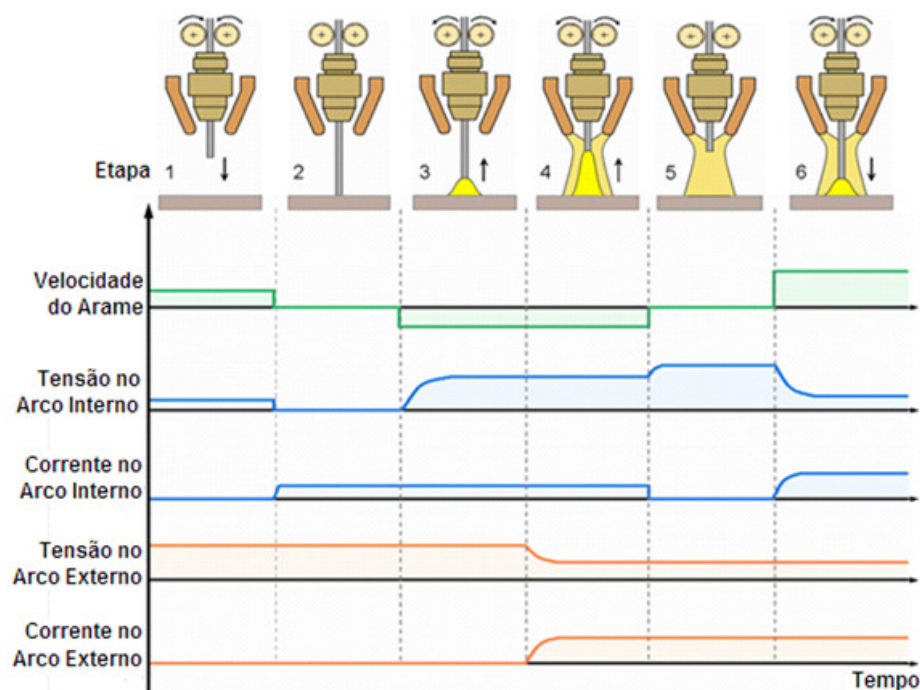


Figura 2.8 - Esquema de funcionamento do "Soft Start" (atualizada a partir de REIS; SCOTTI, 2007 p. 129)

Para facilitar a visualização do procedimento "Soft Start", é apresentado na Figura 2.9 uma sequência de imagens obtidas com câmera de alta velocidade, onde é possível observar na parte superior preferencialmente o arco e na parte inferior preferencialmente o arame. Cada imagem apresentada corresponde, na sequência, a uma etapa do processo de abertura do arco, também estão identificados os tempos de cada etapa em milissegundos.

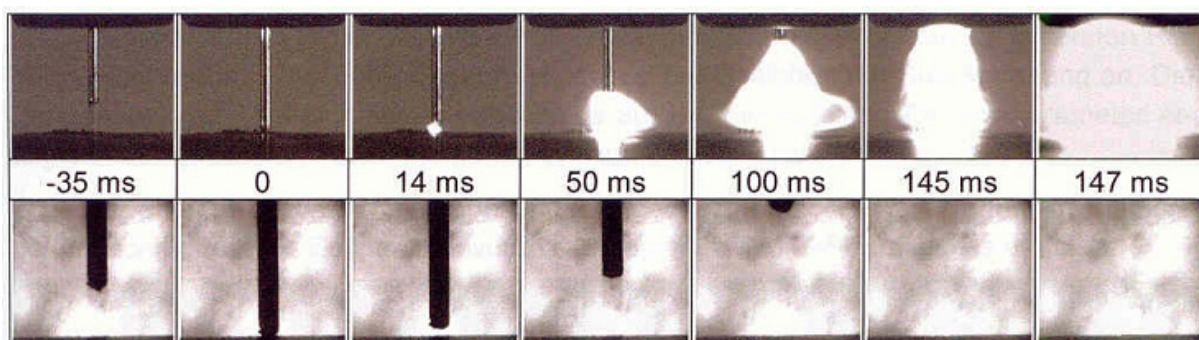


Figura 2.9 - Sequência de fotos do acendimento do arco externo com visualização preferencial do arco na parte superior e do arame na parte inferior (ISF/ISAF, 2002 *apud* OLIVEIRA, 2006)

Como pode ser observado na Figura 2.10, a reabertura do arco MIG/MAG 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.

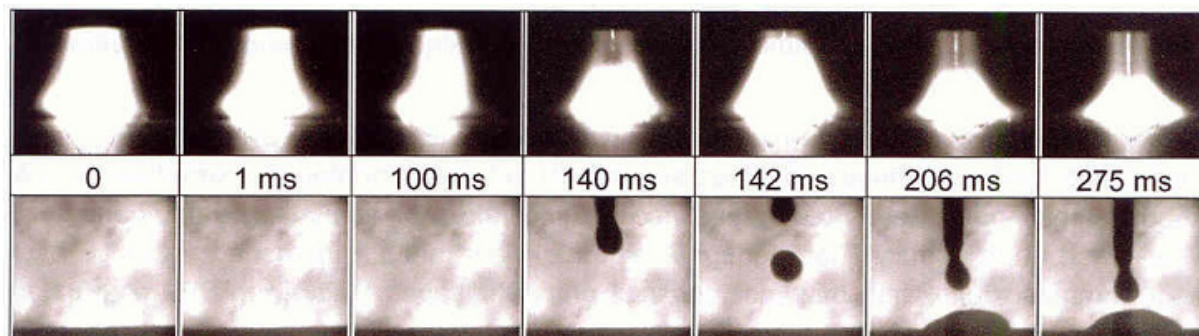


Figura 2.10 – Sequência de fotos do acendimento do arco interno com visualização preferencial do arco na parte superior e do arame na parte inferior (ISF/ISAF, 2002 *apud* OLIVEIRA, 2006)

CAPÍTULO III

BANCADA EXPERIMENTAL

3.1 Bancada experimental

A Figura 3.1 apresenta uma visão geral da bancada experimental utilizada no trabalho.

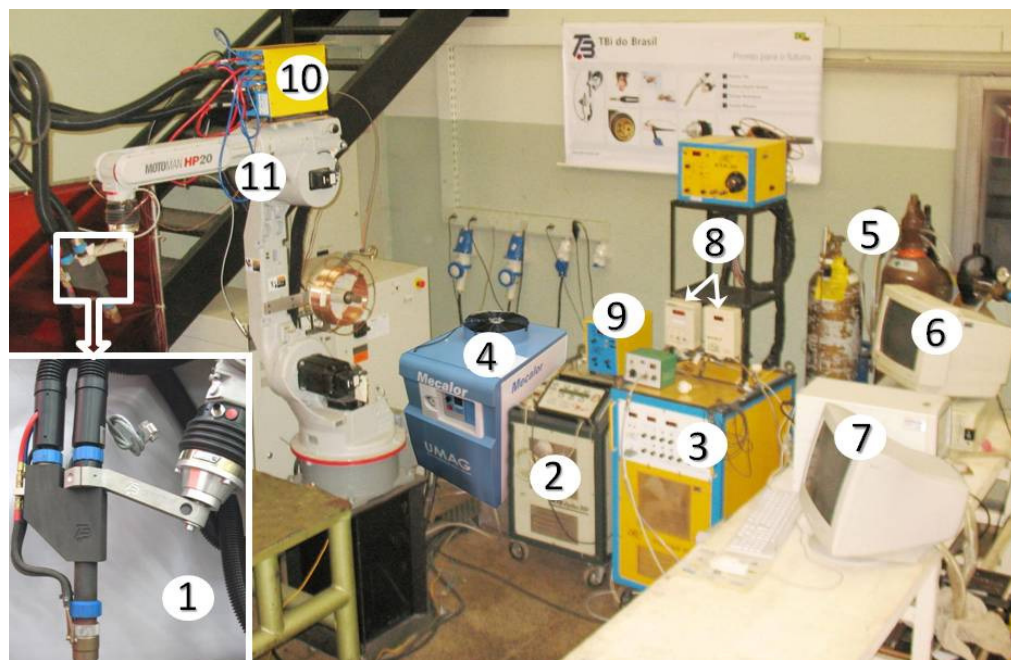


Figura 3.1 – Bancada experimental: Tocha "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos (1); Fonte conectada ao circuito MIG/MAG (2); Fonte conectada ao circuito do arco externo (3); Unidade de água gelada (4); Gases para o processo (5); Sistema de controle para o processo (6); Sistema de aquisição de sinais de corrente e tensão (7); Medidores de vazão (8); Interface fonte-cabeçote alimentador (9); Cabeçote alimentador com capacidade de reverter a direção de alimentação do arame (10); Robô Motoman modelo HP20 (11)

3.1.1 Robô

O robô que foi utilizado neste trabalho possui 6 GDL (**G**raus **D**e **L**iberdade), fabricado pela Motomam®, modelo HP20, com capacidade de carga de 20 kg no centro do punho, acionado por um controlador NX100. A Figura 3.2 mostra o detalhe da tocha fixada ao robô. Nesta figura é mostrado também o suporte para tocha e sensor de impacto. A presença deste sensor é importante para evitar avarias tanto na tocha quanto no robô (ele possui a finalidade de interromper o movimento em casos de colisões, que podem ocorrer ou por erro de programação ou pela presença de obstáculos no caminho).

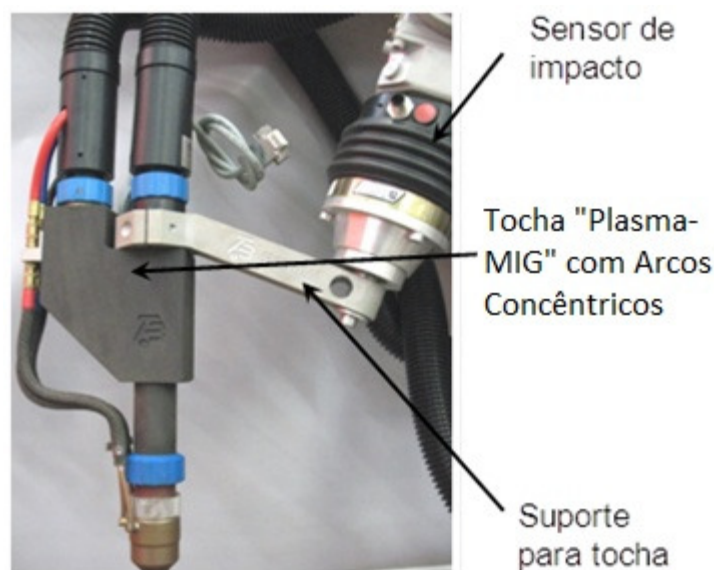


Figura 3.2 – Detalhe de fixação da tocha, suporte e sensor de impacto

3.1.2 Fontes de soldagem para o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos

O processo necessita de dois circuitos independentes, um para a formação do arco externo e outro para o arco interno (formado entre o eletrodo consumível e a peça) do processo. Para tanto, foram utilizadas duas fontes de soldagem multi-processos capazes de operar com característica estática no modo corrente constante. Para o arco externo, foi utilizada a fonte eletrônica de soldagem "Inversal 300", selecionada para operar no modo TIG/Plasma, com característica estática do tipo corrente constante e polaridade do eletrodo positiva. Para o arco interno, foi utilizada a fonte eletrônica de soldagem "Digitec 300", selecionada para operar no modo MIG/MAG, com característica estática do tipo corrente constante e polaridade do eletrodo positiva.

3.1.3 Tocha para soldagem "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos

Foi utilizada uma tocha comercial de fabricação da empresa TBi, modelo PLM 500 construída de acordo com a norma europeia DIN EN 60974/ VDE 0544. Na Figura 3.3 é apresentada a tocha, com destaque aos elementos principais mostrados de forma “explodida”.

Esta tocha pesa 1700 gramas sem os cabos de alimentação e mede nas suas dimensões maiores 294 mm (comprimento) e 112 mm (largura). Neste modelo de tocha, o eletrodo responsável pelo arco externo é de cobre e possui formato anular.

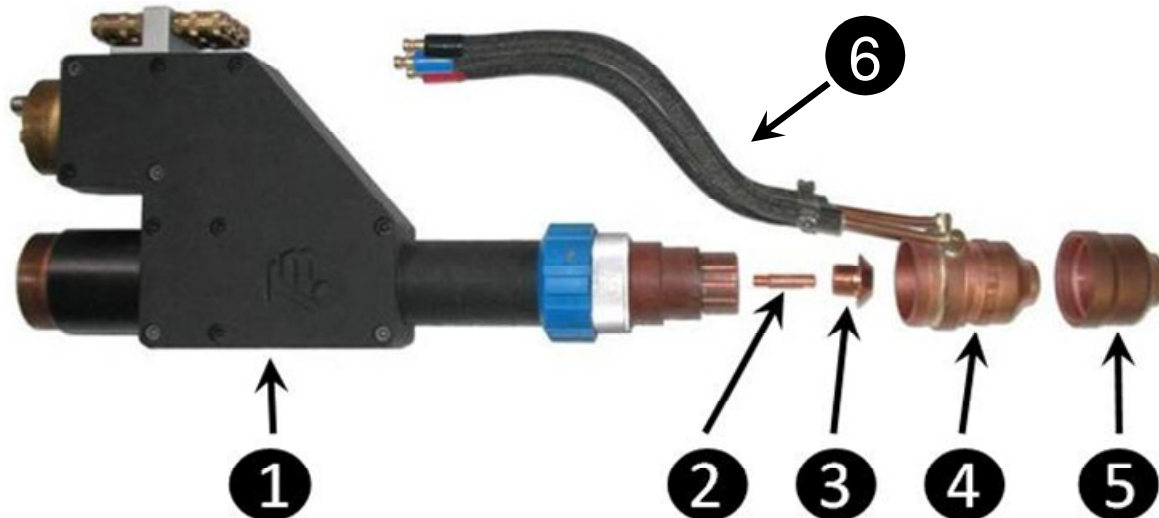


Figura 3.3 - Tocha "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos: 1 - Corpo da tocha; 2 – Bico de Contato; 3 - Eletrodo anular de cobre responsável pelo arco externo; 4 - Bocal constritor; 5 - Bocal externo; 6 - Mangueiras de refrigeração por água e para passagem da proteção gasosa externa

Os elementos principais que constituem a tocha incluem o bico de contato MIG/MAG, o eletrodo anular de cobre, bocal constritor do arco externo, bocal de proteção, que estão mostrados de forma esquemática na Figura 3.4, com as devidas proporções respeitadas. Vale ressaltar que os componentes identificados nesta figura estão sujeitos a avarias provocadas pelas altas temperaturas envolvidas no processo e necessitam de um eficiente sistema de refrigeração, procedimento que será discutido com detalhes no item 3.1.6.

A Figura 3.5, por sua vez, define e identifica as distâncias de posicionamento dos principais elementos da tocha, os quais influem de forma decisiva no comportamento do processo. Os valores de Recuo do eletrodo do arco externo (RP) e Recuo do bico de contato MIG/MAG (RM) dependem da característica de construção da tocha, sendo para o modelo utilizado neste trabalho, respectivamente, 9 e 18 mm. Já o valor da Distância da

Tocha à Peça (DTP) pode ser variado simplesmente mudando o posicionamento da tocha em relação à peça de trabalho e seu valor é indicado na metodologia específica de cada capítulo.

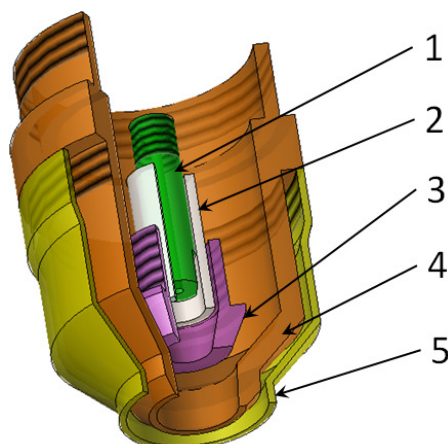


Figura 3.4 – Vista esquemática dos principais elementos da tocha: 1 – Bico de contato MIG/MAG; 2 – Isolamento cerâmico; 3 – Eletrodo do arco externo; 4 – Bocal constritor do arco externo; 5 – Bocal Externo

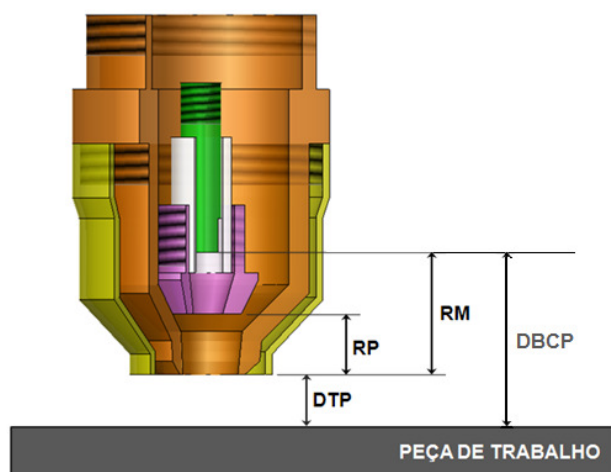


Figura 3.5 – Vista esquemática do posicionamento dos principais elementos da tocha: DTP - Distância da Tocha à Peça; RP - Recuo do eletrodo do arco externo; RM - Recuo do bico de contato MIG/MAG; DBCP - Distância do Bico de Contato MIG/MAG à Peça

Também foi utilizada a tocha comercial de fabricação da empresa TBi, modelo PLM 900 mostrada na Figura 3.6. Esta tocha tem as mesmas características construtivas do modelo anterior, se diferenciando pela sua maior capacidade de refrigeração, o que permite soldagens com maiores valores de correntes.



Figura 3.6 – Tocha para soldagem com o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos modelo PLM 900

3.1.4 Sistema de alimentação do arame eletrodo

O sistema de alimentação é composto de dois módulos, um onde estão localizados os rolos alimentadores, os conectores para os cabos da tocha e as conexões de água e gás (Figura 3.7) e outro onde estão localizados os sistemas eletrônicos e a interface com o usuário (Figura 3.8). O diferencial desse sistema é sua capacidade de acionar os rolos alimentadores, tanto no sentido horário quanto no anti-horário (portanto, é capaz de fazer o recuo do eletrodo consumível, que é uma exigência para a execução do procedimento "Soft Start" de abertura do arco).

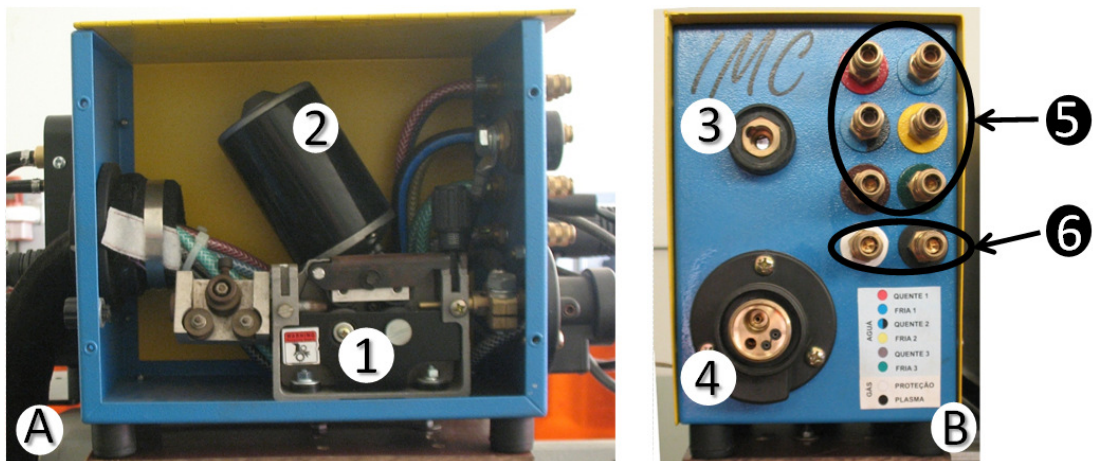


Figura 3.7 – Vista lateral (A) e vista frontal (B) do cabeçote alimentador (sem os cabos e mangueiras conectados): 1 – Roios alimentadores; 2 – Motor de acionamento dos rolos alimentadores; 3 – Conector engate rápido 9 mm fêmea para o cabo do arco externo; 4 – Euro conector fêmea para o cabo MIG/MAG; 5 – Entradas e saídas de água para refrigeração da tocha; 6 – Saídas de gases de proteção e do arco externo

O cabeçote alimentador pode operar em duas situações. Primeiro, com a fonte selecionada para operar em modo remoto. Neste caso, a regulação da velocidade de alimentação é realizada por meio do programa que comanda o processo. A segunda situação é com a fonte selecionada para operar no modo local, quando a regulação da velocidade de alimentação é realizada diretamente no potenciômetro localizado no painel da interface do cabeçote alimentador ou no painel da fonte. Esta configuração é utilizada somente para soldagem MIG/MAG convencional usando este mesmo cabeçote.

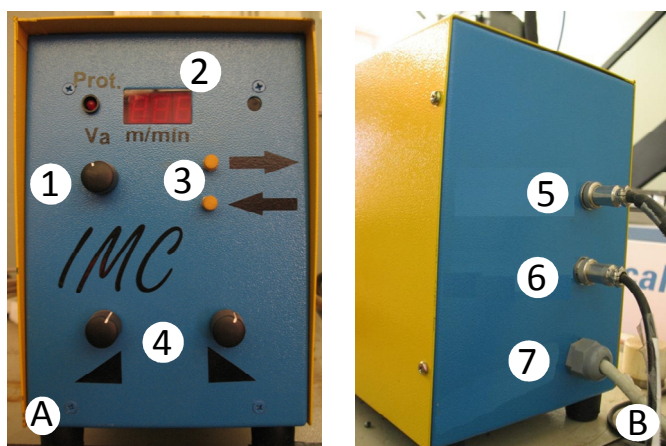


Figura 3.8 - Vista frontal (A) e traseira (B) da interface do cabeçote alimentador: 1 - Potenciômetro de ajuste da velocidade de alimentação; 2 - Display indicativo da velocidade de alimentação, em m/min; 3 - Botões de avanço e retrocesso rápido do arame; 4 - Rampas de subida e descida do arame; 5 - Interface com o cabeçote alimentador; 6 - Interface com o sistema de controle (PC); 7 - Interface com a fonte MIG/MAG

3.1.5 Unidade de controle microprocessada (Cabeçote + Programa “P-MIG”)

O controle do processo é executado por meio de um microcomputador equipado com duas placas de aquisição e controle analógicos e digitais de denominação Interdata (desenvolvida pela empresa IMC). O controle dos parâmetros é realizado por meio do programa “P-MIG” (atualmente na versão 2.21), que opera em ambiente DOS, também desenvolvido pela IMC (Figura 3.9).

Neste programa é possível realizar a regulação dos seguintes parâmetros:

- Parâmetros de Controle para o Arco Interno (MIG/MAG):
 - Corrente de Pulso do Arco Interno;
 - Corrente de Base do Arco Interno;
 - Tempo de Pulso do Arco Interno;
 - Tempo da Base do Arco Interno;

- Velocidade do Arame.
- Parâmetros de Controle para o Arco Externo (Plasma):
 - Corrente de Pulso do Arco Externo;
 - Corrente de Base do Arco Externo;
 - Tempo de Pulso da Corrente do Arco Externo;
 - Tempo de Base da Corrente do Arco Externo;
 - Tempo da rampa de descida.
- Parâmetros do procedimento de abertura do arco ("Soft Start"):
 - Corrente do arco externo de Pré-Aquecimento;
 - Tempo de Pré-Aquecimento;
 - Tempo de defasagem entre os pulsos de corrente do arco Externo e Interno;
 - Corrente de abertura;
 - Velocidade de aproximação e retrocesso do arame.

```

      PLASMA / MIG 2.21
    CORRENTE MIG
    corrente de base [ A ] : 100.00   tempo Base [ms] : 8.00
    corrente de pulso [ A ] : 280.00   tempo pulso [ms] : 4.20
    cor. med. sinerGico [ A ] : 161.97   Uel. arame [m/min] : 7.70

    CORRENTE PLASMA
    corrente de base [ A ] : 0.00   cor. de finalizacao [ A ] : 0.00
    Corrente de pulso [ A ] : 0.00   Tempo de finalizacao [ s ] : 0.30
    tempo de rampa desc. [ s ] : 2.00

    GERAIS
    corrente preaquec. [ A ] : 100.00
    tempo preaquecine. [ s ] : 0.00
    defasagem [ms] : 7.90
    corrente De abert. [ A ] : 50.00
    velocidade aprox [m/min] : 1.00

    TECLAS DE FUNCAO
    O - SAIR
    N - ABERTURA
    ESPACO - DESLIGA

    SITUACAO
    ETAPA [ PROTECAO ]
    IsP1 [ ]
    Ua [ ]
    Ua2 [ ]
  
```

Figura 3.9 - Tela de apresentação do programa P-MIG, versão 2.21

Na configuração atual do programa e das fontes usadas na montagem, as soldas são sempre em corrente contínua, podendo variar a polaridade (as fontes operem apenas com característica estática de corrente constante). Como se vê, o programa é feito para se soldar na condição pulsada. Quando o usuário desejar soldar com corrente constante, é

necessário atribuir valores iguais para os parâmetros de base e de pulso, exceto para os tempos, que neste caso não necessitam de regulagens.

3.1.6 Sistema de refrigeração

Processos de soldagem que operam com altas intensidades de corrente, como o "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos e o MIG/MAG Duplo-Arame, sofrem desgaste maior de seus componentes. No caso do "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos, o bocal constritor, o eletrodo anular de cobre e o bico de contato são os elementos mais afetados. Bico de contato sobreaquecido em operação pode dificultar a passagem do arame e provocar instabilidades ao processo.

Para promover a retirada de calor da tocha, existem basicamente duas opções. Na primeira opção, que por padrão acompanha a maioria das fontes de soldagem de alta capacidade, um sistema promove a circulação de água que retira calor da tocha. Este calor é posteriormente transferido para o meio ambiente por meio de um radiador. Neste sistema, por mais eficiente que ele seja, a temperatura de operação está acima da temperatura ambiente. A segunda opção, a água retira calor da tocha, assim como no sistema anterior. No entanto, esta água é resfriada por um eficiente sistema de refrigeração. Aqui a temperatura da água pode ser ajustada para valores abaixo da temperatura ambiente, permitindo retirar grandes quantidades de calor da tocha.

Essers et al. (1981) já havia observado que o sistema de refrigeração aumentava significativamente a capacidade de soldagem de uma tocha (de modelo similar ao utilizado neste trabalho), conseguindo trabalhar com correntes de até 300 e 400 A, respectivamente para os arcos externo e interno, sem danificar a tocha. Assim, no presente trabalho foi utilizada uma unidade de refrigeração de água (na Figura 3.10 é mostrado o painel frontal do equipamento) capaz de fornecer água ao sistema numa faixa de 5 a 25 °C. Como padrão para todos os ensaios, a temperatura foi mantida em 16 °C.

A montagem da unidade de refrigeração de água gelada foi realizada de acordo com o esquema hidráulico mostrado na Figura 3.11. Nesta figura também é mostrada a presença de sensores de fluxo. Eles são ligados em série e conectados ao computador de controle do processo, que só aciona as fontes se todos os sensores estiverem detectando a circulação da água. Se a passagem de água em algum dos circuitos for bloqueada por qualquer motivo, o software "P-MIG" desliga o processo, para evitar que algum componente vital da tocha seja danificado. Já o "by-pass" também indicado na Figura 3.11 é mostrado com mais detalhes na Figura 3.12. Esse sistema de "by-pass" interliga a saída de água gelada e o retorno de água quente, para evitar sobrepressão do sistema, caso não haja

equipamentos ligados no sistema de refrigeração. No caso de não existir nenhum equipamento conectado, a válvula deve permanecer totalmente aberta, para permitir o retorno da água para o reservatório. No caso de existir equipamento conectado, a válvula deve, então, ser gradualmente fechada, aumentando desta forma a pressão no lado da saída de água, o que obriga a passagem da água pela tocha e o retorno ao reservatório pelo lado de menor pressão.



Figura 3.10 - Unidade Móvel de refrigeração de água, Fabricante Mecalor, Modelo: UMAG MAS-9-RI-220

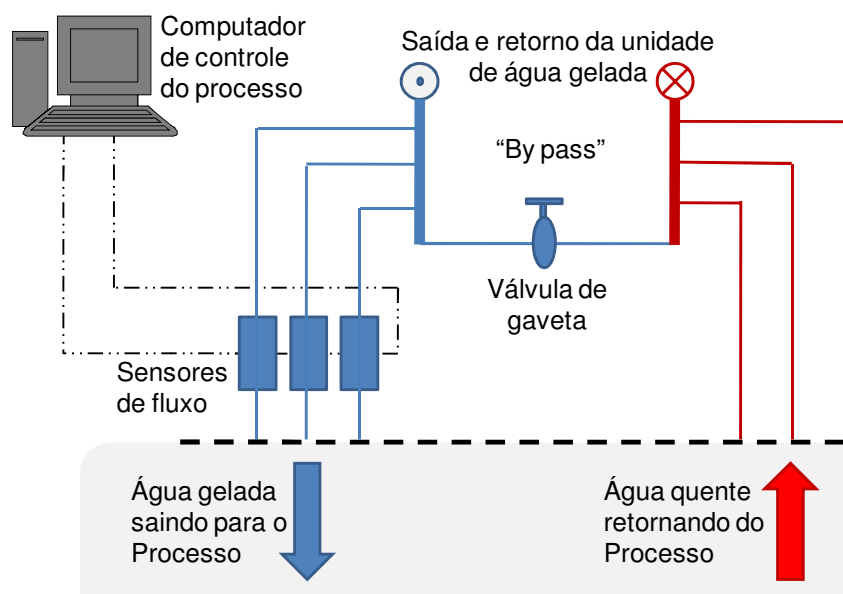


Figura 3.11 - Esquema de posição dos sensores de fluxo do circuito hidráulico da saída e retorno da unidade de refrigeração

O fabricante do equipamento recomenda que a bomba de circulação de água opere numa faixa de pressão entre 2,5 e 3,5 kgf/cm², que é suficiente para garantir uma vazão na faixa de 1,5 a 2 l/min em cada um dos circuitos de refrigeração. O ajuste de vazão e pressão é realizado através da válvula de gaveta, que quanto mais fechada, maior é a pressão de operação e maior é a vazão de água pela tocha.

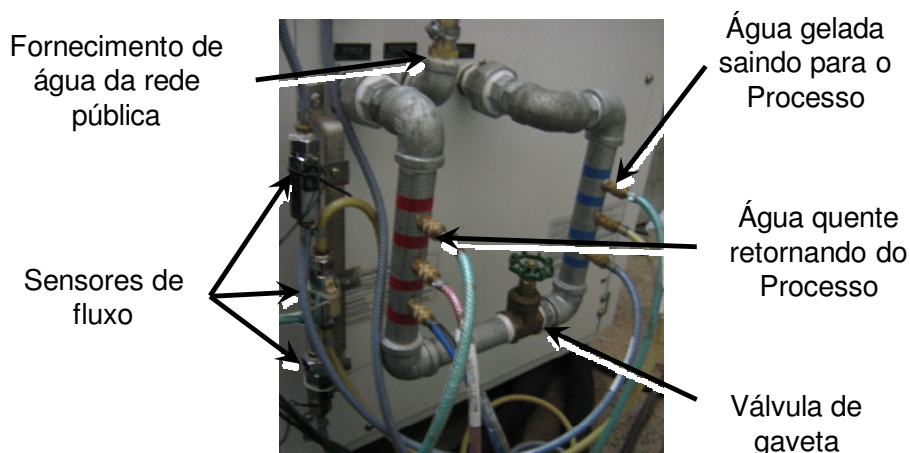


Figura 3.12 - Vista do “by-pass” com válvula de gaveta e engates rápidos para mangueiras de água

3.1.7 Sistemas de aquisição e tratamento de dados

Para aquisição dos sinais de corrente dos arcos internos e externos foram utilizados transdutores de corrente que funcionam segundo o princípio do efeito Hall. Tal transdutor gera uma tensão que é proporcional a corrente que passa pelos cabos que conduzem corrente da fonte até a tocha de soldagem.

Para aquisição do valor de tensão de soldagem, foi necessária a utilização de um divisor de tensão para garantir que a entrada de tensão na placa fosse de no máximo ± 10 V (faixa de medição da placa). Esta divisão é necessária uma vez que as fontes de soldagem apresentam tensão em vazio na faixa de 70 V, valor que danifica a placa de aquisição.

Para o processo de conversão dos sinais analógicos de corrente e tensão em sinais digitais foi utilizada uma placa de aquisição da *National Instruments* Modelo USB 6009 (Figura 3.13) com uma resolução de 14 bits e com capacidade de operar na faixa de ± 10 V. Para uma faixa de medição do sensor Hall de ± 500 A, resulta numa resolução de medição, (calculada pela razão: faixa de medição do sensor hall/resolução da placa) de 0,06 A para a corrente. De maneira similar, para uma faixa de medição de ± 100 V do divisor de tensão, resulta numa resolução de medição de 0,01 V para a tensão.

A placa de aquisição é comandada por um programa desenvolvido em ambiente LabVIEW® (Figura 3.14), que faz a aquisição e armazenamento dos dados relativos aos sinais. No programa, podem ser ajustados os valores de frequência de aquisição, o tempo de aquisição e os canais a serem utilizados.



Figura 3.13 - Placa de aquisição tipo “Plug and Play” da *National Instruments* modelo: NI USB-6009

O tratamento dos dados é realizado no software OriginPro 7.5® que permite abrir, manipular (selecionar faixas de tempo dos sinais que se deseja trabalhar), sincronizar e tratar os dados gravados pelo primeiro programa.

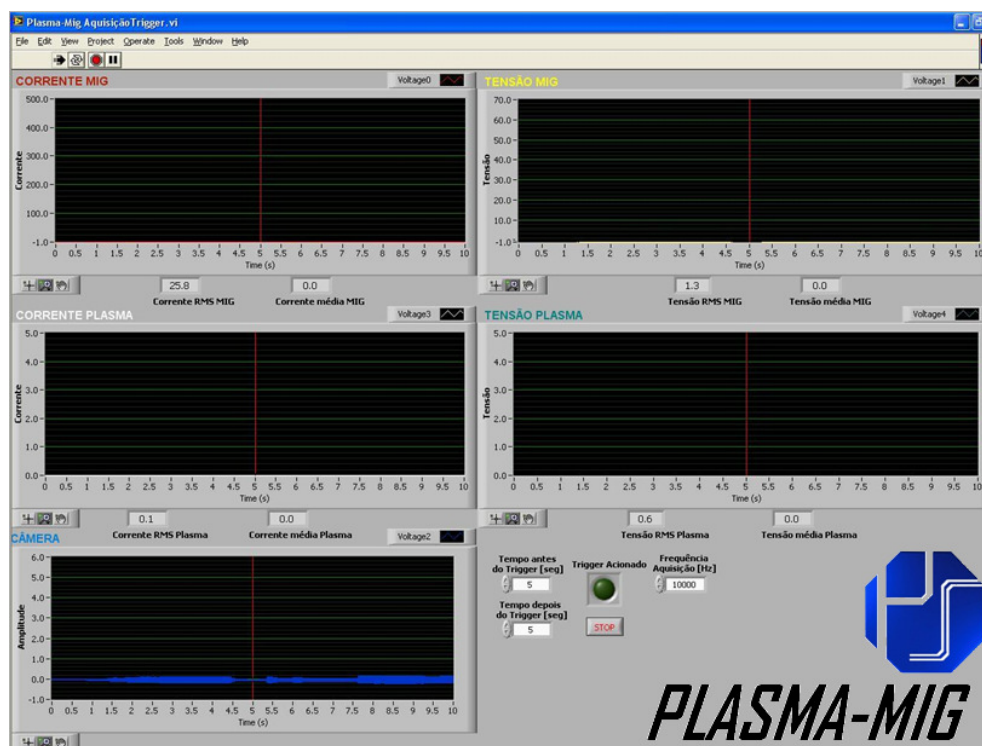


Figura 3.14 - Interface do sistema de aquisição de dados

3.1.8 Sistema para filmagem a alta velocidade

Para se adaptar aos experimentos deste projeto quando da necessidade de filmagens, a bancada mostrada na Figura 3.1 foi complementada com a presença de um conjunto de um canhão laser-lentes (A), uma mesa para movimentação das placas de teste (C) e de uma câmera para filmagem a alta velocidade (D), como ilustrado na Figura 3.15.

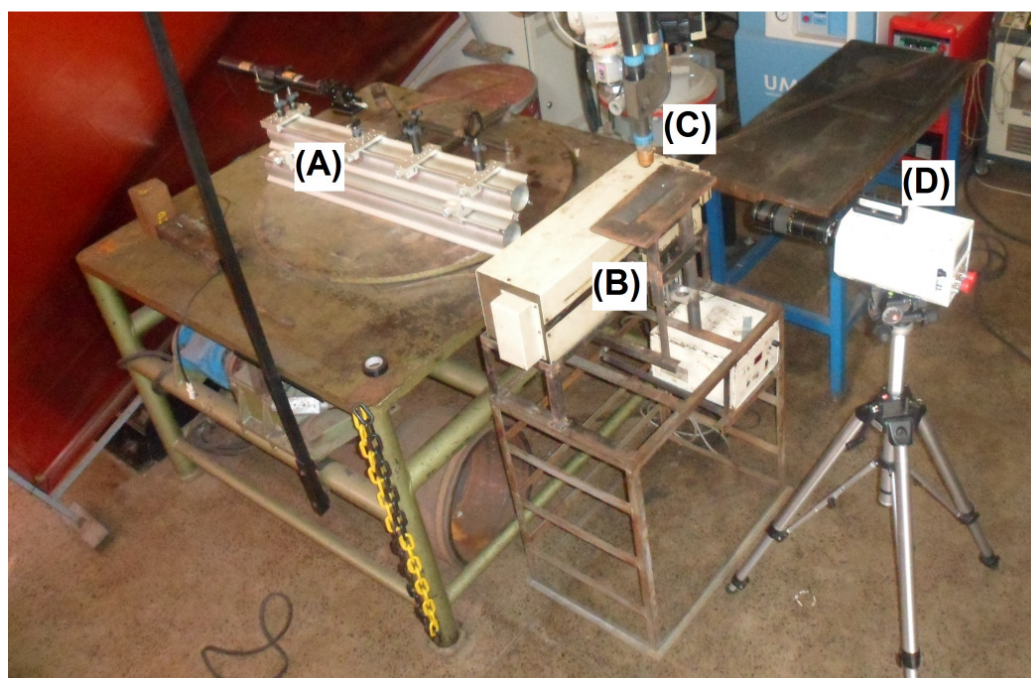


Figura 3.15 – Bancada experimental para filmagem. Conjunto de laser e lentes convergentes e divergentes (A); Mesa para movimentação dos corpos de prova (B); Tocha "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos (C); Câmera para filmagem a alta velocidade (D)

O laser utilizado é um hélio-neônio (He-Ne), com comprimento de onda de $632,8 \text{ nm}$, cujo espectro difere daquele produzido pelo arco, conforme Figura 3.16. Logo após a saída do laser, é posicionada uma lente divergente para aumentar o diâmetro do feixe e na sequência uma lente convergente para torná-lo novamente colimado, mas com maior diâmetro. Antes da câmera de alta velocidade é posicionado um filtro passa-banda, cuja finalidade é eliminar os comprimentos de onda produzidos pelo arco de solda, permitindo prioritariamente a passagem do feixe de luz produzido pelo laser. Podem também ser utilizados filtros neutros para controlar a intensidade de luz tanto que sai do laser e incide na posição do arame quanto que incide sobre a câmera. Ao se reduzir a intensidade da luz que sai do laser, mais evidente fica a luz emitida pelo arco, enquanto ao se reduzir a luz que entra na câmera, menos luz o arco se torna perceptível, mas intensifica-se o efeito da perfilografia.

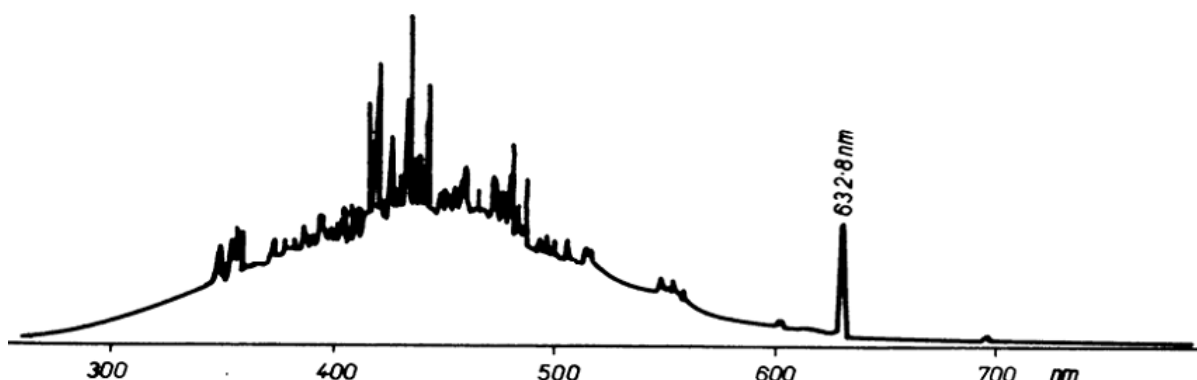


Figura 3.16 – Espectro do arco TIG e do feixe de laser (OKADA et al., 1980)

Para o registro das imagens referentes ao Capítulo 5 foi utilizada uma câmera, modelo Hi-Dcam II, com velocidade de filmagem de 2000 quadros por segundo, com tempo de abertura do obturador (*shutter*) de 1/20000. As imagens foram gravadas em formato TIFF (Tagged Image File Format) com resolução de 420 x 256 pixels. Para o registro das imagens referentes aos capítulos 7 e 8, foi utilizada uma câmera, modelo NAC Memrecam Ci, com velocidade de filmagem de 2000 quadros por segundo, com tempo de abertura do obturador de 1/24000. As imagens foram gravadas em formato TIFF com resolução de 252 x 186 pixels.

Laser, lentes e câmera compõem os equipamentos básicos utilizados na técnica perfilográfica, que será apresentada com maiores detalhes no capítulo 5. A mesa para movimentação das placas de teste se fez necessário, uma vez que a tocha necessitava estar parada, já que a técnica de filmagem utilizada não permite a movimentação dos componentes da tocha. Desta forma, o robô apenas posiciona a tocha e a velocidade de soldagem é definida pela movimentação da mesa.

3.1.9 Gases para o Processo

O processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos exige o fornecimento independente de três gases, a saber, o gás interno, o intermediário e o externo. Foi então utilizado Ar (Argônio) como gás interno e intermediário e a mistura Ar+8%CO₂ para gás externo, todos provindos de cilindros comerciais. No entanto, para o tópico descrito no Capítulo 4, foram utilizadas misturas diferentes, também fornecidas em cilindros comerciais, uma vez que o objetivo do capítulo era o de verificar a influência da composição dos gases sobre o aspecto do cordão de solda e desgaste do eletrodo do arco externo. Os valores de vazão estão especificados em cada capítulo.

3.1.10 Metal de adição

As soldas que envolvem adição de metal foram realizadas com arame maciço de aço ao carbono da classe AWS ER70S-6, de 1,2 mm de diâmetro.

3.1.11 Metal de base

Todos os corpos de prova utilizados neste trabalho foram confeccionados em aço com baixo teor de carbono do tipo ABNT 1020. As soldas foram realizadas sobre as chapas na forma “como recebida”, lavadas e escovadas com escova manual.

3.1.12 Medidor de vazão de gás

Para garantir uma correta vazão nos gases utilizados no processo, foi utilizado o medidor mostrado na Figura 3.17. De acordo com o manual do fabricante, utiliza um sensor que é independente da pressão, baseado em princípios de medição mássica tipo “thermal flow”, cujo resultado da medição não é afetado pela variação de pressão. Antes de cada conjunto de experimento, este sensor era acoplado à saída da tocha e a vazão de cada gás regulada individualmente.



Figura 3.17 – Medidor de vazão de gás modelo MVG 03

CAPÍTULO IV

INFLUÊNCIA DA VAZÃO DOS GASES SOBRE O ASPECTO SUPERFICIAL DO CORDÃO DE SOLDA E DA COMPOSIÇÃO SOBRE A INTEGRIDADE DOS COMPONENTES DA TOCHA

4.1 Introdução

Uma das principais funções dos gases em soldagem a arco elétrico por processos com alimentação contínua de arame e proteção gasosa é garantir que as partes superaquecidas pelo arco de soldagem (ponta do arame-eletrodo, gotas em transferência e poça de fusão) estejam protegidas da ação nociva da atmosfera local. Para Kah e Martikainen (2013), os principais agentes nocivos são o oxigênio, o nitrogênio e o vapor de água presente no ar ambiente. Desta forma, o gás de proteção vai ter a função de impedir a presença dos agentes nocivos da vizinhança da solda. Little e Stapon (1990) acrescentam que o gás de proteção (em conjunto com outros parâmetros de soldagem) promove uma maior estabilidade do arco e transferência metálica uniforme. Mais exato seria dizer que o gás de proteção é ainda, por se tornar o meio ionizado (plasma), um fator de manutenção do arco e que interfere no modo de transferência.

Quando se fala em gás para soldagem, logo a palavra “vazão” é lembrada. Vazão de gás é um parâmetro que deve ser cuidadosamente selecionado para que o mesmo exerça suas funções de forma eficiente sem prejudicar a formação do cordão de solda. As consequências de uma vazão inadequada podem ser desde falta de proteção da poça de fusão (vazões baixas) até a contaminação da atmosfera protetora por turbulências e desperdícios (vazões altas). Como citado por Scotti e Ponomarev (2008 p. 96-97), infelizmente não existe uma forma adequada de se determinar a vazão apropriada para cada condição de soldagem, devendo o usuário observar o comportamento da solda e usar sua experiência e bom senso para definir uma vazão adequada.

Na soldagem a arco elétrico por processos com alimentação contínua de arame e proteção gasosa, o gás de proteção é conduzido por uma tubulação até um bocal. Na saída do bocal, garante-se um fluxo do mesmo o mais colimado possível. De acordo com Hu e Tsai (2007), a partir do momento em que deixa o bocal, é sugado para a região do eletrodo próximo da gota em formação, como ilustra a Figura 4.1. Ainda de acordo com os autores, o gás de proteção ionizado ao redor da ponta do eletrodo é comprimido radialmente e empurrado axialmente em direção à peça pela força eletromagnética. Isto pode ser observado na distribuição de velocidades que é também mostrada na Figura 4.1. Didaticamente explicando as informações de Hu e Tsai, pode se dizer que ao sair do bocal o gás de proteção tem uma pressão um pouco maior que a atmosférica (flui mesmo na ausência do Plasma). Porém, parte do mesmo é acelerada para dentro do jato de plasma, como se a ponta do eletrodo fosse um ventilador com pressão negativa à jusante e positiva à vazante. O restante do gás flui ao redor do jato de plasma, garantindo a proteção como se fosse uma cortina (Figura 4.2).

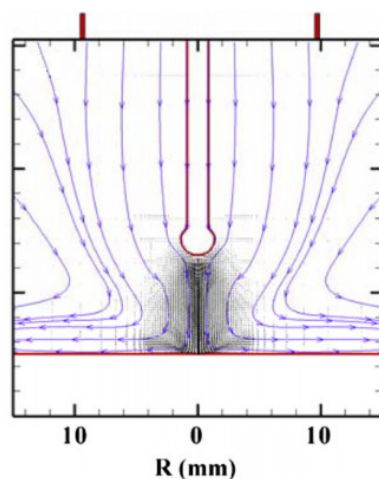


Figura 4.1 – Distribuição de velocidades do fluxo de gás argônio na soldagem MIG/MAG convencional, com diâmetro interno do bocal representado pelas duas linhas na margem superior da figura (HU; TSAI, 2007)

Quando empurrado axialmente, este gás se transforma em plasma (conduzindo eletricidade), configurando o jato de plasma (a razão para formação do jato de plasma está discutida em Reis et al., 2011). Sua velocidade é progressivamente aumentada axialmente do trajeto entre a ponta do eletrodo e a poça, até iniciar sua frenagem próxima à superfície da peça, atingindo ao final uma velocidade axial zero (ponto de estagnação), com transferência parcial de momentum para a poça e desvio axial do fluxo. Esta última afirmação é suportada pela Figura 4.1.

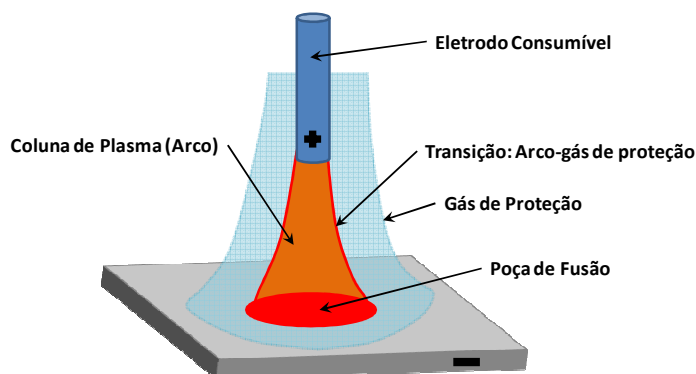


Figura 4.2 – Representação esquemática da região do arco e da poça de fusão envolvida pelo gás de proteção

Especificamente quanto ao Processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos, o mesmo opera com o fornecimento de três parcelas de gases de proteção, que percorrem caminhos diferentes dentro da tocha, conforme Figura 4.3. Neste trabalho, cada parcela de gás, em função do seu papel, recebeu nomes diferentes, a saber, Externo, Intermediário e Interno. Por esta figura, pode ser observado que o gás Interno é alimentado ao redor do bico de contato MIG/MAG e obrigado a passar pelo orifício do eletrodo do arco externo. O gás Intermediário é alimentado ao redor do eletrodo do arco externo e obrigado a passar pelo orifício do bocal constritor do arco externo. Finalmente, o gás de Proteção Externo é alimentado entre o bocal constritor do arco externo e o bocal externo.

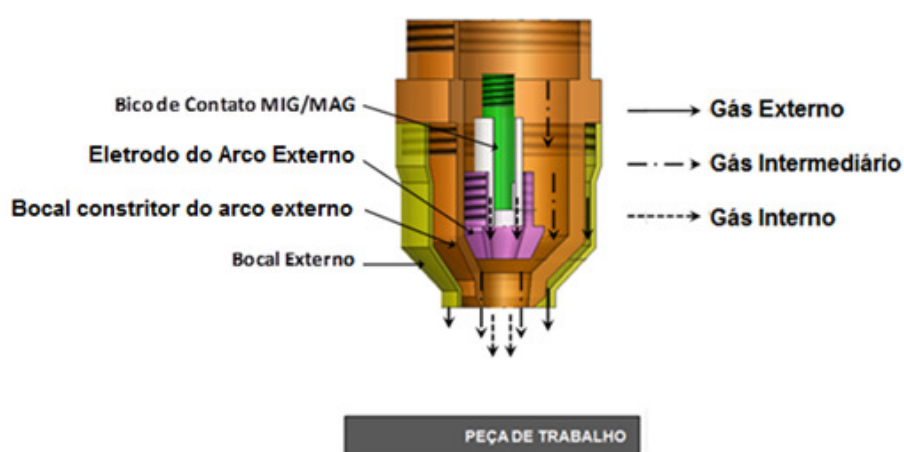


Figura 4.3 - Vista esquemática dos principais elementos da tocha com destaque para os caminhos percorridos pelos gases Externo, Intermediário e Interno

Uma variedade de combinações e formas de fornecimento pode ser obtida ao associar os três gases (Externo, Intermediário e Interno). De acordo com Essers et al.

(1981), existem quatro combinações operacionais de fornecimento de gases no processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos, a saber:

1. Externo, Intermediário e Interno, alimentados separadamente;
2. Externo, Intermediário e Interno, alimentados como uma simples mistura dos mesmos;
3. Intermediário combinado com Externo e Interno alimentado separadamente;
4. Intermediário combinado com Interno e Externo alimentado separadamente.

Para Essers et al. (1981), a primeira possibilidade é a melhor solução, uma vez que o operador pode definir a composição e a vazão para cada gás de forma separada. Esta abordagem permite que o usuário evite a utilização de gases ativos perto do eletrodo do arco Externo, o que poderia danificá-lo, mas usando-os em outras áreas da tocha (melhorar a estabilidade de arco). Esses autores mencionaram ainda que o fluxo de gás Intermediário é altamente crítico (mas não demonstraram, nem informaram os valores utilizados). De acordo com eles, se o fluxo dos gases não é adequadamente regulado em cada caso, o arco externo pode se tornar instável e o aspecto da solda pode adquirir uma aparência irregular.

Na Tabela 4.1 são apresentados alguns valores de vazão utilizados por diferentes autores soldando com o processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos e utilizando uma tocha similar à utilizada neste trabalho. Exceto Asai et al. (2009), que soldaram com arame de cobre com 1,2 mm de diâmetro, os demais utilizaram arame de aço ao carbono com 1,2 mm de diâmetro. É possível perceber que não existe um consenso entre os pesquisadores de qual vazão utilizar para cada gás. Vale ressaltar que não foi encontrado nenhum material bibliográfico que objetivasse uma avaliação de qual seria a melhor vazão de gases para o processo. Apenas são informados os valores utilizados, mas nenhuma explanação de como foram selecionados foi encontrada.

Além da vazão, a composição do gás a ser utilizado também deve ser considerada. As propriedades de cada gás serão determinantes na formação e manutenção do arco de soldagem, com reflexos na estabilidade do processo, formação do cordão de solda e até mesmo no desgaste dos componentes da tocha de soldagem. Considerando-se que a integridade física dos componentes da tocha de soldagem é de fundamental importância para um bom funcionamento do processo, o efeito de cada parcela de gases sobre este aspecto deve ser considerado. Algumas propriedades físico-químicas dos gases, com descrito a seguir, estão relacionadas à geração de calor e estabilidade da transferência metálica, que por suas vezes influenciam na temperatura de trabalho da tocha e incidência de respingos sobre a mesma.

Tabela 4.1 – Levantamento de vazões de gases de soldagem usados por diferentes autores no processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos

	Interno [<i>l/min</i>]	Intermediário [<i>l/min</i>]	Externo [<i>l/min</i>]
Ono et al. (2009)	5 (Ar)	10 (Ar)	10 (Ar + 20%CO ₂)
Bica et al. (1995)	não informado	15 (Ar)	30 (Ar + CO ₂) *
Resende (2009)	5 (Ar)	5 (Ar)	10 (Ar + 8%CO ₂)
Alaluss et al. (2007)	5	10	18
Oliveira (2006)	5 (Ar)	5 (Ar)	10 (Ar + 4%CO ₂)
Tanaka et al. (2008)	10 (Ar)	15 (Ar + 20%CO ₂)	15 (Ar + 20%CO ₂)
Yan et al. (2009)	10 (Ar)	não informado	20-25 (Ar)
Asai et al. (2009)	10 (He)	15 (Ar)	10 (Ar)
Katayama et al. (2010)	5 (Ar)	10 (Ar)	10 (Ar)

(*) Proporção entre Ar e CO₂ não informada

A estabilidade do arco, a formação do cordão e a qualidade da solda são vinculadas às propriedades físico-químicas dos gases de proteção. Neste sentido, destaca-se o potencial de ionização, a condutividade térmica (ou capacidade de troca de calor) e o potencial de oxidação.

Lyttle (1994) define o **potencial de ionização** como a energia, expressa em elétron-volt, necessária para remover um elétron de um átomo do gás, tornando-o um íon (ou seja, ionizando o gás, transformando-o no quarto estado da matéria, chamado Plasma). A abertura e manutenção do arco são muito influenciadas pelos potenciais de ionização dos componentes do gás de proteção utilizado no processo de soldagem. Para todos os outros fatores mantidos constantes, o valor do potencial de ionização diminui à medida que o peso molecular do gás aumenta.

Complementando, Lancaster (1986 p. 10) apresenta os conceitos de **Dissociação e Ionização**. Quando um gás é aquecido, as moléculas individuais adquirem mais energia (energia cedida ao sistema). Ainda de acordo com Lancaster, moléculas diatômicas como o hidrogênio, nitrogênio e oxigênio absorvem energia primeiramente por rotação e, em seguida, por movimentos de vibração de um átomo em relação ao outro. Quando a energia de vibração alcança um nível suficientemente alto, pode romper a camada de valência que mantém os dois átomos juntos, causando então a dissociação ao estado monoatômico. Se mais energia é fornecida, parte dela é absorvida pela camada externa de cada átomo, e causa o destacamento de um dos elétrons – o átomo ioniza em um elétron e um íon carregado positivamente. Maiores incrementos de energia podem causar múltiplas ionizações, quando o átomo perde mais de um de seus elétrons. Os níveis de energia para

ionização são (no caso de gases diatômicos) substancialmente maiores do que os para dissociação.

Desta forma, pode-se imaginar que ao estar ionizado o meio absorveu energia (para dissociação e ionização, as quais poderiam ser acrescentadas ainda com os calores sensíveis). Este estado energético poderia ser denominado de entalpia do plasma. E assim, vai depender das propriedades de cada gás que forma o plasma. Entretanto, ao voltar ao estado inicial (plasma voltando a ser gás), este calor é devolvido ao meio.

De acordo com Little (1994), a **condutividade térmica** de um gás é a medida de quão bem ele é capaz de conduzir o calor. Ela influencia a perda de calor radial a partir do centro para a periferia da coluna do arco, bem como a transferência de calor entre o plasma e o metal fundido. A Figura 4.4 mostra que os gases moleculares (hidrogênio, oxigênio e dióxido de carbono) têm maior condutividade térmica a baixas temperaturas (em torno de 3000 K), e os gases inertes, argônio e hélio, a altas temperaturas (em torno de 9000 K).

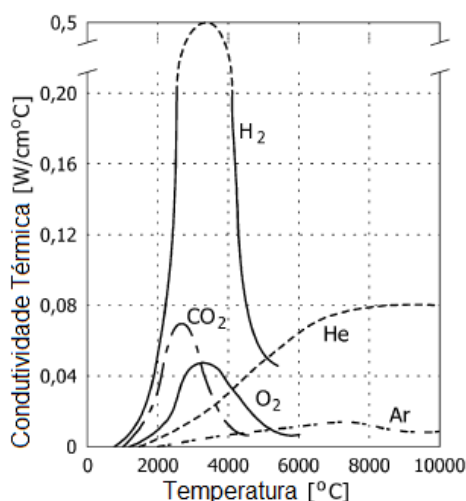


Figura 4.4 - Condutividade térmica de alguns gases em função da temperatura, adaptado de Suban e Tusek (2003)

Liskevick et al. (2013) detalham um pouco mais esta transferência de calor do gás de proteção/plasma para o metal. Para os autores, a energia da coluna de plasma é entregue a chapa, principalmente para a região ao redor da poça de fusão. A radiação da coluna de plasma é um meio de transferir o calor para a chapa, especialmente fora da conexão arco-peça (devido à alta temperatura dentro dessa região, o calor é transferido por condução). Entretanto, o jato de plasma também carrega energia do plasma (entalpia) e a transfere por convecção (através dos fenômenos de difusão e advecção) forçada ou natural, para a chapa. Portanto, uma parcela do calor da coluna de plasma se perde para o ambiente (diretamente, ou indiretamente), também por radiação (predominantemente) e

advecção (há uma diferença entre a velocidade do fluxo do gás e o jato de plasma, aquecendo a fronteira da coluna de plasma - gás de proteção). Ainda de acordo com os autores, a parcela significativa desta perda de calor da coluna de plasma vai para a chapa (não considerada, então, como perda). Isso acontece por convecção forçada, uma vez que a camada correspondente do gás aquecido não ionizado em torno também carregue a energia (entalpia).

Outra propriedade é a **Reatividade e o potencial de oxidação**. Para Lyttle (1994), a natureza oxidante dos gases de proteção afeta tanto o desempenho da soldagem quanto as propriedades do cordão resultante. Argônio e hélio são gases inertes (não reativos), pois não tem qualquer influência química sobre o metal de solda. Gases ativos (oxidantes), como o dióxido de carbono e o oxigênio, reagem com elementos do metal de adição ou metal de base e formam a escória na superfície do metal depositado. Isto pode levar a perda de elementos como o manganês e o silício, que pode afetar a qualidade e o custo da soldagem produzida. Gases oxidantes facilitam a emissão de elétrons, de acordo com Scotti e Ponomarev (2008, p. 23) na soldagem com eletrodo consumível, os elétrons são emitidos devido a um fenômeno denominado de emissão catódica. No caso, elétrons são mais facilmente emitidos por camadas de óxidos formadas sobre a poça e arredores, tornando-os positivamente carregados. O alto gradiente de tensão localizado criado entre esta camada e o metal de base propicia as condições necessárias para que elétrons se agrupem sob esta camada e se acelerem em direção ao anodo (eletrodo), rompendo e atravessando essa camada sem a necessidade de um valor global muito alto de tensão entre o eletrodo e a chapa.

A Tabela 4.2 na sequência apresenta algumas propriedades de gases comumente utilizados na soldagem.

Tabela 4.2 - Propriedades dos gases de proteção (adaptado de: SUBAN; TESEK, 2003 e SCOTTI; PONOMAREV, 2008 p. 98)

Gás	Peso Molecular (Kg/Kmol)	Densidade (kg/m³)	Potencial de Ionização (eV)	Reação no arco
Argônio (Ar)	39,9	1,78	15,8	Inerte
Hélio (He)	4,00	0,18	24,6	Inerte
Dióxido de Carbono (CO₂)	44,0	1,98	14,4	Oxidante
Oxigênio (O₂)	32,0	1,33	13,2	Oxidante
Hidrogênio (H₂)	2,01	0,07	13,5	Redutor
Nitrogênio (N₂)	28,0	1,16	14,5	Reativo

O **argônio**, conforme Lyttle (2005), é mais denso que o ar atmosférico, possui baixa condutividade térmica e pode ionizar facilmente. Isto significa que o argônio protege bem a região de solda (baixas vazões de gás são necessárias), fornecendo um arco relativamente estreito, com boa condutividade elétrica (o que facilita a abertura do arco). Ele pode ser usado sozinho na soldagem TIG e também na soldagem MIG/MAG de alumínio e outros materiais não ferrosos. O Argônio também é o principal componente das misturas gasosas para soldas de alta produtividade (transferência goticular) em aços com o processo MIG/MAG.

O **dióxido de carbono** se dissocia a temperaturas de arco e se recombina quando ele entra em contato com o metal de base mais frio, transferindo a energia do arco para a poça de fusão. A adição de dióxido de carbono fornece cordões de solda com perfis de penetração mais profundos, em função da sua melhor capacidade de transferência de calor. A atmosfera oxidante produzida resulta em cordões de solda com maiores quantidades de escória (LYTTLE, 2005). Esta escória é resultado da queima de elementos desoxidantes presentes no arame. Para Kah e Martikainen (2013), o CO₂ é um gás preferido na soldagem MIG/MAG de aços carbono, pois oferece vantagens como maiores velocidades de soldagem, maior penetração e menores custos. No entanto, ainda de acordo com os autores, a utilização de CO₂ puro é restrita, devido a problemas associados com geração de respingos e perdas de material devido à oxidação.

Zielinska et al. (2008) mostram que quando a quantidade de CO₂ no gás de proteção é superior a 9%, pode-se observar claramente a formação de respingos (Figura 4.5). O arco perde estabilidade, a formação de respingos é facilitada e fumos são formados de forma intensiva. A forma de arco é significativamente modificada (mais longa e mais difusora) quando a percentagem de CO₂ excede 12%. A transferência do metal fundido é completamente alterada: gotas grandes são formadas na extremidade do eletrodo, como resultado da transição para o modo de transferência globular.

Liskevych e Scotti (2011) observaram na soldagem MIG/MAG por curto-circuito efeitos do CO₂ sobre a geração de respingos bem similares aos resultados de Zielinska et al. (2008). Mas também apontam que o aumento no teor de CO₂ em misturas com Argônio aumenta a penetração e a área fundida do cordão de solda. Os mesmos atribuíram este comportamento à sua maior capacidade de troca de calor. Os autores observaram também que quanto maior a porcentagem de CO₂, mais desigual e menos uniforme era o acabamento superficial do cordão de solda.

Na Figura 4.6, são apresentados os resultados de distribuição de temperatura no arco proposta por Xu, Hu e Tsai (2008), que considera também as interações entre metal líquido e sólido na ponta do eletrodo.

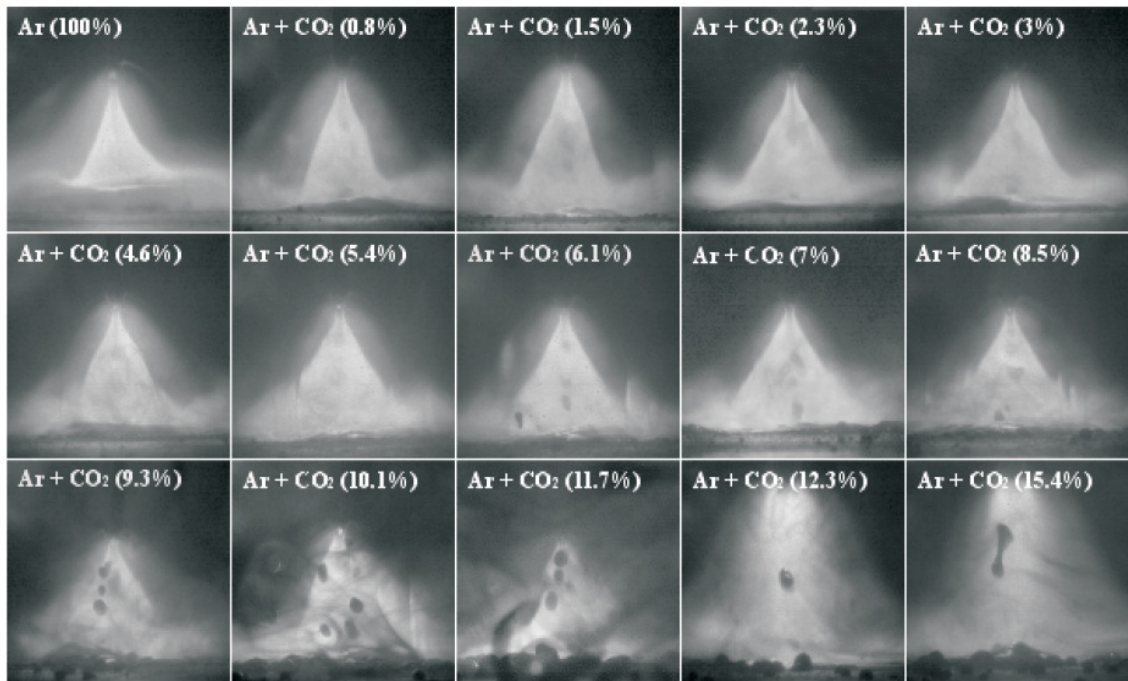


Figura 4.5 - Formato do arco para diferentes misturas do gás de proteção com o processo operando no modo corrente constante de 318 A com velocidade de alimentação de 9 m/min e DCPB de 20 mm, na soldagem de aço carbono com eletrodo de 1,2 mm de diâmetro (ZIELINSKA et al., 2008)

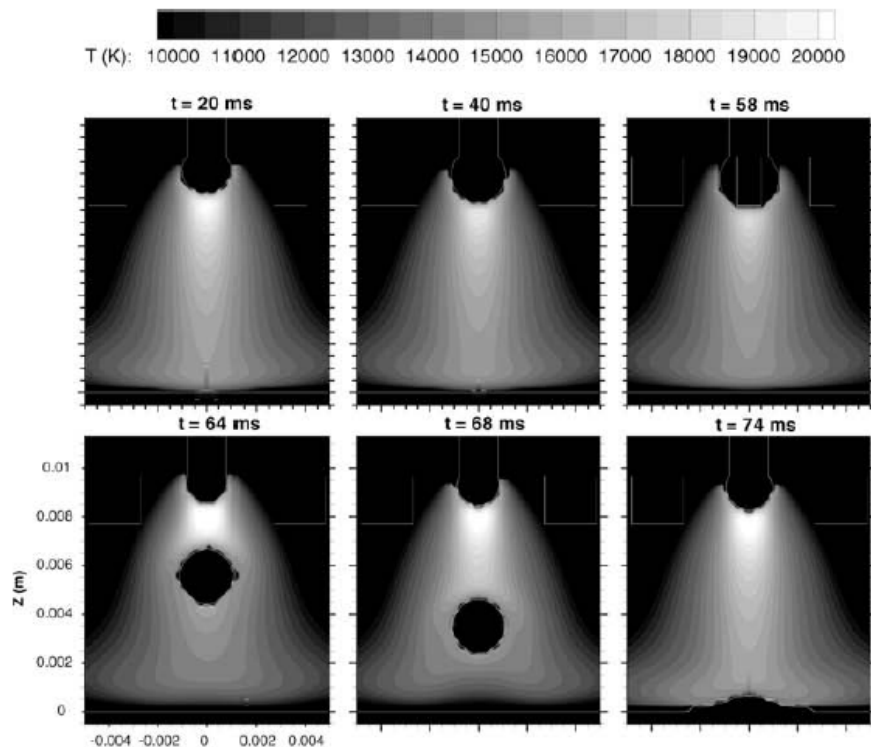


Figura 4.6 - Resultado de simulação numérica para a distribuição de temperatura durante a transferência metálica obtida por Xu, Hu e Tsai (2008)

Dentro da revisão bibliográfica apresentada, não há informações suficientes para se prever o comportamento dos gases em uma soldagem com arco duplo e transferência metálica, tampouco do efeito da vazão dos gases sobre a formação do cordão. Além disso, pode se esperar que o gás de proteção e sua vazão vão afetar a vida útil dos componentes da tocha, que tem alto custo. Desta forma, este capítulo tem o objetivo de atuar em duas frentes de investigação a respeito dos gases utilizados no processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos. Na primeira, será investigada a forma com que a vazão dos gases afeta o acabamento da superfície do cordão de solda, enquanto na segunda, será investigada a influência da composição dos gases sobre a integridade dos principais elementos da tocha.

4.2 Avaliação da influência da vazão dos gases sobre o aspecto superficial do cordão de solda

4.2.1 Metodologia e Procedimento Experimental

A avaliação da influência das vazões dos gases utilizados no processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos sobre o aspecto superficial do cordão de solda foi realizado em duas etapas. Na primeira, os experimentos foram conduzidos a partir de um planejamento fatorial envolvendo as vazões dos gases externo, intermediário e interno. Na segunda foram otimizados os resultados da primeira etapa, avaliando-se uma variável a cada vez ("*one step at a time*").

Em ambas as etapas, para efeito de comparação, foram realizadas soldagens de simples deposição sobre chapa ("*bead-on-plate*"). Foram utilizadas duas fontes de soldagem multiprocessos reguladas para operar em polaridade positiva (CC+ ou polaridade inversa) e com característica estática corrente constante. A tocha comercial utilizada apresentava um recuo do eletrodo do arco externo (RP) e recuo do bico de contato MIG/MAG (RM), respectivamente iguais a 9 e 18 mm. Já para o valor da distância da tocha até a peça (DTP) foi utilizado 10 mm, resultando em uma distância do bico de contato MIG/MAG à peça (DBCP) de 28 mm.

O arame-eletrodo utilizado nos ensaios foi da classe AWS ER70S-6, de diâmetro 1,2 mm, com uma velocidade de alimentação de 10,2 m/min. Para corrente do arco Interno foi regulado o valor de 260 A e para corrente do arco externo foi regulado o valor de 75 A. A velocidade de soldagem foi regulada em 36 cm/min. Esta condição de soldagem foi previamente avaliada por meio de filmagem a alta velocidade, verificando-se que o modo de transferência metálica era tipicamente goticular, ou seja, acima da faixa de corrente de transição globular-goticular.

Uma mistura Ar+8%CO₂ foi usada para todos os gases do processo (Externo, Intermediário e Interno). Optou-se por trabalhar com a mesma mistura para todos os gases para evitar variações na composição final da mistura, o que poderia prejudicar a interpretação dos testes comparativos. A utilização de CO₂ em contato com o eletrodo não consumível de cobre (eletrodo do arco externo) foi apresentada por Essers et al. (1981) como sendo prejudicial ao mesmo. Em sua análise, o autor observou uma deterioração mais acentuada no eletrodo do arco externo, apontado como sendo causada pelo ataque do oxigênio dissociado do CO₂, provocando oxidação e, conseqüente, deterioração. No entanto, este desgaste pode ser relevante quando é realizado um conjunto muito grande de testes; para o presente trabalho, onde foram realizados 18 experimentos, não foi observado um desgaste significativo.

Foi proposto um planejamento fatorial 2³, onde 2 corresponde ao número de níveis avaliados e 3 à quantidade de fatores (vazão dos gases Externo, Intermediário e Interno). Combinando as três variáveis (fatores) em dois níveis, tem-se um total de oito combinações, as quais estão indicadas na Tabela 4.3. Vale ressaltar que os experimentos foram realizados em uma sequência aleatória e não na de identificação da coluna “testes”.

Após a realização do conjunto de experimentos apresentados na Tabela 4.2, foi também realizada uma varredura em torno dos parâmetros da melhor condição de soldagem. Para tanto, apenas a vazão de um dos gases foi variada de cada vez para valores acima e abaixo da melhor condição de soldagem, com o objetivo de encontrar combinações ainda melhores às já obtidas. Nesta etapa foram realizados mais 10 testes. Desta forma, um total de 18 experimentos foi realizado.

Tabela 4.3 – Planejamento experimental para estudar o efeito da vazão de cada parcela de gás sobre o aspecto superficial do cordão de solda

Teste	Vazão de gás Externo (l/min)	Vazão de gás Intermediário (l/min)	Vazão de gás Interno (l/min)
1	5	2	8
2	10	2	8
3	10	2	2
4	5	2	2
5	5	8	2
6	10	8	2
7	10	8	8
8	5	8	8

4.2.2 Resultados e Discussões

Na Tabela 4.4 estão apresentados os valores médios, com seus respectivos desvios padrões, dos sinais de corrente e tensão monitorados para os circuitos do arco interno e do arco externo, para cada um dos experimentos apresentados na Tabela 4.2. Pelos baixos desvios padrões, pode ser observado que o processo ocorreu de maneira bastante estável, uma vez que se trata de uma transferência do tipo goticular com a fonte operando no modo corrente constante. No circuito do arco externo, o desvio é baixo devido à característica autógena desta parte do processo. No circuito do arco interno, mesmo acontecendo transferência metálica, os valores de desvio padrão também foram baixos, característico de uma transferência metálica do tipo goticular.

Tabela 4.4 – Valores médios dos sinais de corrente e tensão monitorados para os circuitos dos arcos externo e interno

Teste	$I_{ArcoExterno}$ [A]	$U_{ArcoExterno}$ [V]	$I_{ArcoInterno}$ [A]	$U_{ArcoInterno}$ [V]
1	$72,5^{\pm 2,0}$	$44,2^{\pm 2,0}$	$261,0^{\pm 3,7}$	$29,6^{\pm 1,0}$
2	$72,7^{\pm 1,9}$	$45,9^{\pm 2,0}$	$260,6^{\pm 3,6}$	$30,3^{\pm 1,2}$
3	$72,8^{\pm 1,8}$	$47,0^{\pm 1,0}$	$260,6^{\pm 3,7}$	$32,9^{\pm 1,2}$
4	$72,7^{\pm 1,8}$	$46,7^{\pm 1,2}$	$260,7^{\pm 3,7}$	$32,1^{\pm 1,0}$
5	$72,8^{\pm 1,9}$	$45,9^{\pm 1,6}$	$260,7^{\pm 3,7}$	$31,1^{\pm 1,3}$
6	$72,7^{\pm 1,8}$	$45,5^{\pm 1,2}$	$260,7^{\pm 3,7}$	$30,5^{\pm 1,0}$
7	$72,7^{\pm 1,8}$	$46,6^{\pm 0,2}$	$260,6^{\pm 3,5}$	$30,3^{\pm 0,8}$
8	$72,7^{\pm 1,8}$	$46,7^{\pm 1,8}$	$260,7^{\pm 3,6}$	$30,5^{\pm 1,0}$

Após a execução dos ensaios indicados na Tabela 4.3, os corpos de prova foram devidamente identificados para uma posterior análise. Na sequência, foram convidados quatro engenheiros com experiência em soldagem, os quais fizeram de forma independente (*i.e.*, sem comunicação entre eles e sem conhecer os parâmetros utilizados em cada teste) uma avaliação visual de cada placa de teste. Os mesmos foram instruídos a atribuírem notas de 0 a 5 para o aspecto superficial de cada cordão de solda. Na Tabela 4.5 estão apresentadas as notas atribuídas por cada engenheiro e na Figura 4.7, as imagens dos corpos de prova juntamente com a média e desvio padrão das notas para cada teste.

Para verificar quais parâmetros (vazão de gás Externo, Intermediário e Interno) mais afetam a resposta (somatório de notas atribuídas – Tabela 4.5), foi realizada uma análise de variância, usando-se o software Statística®. A Tabela 4.6 apresenta os efeitos de cada vazão de gás (Externo, Intermediário e Interno) calculado a partir da resposta do

planejamento experimental, considerando os níveis (-1,1) das variáveis independentes. Esta tabela indica que as vazões dos três gases têm efeito significativo sobre a aparência do cordão de solda, apesar da média apresentar alta significância (baixo "*p-value*") e alto valor de efeito ("*effect*"). Esses resultados são coerentes, considerando outros fatores que afetam as aparências do cordão de solda e que não foram controladas nos experimentos, como a transferência de metal, volume da poça, etc.

Tabela 4.5 – Notas atribuídas por cada avaliador e média e desvio padrão das notas para cada teste

Teste	Avaliadores				Média das notas atribuídas com desvio padrão
	1	2	3	4	
1	3	3	2	2	2,50 ^{±0,6}
2	3	2	3	4	3,00 ^{±0,8}
3	1	1	1	2	1,25 ^{±0,5}
4	0	0	0	0	0,00 ^{±0,0}
5	3	4	3	3	3,25 ^{±0,5}
6	5	5	5	5	5,00 ^{±0,0}
7	2	4	4	5	3,75 ^{±1,3}
8	3	3	3	3	3,00 ^{±0,0}

A vazão de gás Intermediário é claramente o de maior influência, considerando o seu alto "*effect*" e baixo "*p-value*". No entanto, para as vazões de gás Externo e Interno não é tão obvio o que apresenta o maior efeito. Ainda pode ser observada a existência de interação entre as variáveis analisadas, com maior destaque para as vazões de gases Intermediário e Interno.

Como mostrado na Tabela 4.6, todos os três gases do processo afetam o aspecto superficial do cordão de solda. Observando agora a Tabela 4.5 e a Figura 4.7, tem-se que o melhor desempenho foi o do teste 6 e o pior do teste 4. Dentre as combinações testadas, a do teste 6 (10, 8 e 2 l/min, respectivamente para os gases Externo, Intermediário e Interno) foi a que propiciou o melhor acabamento, possivelmente por ter propiciado um perfil de escoamento dos gases de maneira mais uniforme em direção a poça de fusão.

Tabela 4.6 – Efeitos e “*p-values*” obtidos por ANOVA para a influência de cada gás na aparência do cordão de solda

	<i>Mean/Interc.</i>	(1) Externo	(2) Intermediário	(3) Externo	1 e 2	1 e 3	2 e 3
<i>p-value</i>	0,007	0,037	0,019	0,057	0,204	0,090	0,027
Efeito	10,87	4,25	8,25	2,75	0,75	-1,75	-5,75

No teste 4, em que foi obtido o pior desempenho, foram utilizados 5, 2 e 2 l/min, respectivamente para os gases Externo, Intermediário e Interno. Observando o aspecto do cordão de solda relativo a esse teste na Figura 4.7, podem ser observadas algumas porosidades, indicando que a proteção gasosa pode ter sido insuficiente.

Considerando primeiramente apenas o gás Intermediário e fazendo uma análise comparativa entre os testes, pode ser observado diretamente na Figura 4.7 que os testes 1 a 4 (relativos a uma vazão de gás Intermediário de 2 l/min) apresentaram o pior desempenho se comparados aos testes 5 a 8 (relativos a uma vazão de 8 l/min). Este resultado está de acordo com Essers et al. (1981), que mencionaram que a vazão de gás Intermediário é a mais crítica. Considerando agora apenas o gás de proteção Externo para análise, comparou-se os pares de testes 1 e 2, 3 e 4, 5 e 6, 7 e 8 (vazão de gás Externo de 5 e 10 l/min, respectivamente, para cada par, mas mantendo a vazão constante dos gases Intermediário e Interno). É observado que uma vazão de 10 l/min proporcionou melhores resultados em relação a uma vazão de 5 l/min.

Teste	Imagem do Corpo de Prova	Vazão de gás Externo [l/min]	Vazão de gás Intermediário [l/min]	Vazão de gás Interno [l/min]	Somatório das notas atribuídas
1		5	2	8	10
2		10	2	8	12

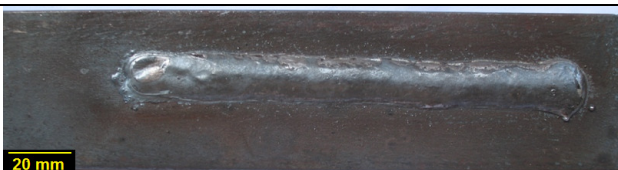
Teste	Imagem do Corpo de Prova	Vazão de gás Externo [l/min]	Vazão de gás Intermediário [l/min]	Vazão de gás Interno [l/min]	Somatório das notas atribuídas
3		10	2	2	5
4		5	2	2	0
5		5	8	2	13
6		10	8	2	20
7		10	8	8	15
8		5	8	8	12

Figura 4.7 – Aparência dos cordões resultantes das diferentes combinações de vazão de gases e as correspondentes somatórias de notas atribuídas

Ainda na Figura 4.7, considerou-se, finalmente, os experimentos com variação na vazão do gás Interno, comparando os pares de testes 1 e 4, 2 e 3, 8 e 5, 7 e 6 (vazão de gás Interno de 8 e 2 l/min, respectivamente, para cada par, mas mantendo-se a vazão constante dos gases Intermediário e Externo). A partir destes pares de resultados não foi possível identificar uma diferença expressiva na aparência dos cordões de solda. Isto pode

estar relacionado à interação entre as vazões dos gases Externo e Intermediário observada na Tabela 4.6.

Para seleccionar o melhor conjunto de parâmetros, foram traçados os gráficos de valores preditos e esperados (“*Desirability*”), como mostrado na Figura 4.8. Pode ser observado que os melhores resultados (maiores respostas) de acabamento superficial foram obtidos para valores de vazão máximos de gás Externo, máximos para gás Intermediário e mínimos de gás Interno. Ainda, por este mesmo gráfico, é possível verificar quantitativamente a maior sensibilidade da resposta frente à vazão do gás Intermediário.

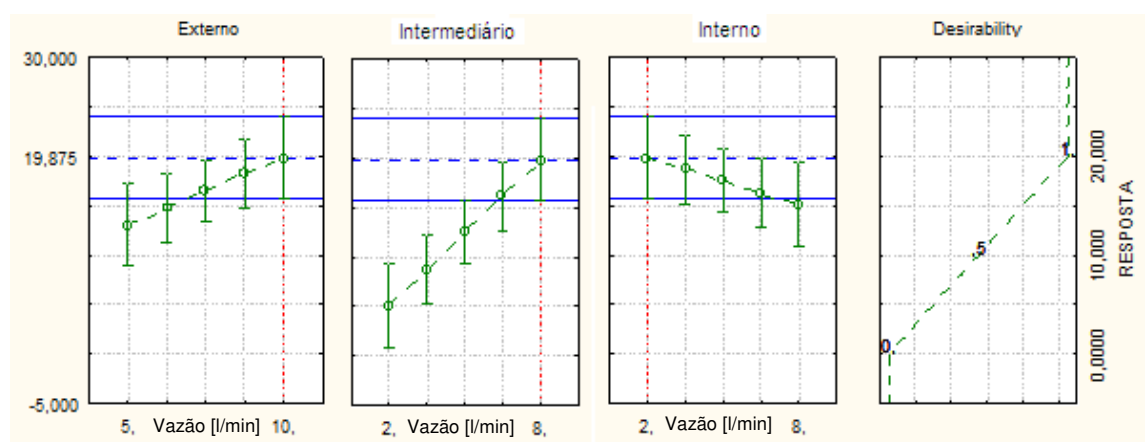


Figura 4.8 - Valores preditos e esperados (“*Desirability*”)

A partir da melhor condição de soldagem encontrada com o auxílio dos experimentos realizados com base no planejamento fatorial (10, 8 e 2 l/min, respectivamente para os gases Externo, Intermediário e Interno), foi realizada uma avaliação do efeito da vazão de cada um dos gases separadamente, realizando a avaliação pelo método uma variável a cada vez (“*one step at a time*”). Primeiramente foram fixadas as vazões dos gases Externo e Interno e variada a vazão do gás Intermediário de 6 a 12 l/min (a vazão do gás Intermediário foi avaliada primeiro em função do seu maior efeito sobre o processo). Pelo aspecto dos cordões de solda da Figura 4.9, pode ser observado que o Teste 9 (correspondente a uma replica do teste 6) já se encontrava numa condição otimizada para a vazão do gás Intermediário, uma vez que valores abaixo e acima de 8 l/min resultaram em cordões de solda com aspecto superficial inferior.

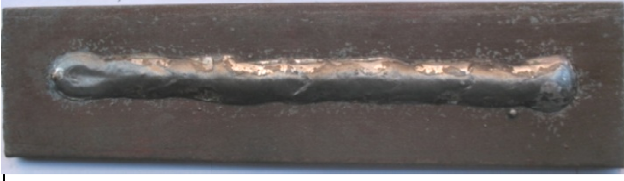
Teste	Imagem do Corpo de Prova	Vazão de gás Externo [l/min]	Vazão de gás Intermediário [l/min]	Vazão de gás Interno [l/min]
9 (Réplica)		10	8	2
10		10	6	2
11		10	10	2
12		10	12	2

Figura 4.9 – Aparência dos cordões resultantes dos experimentos para otimização do valor de vazão de gás Intermediário

Similarmente, na Figura 4.10 são apresentados os resultados relativos à otimização da vazão do gás Interno. O teste 9 foi reapresentado para facilitar a comparação. Um aumento na vazão do gás Interno (teste 14) prejudicou o aspecto do cordão de solda. Uma provável causa é que um aumento na vazão deste gás provoca um aumento considerado na velocidade de escoamento do mesmo (a pressão e as turbulências sobre a poça fundida se tornam maiores), o que teria como resultado cordões irregulares. Por outro lado, também foi realizado um teste sem a presença de gás Interno (teste 15) e não foi observado nenhum prejuízo no aspecto superficial do cordão de solda quando comparado ao teste 9 ou 6. Este é um resultado bastante interessante, uma vez que indica a possibilidade de se trabalhar com o processo com o fornecimento de apenas dois gases, Intermediário e Externo (deve-se, porém, avaliar o efeito desse gás sobre o resfriamento dos componentes da tocha, consequentemente sobre a vida útil deles). Além da vantagem operacional, já que seria um

parâmetro a menos para regular, também existe a vantagem logística e financeira de se trabalhar com um gás a menos.

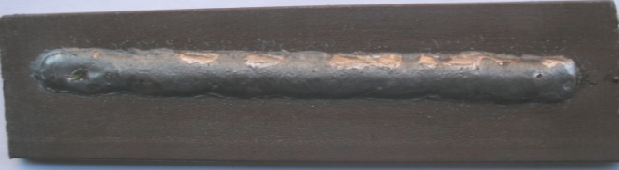
Teste	Imagem do Corpo de Prova	Vazão de Gás Externo [l/min]	Vazão de Gás Intermediário [l/min]	Vazão de Gás Interno [l/min]
9 (Réplica)		10	8	2
14		10	8	5
15		10	8	0

Figura 4.10 – Aparência dos cordões resultantes dos experimentos para otimização do valor de vazão de gás Interno

Na Figura 4.11 são apresentados os resultados relativos à otimização da vazão de gás Externo. Utilizando o teste 9 como comparação, tanto ao aumentar quanto ao diminuir a vazão do gás Externo, o aspecto superficial do cordão foi piorado. Complementando essa etapa, também foi realizado o teste 18, em que foi utilizada uma maior vazão de gás Externo (15 l/min) e suprimido o gás Interno. Comparando, então, os testes 16 e 18, o que se observa é uma melhora no aspecto do cordão quando o gás Interno é suprimido, reforçando ainda mais o que foi apresentado no parágrafo anterior.

Quando é observada a melhor condição de soldagem, máxima vazão para gases Externo e Intermediário e mínima vazão para gás Interno, pode ser estabelecida uma relação direta com o processo convencional de soldagem a Plasma. No processo a Plasma, o aspecto final do cordão de solda está diretamente relacionado à vazão de gás Intermediário (gás Plasma) e o gás Externo cumpre o papel de oferecer uma proteção adicional à poça de fusão. No processo "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos, os experimentos realizados indicaram esta mesma relação, a de que a vazão do gás

Intermediário tem influência direta no aspecto superficial do cordão de solda e o gás Externo fornece uma proteção complementar à poça. Neste caso, o gás Interno atuaria apenas como uma proteção complementar, a ponto de poder ser suprimido do processo se as vazões dos outros dois gases forem suficientes ao processo, como aconteceu nos testes 15 e 18.

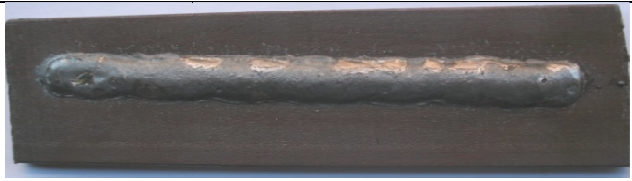
Teste	Imagem do Corpo de Prova	Vazão de Gás Externo [l/min]	Vazão de Gás Intermediário [l/min]	Vazão de Gás Interno [l/min]
9 (Réplica)		10	8	2
16		15	8	2
17		5	8	2
18		15	8	0

Figura 4.11 – Aparência dos cordões resultantes dos experimentos para otimização do valor de vazão de gás Externo

4.3 Avaliação da influência do tipo de gás sobre a integridade dos componentes da tocha

4.3.1 Metodologia e Procedimento Experimental

Após a avaliação das vazões dos gases, com a utilização de mistura de Ar+8%CO₂ para todos os gases, foi então avaliada a influência do tipo de gás sobre a condição física do bocal externo e do eletrodo não consumível. Para tanto, três séries de experimentos foram

conduzidas, a primeira com mistura de Ar+8%CO₂ para todos os gases, a segunda com Argônio para o gás Interno e Intermediário e mistura de Ar+8%CO₂ para o gás Externo, e, finalmente, uma terceira com Argônio para todos os gases. Para todas as combinações, as vazões utilizadas foram 10, 8 e 2 l/min respectivamente para os gases Externo, Intermediário e Interno.

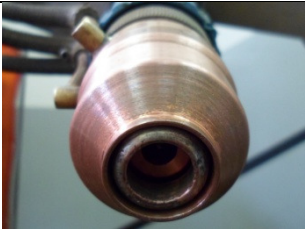
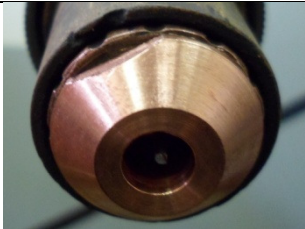
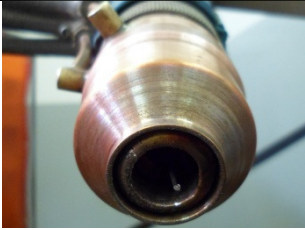
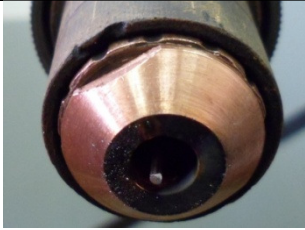
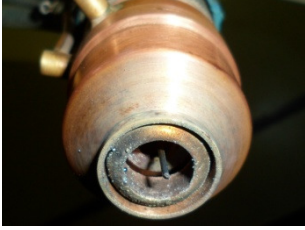
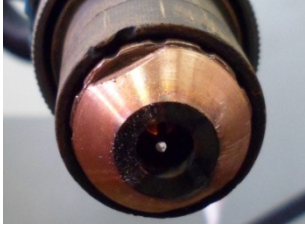
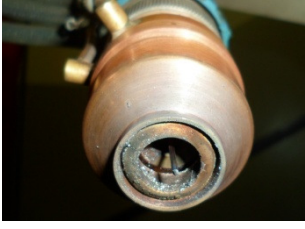
Para permitir uma comparação, todos os testes foram realizados com 260 A de corrente no eletrodo consumível e 75 A de corrente no arco externo. A velocidade de alimentação do arame foi definida para cada grupo de testes com o objetivo de manter o comprimento de arco constante em aproximadamente 4 mm (definido visualmente), pequenas variações foram observadas em função da diferença do poder calorífico dos gases. As velocidades de alimentação de arame definidas para cada grupo de testes foram: 11,0 m/min ao utilizar mistura de Ar+8%CO₂ para todos os gases; 10,3 m/min com Argônio para o gás Interno e Intermediário e mistura de Ar+8%CO₂ para o gás Externo; e, finalmente, 10,2 m/min utilizando Argônio para todos os gases. Mantendo constante a relação entre velocidade de soldagem e velocidade de alimentação, os testes foram realizados com velocidade de soldagem de 39, 36 e 36 cm/min.

Para cada série de experimentos, foram realizadas 60 soldas de 30 segundos cada, totalizando 30 minutos de solda para cada condição. O início da solda é um dos momentos mais instáveis, promovendo a geração de respingos que aderem nas partes da tocha, acelerando o seu desgaste, o que justifica realizar as interrupções a cada 30 segundos de solda. Após cada parada, o bocal e o eletrodo não consumível foram fotografados antes de iniciar um novo teste. Um cuidado especial foi tomado a fim de evitar a remoção mecânica de respingos das partes avaliadas.

4.3.2 Resultados e Discussão

Na Figura 4.12, são apresentadas as imagens dos componentes da tocha em função do tempo de solda utilizando mistura de Ar+8%CO₂ para o gás Externo e Argônio para os gases Intermediário e Interno. Pela sequência de imagens é possível observar um acúmulo crescente de respingos nos componentes da tocha. Acúmulo este, aceitável (baseado na experiência do autor) até o limite de 30 soldas (correspondente a 15 minutos), que corresponde a um comprimento de solda de 5,4 metros. Após este limite, foi necessário interromper o processo para realizar a limpeza da tocha. Se a limpeza não fosse realizada, os respingos acumulados começariam a alterar a geometria do bocal e do eletrodo, o que certamente prejudicaria o escoamento dos gases de solda, o que pode acabar por gerar turbulência na região da poça fundida. Além disso, os acúmulos de respingos podem se

desprender durante a soldagem e atingir a poça fundida, vindo a se tornar um defeito no cordão.

Número de soldas (30 segundos cada)	Condição do bocal	Condição do eletrodo não consumível
0		
2 (1 min. de solda)		
4 (2 min. de solda)		
6 (3 min. de solda)		
8 (4 min. de solda)		
10 (5 min. de solda)		

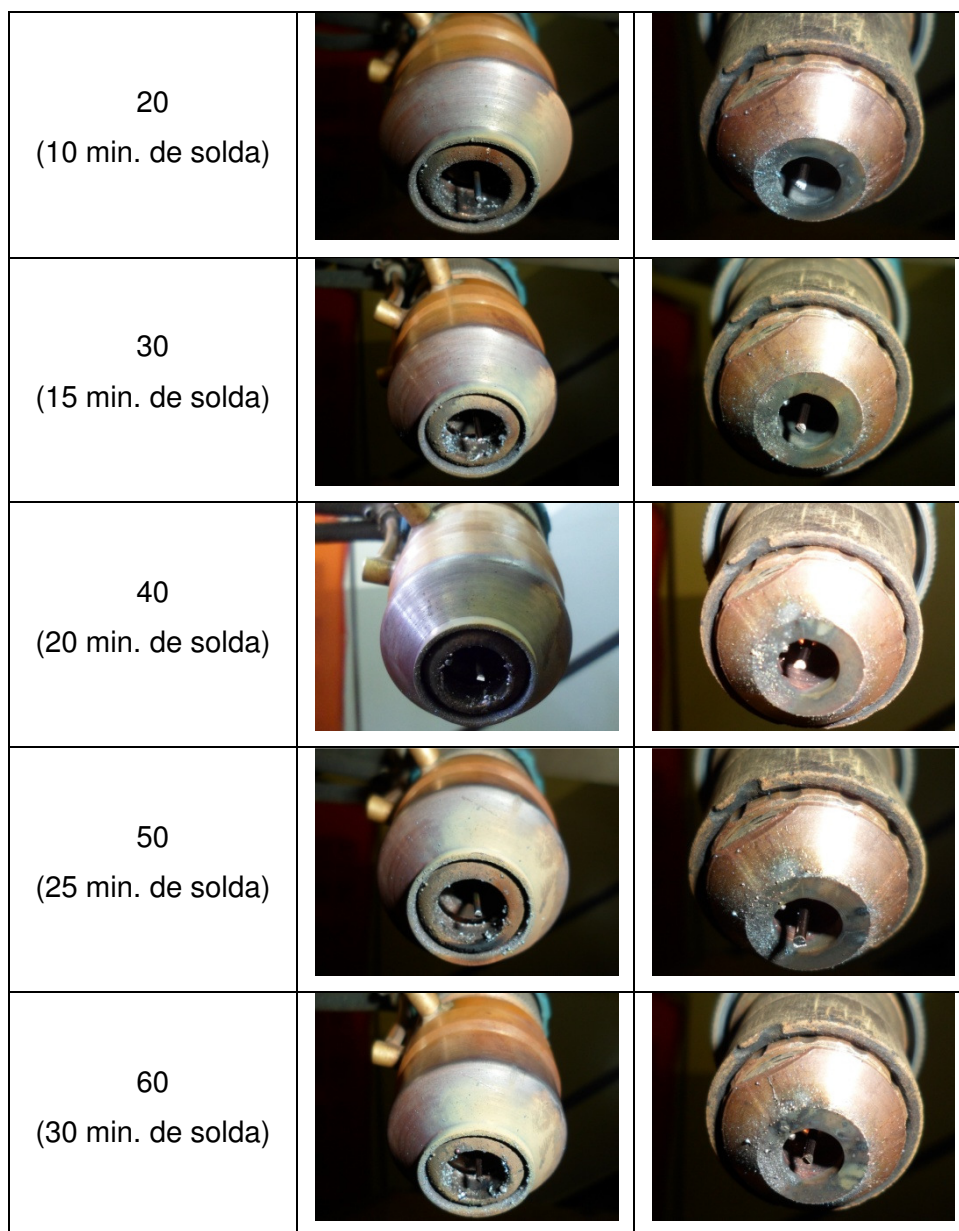
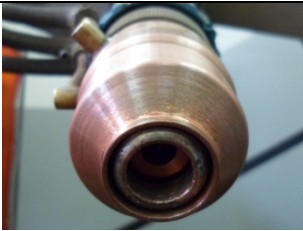
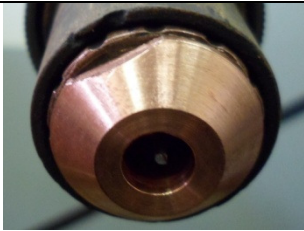
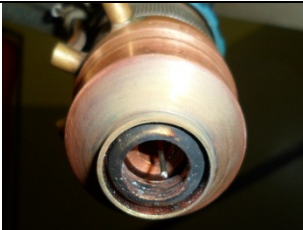
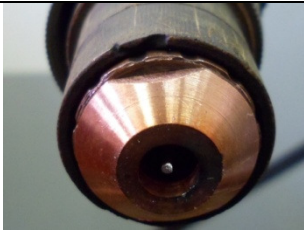
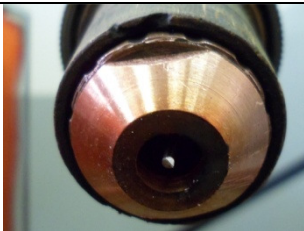
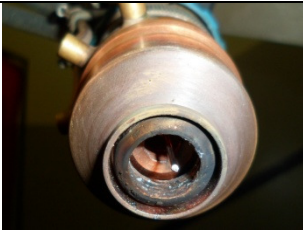
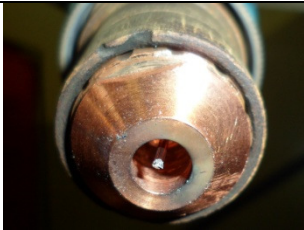
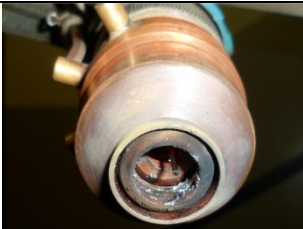
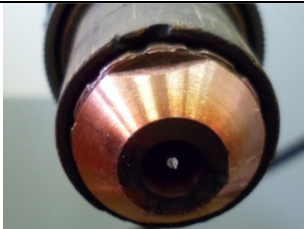
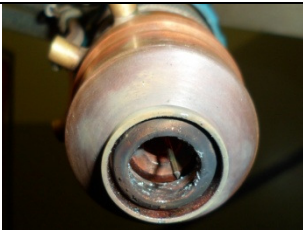


Figura 4.12 – Aspecto dos componentes da tocha em função do tempo de solda utilizando mistura de Ar+8%CO₂ como gás Externo e Argônio como gases Interno e Intermediário

Na Figura 4.13, são apresentadas as imagens dos componentes da tocha em função do tempo de solda utilizando Argônio para todos os gases do processo. Nesta sequência de imagens, podem ser observados dois momentos, um primeiro onde os respingos praticamente não aderem ao eletrodo não consumível (20 cordões de solda ou 10 minutos), sendo estabelecido como limite para executar uma limpeza nos componentes da tocha. Na sequência, um segundo momento onde a aderência de respingos é mais acelerada. Essa dificuldade de aderência dos respingos no eletrodo se deve a menor capacidade de transferir calor do arco em atmosfera de argônio se comparadas à mistura de Ar+8%CO₂, o que resulta em respingos com menor calor que aderem menos as partes da

tocha. Com o passar do tempo, quando alguns respingos já estão aderidos e acabam por atuar como “âncoras” para os demais, acelerando o acúmulo no segundo estágio. Como resultado dos respingos menos aderidos, pode ser observado o seu desprendimento apenas com o fluxo de gases, conforme Figura 4.13 no intervalo correspondido entre 40 e 50 soldas.

Número de soldas (30 segundos cada)	Condição do bocal	Condição do eletrodo não consumível
0		
2 (1 min. de solda)		
4 (2 min. de solda)		
6 (3 min. de solda)		
8 (4 min. de solda)		
10 (5 min. de solda)		

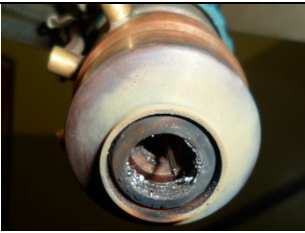
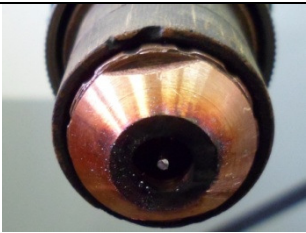
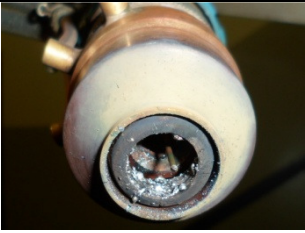
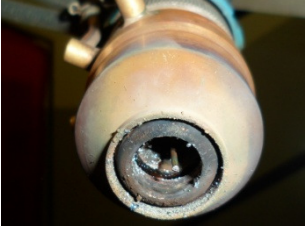
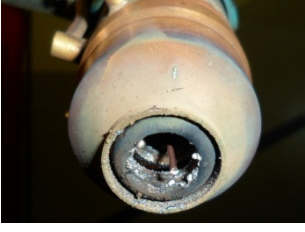
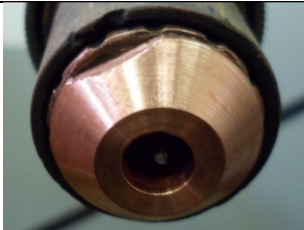
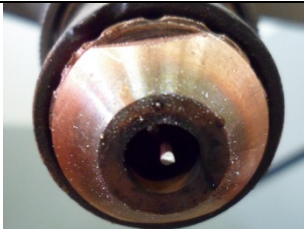
Número de soldas (30 segundos cada)	Condição do bocal	Condição do eletrodo não consumível
20 (10 min. de solda)		
30 (15 min. de solda)		
40 (20 min. de solda)		
50 (25 min. de solda)		
60 (30 min. de solda)		

Figura 4.13 - Aspectos dos componentes da tocha em função do tempo de solda utilizando Argônio para todos os gases do processo

Finalmente, na Figura 4.14, são apresentadas as imagens dos componentes da tocha em função do tempo de solda utilizando mistura de $\text{Ar}+8\%\text{CO}_2$ para todos os gases do processo. Nesta sequência, é observado que uma grande quantidade de respingos fica aderida nas partes da peça, sendo que apenas com 10 soldas (correspondente a 5 minutos) o eletrodo já necessita de uma intervenção para realizar sua limpeza. Este tempo corresponde a 1,8 metros de solda, o que representa apenas 1/3 do comprimento de solda realizado com mistura de $\text{Ar}+8\%\text{CO}_2$ para o gás Externo e argônio para os demais.

Número de soldas (30 segundos cada)	Condição do bocal	Condição do eletrodo não consumível
0		
2 (1 min. de solda)		
4 (2 min. de solda)		
6 (3 min. de solda)		
8 (4 min. de solda)		
10 (5 min. de solda)		

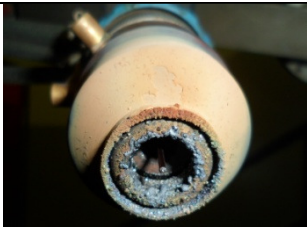
Número de soldas (30 segundos cada)	Condição do bocal	Condição do eletrodo não consumível
20 (10 min. de solda)		
30 (15 min. de solda)		
40 (20 min. de solda)		
50 (25 min. de solda)		
60 (30 min. de solda)		

Figura 4.14 – Aspectos dos componentes da tocha em função do tempo de solda utilizando mistura de $\text{Ar}+8\%\text{CO}_2$ para todos os gases do processo

Durante a realização dos testes, também foi utilizado um termômetro digital com termopar para monitorar a temperatura do bocal externo logo após o final das soldas. Esta forma de monitorar a temperatura não foi muito precisa, uma vez que o tempo entre o final da solda e o posicionamento do termopar no bocal decorreu de aproximadamente 3 segundos. Também deve ser considerado o tempo de estabilização da leitura e o resfriamento contínuo do eletrodo, uma vez que a refrigeração era mantida. No entanto, os resultados obtidos servem de parâmetro de comparação entre os testes.

Foi observado que as leituras máximas de temperatura para a condição de mistura de Ar+8%CO₂ para o gás Externo e argônio para os gases Interno e Intermediário situaram na faixa de 220 a 245°C, com argônio para todos os gases entre 200 e 220°C e com mistura de Ar+8%CO₂ para todos os gases entre 250 e 280°C. As maiores temperatura observadas para a mistura de Ar+8%CO₂ é resultado da maior condutividade térmica da mistura de CO₂, conforme mostra a Figura 4.4 de Suba e Tusek (2003).

Finalizados os testes apresentados neste item, os eletrodos não consumíveis foram retirados da tocha (após as 60 soldas) e limpados manualmente com o auxílio apenas de um pano úmido. Tomou-se o cuidado para evitar a aplicação de força excessiva. Os aspectos dos eletrodos após limpeza estão apresentados na Figura 4.15. A pior condição foi observada utilizando mistura de Ar+8%CO₂ para todos os gases, o que pode ser atribuída a maior quantidade de calor fornecido pelo arco aos respingos e ao eletrodo, que, conseqüentemente, aderiram mais facilmente ao eletrodo de cobre.

Figura correspondente	Figura 4.12	Figura 4.13	Figura 4.14
Gás Interno	Ar a 2 l/min	Ar a 2 l/min	Ar+8%CO ₂ a 2 l/min
Gás Intermediário	Ar a 8 l/min	Ar a 8 l/min	Ar+8%CO ₂ a 8 l/min
Gás Externo	Ar+8%CO ₂ a 10 l/min	Ar a 10 l/min	Ar+8%CO ₂ a 10 l/min
Condição do eletrodo não consumível após limpeza com pano úmido			

Figura 4.15 – Aspecto do eletrodo não consumível após a sequência de 60 soldas e submetidos a limpeza manual com pano úmido

4.4 Considerações do Capítulo

Para as condições e parâmetros de soldagem utilizados neste trabalho, pode-se concluir que:

- O aspecto superficial do cordão de solda é afetado consideravelmente pela proporção em que são alimentados os gases Externo, Intermediário e Interno;

- Melhores cordões de solda são obtidos quando se utiliza maior vazão para os gases Externo e Intermediário e menor vazão para o gás Interno;

- A vazão do gás Intermediário é que mais exerce influência sobre o aspecto superficial do cordão de solda;

- A vazão do gás Externo tem influência sobre o aspecto superficial do cordão de solda e seu principal efeito se concentra em garantir uma proteção completa a poça de fusão;

- Quando a vazão dos gases Intermediário e Externos for suficiente para garantir a proteção completa da poça de fusão, o gás Interno pode ser suprimido (a menos que se vier afetar a vida útil da tocha, por deficiência na refrigeração);

- Quando se optar por utilizar o gás Interno, este deve possuir uma baixa vazão;

- A integridade dos componentes da tocha é afetada pelo tipo de gás utilizado no processo;

- A utilização da mistura ativa $\text{Ar}+8\%\text{CO}_2$ transfere mais calor para os componentes da tocha, conseqüentemente promove uma deterioração mais acelerada;

- Independente do gás utilizado e necessária à limpeza da tocha, sendo que em intervalos mais curtos quando se utiliza $\text{Ar}+8\%\text{CO}_2$ para todos os gases.