

REGINA PAULA GARCIA SANTOS

UMA AVALIAÇÃO COMPARATIVA DOS PROCESSOS
MIG/MAG E ELETRODO TUBULAR EM TERMOS DE
CAPACIDADE PRODUTIVA, GERAÇÃO DE FUMOS E
DE RESPINGOS



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2010

REGINA PAULA GARCIA SANTOS

**UMA AVALIAÇÃO COMPARATIVA DOS PROCESSOS MIG/MAG E
ELETRODO TUBULAR EM TERMOS DE CAPACIDADE PRODUTIVA,
GERAÇÃO DE FUMOS E DE RESPINGOS**

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Américo Scotti

UBERLANDIA - MG

2010

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

S237a Santos, Regina Paula Garcia, 1977-
Uma avaliação comparativa dos processos MIG/MAG e eletrodo tubular em termos de capacidade produtiva, geração de fumos e de respingos [manuscrito] / Regina Paula Garcia Santos. - 2010.
132 f. : il.

Orientador: Américo Scotti.

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

1. Soldagem - Teses. I. Scotti, Américo, 1955- II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621.791

REGINA PAULA GARCIA

UMA AVALIAÇÃO COMPARATIVA DOS PROCESSOS MIG/MAG E
ELETRODO TUBULAR EM TERMOS DE CAPACIDADE PRODUTIVA,
GERAÇÃO DE FUMOS E DE RESPINGOS,

Dissertação _____ 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. Valtair Ferraresi – UFU – Membro

Prof. Dr. Giovani Dalpiaz – Petrobras/Cenpes – Membro

Uberlândia, _____ de _____ de 2010

AGRADECIMENTOS

- Ao meu orientador, Prof. Américo Scotti, pela orientação e profissionalismo demonstrado nestes anos de trabalho e que muito contribuiu para minha formação;
- Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da UFU, pela oportunidade de realização deste trabalho. Agradecimento especial ao coordenador Gilmar Guimarães;
- Ao CNPq pelo apoio financeiro;
- Ao Laprosolda/UFU pelo apoio técnico e laboratorial, sem os quais não seria possível a realização deste trabalho;
- A Lincoln Electric pela doação de insumos e apoio técnico;
- Ao Prof. Valtair Ferraresi pelos ensinamentos, apoio e amizade;
- Ao Prof. Louriel Oliveira Vilarinho pelo apoio a realização desse trabalho, pelos ensinamentos, incentivo e amizade;
- A os amigos e amigas do Laprosolda. Agradecimento especial ao Daniel Souza, Rhuam Reis, Verônica de Lis, Diandro Bailoni, Luiz Carlos, André Resende, Thonson Ferreira que contribuíram diretamente na realização deste trabalho;
- Aos meus familiares pelo incentivo e apoio;
- Aos amigos e amigas pelas horas de descontração;
- Aos técnicos da oficina, Lazineiro, Passarinho e Reginaldo.

SUMÁRIO

<i>Lista de Figuras</i>	<i>ix</i>
<i>Lista de Tabelas</i>	<i>xiii</i>
<i>Simbologia</i>	<i>xv</i>
<i>Resumo</i>	<i>xvi</i>
<i>Abstract</i>	<i>xvii</i>

CAPÍTULO I

Introdução	1
-------------------------	----------

CAPÍTULO II

Revisão Bibliográfica	4
2.1 Fundamentos do Processo MIG/MAG	4
2.1.1 Introdução	4
2.1.2 Transferência metálica no processo MIG/MAG	6
2.1.3 Variáveis no processo MIG/MAG	10
2.2 Fundamentos do processo Eletrodo Tubular.....	13
2.2.1 Introdução.....	13
2.2.2 Transferência metálica no processo Eletrodo Tubular.....	17
2.2.3 Variáveis do processo Eletrodo Tubular.....	22
2.3 Proteção Gasosa	24
2.4 Geração de Fumos.....	27
2.5 Geração de Respingos.....	33

CAPÍTULO III

Metodologia Experimental, Equipamentos e Insumos.....	37
3.1 Metodologia	37
3.2 Bancada Experimental Geral	41
3.2.1 Fonte de Potência para Soldagem	42
3.2.2 Sistema de alimentação do arame eletrodo.....	43
3.2.3 Tocha.....	44

3.2.4 Robô.....	45
3.2.4 Suporte de Fixação das chapas de testes.....	46
3.2.5 Sistema de aquisição de sinais elétricos e tratamento de dados.....	47
3.3 Bancada Experimental para o Ensaio de Respingo.....	49
3.4 Bancada Experimental para o Ensaio de Fumos.....	52
3.5 Consumíveis.....	52
3.5.1 Gases.....	53
3.5.2 Metal de adição.....	54
3.5.3 Metal de base	54

CAPÍTULO IV

Testes Preliminares	55
4.1 Definição da Faixa Operacional.....	55
4.1.1 Introdução.....	55
4.1.2 Definição das velocidades de alimentação.....	57
4.1.3 Definição das faixas para tensão de regulação.....	59
4.1.4 Definição das velocidades de soldagens.....	62
4.2 Testes de certificação dos parâmetros	66

CAPÍTULO V

Análise da Capacidade de Produção e Econômica para o arame tubular e para o arame maciço.....	69
5.1 Procedimento experimental	69
5.2 Resultados	71
5.3 Determinação do Custo de Soldagem e da Capacidade Produtiva	84

CAPÍTULO VI

Análise da Geração de Respingos dos Processos Eletrodo Tubular e MIG/MAG	88
6.1 Procedimento experimental	88
6.2 Definição dos Parâmetros para o Ensaio de Coleta de Respingo	91
6.3 Resultados	93

CAPÍTULO VII

Análise da Geração de Fumos para o Processo Eletrodo Tubular e o Processo MIG/MAG	104
7.1 Procedimento Experimental	104
7.2 Resultados	108

CAPÍTULO VIII

Discussão Geral	117
------------------------------	------------

CAPÍTULO IX

Conclusões	120
-------------------------	------------

CAPÍTULO X

Propostas de Trabalhos Futuros	123
---	------------

CAPÍTULO XI

Revisão Bibliográfica	125
------------------------------------	------------

ANEXO 1

Guia de utilização do Software de Cálculo do Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência Metálica por Curto-Circuito.....	131
--	------------

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Visão geral do bocal de uma tocha, arame eletrodo e arco MIG/MAG (adaptado Resende, 2009).....	5
Figura 2.2	Classificação para os Modos Fundamentais de Transferência Metálica. Proposto pelo IIW (adaptado de Vilarinho, 2007).....	7
Figura 2.3	Ciclo completo da transferência metálica por curto-circuito (adaptado Gomes 2006).....	8
Figura 2.4	Visão geral da soldagem com arame tubular com proteção gasosa (adaptado Cooper Ordóñez, 2004).....	13
Figura 2.5	Parâmetros operacionais para análise das transferências metálicas para diferentes arames tubulares sobre duas proteções gasosas, onde foram realizados testes iniciais e depois repetidos com filmagens para alguns testes onde: w- velocidade de fusão; I- corrente; s- comprimento energizado do eletrodo; La- comprimento de arco (adaptado Starling e Modenesi 2006).....	18
Figura 2.6	Quadros de filmagens para arame rutilico com proteção gasosa Ar+ 25% CO2 para diferentes correntes (adaptado Starling e Modenesi 2006).....	19
Figura 2.7	Quadros de filmagens para arame rutilico com proteção gasosa 100% CO2 para diferentes correntes (adaptado Starling e Modenesi 2006).....	19
Figura 2.8	Quadros de filmagens para arame básico com proteção gasosa Ar+ 25% CO2 para diferentes correntes (adaptado Starling e Modenesi 2006)	20
Figura 2.9	Quadros de filmagens para arame básico com proteção gasosa 100% CO2 para diferentes correntes (adaptado Starling e Modenesi 2006).....	20
Figura 2.10	Quadros de filmagens para arame metal cored com proteção gasosa Ar+ 25% CO2 para diferentes correntes (adaptado Starling e Modenesi 2006).....	21
Figura 2.11	Quadros de filmagens para arame metal cored com proteção gasosa 100% CO2 para diferentes correntes (adaptado Starling e Modenesi 2006).....	21
Figura 2.12	Taxa de Deposição para arames tubulares e arames sólidos em função do aumento da corrente (adaptado Widgery, 1994).....	22
Figura 2.13	Caracterização das principais funções do gás de proteção (adaptado Suban e Tusek, 2001).....	24
Figura 2.14	Mecanismos de formação fumos onde, 1- Evaporação de fumos da ponta do eletrodo (gota), 2- Evaporação de fumos do eletrodo na conexão catódica ou anódica; 3- Evaporação de fumos durante o destacamento da gota; 4- Evaporação de fumos de pequenas gotas que são repelidas, 5- Evaporação de fumos dos respingos, 6- Evaporação de fumos da poça de fusão e 7- Evaporação de fumos do cordão de solda ainda fundido (adaptado Hewitt and Hirst, 1993).....	28

Figura 2.15	TGF (Fume generation rate) para diferentes modos de transferência metálica para um aço inoxidável, destacando-se o aumento da tensão no processo GMAW na mudança do modo de transferência (adaptado Gray et al, 1982).....	30
Figura 2.16	Taxa de geração de fumos em função do gás de proteção para o processo MIG/MAG (adaptado Castner 1995).....	31
Figura 2.17	Condições de corrente e tensão para diferentes modos de transferência metálica, para arame maciço com proteção gasosa 100% CO ₂ (adaptado Hashimoto e Morimoto, 2006).....	34
Figura 3.1	Bancada experimental geral, onde, 1-Unidade Robótica; 2- Fonte de potência para soldagem; 3- Cabeçote alimentador; 4- Mesa; 5- Tocha; 6- Suporte para chapas de teste; 7- Controle da Unidade Robótica; 8- Cilindro dos gases de proteção; 9- Sistema de refrigeração da tocha; 10- Sistema de aquisição de sinais elétricos.....	41
Figura 3.2	Alimentador de arame cabeçote: onde, 1 – Roletes do alimentador de arame; 2 – Encoder para aquisição da velocidade de alimentação (com 50 pulsos/minuto); 3 – Saídas de gases de proteção; 4 – Rolo de arame para realizar a soldagem: (A) Vista lateral do alimentador, com detalhe do sistema de roletes para alimentação de arame; (B) vista frontal, com detalhe do painel de seleção de programa e regulagem do programa.....	42
Figura 3.3	Roletes lisos para soldagem com o MIG/MAG; B) Roletes estriados para soldagem com o processo Eletrodo Tubular.....	43
Figura 3.4	(A) Bocal para soldagem com o processo GMAW com formato cilíndrico para saída do gás de proteção; (B) Bocal para soldagem com o processo FCAW, com o formato cônico para saída do gás de proteção.....	44
Figura 3.5	Detalhe de fixação da tocha, onde, 1 – Tocha de soldagem; 2 – Suporte para a tocha; 3 – Sensor de impacto; 4 – Indicação do cabo para a coleta dos sinais elétricos de tensão (que internamente vai até o suporte do bico de contato); 5 – Painel de acionamento do robô.....	45
Figura 3.6	Visão geral do suporte para fixação das chapas de teste.....	46
Figura 3.7	Esquema da montagem do sistema de aquisição de dados.....	47
Figura 3.8	Placa de aquisição tipo “Plug and Play” da National Instruments modelo: NI USB-6009.....	48
Figura 3.9	Caixa coletora de respingos com as respectivas barras que realizam as divisões para se obter os três alcances distintos.....	49
Figura 3.10	Extensor de área de coleta de respingo (“coifa”), posicionado sobre a base, deixando a mostra à região do encaixe com a base.....	49
Figura 3.11	Placa de teste para realização do ensaio de respingo, de aço comum ao carbono de dimensões 480 x 9,5 x 9,5 mm	50
Figura 3.12	Dispositivo para análise granulométrica, constituído de três peneiras, um fundo e um sistema vibratório mecânico.....	51
Figura 3.13	Visão Geral do Coletor de Fumos constituído por: 1- Câmara de sucção; 2- Coifa coletora; 3- Manômetro que indica a queda de pressão no filtro; 4- Manômetro que indica a pressão imposta pelo sistema de sucção; 5- Mesa giratória; 6- posicionamento da tocha para a realização das soldagens	52
Figura 4.1	Placa de teste para a realização dos testes preliminares fixa ao suporte para minimizar as distorções.....	56
Figura 4.2	Aspectos do cordão sob diferentes valores de tensão de regulagem para o arame tubular, com proteção gasosa 100% CO ₂ a 200 A. Etapa de definição do cordão padrão com variação da tensão de 2 em 2 volts	60

Figura 4.3	Representação da faixa de trabalho para o arame maciço AWS ER 70S-6 (DBCP 12 mm) e do arame tubular AWS E71T-1(DBCP 20 mm), ambos com 1,2 mm: A) para proteção gasosa 100%CO ₂ ; B) para proteção gasosa Ar+25% CO ₂	61
Figura 5.1	Geometria das placas de teste de aço comum ao carbono para a realização do ensaio para avaliar o rendimento de deposição (cotas em milímetros)	69
Figura 5.2	Oscilogramas de corrente e tensão para o processo MIG/MAG com gás de proteção 100% CO ₂ : a) Corrente de 150 A e tensão regulada 21 V; b) Corrente de 200 A e tensão regulada 23 V.....	72
Figura 5.3	Oscilogramas de corrente e tensão para o processo MIG/MAG com gás de proteção 100% CO ₂ : a) Corrente de 250 A e tensão regulada 25 V; b) Corrente de 300 A e tensão regulada 29 V.....	72
Figura 5.4	Oscilogramas de corrente e tensão para o processo MIG/MAG com gás de proteção Ar+25% CO ₂ : a) Corrente de 150 A e tensão regulada 19 V; b) Corrente de 200 A e tensão regulada 21 V.....	73
Figura 5.5	Oscilogramas de corrente e tensão para o processo MIG/MAG com gás de proteção Ar+25% CO ₂ : a) Corrente de 250 A e tensão regulada 21 V; b) Corrente de 300 A e tensão regulada 27 V.....	73
Figura 5.6	Oscilogramas de corrente e tensão para o processo Eletrodo Tubular com gás de proteção 100% CO ₂ : a) Corrente de 150 A e tensão regulada 25 V; b) Corrente de 200 A e tensão regulada 27 V	75
Figura 5.7	Oscilogramas de corrente e tensão para o processo Eletrodo Tubular com gás de proteção 100% CO ₂ : a) Corrente de 250 A e tensão regulada 30 V; b) Corrente de 300 A e tensão regulada 32 V.....	76
Figura 5.8	Oscilogramas de corrente e tensão para o processo Eletrodo Tubular com gás de proteção Ar+25%CO ₂ : a) Corrente de 150 A e tensão regulada 25 V; b) Corrente de 200 A e tensão regulada 27 V.....	76
Figura 5.9	Oscilogramas de corrente e tensão para o processo Eletrodo Tubular com gás de proteção Ar+25%CO ₂ : a) Corrente de 250 A e tensão regulada 30 V; b) Corrente de 300 A e tensão regulada 32 V.....	77
Figura 5.10	Variação da taxa de fusão com o aumento da corrente para o arame tubular E71T-1 em função do tipo de proteção gasosa.....	78
Figura 5.11	Variação da taxa de fusão com o aumento da corrente para o arame maciço ER70S-6 em função do tipo de proteção gasosa	78
Figura 5.12	Figura 5.12- Velocidade de alimentação do arame pela corrente, arame maciço AWS E70S-6 com proteção gasosa Argônio puro (adaptado de Modenesi e Reis, 2007).....	79
Figura 5.13	Taxa de fusão (linha de cima) e taxa de deposição (linha de baixo) em função da corrente: (a) arame maciço com proteção gasosa de 100% CO ₂ ; (b) arame tubular com proteção gasosa de 100% CO ₂	80
Figura 5.14	Comparação do rendimento de deposição (ND) entre os processos MIG/MAG e Eletrodo Tubular com proteção gasosa 100% CO ₂	81
Figura 5.15	Comparação do rendimento de deposição (ND) entre os processos MIG/MAG e Eletrodo Tubular com proteção gasosa Ar + 25% CO ₂	81
Figura 5.16	Aspectos dos cordões de solda realizados com o processo Eletrodo Tubular com a proteção gasosa de 100% CO ₂ , para as correntes de 150 A, 200 A, 250 A e 300 A	82
Figura 5.17	Aspectos dos cordões de solda realizados com o processo MIG/MAG com proteção gasosa de 100%CO ₂ , para as correntes respectivamente de 150 A, 200 A, 250 A e 300 A	83

Figura 6.1	Oscilogramas de corrente e tensão para o processo MIG/MAG, corrente de 190 A,: a) Gás de proteção 100% CO ₂ e tensões de regulagem 20 V, 21 V, 22 V; b) Gás de proteção Ar+25 CO ₂ % e tensões de regulagem 20 V, 21 V e 22	93
Figura 6.2	Oscilogramas de corrente e tensão para o processo Eletrodo Tubular, corrente de 190 A: a) Gás de proteção 100% CO ₂ e tensões de regulagem 26 V, 27 V, 28 V; b) Gás de proteção Ar+25 CO ₂ % e tensões de regulagem 26 V, 27 V e 28	94
Figura 6.3	Taxa de respingo gerado para diferentes níveis de tensão de regulagem (adaptado Kang e Rhee, 2001)	97
Figura 6.4	Massa de respingo em gramas em função da variação de tensão de regulagem para os dois tipos de proteção gasosa para o processo Eletrodo Tubular	98
Figura 6.5	Massa de Respingo em gramas em função da variação de tensão de regulagem para os dois tipos de proteção gasosa para o processo MIG/MAG	99
Figura 6.6	Distribuição dos respingos por alcance para o arame tubular com proteção gasosa de 100% CO ₂	100
Figura 6.7	Distribuição dos respingos por alcance para o arame tubular com proteção gasosa de Ar+25% CO ₂	101
Figura 6.8	Distribuição dos respingos por alcance para o arame maciço com proteção gasosa de 100% CO ₂	101
Figura 6.9	Distribuição dos respingos por alcance para o arame maciço com proteção gasosa de Ar+25% CO ₂	102
Figura 7.1	Comparação da TGF1(mg/kg) para o processo MIG/MAG e Eletrodo Tubular para gás de proteção Ar + 25% CO ₂	109
Figura 7.2	Comparação da TGF1(mg/kg) para o processo MIG/MAG e Eletrodo Tubular para gás de proteção 100% CO ₂	109
Figura 7.3	Oscilogramas de corrente e tensão para o processo Eletrodo Tubular com gás de proteção 100% CO ₂ : a) Corrente de 150 A e tensão regulada 26 V; b) Corrente 250 A e tensão regulada 30 V	110
Figura 7.4	Oscilogramas de corrente e tensão para o processo MIG/MAG com gás de proteção 100% CO ₂ : a) Corrente de 150 A e tensão regulada 21 V; b) Corrente 250 A e tensão regulada 24 V	111
Figura 7.5	Comparação da TGF2 (g/min) para o processo MIG/MAG e Eletrodo Tubular para gás de proteção Ar + 25% CO ₂	112
Figura 7.6	Comparação da TGF2 (g/min) para o processo MIG/MAG e Eletrodo Tubular para gás de proteção 100% CO ₂	112
Figura 7.7	Comparação da TGF3 (g/m) para o processo MIG/MAG e Eletrodo Tubular para gás de proteção Ar + 25% CO ₂	113
Figura 7.8	Comparação da TGF3 (g/m) para o processo MIG/MAG e Eletrodo Tubular para gás de proteção 100% CO ₂	113
Figura 7.9	Taxa de fumos relativa TGF1 em mg/Kg (a) e absoluta TGF2 em g/min (b) em função da variação da tensão para o processo Eletrodo Tubular e MIG/MAG	115
Figura A.1	Tela inicial do programa	131
Figura A.2	Programa preparado para a análise final	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Efeito do calor imposto sobre a taxa de geração de fumos, valores avaliados por quilograma de arame fundido (Deam et al 1997).....	31
Tabela 2.2	Fatores primários para geração de respingo com gás de proteção 100%CO ₂ (adaptado Hashimoto e Morimoto, 2006)Gases a serem utilizados no desenvolvimento deste trabalho.	34
Tabela 3.1	Composição química e propriedades mecânicas dos arames utilizados para o desenvolvimento do trabalho (informações fornecidas pelos fabricantes)	53
Tabela 4.1	Valores de Velocidade de alimentação definidos para obter os níveis de corrente desejados para os dois tipos de gases e arames.....	57
Tabela 4.2	Parâmetros de soldagem recomendados pelo fabricante Belgo Bakaert do arame maciço (informação fornecida pelo fabricante).....	59
Tabela 4.3	Parâmetros de soldagem recomendados pelo fabricante Lincoln Electric para o arame tubular (informação fornecida pelo fabricante)	59
Tabela 4.4	Faixa de tensão de regulação definidas.....	60
Tabela 4.5	Parâmetros de regulação e as velocidades de soldagens calculadas inicialmente para as soldagens com arame maciço e tubular para se obter TD de 1,35 g/cm para os rendimentos hipotéticos de 90% e 80%.....	65
Tabela 4.6	Parâmetros de regulação definidos (corrente, tensão, velocidade de alimentação) e calculado (velocidade de soldagem corrigida) para o arame maciço e tubular para se obter TD de 1,35 g/cm.....	66
Tabela 4.7	Parâmetros monitorados para as soldagens com arame maciço e tubular para se obter TD de 1,35 g/cm.....	67
Tabela 5.1	Parâmetros de regulação definidos (corrente, I; tensão, U; velocidade de alimentação, Val) e calculado (velocidade de soldagem, Vsol) para os arames maciço e tubular.....	69
Tabela 5.2	Valores médios monitorados de tensão (U) e corrente (I) e valores calculados de taxa de fusão (TF), taxa de deposição (Td), rendimento de deposição (ND), velocidade de soldagem (Vsol) e taxa de deposição por unidade de comprimento (TD), para as diferentes combinações gás-arames-nível de corrente desejada.....	71
Tabela 5.3	Valores medidos para frequência de transferências de gotas (Fcc), tempos de arco aberto (tab) e tempos de curto-circuito (tcc) e valores calculados do tamanho teórico da gota Øgota em transferência para as soldagens MIG/MAG com o arame maciço.....	74
Tabela 5.4	Valores de taxa de deposição, velocidade de soldagem, taxa de fusão e preço por quilograma de arame para um TD de 0,13 kg/m, trabalhando com os dois arames com uma corrente de 200 A e proteção gasosa de 100% CO ₂	85
Tabela 5.5	Custos de arame por metro de solda para os arames maciço e tubular ao se trabalhar com uma mesma taxa de deposição por unidade de comprimento de 0,13 kg/m	86
Tabela 5.6	Valores do aumento do custo e tempo de soldagem utilizando-se o arame tubular	86
Tabela 6.1	Parâmetros de regulação definidos para as soldagens com arame maciço e tubular, com a respectiva proteção gasosa	92

Tabela 6.2	Parâmetros monitorados de tensão (U) e corrente (I) e valores calculados para taxa de fusão (TF), taxa de deposição (Td), massa de respingo (MR), rendimento de deposição (ND) e taxa de deposição por unidade de comprimento (TD)	95
Tabela 6.3	Distribuição percentual de massa de respingo por alcance (DPA), distribuição de respingo por tamanho (DPT) e alcances do coletor (AL)	96
Tabela 6.4	Valores medidos para frequência de transferências de gotas (Fcc), tempos de arco aberto (tab) e tempos de curto-circuito (tcc) e valores calculados para o índice de regularidade (IVcc), do tamanho teórico da gota Øgota em transferência e massa de respingo gerada (MR) para as soldagens MIG/MAG	99
Tabela 7.1	Valores nominais da taxa de fumos gerada para a calibração do coletor de fumos em função da tensão, segundo norma AWS F1.2:2006	104
Tabela 7.2	Valores regulados de tensão (URef), velocidade de alimentação (Val) e velocidade de soldagem (Vsol)	106
Tabela 7.3	Valores de regulação dos parâmetros e valores médios monitorados	107
Tabela 7.4	Valor monitorado de tempos de realização de soldagem e valores calculados de massa inicial do filtro (MI), massa final (MF) e massa de fumos (MFumos)	108
Tabela 7.5	Valores das taxas de geração de fumos	108
Tabela 7.6	Valores médios medidos para frequência de transferências de gotas (Fcc), tempos de arco aberto (tab), tempos de curto-circuito (tcc) e os valores calculados da razão entre esses tempos e o tamanho teórico da gota Ø gota em transferência para as soldagens MIG/MAG	111
Tabela 7.7	Cálculo da geração da taxa de fumos em função da tensão (valores monitorados e regulados)	114

SIMBOLOGIA

ρ	- Densidade de arame;
CO ₂	- Dióxido de carbono;
Ar	- Argônio;
Val	- Velocidade de alimentação;
I	- Corrente;
U	- Tensão;
DBCP	- Distância do Bico de Contato MIG/MAG à Peça;
T _d	- Taxa de Deposição;
T _D	- Taxa de Deposição por unidade de Comprimento;
T _F	- Taxa de Fusão;
N _D	- Rendimento de Deposição;
V _{sol}	- Velocidade de Soldagem;
d	- Diâmetro de Arame;
M _f	- Massa final;
M _i	- Massa Inicial;
T _{ab}	- Tempo de arco aberto;
U _{Reg}	- Tensão de Regulagem;
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas;
F _{CC}	- Frequência de Curto Circuito;
t _{CC}	- Tempo de Curto Circuito;
d _g	- Diâmetro da Gota;
MIG/MAG	- Metal Inert Gas / Metal Active Gas;
GDL	- Grau de Liberdade;
Ø _{gota}	- Diâmetro de gota;
CTS	- Custo Total de Soldagem;
CM	- Custo de Material;
CT	- Custo de Trabalho;
CEQ	- Custo de Equipamento;
CEL	- Custo de Eletricidade;
Mc	- Massa por unidade de comprimento de solda;
Pc	- Preço por unidade de comprimento;
Pk	- Preço por quilograma;
IV _{cc}	- Índice Vilarinho de Regularidade em Transferência por Curto-Circuito;
$\sigma_{t_{CC}}$	- Desvio padrão do tempo médio de curto-circuito ;
$\overline{t_{CC}}$	- Tempo médio de curto-circuito calculado;
$\sigma_{t_{AA}}$	- Desvio padrão do tempo médio de arco aberto calculado;
$\overline{t_{AA}}$	- Tempo médio de arco aberto calculado;
DPT	- Distribuição de respingo por tamanho;
DPA	- Distribuição percentual de massa de respingo por alcance;
AL	- Alcances do coletor;
AWS	- American Welding Society;
ASTM	- American Society for Testing and Materials
TGF	- Taxa de Geração de Fumos;
M _{Fumos}	- Massa de Fumos;

SANTOS, R. P. G. 2010. **Uma Avaliação Comparativa dos Processos MIG/MAG e Eletrodo Tubular em Termos de Capacidade Produtiva, Geração de Fumos e de Respingos**. 134 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG.

Resumo

Diante das diferenças operacionais existentes entre, o processo Eletrodo Tubular e o processo MIG/MAG, dois processos de soldagem competitivos em termos de qualidade e produtividade, surge a necessidade de quantificar e salientar as principais características de cada um, visando fornecer ao usuário informações mais seguras que permitam a opção pelo melhor processo de acordo com sua aplicação. Porém, uma comparação entre esses processos para se tornar justa e de valor prático deve ser feita compensando as suas diferenças operacionais. Desta forma, neste trabalho foi proposto realizar a comparação entre os dois processos mencionados de tal forma a tornar os resultados mais aplicáveis. Para isto, procurou-se avaliar arames e respectivos gases de proteção de grande aplicação para cada um dos processos, sob um mesmo nível de corrente, embora cobrindo uma faixa típica de uso, com uma mesma taxa de deposição por unidade de comprimento e, principalmente, respeitando os demais parâmetros de soldagem que são típicos de cada um dos processos. Soldagens foram realizadas utilizando-se os arames E71T-1 e ER70S6 sob as proteções gasosas 100%CO₂ e Ar+25%CO₂ em diferentes níveis de corrente, usando chapas chanfradas quando pertinente. Procurou-se distinguir e avaliar características de cada processo que pudessem influenciar diretamente na sua operacionalidade, tais como, capacidade produtiva (a taxa de fusão e deposição) e de geração de fumos e respingos. Ensaio dedicados para mensurar estas características foram aplicados de forma sistemática. De um modo geral, o arame tubular utilizado apresentou uma maior taxa de deposição do que o arame maciço, porém com um maior consumo de material para se formar um mesmo cordão. Também se observou que o tubular gera um nível maior de respingos com dimensões maiores do que o arame maciço, assim como maior produção de fumos. A proteção gasosa com 100% de CO₂ intensifica a geração de fumos e respingos para os dois processos. Porém, uma análise econômica mostra que com o tubular é possível realizar um dado comprimento de solda em menor tempo (maior produtividade), no que pese o maior custo em função do preço dos produtos no momento.

Palavras-chave: MIG/MAG, Eletrodo Tubular, Respingo e Fumos.

SANTOS, R. P. G. 2010. **A Comparative Evaluation of Processes GMAW and FCAW in Terms of Production Capacity, Fume Generation Rate and Spattering.** 134 f. M.Sc. Dissertation, Federal University of Uberlandia, Uberlandia - MG.

Abstract

Considering the existing operation differences between two competing welding processes, FCAW and GMAW in terms of quality and productivity, the necessity of quantifying and pointing out the main characteristics of each process comes out. The objective is to supply relevant and useful information to users, allowing them to opt for the process that better suits their requirements. However, for a comparison between these processes to be fair and of practical value, operational differences must be considered and taken account of. Therefore, the comparison between the two processes was carried out in such a way as to produce results most relevant and applicable results. To achieve these, the experiment was carried out using the most widely used wires and shielding gases for each process, under the same current level, while covering a typical range of use, with the same deposition rate per unit length, and especially respecting the other welding parameters that are typical of each of the processes. Weldments were carried through using the wires E71T-1 and ER70S6 under the gas shielding of 100%CO₂ and Ar+25%CO₂, at different current levels, using bevelled plates when pertinent. It was looked to distinguish and to evaluate characteristics of each process that could influence directly in its operation, such as, productive capacity (melting and deposition rates) and fume generation rate and spattering. Dedicated tests to measure these characteristics were applied systematically. In general, the tubular wire used presented a higher deposition rate than the solid wire, yet with a bigger consumption of material to form same-size-beads. It was also observed that the tubular wire generates a higher level of spatter with bigger dimensions of that the solid one, as well as bigger production of fumes. The shielding gas with 100% of CO₂ intensifies the generation of fumes and spatter for the two processes. However, if analyzed in terms of economic point of view, it is demonstrated that with the tubular wire is possible to carry through certain amount of weld in lesser time (bigger productivity), in what it weighs the biggest cost in function of the price of the products at the moment.

Keywords: GMAW, FCAW, Spattering and Fumes.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

As transformações na economia mundial resultam em constantes exigências por qualidade e produtividade a baixo custo, fatores que asseguram a competitividade no ambiente industrial. E, desse modo, têm impulsionado o desenvolvimento de tecnologias em soldagem e aprimoramento de técnicas conexas a este seguimento, diversificando os processos a arco voltaico que garantam esses requisitos.

Um dos processos que se destacam na atualidade e tem sua utilização crescente é o conhecido como MIG/MAG. Neste processo, um arco de soldagem é formado entre um arame-eletrodo maciço¹ continuamente alimentado e o material de base, formando uma poça que é protegida por um gás de proteção. Este processo MIG/MAG tem ascendido no meio industrial por apresentar alta capacidade produtiva, assegurada principalmente pela utilização de alta densidade de corrente, o que proporciona alta taxa de fusão, além de que sua alimentação contínua de arame possibilitar um alto fator de trabalho. Porém, apresenta uma complexa correlação entre as variáveis que o governam, exigindo certo grau de conhecimento do operador e supervisores (incluindo o engenheiro de soldagem) para garantir o melhor aproveitamento de suas qualidades operatórias. Outra restrição correlacionada ao uso de arames maciços ocorre em função das limitadas ação metalúrgica proporcionada pelos mesmos e composições disponíveis no mercado, comprometendo, assim, a versatilidade na soldagem de materiais com requerimentos especiais.

Diante dessa perspectiva, o processo Eletrodo Tubular surge como uma alternativa para suprir as deficiências do processo MIG/MAG. Para isto, o Processo Eletrodo Tubular utiliza como arame uma fita metálica na forma tubular envolvendo um

¹ - No Brasil, em função do termo inglês "solid", o arame para MIG/MAG é normalmente referenciado como "aramé sólido", terminologia não precisa tecnicamente, pois outros arames usados em soldagem, como os tubulares, também são sólidos

fluxo, mas operando da mesma forma do MIG/MAG. Busca, assim, garantir, ou até aumentar, a alta eficiência de produção desse último, com alta versatilidade das características operacionais proporcionadas pelo fluxo (melhorias das características metalúrgicas e, conseqüentemente, das propriedades mecânicas). A composição química do fluxo pode ser facilmente alterada, em função do requerimento do material a ser soldado. Sua maior restrição reside no maior custo do consumível, mantendo-se de forma similar a complexidade de correlação entre as variáveis que governam o processo.

Ao ser lançado, a estratégia de marketing para o processo Eletrodo Tubular tem sido enfatizar as qualidades de seu arame no que diz respeito à alta produtividade e qualidade do cordão da solda produzida, sendo estas características estabelecidas como benefícios compensatórios ao elevado custo do arame. Muitos chegam a afirmar que tal processo apresenta um desempenho muito superior ao processo MIG/MAG. Entretanto, o processo MIG/MAG continua merecendo uma grande aceitabilidade no meio industrial, principalmente com o aprimoramento de equipamentos que proporcionam melhorar o desempenho do uso do arame maciço. Esta dualidade deixa os usuários confusos na hora de seleção de processos de soldagem. Pode-se esperar, contudo, que cada processo tenha a situação em que se apresente melhor que o outro.

Nesse contexto, torna-se importante o entendimento das características operacionais de cada processo, através da óptica de funcionamento de um e do outro, com o intuito de proporcionar a correta utilização de cada processo em função de sua aplicação, buscando desmistificar preconceitos que envolvem a operacionalidade dos dois processos. Mas existe uma escassez de informação na literatura corrente que permita uma comparação eficiente e global entre os dois processos. Os poucos trabalhos parecem dar ênfase apenas a um ou outro aspecto operacional, ou ao fazer comparações utilizando ambos processos com mesma regulação de parâmetros, o que nem sempre corresponde com a melhor condição operacional de cada processo em separado. Desta forma, parece ser necessário o desenvolvimento de uma metodologia própria capaz de sistematizar a análise comparativa entre o processo MIG/MAG e o processo Eletrodo Tubular, com cada processo trabalhando com parâmetros adequados para sua operacionalidade (maior eficiência dos resultados) e usando um número maior de características (análise mais global).

Assim, neste trabalho pretende-se, ao avaliar soldagens feitas com dois arames de grande aplicação no mercado, sob a proteção de misturas gasosas de grande utilização, busca-se entender aspectos operacionais característicos de cada processo, possibilitando uma comparação entre os mesmos em função de uma dada aplicação. Para tal, os processos devem ser analisados em condições paramétricas diferenciadas

e apropriados a cada um, uma vez que os mesmos apresentam diferenças significativas no desempenho operacional, principalmente no que tange a taxa de fusão e modo de transferência metálica. Além disto, procurar-se-á analisar características de ordem prática, tais como a capacidade de produção (taxa de fusão e deposição), a tolerância de regulação dos parâmetros (facilidade de operar), a geração de respingos (não no sentido do rendimento de deposição, mas sim no que tange a outros aspectos operacionais) e a geração de fumos (visando o ponto de vista de saúde ocupacional). Entretanto, não se pretende cobrir todas as variáveis envolvidas nos processos, limitando-se a avaliar um tipo e bitola de arame para cada processo, sob dois tipos de gases de proteção, apenas na posição plana, para um tipo de chanfro e a poucas correntes nominais. Também não será avaliado o efeito da regulação da indutância, sobre os dois processos de soldagem. Assim, deixa-se claro de que, do ponto de vista técnico, não se pode estar falando de comparação absoluta entre os processos, até por que os próprios consumíveis apresentam comportamentos distintos de fabricante para fabricante. Mas, acredita-se que com a metodologia a ser proposta se estará contribuindo para fazer comparações mais seguras e fornecer ao usuário um número maior de informações mais precisas, facilitando sua atividade profissional.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica tem como finalidade reunir informações a respeito dos processos de soldagem MIG/MAG e Eletrodo Tubular e servir de base técnica e científica para o entendimento dos princípios básicos que envolvem os processos, permitindo a formação de conceitos para a discussão dos resultados.

2.1 Fundamentos do Processo MIG/MAG

2.1.1 Introdução

A soldagem é o método mais simples de união permanente de metais e pode ser utilizado em conjunto com outros processos de fabricação. Sua importância está no fato de que se podem unir quase todos os tipos de metais e ligas comerciais, e até recuperar produtos manufaturados, permitindo flexibilidade de projeto, redução de custos e facilidade de aplicação em qualquer local. Os processos de soldagem, por apresentarem um campo de aplicação irrestrito são empregados para a fabricação diversos de produtos, tais como estruturas metálicas, navios, aeronaves, Miranda (1999).

O processo de soldagem MIG/MAG (Metal Inert Gas / Metal Active Gas - também conhecido como GMAW (Gas Metal Arc Welding)) é um processo de soldagem que se baseia na fonte de calor de um arco elétrico, mantido entre a extremidade de um arame nu consumível, alimentado continuamente, e a peça a soldar. A proteção da região da solda é realizada por uma atmosfera protetora de gás inerte (argônio (Ar) e hélio (He)) ou um gás ativo (CO₂ ou misturas de O₂ e N₂) de acordo com Scotti e

Ponomarev (2008). Na Figura 2.1 é apresentada uma visão geral do bocal de uma tocha, do arame eletrodo e do arco MIG/MAG durante uma soldagem.

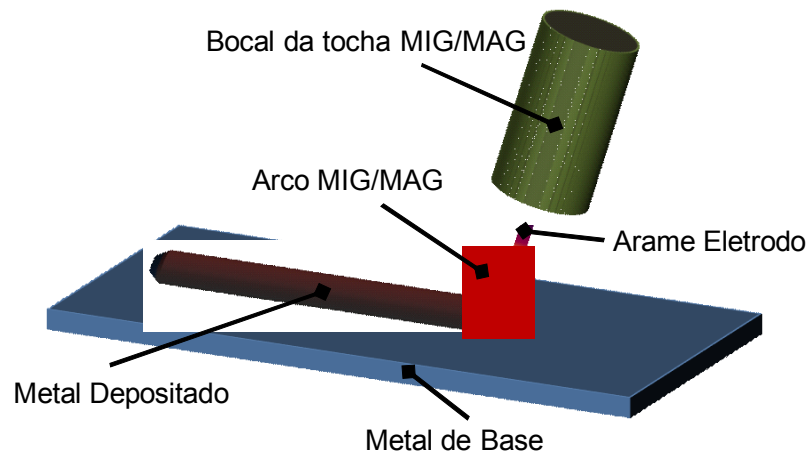


Figura 2.1 – Visão geral do bocal de uma tocha, arame eletrodo e arco MIG/MAG

As indústrias para garantir uma maior competitividade no mercado mundial global cada vez mais exigem processos que aliem qualidade com maior produtividade, desse modo o processo MIG/MAG apresenta-se como uma alternativa eficiente para atender estes requisitos. Para tanto este processo pode ser operado de forma automática e semi-automática, sendo capaz de soldar diferentes tipos de metais em diversas posições de soldagem o que permite uma grande versatilidade a este processo.

As principais vantagens do processo MIG/MAG citados na bibliografia (Scotti e Ponomarev, (2008) e Miranda (1999)) são:

- ✓ Soldagem de praticamente todos os metais e ligas comerciais;
- ✓ Alimentação contínua do eletrodo;
- ✓ Soldagem em todas as posições;
- ✓ Elevada taxa de fusão do arame eletrodo e também de deposição;
- ✓ Alta capacidade produtiva;
- ✓ Geração de pouco fumo e pouca escória;
- ✓ Permite a automatização industrial, possibilitando a utilização de robôs.

As principais restrições do processo MIG/MAG citadas na literatura (Scotti e Ponomarev, (2008) e Miranda (1999)) são:

- ✓ Maior sensibilidade à variação dos parâmetros elétricos de soldagem;
- ✓ Uma alta emissão de calor e luz;
- ✓ Relativa dificuldade para manipular o equipamento de soldagem;

6 Capítulo II - Revisão Bibliográfica

- ✓ Utilização mais restrita em locais de difícil acesso, devido à maior complexidade e dimensões dos equipamentos;
- ✓ O arco deve ser protegido das correntes de ar, para garantir a eficiência da proteção gasosa utilizada.

O processo MIG/MAG possui uma série de parâmetros tais como: o modo de transferência metálica, corrente, tensão, distância bico contato peça (DBCP) gás de proteção, composição química do arame eletrodo, diâmetro do eletrodo. A inter-relação entre estes parâmetros é capaz de influenciar nas características operacionais do processo bem como na formação e no aspecto final do cordão, nas próximas seções será feita uma análise destes parâmetros.

2.1.2 Transferência metálica no processo MIG/MAG

O modo pelo qual o metal fundido é transferido da ponta do eletrodo consumível para a poça de fusão, exerce grande influência sobre o desempenho do processo MIG/MAG podendo, afetar diretamente a estabilidade do processo, a geração de respingos, a capacidade posicional do processo, a qualidade e o aspecto visual da solda (Norrish, 1992).

De acordo com Kim e Eagar (1993), diversas variáveis operacionais são capazes de influenciar o modo de transferência do metal para a poça de fusão, dentre os quais pode-se destacar, a corrente de soldagem, a composição do gás de proteção, a extensão energizada do eletrodo e a polaridade. A influência dessas diversas variáveis operacionais na transferência do material resulta em diferentes modos de transferência da gota. Deste modo, existem várias classificações para os modos de transferência, dentre os quais Scotti (2000) cita e descreve como modos básicos de transferência os seguintes modos: globular, curto-circuito, goticular, goticular com alongamento e rotacional. O autor também afirma que é possível ocorrer combinações dos modos básicos de transferência resultando em globular/curto-circuito, globular/curto-circuito/globular, globular/curto-circuito/goticular ou goticular com alongamento, globular/goticular e globular/ricocheteamento.

Porém o IIW propôs recentemente atualizações e revisões na classificação dos modos de transferência metálica, englobando possíveis variações como apresentado por Lucas, Iordachescu e Ponomarev (2005). Resultando, num conceito básico denominado Modos Fundamentais de Transferência Metálica, ou seja, é o conjunto de modos de transferência que ocorrem de forma distinta e podem ser classificados em naturais e controlados. O modo natural se caracteriza pela ocorrência da transferência

metálica sem controle da fonte, enquanto que no modo controlada a transferência ocorre pela imposição de controle da fonte. A Figura 2.2 representa a classificação dos diversos modos de transferência metálica proposto pelo IIW conforme Vilarinho (2007).

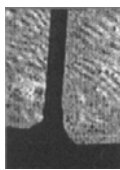
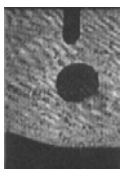
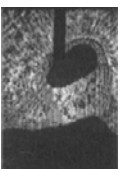
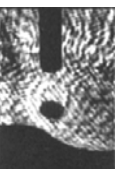
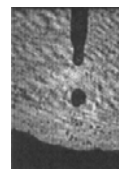
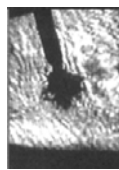
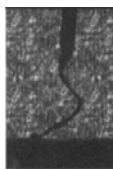
Transferência	Tipo Fundamental	Proposta de Classificação Pelo IIW							
		Fundamental		Modo					
		Fundamental		Modo					
	Natural	A		B		C	D		E
	Controlado	Curto - Circuito		Globular		Pulsada Projetada	Goticular (Spray)		Rota-cional
		An	Ac	B1	B2		D1	D2	
	Natural	Curto- Circuito	Curto- Circuito Controlado	Globular em Gotas	Globular repelida	Pulsada	Goticular	Elongamento (streaming)	Explosiva
	Natural								
	Controlado								
	Natural								
	Natural								
	Natural								

Figura 2.2 - Classificação para os Modos Fundamentais de Transferência Metálica. Proposto pelo IIW (adaptado de Vilarinho, 2007).

A transferência por curto-circuito é caracterizada por gotas formadas na ponta do eletrodo, que tocam a poça de fusão e durante cada toque, ocorre à extinção momentânea do arco. A gota é transferida por tensão superficial e ocorre a baixas e moderadas correntes, e baixas tensões no arco, o que proporciona um arco curto. A transferência metálica por curto-circuito de acordo com Machado (1996) produz uma poça de fusão relativamente pequena, de rápida solidificação sendo assim muito utilizada na soldagem de chapas de pequenas espessuras, e na soldagem fora da posição plana, devido ao menor aporte térmico envolvido em comparação a outros modos de transferência. A Figura 2.3 ilustra o comportamento dos sinais de corrente e tensão durante a transferência por curto-circuito.

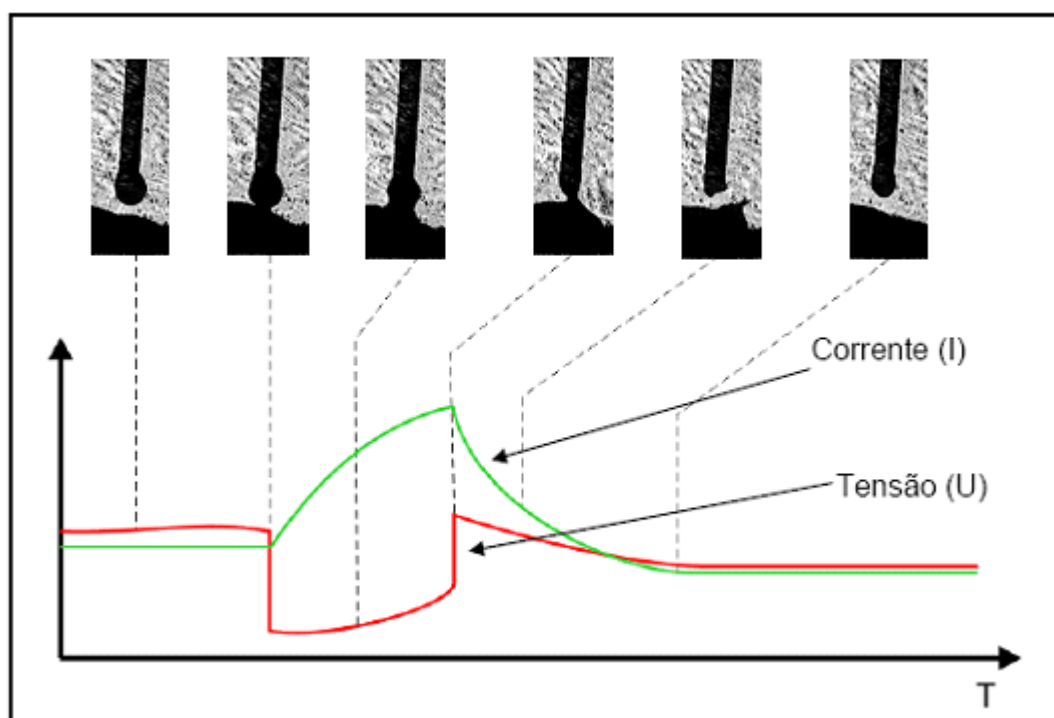


Figura 2.3 - Ciclo completo da transferência metálica por curto-circuito (adaptado Gomes, 2006)

É possível perceber que a tensão cai abruptamente quando a gota toca a poça, então se observa o início do curto-circuito e assim permanece até o fim do curto-circuito, já a corrente aumenta rapidamente no início do curto-circuito decrescendo apenas após o destacamento da gota. Para Scotti e Ponomarev (2008) verifica-se que imediatamente após o curto-circuito, a taxa de fusão do eletrodo torna-se maior do que a de alimentação, isso devido à elevada corrente logo após o curto-circuito, ou seja, o comprimento do arco cresce rapidamente, enquanto uma nova gota é formada.

A Transferência Globular é caracterizada pela transferência irregular de gotas grandes (tamanho da gota excede o diâmetro do arame antes do destacamento), essa transferência ocorre tipicamente com correntes baixas a moderadas, porém com tensões mais altas para evitar curto-circuito e com baixas frequências de destacamento. O metal de adição se destaca do eletrodo e é transferido para a poça de fusão basicamente por ação gravitacional. Com este tipo de transferência metálica, é comum um elevado nível de respingos e instabilidades do arco o que torna a operação restrita à posição plana.

A transferência globular repelida apresenta as mesmas características da transferência globular, o que a difere é o desvio da gota devido a forças de repulsão que podem ocorrer em função da polaridade ou gás de proteção utilizado. De acordo com

Ushio et al (1995) a utilização de gases de proteção com teor superior a 10% de CO₂ na mistura causa repulsão nas gotas, resultando no modo de transferência globular repelida, este gás também causa um aumento da força no arco que age sobre a gota, no sentido de dificultar o destacamento da mesma.

Na transferência Goticular (*Spray*), o metal se transfere na forma de pequenas gotas com diâmetro aproximadamente igual ao do eletrodo, em altas frequências sob a ação de intensas forças eletromagnéticas e é caracterizada por altas tensões e correntes de soldagem (acima da corrente de transição globular – goticular). É um modo de transferência estável, baixa produção de respingos e de alta produção. No entanto, devido às altas correntes, é indicado para soldagens na posição plana e de chapas grossas. A corrente de *transição* é uma região de corrente, na qual ocorrem alterações no modo de formação da gota, passando de grandes gotas em baixa frequência para gotas pequenas com alta frequência de destacamento. O valor da corrente de transição pode ser influenciado por inúmeros fatores tais como: a composição química do eletrodo, o diâmetro, o comprimento do eletrodo, bem como pelo gás de proteção e a DBCP. Haidar e Lowke (1997) afirmam que a adição de até 5%CO₂ diminui a tensão superficial da gota e, conseqüentemente, diminui a corrente de transição, pois a gota precisa crescer menos antes de se destacar, porém maiores teores de CO₂ resultam num aumento da corrente de transição.

Outro tipo de transferência goticular é a transferência com Elongamento (*streaming*) que se caracteriza por níveis de correntes elevados, onde segundo Scotti e Ponomarev (2008) o arco escala a superfície do eletrodo, superaquecendo-o e tornando pastosa uma região acima da ponta do eletrodo, e devido às forças eletromagnéticas envolvidas ocorre o alongamento formando então pequenas gotas, com diâmetros menores que o diâmetro do eletrodo que se desprendem em alta frequência. Também se caracteriza pela baixa geração de respingos, apresentando alto aporte térmico e taxa de fusão, sendo utilizado para soldagem de chapas grossas na posição plana.

A transferência Explosiva é caracterizada por reações químicas entre os componentes do eletrodo, que formam bolhas no interior das gotas que explodem antes do destacamento, podendo ser observada em soldagem MIG/MAG de alumínio com eletrodo contendo magnésio, causando um alto índice de fumos e respingos.

A transferência Rotacional se caracteriza por altas tensões e corrente, implicando numa alta densidade de calor que resulta num maior alongamento na ponta do eletrodo, que sofre ações de forças eletromagnéticas provocando o movimento rotacional. As gotas possuem um diâmetro muito menor que o eletrodo, com elevada

freqüência e a transferência é considerada instável provocando uma grande quantidade de respingos.

A transferência Pulsada é obtida por meio de fontes especiais que permite a execução de pulsos periódicos de alta corrente (acima da corrente de transição) e em momentos de baixa corrente, onde não há transferência metálica, a corrente apenas mantém o arco aberto. Os pulsos permitem uma transferência goticular com valores médios de corrente inferiores aos valores nos quais esta forma de transferência naturalmente ocorre, com gotas com diâmetro praticamente igual ao do eletrodo. Assim, obtêm-se as vantagens desta transferência com baixos valores de corrente, permitindo a soldagem fora da posição plana e de juntas de pequena espessura.

2.1.3 Variáveis no processo MIG/MAG

O processo MIG/MAG é complexo e apresenta uma série de parâmetros de regulação que influenciam diretamente ou indiretamente no resultado final do processo que é a obtenção do cordão de solda, ou seja, influenciam na geometria do cordão e no aspecto produtivo do processo. Os parâmetros mais importantes dentro do processo MIG/MAG de acordo com ASM (1993) são:

- A corrente de soldagem e velocidade de alimentação do arame;
- A tensão do arco (comprimento do arco);
- A velocidade de soldagem;
- Diâmetro e composição do eletrodo;
- Composição do gás de proteção;
- DBCP.

Porém, existe uma correlação de dependência entre estas variáveis sendo muito difícil ajustar um parâmetro sem causar alterações em outro, e conseqüentemente causar alterações no aspecto final do cordão. Dessa forma torna-se necessário conhecer os efeitos de cada parâmetro sobre a geometria do cordão bem como os efeitos gerados pela interrelação entre os mesmos.

a) Corrente

Parâmetros como a corrente e a tensão conforme justifica Scotti e Ponomarev (2008) influenciam diretamente na formação do cordão, na taxa de fusão e no tipo de transferência metálica, que por sua vez influenciam em aspectos operacionais do processo como, a geração de fumos e de respingo. Com a utilização de uma fonte de tensão constante a corrente é regulada por meio da velocidade de alimentação. Maiores velocidades de alimentação resultam em maiores correntes e conseqüentemente em

taxas maiores de fusão que estão diretamente relacionadas com o consumo de eletrodo, dessa forma os valores de velocidade de alimentação devem se equiparar ao consumo, para prevenir o apagamento do arco. Para que ocorra a fusão do eletrodo (consumo) é necessária a geração de calor que pode ser oriundo de diferentes fontes tais como: o calor gerado no eletrodo por efeito Joule devido à passagem da corrente, o calor gerado devido às reações na conexão arco-eletrodo, o calor proveniente da coluna de plasma devido às reações de ionização do gás de proteção e o calor proveniente da poça de fusão devido às reações geradas na conexão arco-peça.

Mas segundo Allum e Quintino (1984) a fusão na soldagem depende essencialmente do aquecimento do arame pelo arco e pelo efeito Joule (aquecimento por resistência elétrica) ao longo do eletrodo. Considerando estes dois efeitos pode-se mostrar que a velocidade de fusão do arame pode ser representada, para o processo MIG/MAG por meio da Equação 1:

$$w = \alpha i + \beta s i^2 \quad (1)$$

Onde w é a velocidade de fusão, α e β são, respectivamente, coeficientes ligados ao aquecimento do eletrodo pelo arco e por efeito Joule, s é o comprimento livre do eletrodo e i é a corrente. Dessa forma, aumentos de corrente resultam em maiores taxas de fusão (consumo), maior penetração em ação do maior calor gerado, cordões mais largos e até mesmo alteração no tipo de transferência metálica.

b) Tensão

A tensão de soldagem está relacionada com o comprimento do arco, um aumento de tensão resulta num arco com maior comprimento. Assim, como a corrente variações de tensão, podem resultar em variações no tipo de transferência metálica. De acordo com Scotti e Ponomarev (2008) um mesmo comprimento de arco pode ser associado a diferentes correntes, o que se verifica é uma região de estabilidade da tensão com fatores como a corrente, o comprimento do eletrodo, taxa de fusão. Desse modo variações em qualquer um destes fatores exige uma nova condição de equilíbrio para os mesmos, o comportamento de tais fatores para se atingir o equilíbrio depende da característica estática da fonte. Quanto ao aspecto visual do cordão, tensões mais baixas tendem a gerar cordões com perfil mais estreito, ao passo que tensões maiores resultam em cordões mais largos.

c) Velocidade de Soldagem

A velocidade de soldagem representa o deslocamento linear do arco ao longo da junta a ser soldada. Para uma mesma condição de soldagem quanto maior a velocidade

de soldagem menor o efeito da poça na transferência do calor e maior penetração. Por outro lado a partir de certa velocidade de soldagem, uma maior velocidade resulta num menor calor imposto e conseqüentemente numa menor penetração, largura e reforço do cordão. Porém baixas velocidades de soldagem resultam em cordões largos com muito depósito de material resultando num aumento do volume da poça, passando então o calor do arco a atuar diretamente na poça e não no metal de base e desse modo reduzindo a penetração. Quando a velocidade de soldagem apresenta altos valores, é possível que ocorra mordeduras ao longo do cordão de solda Gimenes (2005).

d) Diâmetro e Composição do Eletrodo

O tipo de arame geralmente é definido tomando por base a especificação fornecida por normas regulamentadas por instituições como a *American Welding Society* (AWS). A composição química do eletrodo depende da composição do metal de base, das propriedades mecânicas que se deseja alcançar para a solda e, do tipo de gás de proteção. A definição do diâmetro do eletrodo ocorre principalmente em função da espessura do metal de base, da posição de soldagem e de outros fatores que restrinjam o tamanho da poça de fusão. Para cada combinação diâmetro e composição de eletrodo existe uma faixa de corrente ideal para sua utilização.

e) Extensão livre do eletrodo e distância bico contato peça (DBCP)

Segundo Miranda (1999) a DBCP está diretamente relacionada com duas outras variáveis, o comprimento do arco (L_a) que compreende a região entre a ponta do eletrodo e a poça de fusão e com a extensão livre do eletrodo (L_{el}) que representa a região entre o contato elétrico e a ponta do eletrodo, comprimento energizado do eletrodo. Desse modo a distância bico contato peça corresponde à somatória destes dois comprimentos resultando na Equação 2:

$$DBCP = L_a + L_{el} \quad (2)$$

Estas variáveis também estão correlacionadas com a velocidade de alimentação, tensão, corrente e até mesmo com a característica estática da fonte. Dessa forma variações de comprimento resultam em variações nos demais parâmetros, por exemplo, um aumento no comprimento livre do eletrodo, oferece uma maior resistência à passagem de corrente resultando num maior aquecimento por efeito Joule. Ainda para Scotti e Ponomarev (2008) o aumento da resistência elétrica do eletrodo aumenta a energia proveniente do efeito Joule, necessitando então, de uma menor corrente para

uma mesma velocidade de alimentação dessa forma, a característica estática da fonte atua no sentido de promover novamente o equilíbrio entre essas variáveis, uma vez que não houve uma nova regulação de parâmetros.

2.2 Fundamentos do processo Eletrodo Tubular

2.2.1 Introdução

A soldagem com o processo Eletrodo Tubular produz a coalescência de metais por meio de um arco estabelecido entre o eletrodo alimentado de forma contínua e a peça. A proteção do arco e do cordão ocorre tanto por ação do fluxo existente no interior do arame, como também pode ser acrescida pela ação de um fluxo de gás fornecido por uma fonte externa. Este fluxo é composto por materiais inorgânicos e metálicos que possuem várias funções, dentre as quais se destacam a melhoria das características do arco elétrico e da transferência do metal de solda, a proteção da poça de fusão e, em alguns casos, a adição de elementos de liga, além de atuar como formador de escória Starling e Modenesi (2005).

O processo Eletrodo Tubular possui duas variações, o autoprottegido que não possui proteção gasosa externa, toda a proteção é realizada pelo próprio fluxo do eletrodo por meio da decomposição do fluxo do eletrodo o qual forma uma atmosfera protetora para o arco e para o metal fundido. Outro tipo é o eletrodo com proteção gasosa no qual as funções de proteção do arco e ionização da atmosfera são realizadas por um gás (inerte, ativo ou mistura destes) introduzido à parte. A Figura 2.4 apresenta uma visão geral da soldagem com arame tubular com proteção gasosa introduzida pela tocha.

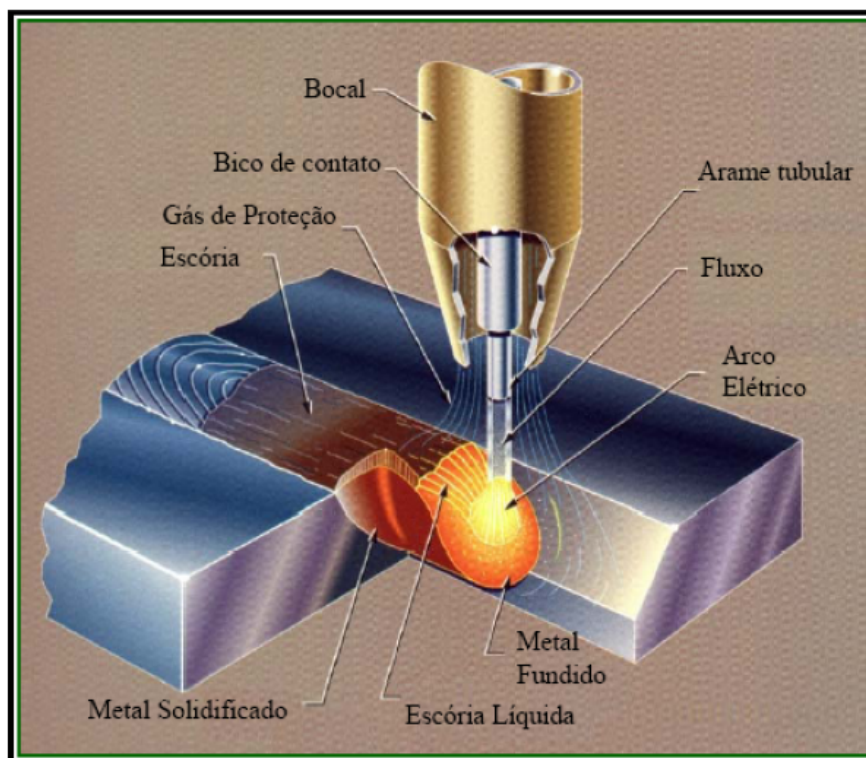


Figura 2.4- Visão geral da soldagem com arame tubular com proteção gasosa
(adaptado Cooper Ordóñez, 2004)

A soldagem com arame tubular apresenta muitas semelhanças com o processo MIG/MAG principalmente no que tange a equipamentos e princípio de funcionamento, normalmente trata-se de um processo semi-automático que permite a automatização. Do ponto de vista metalúrgico, a ação do fluxo confere a este processo propriedades semelhantes ao eletrodo revestido.

Na década de 80 o arame tubular surge no Japão, EUA e Europa como uma alternativa capaz de melhorar a produtividade sem prejudicar a qualidade do metal depositado. Segundo Widgery (1994) o processo Eletrodo Tubular se destaca por apresentar metal depositado de alta qualidade, cordão de solda com bom aspecto visual, facilidade operacional de manuseio do processo, além de soldar vários tipos de aços em grandes faixas de espessuras, apresentarem alta tolerância com relação a contaminantes que podem originar trincas e também podendo apresentar altas taxas de deposição dependendo da combinação arame-gás escolhida. Porém ainda para este autor ao se comparar a taxa de deposição do arame tubular com o arame maciço, o primeiro pode não ser tão eficiente, entretanto conceito de produtividade não se restringe a taxa de deposição, muitas outras variáveis constituem este conceito e permitem ao tubular uma melhor produtividade do que o arame maciço. Por outro lado, um limitante do processo Eletrodo Tubular é o alto custo em relação ao arame sólido,

entretanto, à medida que se aumentam os elementos de ligas esta relação diminui Araújo (2004).

Os arames tubulares são constituídos por uma fita metálica enrolada na forma de uma bobina e de um pó com formulações específicas, denominado fluxo. A grande diversidade de elementos que podem constituir o fluxo dos arames tubulares confere a este arame, a possibilidade de adequação conforme a aplicação do mesmo tornando-o mais flexível do que o arame maciço. Estes fluxos dos arames tubulares podem ser metálicos e não metálicos. Durante a soldagem, o arco possibilita complexas reações químicas com os elementos do fluxo onde cada elemento contribui para o comportamento geral do fluxo no que tange ao desempenho do eletrodo, por exemplo, a estabilidade da transferência do metal, a viscosidade e destacabilidade da escória, as propriedades mecânicas finais da soldagem conforme afirma Bauné, Bonnet e Liu (2000). Portanto, cada composição de fluxo, vai gerar um resultado final diferente, pode-se citar como funções básicas do fluxo, segundo Fortes (2004).

- Desoxidantes e desnitrificantes - são adicionados desoxidantes como o manganês e o silício e formadores de nitretos como o alumínio para auxiliar na purificação do metal de solda;
- Formadores de escória - compostos formadores de escória como óxidos de cálcio, potássio, silício, ou sódio, são adicionados para proteger a poça de fusão da atmosfera. A escória ajuda a melhorar o perfil do cordão de solda, e escórias de rápida solidificação ajudam a suportar a poça de fusão na soldagem fora de posição. A escória também reduz a taxa de resfriamento, ação especialmente importante quando se soldam aços de baixa liga;
- Estabilizadores do arco - o potássio e o sódio são os elementos que auxiliam na obtenção de um arco suave e reduzem a quantidade de respingos;
- Elementos de liga - para aumentar a resistência, a ductilidade, à dureza e a tenacidade são empregados elementos de liga como o molibdênio, cromo, carbono, manganês, níquel e vanádio;
- Geradores de gases.

De acordo com o tipo de fluxo os arames tubulares podem ser classificados em rutilícos, básicos e metal cored. Os rutilícos apresentam fluxos não metálicos com componentes predominantemente ácidos e produzem escória do tipo ácida, apresentam boa soldabilidade, permitem a realização de soldas em todas as posições, devido à escória e ao controle da poça de fusão. Os eletrodos básicos apresentam soldas com boa ductilidade e tenacidade não apresenta boa soldabilidade como os rutilícos, não são

indicados para soldagem fora de posição, pois o tipo de transferência metálica predominante é o globular. Quando o fluxo é metálico (metal cored) conforme relatos de Bauné, Bonnet e Liu (2000), seus elementos têm a função de unir o metal de solda com os elementos de ligas contidos no revestimento metálico do eletrodo, para aumentar a resistência do material depositado e também para desoxidá-lo. Cada fluxo específico (rutilico, básico e metálico) do eletrodo tubular produz resultados diferentes no processo com proteção gasosa.

Para o processo Eletrodo Tubular a escória proveniente da soldagem, independente do tipo de eletrodo, segundo Fortes (2004), apresenta características importantes tais como, moldar e suportar o metal de solda ou ajudá-lo a molhar o metal de base, resultando em melhoria na capacidade de se misturar mais facilmente à parcela do metal de base fundido, aumentando assim a diluição. Nos arames tubulares com fluxo não metálicos, os componentes estabilizadores do arco, devem ser selecionados para que seus resíduos não prejudiquem a formação de escória.

Desse modo, o Eletrodo Tubular como qualquer outro processo de soldagem apresenta vantagens e limitações, cabendo ao usuário a seleção adequada de parâmetros de soldagem, que forneça as melhores condições do processo. Dentre as principais vantagens do processo pode-se citar:

- ✓ Alta qualidade do metal depositado;
- ✓ Ótima aparência da solda (solda uniforme);
- ✓ Excelente contorno em soldas de ângulo;
- ✓ Solda vários tipos de aços e em grandes faixas de espessuras;
- ✓ Fácil operação devido à alta facilidade de mecanização;
- ✓ Alta taxa de deposição devido a alta densidade de corrente;
- ✓ Relativamente alta eficiência de deposição;
- ✓ Requer menos limpeza antes da soldagem que o MIG/MAG;
- ✓ Uso de eletrodos autoprotetidos elimina a necessidade do uso de aparelhos de gás além de ser mais tolerante para condições ao ar livre;
- ✓ Alta tolerância com relação a contaminantes que podem originar trincas;
- ✓ Alta produtividade.

Como principais limitações do processo Eletrodo Tubular pode-se citar:

- ✓ Limitado a soldagem de metais ferrosos e liga a base de níquel;
- ✓ Necessidade de remoção de escória;
- ✓ O arame tubular é mais caro do que o arame maciço;
- ✓ Ruim para passe de raiz;

- ✓ Restrições para soldagem ao ar livre (somente para soldagem com gás de proteção);
- ✓ São gerados mais fumos do que os processos GMAW e SAW
- ✓ Necessidade de utilização de roldanas especiais recartiladas com baixa pressão no alimentador.

2.2.2 Transferência metálica no processo Eletrodo Tubular

O modo de transferência metálica influencia diretamente nas características operacionais e na eficiência do processo, pois afeta diretamente as possibilidades de posições soldagem, a penetração, a estabilidade da poça de fusão e a quantidade de respingos Subramanian et al (1998).

A definição dos modos de transferência metálica está relacionada com os ajustes das variáveis operacionais, corrente, tensão, polaridade, diâmetro e composição do eletrodo, gás de proteção e do modo como as forças atuantes no processo interagem. A deposição do metal de solda é realizada pela transferência de gotas de metal através da coluna do arco, sendo que o tamanho, forma e frequência desta deposição caracterizam um determinado tipo de transferência metálica. No processo Eletrodo Tubular a forma de transferência metálica depende principalmente das características de cada tipo de fluxo do arame. De acordo com Fortes (2004) para este processo basicamente são classificados três tipos diferentes de transferência metálica de transferência globular, transferência goticular (spray), transferência por curto-circuito.

A transferência globular se caracteriza por ocorrer geralmente em tensões não muito baixas e correntes moderadas, porém com a utilização de CO₂ como gás de proteção essa transferência pode acontecer com maiores valores de corrente. Neste modo de transferência a gota é formada e permanece aderida à ponta do eletrodo por tensão superficial até o momento em que a gota atinja um grande volume (maior que o diâmetro do eletrodo) e se destaque por ação da força gravitacional e da força eletromagnética. Este tipo de transferência limitada à soldagem a posição plana.

A transferência goticular (spray) apresenta como principal característica uma grande quantidade de pequenas gotas (menor que o diâmetro do arame tubular) a alta frequência das gotas. Estas gotas são depositadas com alta energia (altas correntes e tensões) e fazem com que a poça de fusão seja bastante fluída, limitando o processo para a posição plana ou horizontal.

A transferência por curto-circuito para o processo Eletrodo Tubular bem como para o processo MIG/MAG é caracterizada por utilizar tensões baixas e correntes não muito elevadas, ocorrendo o toque periódico da gota (de pequeno tamanho próximo ao

diâmetro do eletrodo) na poça de fusão no momento de sua transferência. A cada toque ocorre à extinção do arco, e o metal é transferido em cada curto.

De acordo com Norrish (1995) os arames tubulares básicos normalmente realizam transferência globular para elevadas correntes e transferência por curto-circuito para baixas correntes, assim sendo o fluxo que não funde forma uma coluna em direção ao arco. Também para este autor arames tubulares rútilicos em altas correntes realizam transferência metálica do tipo goticular (spray) onde parte do fluxo forma uma camada de escória na superfície da gota, outra parte do fluxo se decompõe formando gases de proteção e o restante do fluxo é transferido à poça de fusão formando uma camada de escória protetora. Ainda segundo este autor a transferência metálica para arames com núcleo de pó metálico (metal cored) é muito similar a transferência para o arame maciço.

Starling e Modenesi (2006) avaliaram a transferência metálica para arames tubulares do tipo rútilico, básico e metal cored com proteção gasosa de Ar+ 25% CO₂ e 100% CO₂ sobre as condições operacionais apresentadas na Figura 2.5 e fizeram as seguintes observações para as transferências metálicas para cada tipo de arame:

➤ Para arames rútilicos com proteção gasosa Ar+ 25% CO₂ por meio da Figura 2.6, é possível verificar diferentes comportamentos em função do aumento da corrente, para correntes mais baixas observa-se uma transferência do tipo globular com presença de alguns curtos-circuitos. Nota-se que a gota e o fluxo são transferidos independentemente para poça de fusão, com o fluxo formando uma coluna em direção a poça de fusão. Esta coluna parece retardar a transferência da gota para a poça, e em alguns momentos parece tocar a poça Figura 2.6-a. Observa-se que à medida que a corrente aumenta, não há mais a presença de curtos, e a transferência continua globular e o fluxo tocando a poça Figura 2.6-b. Na Figura 2.6-c ainda existe a coluna de fluxo que não mais toca a poça, formando uma gota que também se transfere para a poça, a transferência continua globular com diâmetro da gota maior que o diâmetro do eletrodo. Na Figura 2.6-d o diâmetro da gota esta próximo ao diâmetro do eletrodo, porém com uma frequência de transferência das gotas maior e ainda continua globular.

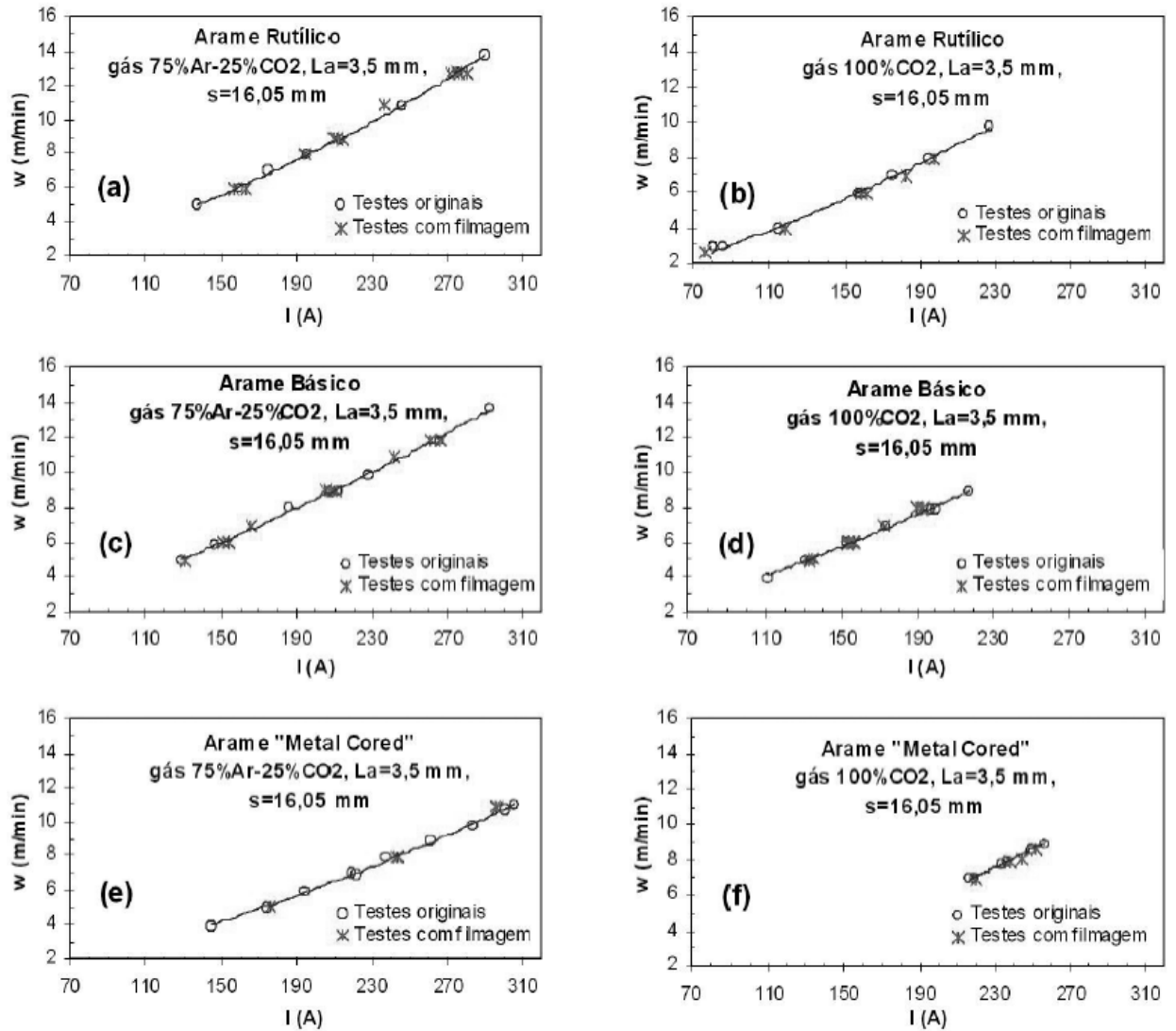


Figura 2.5- Parâmetros operacionais para análise das transferências metálicas para diferentes arames tubulares sobre duas proteções gasosas, onde foram realizados testes iniciais e depois repetidos com filmagens para alguns testes onde: w - velocidade de fusão; I - corrente; s - comprimento energizado do eletrodo; La - comprimento de arco (adaptado Starling e Modenesi 2006)

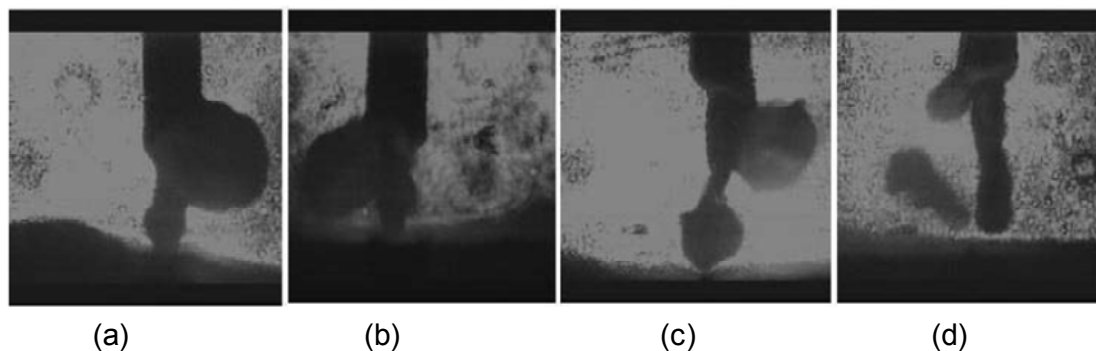


Figura 2.6- Quadros de filmagens para arame rútilico com proteção gasosa Ar+ 25% CO₂ para diferentes correntes (adaptado Starling e Modenesi 2006)

Na transferência metálica para arames rútilicos com proteção gasosa 100% CO₂ verifica-se o mesmo comportamento que para a proteção gasosa Ar+ 25% CO₂, com o aumento progressivo da corrente ocorre transferência do tipo globular, porém a coluna de fluxo formada não toca a poça de fusão Figura 2.7-a e b. Para os níveis mais altos de corrente há uma diminuição do diâmetro da gota, mas ainda sim esta é maior que o diâmetro do eletrodo Figura 2.7-c e d.

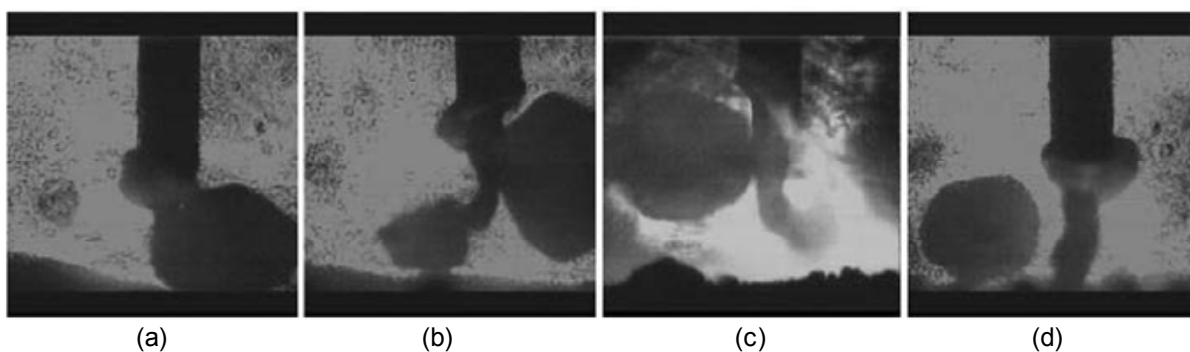


Figura 2.7- Quadros de filmagens para arame rútilico com proteção gasosa 100% CO₂ para diferentes correntes (adaptado Starling e Modenesi 2006)

➤ Para o arame básico com proteção gasosa Ar+ 25% CO₂, observa-se uma transferência metálica do tipo globular repulsiva, com a presença de pequenos curtos-circuitos. Também há uma transferência independente da gota e do fluxo para a poça de fusão, com o fluxo formando uma coluna que toca a poça de fusão constantemente, o que retarda a transferência metálica desse modo, a gota assume grandes diâmetros antes de se destacar Figura 2.8 a e b. Com o aumento da corrente a transferência continua globular, aumentando a freqüência de destacamento da gota e o diâmetro da gota se aproxima do diâmetro do eletrodo Figura 2.8 c e d.

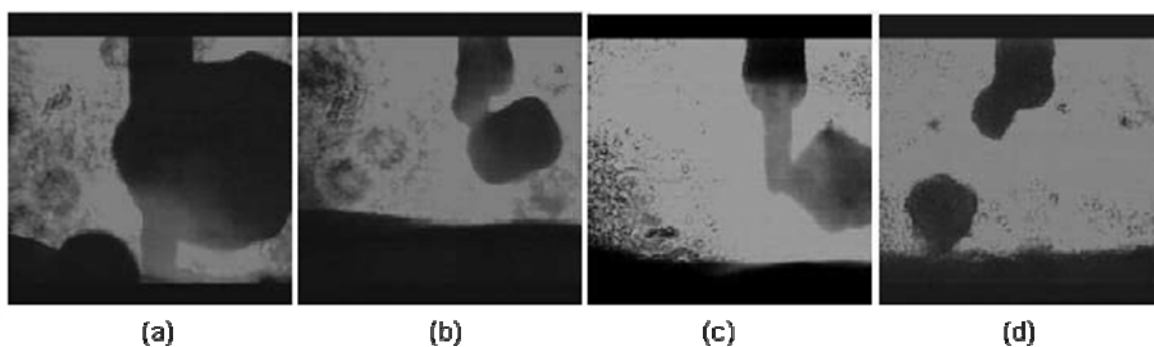


Figura 2.8- Quadros de filmagens para arame básico com proteção gasosa Ar+ 25% CO₂ para diferentes correntes (adaptado Starling e Modenesi 2006)

Para transferências metálicas do arame básico com proteção gasosa 100% CO₂, verifica-se o mesmo comportamento que para a proteção gasosa Ar+ 25% CO₂. A transferência continua globular, porém a coluna de fluxo não toca a poça de fusão e também se observa uma mistura entre a gota metálica e o fluxo, antes da transferência para a poça de fusão conforme Figura 2.9.

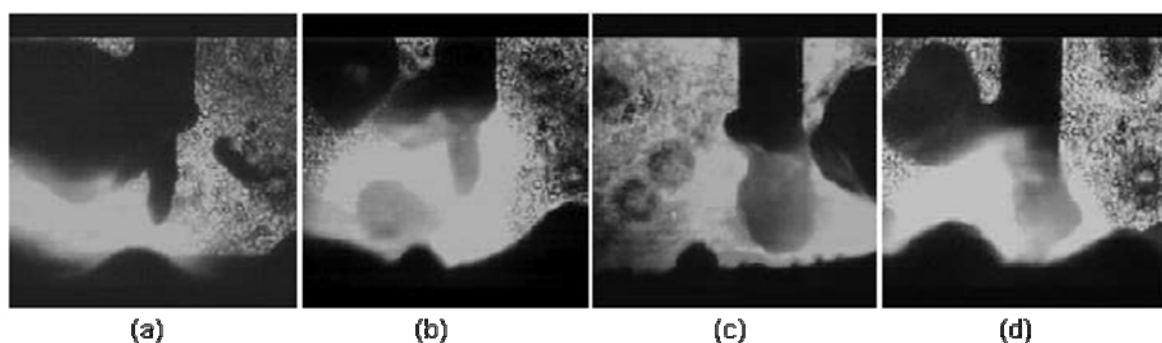


Figura 2.9- Quadros de filmagens para arame básico com proteção gasosa 100% CO₂ para diferentes correntes (adaptado Starling e Modenesi 2006)

➤ Para o metal cored, observa-se que o metal fundido proveniente da fita metálica está misturado ao fluxo do arame, isso ocorre para a proteção gasosa Ar + 25% CO₂. Para as correntes mais baixas a transferência é do tipo globular com presença de alguns curtos circuitos, Figura 2.10-a. Para correntes medianas ocorre a redução do diâmetro da gota e a transferência ocorre de forma similar a goticular (spray), conforme Figura 2.10-b, para correntes mais altas nota-se a formação de um filamento na ponta do eletrodo de acordo Figura 2.10-c. Para a proteção gasosa 100% CO₂ a transferência é do tipo globular repulsiva conforme Figura 2.11.

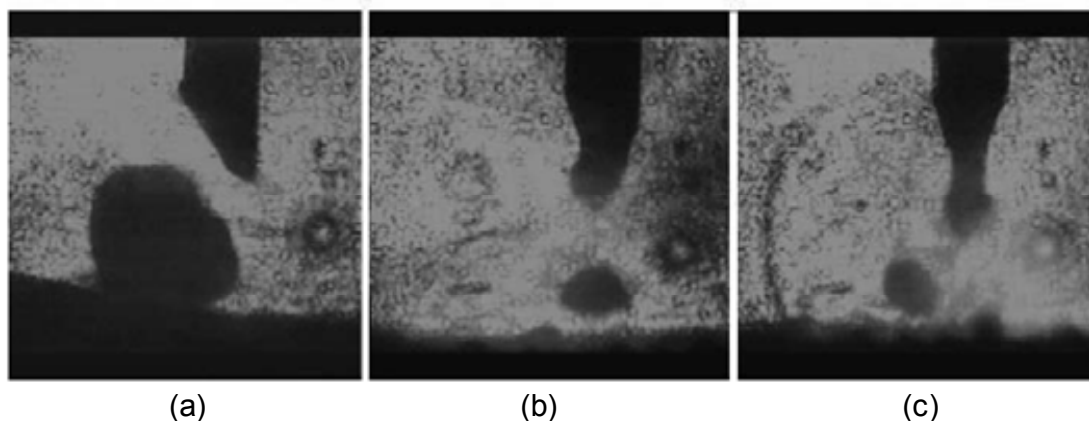


Figura 2.10- Quadros de filmagens para arame metal cored com proteção gasosa Ar+ 25% CO₂ para diferentes correntes (adaptado Starling e Modenesi 2006)

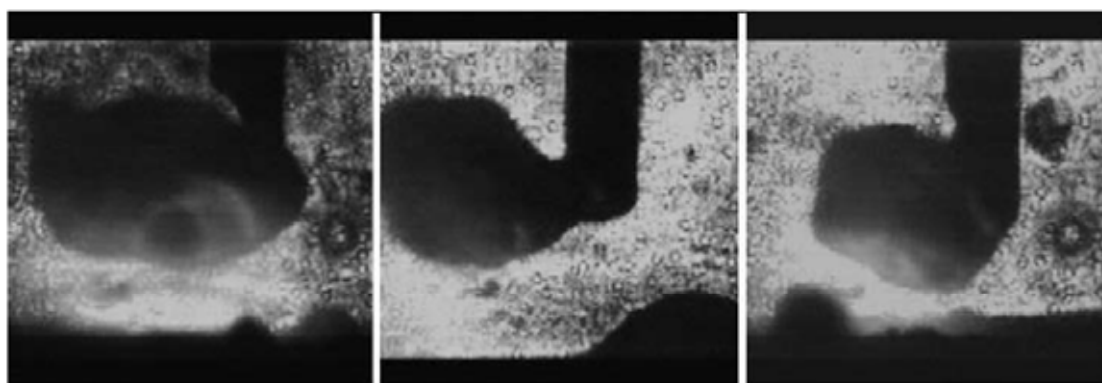


Figura 2.11- Quadros de filmagens para arame metal cored com proteção gasosa 100% CO₂ para diferentes correntes (adaptado Starling e Modenesi 2006)

2.2.3 Variáveis do processo Eletrodo Tubular

O processo Eletrodo Tubular assim como o processo MIG/MAG, pode ter seu desempenho influenciado por variáveis diversas. Dessa forma um melhor entendimento da influência destas variáveis no comportamento do processo, em muito auxilia numa melhor utilização do mesmo. Dentre as principais variáveis pode-se citar:

- Corrente;
- Tensão;
- DBCP e comprimento de eletrodo;
- Velocidade de Soldagem.

A seguir as variáveis mais importantes bem como suas influências serão descritas.

a) Corrente

A corrente de soldagem tem grande efeito no processo Eletrodo Tubular sendo que a taxa de deposição e a penetração do processo são diretamente proporcionais ao aumento da corrente de soldagem conforme Sales (2001). Segundo Widgery (1994) à medida que se trabalha com uma corrente de soldagem maior, em equipamentos com fonte convencional de energia, as taxas de deposição com arames tubulares, incluindo o “metal cored”, aumentam, conforme mostra a Figura 2.12.

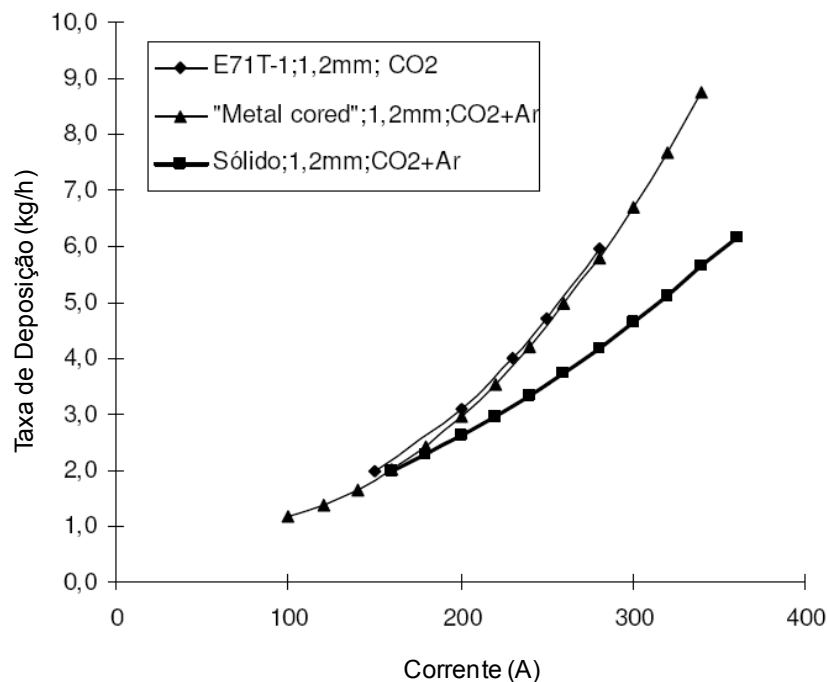


Figura 2.12- Taxa de Deposição para arames tubulares e arames sólidos em função do aumento da corrente (adaptado Widgery, 1994)

Na soldagem com arame sólido, toda a seção transversal do arame conduz corrente, mas para o arame tubular a corrente é conduzida pela fita metálica que envolve o fluxo resultando então numa maior densidade de corrente e numa maior ação do efeito Joule sobre a taxa de fusão, Fortes (2004). Além disso, o aumento da corrente de soldagem causa também, uma diminuição na quantidade de respingos, porosidades, e diâmetro da gota, bem como, na formação excessiva de nitretos e má aparência do cordão Widgery (1994).

b) Tensão

A tensão do arco pode afetar características do cordão de solda, como o perfil do arco, a penetração, a largura e as propriedades do cordão. Tensões maiores podem resultar num maior número de respingos e uma maior irregularidade do cordão. Para tensões menores ocorre um efeito menor da tensão superficial sobre a poça de fusão, pois a área de contato entre o arco e o metal de base é menor, resultando numa menor quantidade de calor irradiado do arco, originando então um cordão convexo de baixa penetração com superfície estreita Widgery (1994).

c) DBCP e Comprimento livre de eletrodo

Um aumento no comprimento do eletrodo tende a aumentar a temperatura do eletrodo devido ao efeito Joule (aumento da resistência elétrica). Sales (1998) relata que o aumento da DBCP pode provocar um aumento significativo do reforço do cordão de solda e diminuir a largura do cordão. Isto ocorre mais significativamente para soldagem com o CO₂ puro. Fixando-se a velocidade de alimentação do arame, qualquer aumento na distância bico de contato peça (DBCP) e conseqüentemente do comprimento livre do eletrodo, tem o efeito de reduzir a corrente.

d) Velocidade de Soldagem

Observa-se que a velocidade de soldagem para o arame tubular apresenta o mesmo comportamento que para o arame maciço influenciando na penetração de forma descontínua, ou seja, primeiro aumenta a penetração com o aumento da velocidade de soldagem e depois diminui com o aumento da velocidade de soldagem, sendo máxima para velocidades intermediárias Gomes (2006).

2.3 Proteção Gasosa

Esta seção descreve o efeito do gás de proteção durante a soldagem tanto para o processo Eletrodo Tubular como para o processo MIG/MAG. Nas soldagens realizadas com gás de proteção, o principal objetivo deste elemento é proteger a poça de fusão e a gota em transferência. Mas também pode exercer funções secundárias tais como, estabilizar o arco, influenciar na transferência metálica, na geometria do cordão, nas propriedades mecânicas e metalúrgicas da solda. A Figura 2.13 apresenta as principais funções do gás de proteção durante a soldagem.

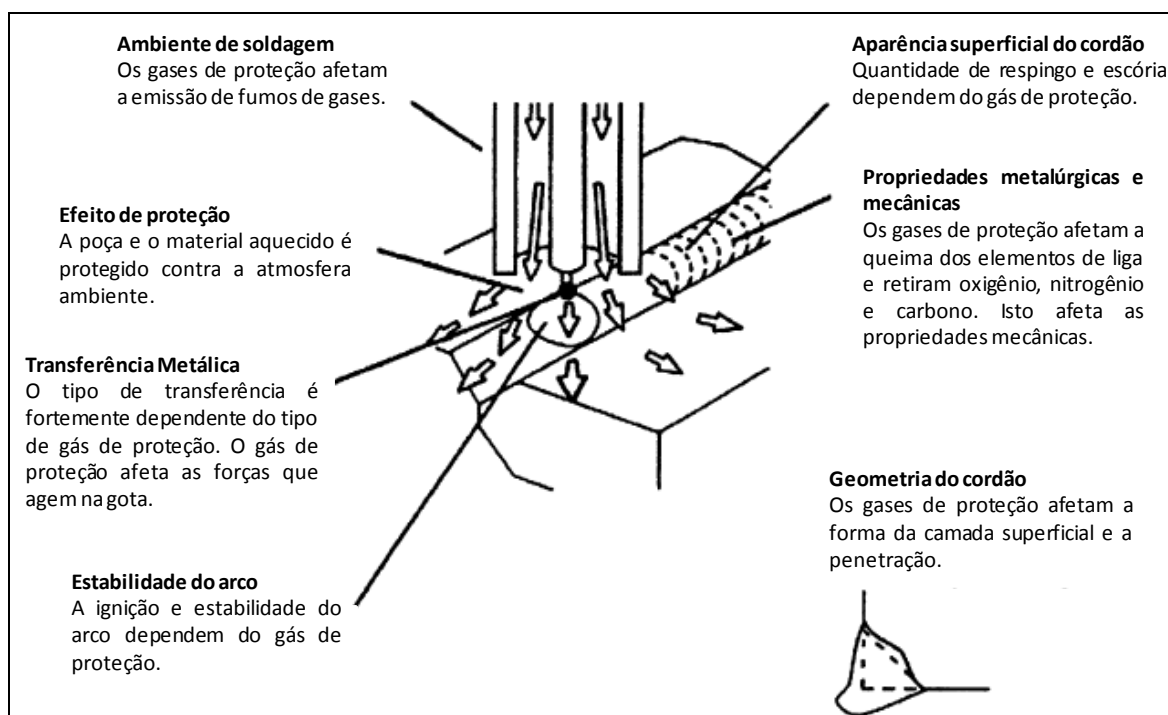


Figura 2.13- Caracterização das principais funções do gás de proteção
(adaptado Suban e Tusek, 2001)

Ainda para Scotti e Ponomarev (2008) não só o tipo do gás de proteção, mas também, a configuração do bocal, o tipo de junta e a vazão do gás, exercem influência na eficiência do gás de proteção em proteger a poça de fusão dos gases do meio ambiente. Desse modo para cumprir de forma adequada suas funções, os gases de proteção apresentam as seguintes propriedades básicas: o potencial de ionização; a condutividade térmica; o potencial de oxidação e a densidade do gás. O potencial de ionização refere-se à capacidade do gás de proteção em ionizar (energia para retirar elétrons) e desse modo conduzir eletricidade propiciando a abertura e a estabilidade do arco. Assim sendo gases com menor potencial de ionização apresentam uma maior facilidade de abertura do arco e estabilidade do mesmo. Embora existam outros fatores envolvidos na manutenção do arco, são requeridos certos níveis de energia para a ionização dos gases o que influencia diretamente nos níveis de tensão empregados.

A condutividade térmica refere-se à capacidade do gás de proteção em conduzir calor, tal propriedade afeta diretamente à fusão do eletrodo e também à tensão do arco. Quanto maior a condutividade térmica do gás de proteção, maior é a tensão necessária para manutenção do arco.

O poder de oxidação dos gases de proteção afeta o desempenho da soldagem e as propriedades do cordão resultante, pois alteram a tensão superficial entre o metal fundido e o ambiente, resultando na molhabilidade. Para Scotti e Ponomarev (2008)

gases com alto poder de oxidação podem oxidar os materiais e elementos da solda. Gases com maior poder de oxidação, 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. Gases inertes como argônio e hélio, por exemplo, não tem qualquer influência química no metal depositado. O gás de proteção pode afetar a resistência do cordão de solda, um incremento na oxidação natural dos gases pode ser responsável pela diminuição da resistência do cordão. A adição de gases reativos como o oxigênio e o dióxido de carbono aumentam a estabilidade do arco e afetam o tipo de transferência metálica obtida.

A densidade do gás de proteção é uma importante propriedade, pois influenciam a eficiência do gás de proteção, quando o gás é mais pesado do que o ar, como o oxigênio e o dióxido de carbono, protegem melhor a poça de fusão.

Dessa forma devido às variáveis envolvidas qualquer mudança no gás de proteção é capaz de causar uma série de alterações no comportamento das soldagens. Para Gimenes (2005) os gases de proteção segundo sua natureza e composição influenciam nas características do arco, no tipo de transferência de metal do eletrodo à peça, na velocidade de soldagem, nas perdas por respingos, na penetração e no formato do cordão. Além disto, o gás de proteção também influencia nas perdas de elementos químicos, na temperatura da poça de fusão, na sensibilidade a fissuração e porosidade, bem como na facilidade da execução da soldagem em diversas posições. Ainda segundo este autor os gases inertes apresentam vantagens metalúrgicas, enquanto o dióxido de carbono (CO_2) puro apresenta vantagens econômicas.

O CO_2 puro é utilizado como gás de proteção durante a soldagem tanto com arames tubulares como com arames maciços, este gás pode apresentar como principais vantagens o baixo custo e a alta penetração. Conforme afirma Dutra e Baixo (1990) um núcleo de condução do arco de pequeno diâmetro aumenta a perturbação da superfície da poça metálica fundida, prejudicando a estabilidade do arco e gerando a formação excessiva de respingos, também produz superfícies de cordões mais oxidadas e irregulares

A utilização do gás de proteção CO_2 puro no processo MIG/MAG não possibilita a transferência metálica do tipo goticular, porém para o processo Eletrodo Tubular isso é possível devido às características do fluxo. Mas para o arame tubular, este gás quando aquecido a altas temperaturas pelo arco elétrico é dissociado formando o monóxido de carbono (CO) e o oxigênio. Segundo Gomes (2006) o oxigênio oriundo desta dissociação reage com os elementos do metal fundido, promovendo a oxidação do

mesmo. E desse modo materiais desoxidantes são adicionados ao fluxo do eletrodo para compensar os efeitos oxidantes da proteção gasosa com CO₂ puro.

O uso da mistura de gases na soldagem pode combinar as vantagens separadas de dois ou mais gases e permitir melhoras na eficiência da proteção gasosa. A adição de argônio ao CO₂ aumenta a estabilidade do arco e reduz a geração de respingos e melhora o aspecto superficial do cordão. Com o aumento de CO₂, a maior fluidez da poça permite velocidades de soldagem mais altas. Misturas com maiores níveis de dióxido de carbono podem ser usadas para transferência por curto-circuito, comumente argônio mais 20 ou 25% de CO₂. Para Ushio et al (1995) na adição de até 10% de CO₂ a transferência globular ocorre normalmente porém, acima desta quantidade a transferência passa a ser globular repulsiva, isso para arame maciço.

Para o arame tubular o aumento do gás inerte (argônio) aumenta a eficiência de transferência dos desoxidantes que estão no fluxo do arame. Por outro lado, a penetração é reduzida. O argônio promove uma diminuição da oxidação do fluxo, quando comparado à proteção com 100% CO₂. Para Fortes (2004) algumas das vantagens apresentadas pela mudança do gás 100%CO₂ para uma mistura de argônio e CO₂ são verificadas através da obtenção de melhor acabamento e perfil do cordão de solda, minimização dos respingos e maiores velocidades de soldagem.

Apesar da transferência de metal para o arame tubular ser um pouco diferente daquela para arame sólido e variar conforme o tipo de arame tubular, o gás CO₂ como proteção para o processo Eletrodo Tubular reage de maneira semelhante para arame sólido; o dióxido de carbono dá boa cobertura e proteção, porém aumenta os respingos e exige tensões mais altas que para a mistura gasosa Ar – CO₂.

2.4 Geração de Fumos

O estudo e a análise da geração de fumos possuem um papel importante no que se refere à soldagem, uma vez que normas rígidas de Segurança do Trabalho determinam o tempo e o limite de exposição do soldador aos fumos. Desse modo, minimizar a taxa de geração de fumos e dos riscos à saúde do trabalhador é sempre uma preocupação, uma vez que este elemento é o responsável pelo alto índice de doenças respiratórias e doenças que afetam o pulmão entre os soldadores segundo Antonini e Murthy (1998). Para Castner (1995) é possível minimizar a quantidade de fumos gerados, aos quais os soldadores estão expostos, avaliando-se uma série de fatores operacionais, tais como seleção adequada de parâmetros de soldagem,

eficiência do processo de soldagem de acordo com sua aplicação, utilização da ventilação mais adequada para o ambiente de soldagem, utilização do material de adição adequado e os gases de proteção. Entretanto, a procura por otimização dos processos de soldagem no ambiente industrial, tem tido como objetivo principal elevar os índices de produtividade, aliados à redução de custos. Nesta perspectiva, encontram-se processos de alta produtividade (alta produção a baixo custo), tais como o processo MIG/MAG, que tem dominado soberanamente o mundo da união dos metais por soldagem. Porém, o processo Eletrodo Tubular tem se despontado como uma alternativa para suprir as deficiências do processo MIG/MAG, garantindo a mesma eficiência no que tange a produtividade. Mas pouco se tem demonstrado da relação entre esta produtividade obtida com a geração de fumos destes processos/técnicas.

Fumos são aerodispersóides gerados termicamente, constituídos por partículas sólidas formadas por condensação de vapores, geralmente após volatilização de substância sólida fundida. No caso de fumos metálicos, freqüentemente o seu processo de geração é acompanhado de reação de oxidação do metal, de modo que as partículas presentes são de óxido do metal, os quais são mais solúveis nos fluidos corpóreos que o metal, definição conforme NBR 12543.

Gray, Hewitt e Dare (1982) em seus estudos realizados concluíram que a formação de fumos pode ser originada por sete diferentes mecanismos tais como, evaporação de fumos da ponta do eletrodo (gota); evaporação de fumos do eletrodo no cátodo ou no ânodo; evaporação de fumos durante o destacamento da gota; evaporação de fumos de pequenas gotas que são repelidas, dos respingos, evaporação de fumos da poça de fusão e do cordão de solda ainda fundido conforme Figura 2.14. Mas para Dennis et al (2001) são apenas três parcelas que influem significativamente na geração de fumos para o processo MIG/MAG sendo elas, a evaporação da ponta do eletrodo durante a formação das gotas, a poça de fusão e os respingos.

No processo Eletrodo Tubular o fluxo exerce grande influência sobre o princípio de formação dos fumos, desse modo para Hewitt and Hirst (1993) os mecanismos de formação dos fumos para este processo consiste das seguintes etapas: vaporização do fluxo seguida de condensação e resultando na oxidação dos componentes do fluxo, oxidação aumenta a vaporização, outro fator que contribui para a formação dos fumos é ejeção de micropartículas por meio da explosão de bolhas formadas no fluxo e também os respingos formados. Para estes autores a poça de fusão para o arame tubular não apresenta uma contribuição significativa na formação dos fumos devido à escória que se forma sobre a poça contribuindo para a formação do cordão. Segundo Jenkins et al (2000), para o processo GMAW o fumo é

predominantemente oriundo da evaporação da ponta do eletrodo, isso ocorrendo porque a temperatura nessa região é maior do que na poça de fusão, devido a alta densidade de calor.

De acordo com Quimby e Ulrich (1999), a realização de estudos sobre a taxa de geração de fumos (TGF, referenciada em inglês como FGR - Fume Generation Rate) no processo GMAW é complexa e influenciada por uma série de variáveis, dificultando a realização de uma análise comparativa entre os resultados disponíveis, inclusive de propor modelos teóricos que expliquem de forma exata o aumento da TGF. Dentre as variáveis que influenciam diretamente a taxa de geração de fumos pode se citar a corrente, a tensão, o tipo de gás de proteção e modo de transferência metálica.

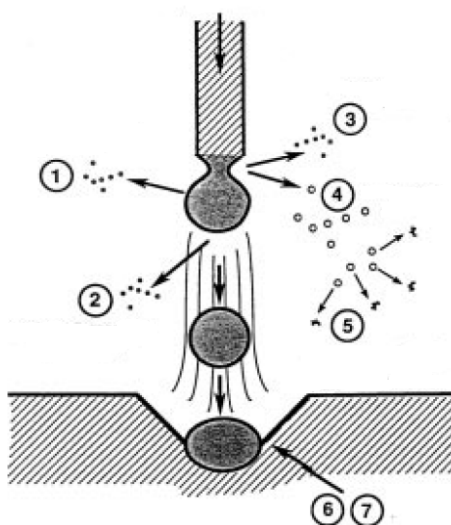


Figura 2.14- Mecanismos de formação fumos onde, 1- Evaporação de fumos da ponta do eletrodo (gota), 2- Evaporação de fumos do eletrodo na conexão catódica ou anódica; 3- Evaporação de fumos durante o destacamento da gota; 4- Evaporação de fumos de pequenas gotas que são repelidas, 5- Evaporação de fumos dos respingos, 6- Evaporação de fumos da poça de fusão e 7- Evaporação de fumos do cordão de solda ainda fundido (adaptado Hewitt and Hirst, 1993)

Para alguns estudiosos como Castner (1995) e Yamame (2007) um aumento da corrente atua diretamente na elevação da taxa de geração de fumos isso, como consequência de um aumento da temperatura do arco, uma vez que proporciona uma maior vaporização de metais presentes no arco, outro fator apontado pelos autores para uma maior geração de fumos é que o aumento da corrente promove um aumento da taxa de fusão do eletrodo por unidade de tempo (resultando numa quantidade maior de gotas que contribuem para uma maior evaporação). É importante frisar que para outros pesquisadores, como, por exemplo, Lancaster (1986), o aumento da corrente não

aumenta a temperatura do arco, ficando a segunda explicação mais plausível. O aumento progressivo da corrente conseqüentemente causas variações no modo de transferência metálica que é outro fator que influi significativamente na elevação da taxa de geração de fumos.

A tensão é outro parâmetro capaz de alterar a taxa de fumos, segundo Castner (1995) e Yamame (2007). Segundo estes autores, o aumento da tensão aumenta a taxa de fumos, pois ocorre uma maior liberação de vapores a altas temperaturas do arco para atmosfera, pois com o aumento da tensão há um aumento da velocidade do fluxo de plasma causando maiores turbulências e conseqüentemente uma maior geração de fumos.

Para Jenkins (2000), as transferências por curto-circuito e spray produzem menores níveis de fumos do que a transferência globular, em função das gotas menores (curto-circuito e spray) possuírem uma menor área superficial e, portanto, absorverem uma menor quantidade de calor do que gotas grandes (globular). Porém assim como a corrente variações na tensão resultam em variações no modo de transferência, para Gray et al (1982) avaliando o efeito da tensão para o processo MIG/MAG para um aço inoxidável 316, com uma corrente constante obtiveram como resultado a Figura 2.15 que representa a geração de fumos para diferentes tensões e conseqüentemente para diferentes modos de transferência metálica.

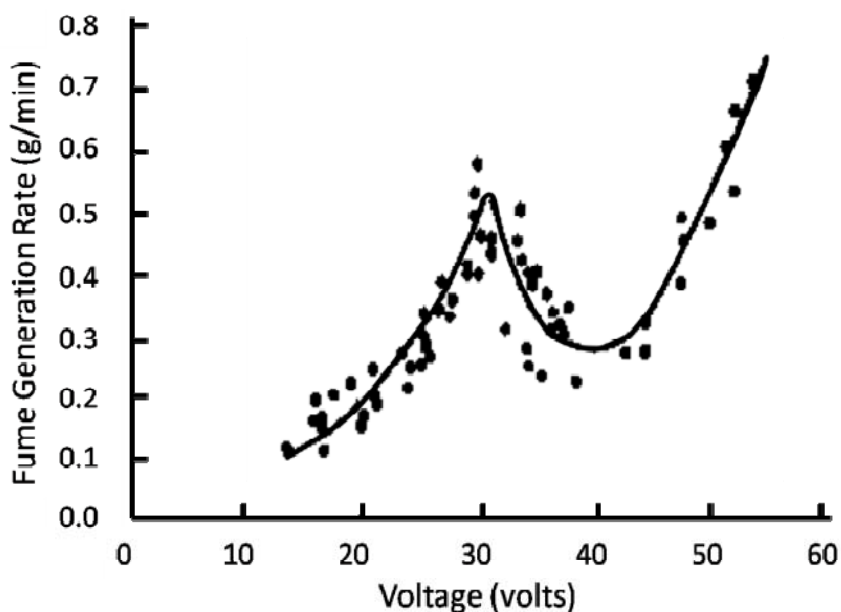


Figura 2.15- TGF (Fume generation rate) para diferentes modos de transferência metálica para um aço inoxidável, destacando-se o aumento da tensão no processo GMAW na mudança do modo de transferência (adaptado Gray et al, 1982)

Ainda segundo Gray et al (1982) nos valores de baixa tensão (12-22 V) ocorrem curto-circuito no qual os valores de tensão acontecem de forma intermitente com picos de baixa tensão onde há uma baixa geração de fumos e de respingos, e picos de altas tensões onde ocorre um aumento na taxa de fumos e dos respingos. O aumento na taxa de geração de fumos com o aumento da tensão é atribuído ao aumento na taxa de respingos gerados. O ponto máximo para geração de fumos para o modo de transferência globular é em torno da tensão de 30 V, a formação de gotas grandes contribuem para uma maior formação de fumos. A partir deste ponto há uma transição para o modo de transferência spray onde apesar do aumento da tensão há uma redução da quantidade de fumos formados em função da formação de gotas menores e também esse tipo de transferência metálica ocorre de forma menos turbulenta. Estes autores então concluíram que o modo de transferência metálica, a composição do gás de proteção e a tensão influem severamente na taxa de geração de fumos e ainda observaram que a taxa de geração de fumos é praticamente independente da corrente se a distância bico contato peça for mantida constante

Para Deam et al (2007) a formação de partículas de fumo envolve mecanismos que necessitam de grande quantidade de energia para acontecer como por exemplo a evaporação, o transporte de vapor metálico (convecção e difusão), condensação e oxidação. Desse modo os autores mediram o calor imposto e compararam com a taxa de geração de fumos para diferentes modos de transferência metálica conforme Tabela 2.1, observa-se por meio desta que para a formação de fumos a transferência globular, requer um nível maior de energia do que os outros tipos de transferência e também gera um nível maior de fumos.

Tabela 2.1- Efeito do calor imposto sobre a taxa de geração de fumos, valores avaliados por quilograma de arame fundido (Deam et al 1997)

Modo de Transferência	Calor Imposto (MJ/kg)	TGF (g/kg)
Curto Circuito	5,1	3,0
Globular	10,3	13,0
Spray	7,1	4,0

A composição do gás de proteção também afeta a geração de fumos para o processo MIG/MAG, como ilustra a Figura 2.16. Procedimentos de soldagem que utilizem como gás de proteção 100% de CO₂ produz mais fumos e respingos do que quando se utilizam misturas de argônio, Castner (1995) em função da diferença do potencial de oxidação dos gases. Também se verifica que o aumento do teor de CO₂ no

gás de proteção resulta num aumento da condutividade térmica do gás, conforme Starling e Modenesi (2008) e então para se manter o mesmo nível de corrente requer uma faixa de tensão de trabalho maior do que quando se utiliza misturas de argônio.

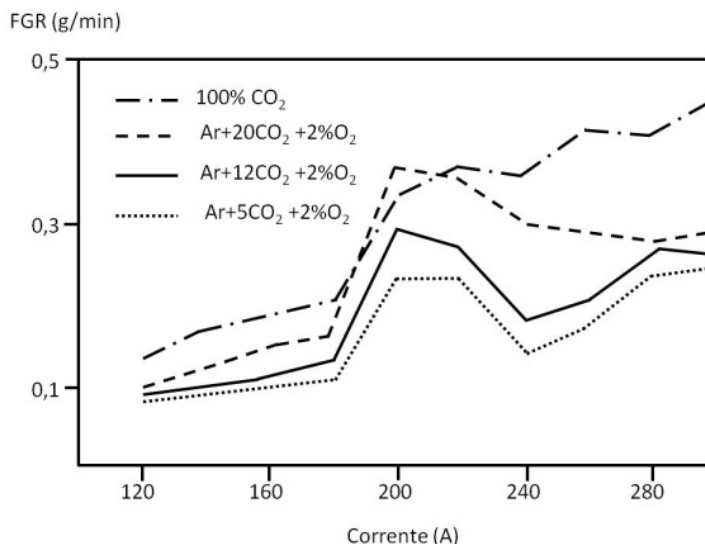


Figura 2.16- Taxa de geração de fumo em função do gás de proteção para o processo MIG/MAG (adaptado Castner 1995)

Todas estas análises de parâmetros que influenciam a geração de fumos referem-se ao processo MIG/MAG, sobre o qual se possui uma vasta literatura. Já para o processo Eletrodo Tubular, as fontes de referência são mais restritas, mas é um fato que este processo apresenta uma taxa de geração de fumos maior que no primeiro processo citado conforme afirma os autores Quimby e Ulrich (199) e Yamame (2007). Segundo Rosado et al (2009), arames tubulares produzem uma taxa maior de fumos para uma mesma intensidade de corrente do que arames do tipo “metal-cored”, uma vez que o efeito resistivo no arame tubular é maior do que no “metal-cored”, resultando num maior aquecimento e evaporação do fluxo. Por outro lado, o processo Eletrodo Tubular apresenta ótimas características operacionais e uma maior versatilidade para utilização em campo. A composição química do fluxo permite alterações que influencia diretamente nas características geométricas do cordão e nas propriedades mecânicas do mesmo.

Kobayashi et al (1985) num estudo realizado com o arame tubular e proteção gasosa de 100%CO₂ para averiguar o efeito dos parâmetros de soldagem sobre a taxa de geração de fumos, concluíram que a TGF aumenta com a elevação da corrente e da tensão e diminui com a utilização de gás de proteção a base de misturas de argônio. Já Hewitt e Hirst (1991) também concluíram que o processo Eletrodo Tubular gera uma

maior quantidade de fumos que o processo MIG/MAG, porém os fumos metálicos gerados contêm menos metal pesado, provavelmente isso ocorra porque a escória absorva parte dos vapores metálicos gerados.

O que se observa é que a geração de fumos é influenciada por uma série de fatores que atuam simultaneamente na formação de fumos e que em determinadas situações o efeito de uma variável se sobrepõe sobre a ação das outras variáveis, tornando-se então a responsável pela geração de fumos. Pode-se supor que, de certa forma, todos os parâmetros que são capazes de alterar a taxa de fumos influenciam diretamente na fusão do eletrodo, ou no modo de transferência metálica.

2.5 Geração de Respingos

A geração de respingos é considerada um fator influente tanto na qualidade quanto na produtividade final da solda (DANTAS E COSTA, 2004). A geração de respingos apresenta como inconvenientes, além do desperdício de material fundido que não vira solda, o custo com mão-de-obra para a remoção dos mesmos, quando permanecem aderidos à peça soldada, e também a dificuldade operacional pela adesão dos respingos à parede do bocal, o que dificulta a passagem do gás de proteção comprometendo a qualidade do cordão. Desse modo, a geração de respingos torna-se um componente do indicador de produtividade para cada processo. Por isso a importância em realizar uma análise comparativa para os dois processos na geração de respingos buscando quantificar o nível de respingos gerados tanto pelo processo MIG/MAG quanto pelo processo Eletrodo Tubular. Desse modo os respingos podem ser caracterizados como material fundido que não compõem o cordão de solda devido a instabilidades do processo, sendo uma variável dependente de uma série de fatores que governam o processo.

Entretanto, a geração de respingo depende do processo de soldagem. Por outro lado, é influenciada por vários parâmetros que compõem o processo, dentro os quais se pode citar a composição do gás de proteção, as características do metal de adição e de base, bem como o tipo de transferência metálica. Para Hashimoto e Morimoto (2006), o modo de transferência metálica atua significativamente no modo de formação do respingo, sendo que no modo de curto-circuito ocorre a formação do respingo logo após o destacamento da gota. Ainda para estes autores, a quantidade do respingo gerado pode ser minimizada pela composição do gás de proteção, sendo que 100% CO₂ tende a gerar uma quantidade maior do que misturas de Ar-CO₂.

Chen et al (1996) resume o mecanismo de formação dos respingos em quatro pontos principais, dentre os quais pode-se destacar:

- Explosão elétrica devido à força pinch que reduz a seção transversal da gota durante o pico de corrente do curto circuito aumentando a densidade de corrente e promovendo a evaporação e explosão do metal fundido;
- Explosões devido ao gás de proteção, no qual o carbono do metal fundido reage com o oxigênio em altas temperaturas resultando em explosões do gás monóxido de carbono;
- O impacto do gás de proteção superaquecido na poça de metal fundido devido a reignição do arco após o curto-circuito;
- E formação de respingos no momento do curto circuito onde a gota se transfere para a poça de fusão.

Hashimoto e Morimoto (2006) descrevem os mesmos mecanismos para formação dos respingos apresentados pelos outros autores, representando-os por meio da Figura 2.17. Para estes autores a formação do respingo ocorre também por quatro formas sendo, que o Tipo I ocorre durante a reignição do arco gerando uma grande quantidade de respingos de dimensões medianas, já o Tipo II ocorre devido à emissão de gases oriundos da gota e da poça de fusão resultando em finas partículas de respingo. O Tipo III é formado durante o curto circuito pelo contato do eletrodo com a poça de fusão, e o respingo tipo IV é gerado pela ação de forças eletromagnéticas sobre a transferência da gota.

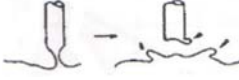
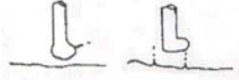
Ainda para este autor o fator primário que governa a geração de respingos varia de acordo com o modo de transferência metálica, para tanto na Figura 2.15 o autor estabelece as regiões de corrente e tensão para cada tipo de transferência metálica com gás de proteção 100% CO₂ para um arame maciço.

Ainda referente à Figura 2.17 o autor define que o princípio de geração de respingo para a transferência por curto circuito é definido pelo tipo I, e para a transferência globular é do tipo IV conforme Tabela 2.2.

Para Kang (2003) apud Miller (1995) os respingos provavelmente são gerados, quando há irregularidades na relação tempo de curto-circuito e tempo de arco. Um arco estável promove uma baixa geração de respingos e uma transferência regular enquanto que um arco instável causa uma alta taxa de respingos. A transferência por curto-circuito para o processo MIG/MAG é caracterizada por meio do contato regular entre o eletrodo e a poça de fusão, durante a abertura do arco ocorre o crescimento da gota, e durante o contato ocorre a transferência de metal fundido na ponta do eletrodo para a

poça. Então este tipo de transferência metálica é caracterizada por variáveis como tempo de circuito-curto, tempo de arco ou a frequência de curto-circuito.

Tabela 2.2- Fatores primários para geração de respingo com gás de proteção 100%CO₂ (adaptado Hashimoto e Morimoto, 2006)

Tipo	Modo de Geração do Respingo	Fator primário da geração de respingos
I		Reignição do Arco
II		Emissão do gás de proteção
III		Durante o curto circuito
IV		Forças Eletromagnéticas

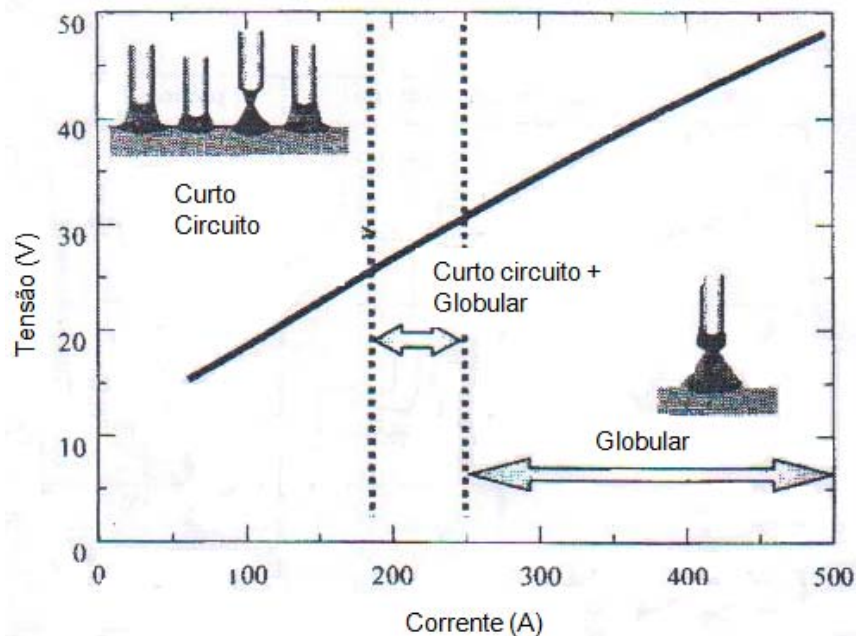


Figura 2.17- Condições de corrente e tensão para diferentes modos de transferência metálica, para arame maciço com proteção gasosa 100% CO₂ (adaptado Hashimoto e Morimoto, 2006)

Desse modo a estabilidade do arco e da transferência metálica influencia diretamente na geração de respingos. Scotti e Rodrigues (2002) citam três causas para a instabilidade do arco:

➤ Curto-circuitos com variações abruptas de corrente gerando contato do eletrodo com a poça de fusão em um período muito curto de tempo e sem nenhuma transferência de metal (curto-circuito incidental);

➤ Falha na reignição de arco;

➤ Variações na taxa de alimentação.

Dessa forma parâmetros como corrente e tensão que influenciam diretamente no modo de transferência metálica também influenciam na geração de respingos. Desse modo existem pontos ótimos de corrente e tensão para geração de níveis mais baixos de respingos conforme afirma Kang e Rhee (2001).

Ainda para Hashimoto e Morimoto (2006) e também para Kang et al (2005) maiores teores de CO₂ no gás de proteção resultam numa maior concentração de respingos devido as características do arco formado, ou seja, um arco de pequeno diâmetro que aumenta a perturbação na superfície da poça metálica, prejudicando a estabilidade do arco e gerando a formação excessiva de respingos. Por outro lado, misturas com maiores teores de argônio contribuem para uma menor geração de respingos.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA EXPERIMENTAL, EQUIPAMENTOS E INSUMOS

Neste capítulo são apresentadas as metodologias para a realização dos ensaios propostos, bem como para a seleção de parâmetros visando resultados quantificáveis e comparáveis. Também são descritos os equipamentos, os acessórios e os materiais de consumo empregados com as respectivas especificações, bem como a montagem geral das bancadas experimentais para a realização de todos os ensaios.

3.1 Metodologia

Este trabalho está propondo uma metodologia para a comparação entre os processos MIG/MAG e Eletrodo Tubular. Entretanto, como o desempenho destes processos depende significativamente das características dos consumíveis (diâmetro, composição química, etc.), na verdade este trabalho está comparando na avaliação da metodologia dois tipos de arames diferentes, sob influência de dois gases de proteção e uma mesma faixa operacional de corrente. Mas como os consumíveis que se estará avaliando são provavelmente os mais usados por esses processos, muitas vezes estarão se referindo à comparação entre processos. De qualquer forma, o mais importante resultado do trabalho deverá ser a metodologia proposta e avaliada, e não os resultados em si, mesmo sem desvalorizar os resultados sobre os consumíveis em si.

Assim, o desenvolvimento de uma metodologia diferenciada capaz de sistematizar a análise comparativa entre o processo MIG/MAG e o processo Eletrodo Tubular se fez necessária para a geração de parâmetros que permitam uma comparação justa entre os processos. Para tal, cada processo (ou produto) sob

comparação deve trabalhar em condições diferenciadas e, preferencialmente, otimizadas, como eles são individualmente usados na prática (atendendo especificações e recomendações do fabricante em relação às suas variáveis - tensão, corrente, DBCP, gás de proteção e tipo de arame). É importante frisar que cada produto apresenta diferenças significativas no desempenho operacional, principalmente no que tange a taxa de fusão e modo de transferência metálica, em função da regulagem de seus parâmetros. Por isto, a metodologia vai procurar outras formas de comparação que não seja a de se soldar os dois processos/produtos com os mesmos parâmetros.

Além disto, para realizar uma análise comparativa das vantagens e desvantagens da utilização do processo Eletrodo Tubular em relação ao processo MIG/MAG, a metodologia deve ter uma maior abrangência em relação aos aspectos práticos, tais como, a capacidade de fusão e deposição, a geração de respingos (no que tange a tamanho e distribuição por alcance), geração de fumos, fator econômico, propriedades mecânicas e facilidade operacional. Comparar sob a óptica de apenas um ou outro aspecto operacional não levaria ao alcance pleno da proposta, pois poderia deixar a comparação tendenciosa.

No contexto das ressalvas acima, a comparação do desempenho entre os dois processos foi fundamentada por duas premissas básicas:

- a) As comparações entre os processos devem ser feitas na mesma corrente, mas varrendo uma ampla faixa de trabalho que atenda o recomendado para cada arame;
- b) O volume de cordão para cada corrente de comparação deve ser o mesmo, independente do processo (mesmo volume de cordão por unidade de comprimento).

Como a taxa de deposição de cada processo para cada combinação arame-gás de proteção é diferente, a adoção dessas premissas pode resultar em energias de soldagem dispares, já que a correção para se obter um mesmo volume de material depositado por unidade de comprimento para diferentes taxas de deposição, numa mesma corrente, é realizada pela velocidade de soldagem. Por outro lado, a comparação adquire características mais práticas, pois numa fabricação soldada o que se quer é o preenchimento da junta, desde que a energia imposta atenda os requisitos metalúrgicos do material e que se atinjam as características operacionais referentes à geometria do cordão.

Mas a varredura em si da corrente satisfaz de forma interpolativa uma análise do efeito de energia de soldagem. Além disto, deve-se levar em conta de que do ponto de vista metalúrgico o importante não é a energia de soldagem e sim o calor imposto, que é uma variável difícil de ser estimada com precisão, para ser adotada como parâmetro de

comparação. Ainda assim, mantendo-se constante a corrente e a velocidade de soldagem para as diferentes combinações arame-gás de proteção, a tensão para cada caso seria diferente, impossibilitando obter a mesma energia de soldagem.

Para a definição das condições otimizadas de soldagem para cada combinação arame-gás de proteção foi adotada a seguinte metodologia:

- a) Buscou-se definir a faixa operacional de corrente, a DBCP, a vazão de gás a ser trabalhada atendendo à recomendação dos fabricantes para cada conjunto arame-gás de proteção;
- b) Na seqüência, procurou-se definir as velocidades de alimentação que resultassem nas correntes desejadas. Para isso, adotou-se inicialmente valores de referência conforme literatura. Realizaram-se soldagens com estes parâmetros para averiguação da correspondência entre as velocidades de alimentação com as correntes. Caso a velocidade de alimentação não correspondesse à corrente desejada, realizava-se uma varredura de regulagem da velocidade de alimentação até se obter o valor correspondente a corrente desejada.
- c) Realizou-se uma varredura nos valores de tensão para cada valor de corrente, a fim de se determinar uma faixa de tensão de regulagem adequada para cada conjunto arame-gás de proteção;
- d) Para a definição do volume de cordão adequado para cada corrente, definiu-se arbitrariamente (mas resguardando condições vistas na prática) um cordão padrão, ou seja, um volume de cordão adequado para preencher uma junta. Determinou-se, assim, para todas as combinações corrente-aramé-gás de proteção, um valor de taxa de deposição por unidade de comprimento;
- e) Uma vez fixada à taxa deposição por unidade de comprimento, buscou-se as velocidades de soldagem para cada nível de corrente que resultassem em tal taxa de deposição;
- f) E, por fim, determinaram-se o conjunto de parâmetros adequados para se fazer comparações entre cada combinação.

Uma vez determinado os parâmetros de soldagem para cada condição arame-gás de proteção, o passo metodológico seguinte é a determinação das respostas que serão usadas como meio de comparação entre os processos. Para tal foram utilizados como meios de resposta as seguintes análises:

- ✓ Taxa de fusão, taxa de deposição e rendimento de deposição;
- ✓ Dimensão e do alcance dos respingos gerados;

- ✓ Geração de fumos;
- ✓ Custo por unidade de comprimento de solda;

A taxa de fusão e a taxa de deposição permitem uma análise operacional de cada processo no que tange ao consumo e a eficiência de deposição. Desse modo é possível avaliar a quantidade de material fundido em função do tempo de soldagem para ambos os processos, bem como analisar a capacidade de deposição do material fundido de cada processo. Para a definição da taxa de fusão é necessário conhecer o valor da densidade (ρ) para cada tipo de arame, a fim de obter-se um valor mais próximo possível do real. Para tal, cortou-se dois metros de arame (maciço ou tubular) e por meio de um micrômetro realizou-se medições de diâmetro ao longo desse comprimento, obtendo um diâmetro médio. Assim, calculou-se o volume dessa quantidade de arame e, na sequência, pesou-se essa massa de arame numa balança de precisão, com resolução de 0,01g. Conhecido, a massa e o volume de arame foi possível calcular a densidade do arame maciço.

Deve-se chamar atenção de que a determinação dos respingos não deve ser confundida com o rendimento de deposição, como muitos usuários o fazem (no rendimento de deposição está incluído perda de massa por escória e evaporação) que é mais acentuada para o arame tubular do que para o maciço. Como o respingo tem, além do caráter econômico (perda de massa), o caráter operacional (trabalho para remoção dos respingos), torna-se interessante comparar os processos quanto à massa de respingo gerado bem como avaliar o alcance dos respingos. Ao determinar o alcance, a metodologia proposta procurou separar as distâncias percorridas por uma distribuição granulométrica.

O ensaio para análise de fumos permite a quantificação dos fumos gerados para ambos os processos. Desse modo é possível avaliar a geração de fumos sob diferentes ópticas, como da geração de fumos por massa de arame consumido ou a da geração de fumos sob a perspectiva de exposição do soldador (maior exposição do soldador à taxa de fumos em função do tempo de soldagem). Conhecer a capacidade de geração de fumos de um processo e outro, bem como a natureza das características que influenciam a geração de fumos, permitem adoção de parâmetros operacionais que minimizem a quantidade de fumos gerados. Do ponto de vista prático, nem sempre o processo que é capaz de gerar uma maior quantidade de fumos é o mais nocivo à saúde dos trabalhadores. Por isso, para realizar uma análise neste âmbito seria necessária uma análise química dos fumos gerados tanto para o processo MIG/MAG quanto para o processo Eletrodo Tubular.

Principalmente por adotar todos os cuidados metodológicos para aumentar a abrangência dos resultados, não foi possível no presente trabalho cobrir todas as variáveis envolvidas nos dois processos. Por isto, o trabalho limitou-se a avaliar uma bitola de arame, tanto para o arame tubular quanto para o arame maciço, sobre dois tipos de gases de proteção, apenas na posição plana, para um tipo de chanfro e na faixa de corrente nominal correspondente à bitola escolhida. Uma variável essencial para a realização da análise comparativa entre os processos seria a avaliação das propriedades mecânicas dos processos, uma vez que na prática esta é considerada por muitos a principal vantagem do o arame tubular sobre o arame maciço. Porém, como já mencionado, devido à falta de tempo hábil não foi possível realizar esta análise. Também não foi avaliado o efeito da indutância, sobre o desempenho das combinações arame-gás de proteção que poderia otimizar algumas condições de soldagem. Esses fatores devem ser levados em consideração na aplicação da metodologia proposta de forma mais completa.

3.2 Bancada Experimental Geral

A bancada experimental geral foi elaborada com o objetivo de realizar as soldagens necessárias para execução dos ensaios determinados como padrão (ensaio de análise da taxa de fusão, deposição e do rendimento de deposição, ensaio de análise da geração de respingo e ensaio de geração de fumos). A denominação de “bancada experimental geral” representa os equipamentos que são comuns em todos os tipos de ensaios realizados, uma vez que para a realização dos ensaios propostos por este trabalho a bancada experimental em si passa por variações para atender especificidade do ensaio. Assim sendo, é descrita a bancada experimental geral e, na seqüência, os equipamentos que são acrescentados a esta para compor as variações da bancada em função do tipo de ensaio.

A bancada experimental geral é constituída basicamente por uma fonte de potência, trabalhando no modo de tensão constante, e um cabeçote de alimentação de arame adequado para soldagens com o processo MIG/MAG e com o processo Eletrodo Tubular. Vinculado ao alimentador de arame há uma tocha automática que está conectada a uma unidade robótica, meio utilizada para a realização das soldagens. Constitui ainda a bancada experimental geral um suporte para as chapas de teste e o sistema de aquisição dos sinais elétricos. A Figura 3.1 apresenta uma visão geral da bancada experimental geral com a identificação dos principais equipamentos e

acessórios. Nos itens seguintes são descritos com mais detalhes os principais componentes da bancada experimental geral.



Figura 3.1 – Bancada experimental geral, onde, 1-Unidade Robótica; 2- Fonte de potência para soldagem; 3- Cabeçote alimentador; 4- Mesa; 5- Tocha; 6- Suporte para chapas de teste; 7- Controle da Unidade Robótica; 8- Cilindro dos gases de proteção; 9- Sistema de refrigeração da tocha; 10- Sistema de aquisição de sinais elétricos

3.2.1 Fonte de Potência para Soldagem

Para a realização dos ensaios com os dois processos, foi utilizada uma fonte inversora, modelo Power Wave 450 /STT da Lincoln, a qual permite a realização de uma série de processos de soldagem, tais como, eletrodo revestido, MIG/MAG, Eletrodo Tubular entre outros. Todos os modos de seleção de programas da máquina encontram-se disponíveis no visor do cabeçote, fazendo com que a operação de seleção do processo ocorra de forma simples pelo usuário. Para a realização deste trabalho, foi selecionado o programa de número cinco (MIG/MAG convencional) com proteção gasosa e com polaridade positiva. Para este programa, que faz a fonte operar no modo de tensão constante, se regula a tensão, a velocidade de alimentação e a indutância do equipamento (que foi deixado no modo “off” neste trabalho).

3.2.2 Sistema de alimentação do arame eletrodo

O sistema de alimentação desse equipamento, também conhecido como cabeçote, é composto de um módulo no qual estão localizados os rolos alimentadores, os conectores para os cabos da tocha e as conexões de gás (Figura 3.2). Também integram esse sistema o visor para a seleção dos programas de soldagem, os comandos para regulagem dos parâmetros tensão e velocidade de alimentação do arame e a indicação média dos parâmetros de regulagem.

O cabeçote apresenta um sistema com quatro roletes que estão dispostos dois a dois longitudinalmente, onde o arame é encaixado sobre os dois roletes inferiores e, em seguida, encaixam-se os dois roletes superiores sobre ele, promovendo uma pressão sobre o mesmo. Ainda no cabeçote há um dispositivo para regulagem da pressão realizada pelos roletes no arame. Uma vez realizado o encaixe do arame entre os roletes e a regulagem de sua pressão, realiza-se automaticamente no próprio cabeçote o avanço do arame ao longo da tocha.

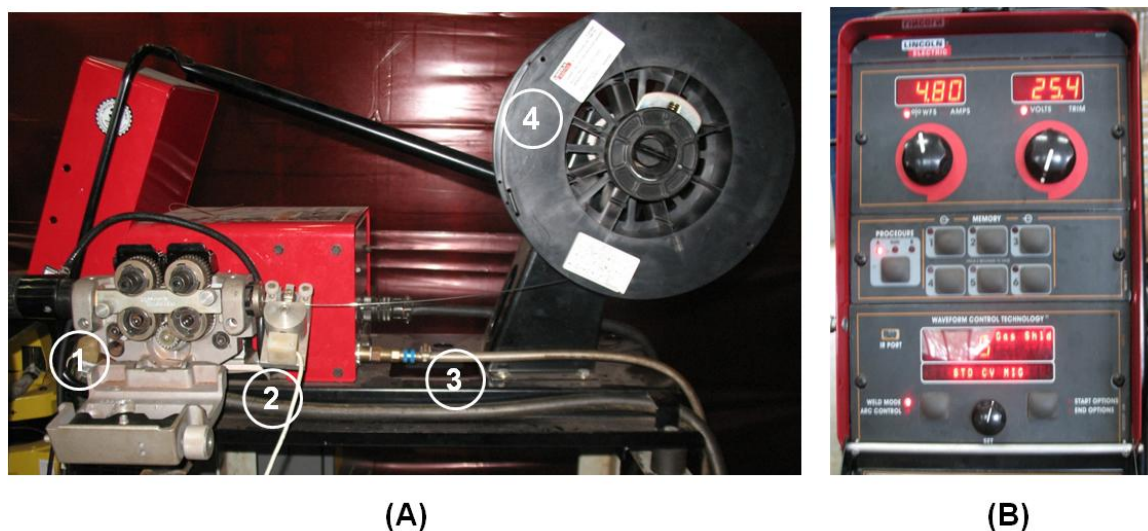


Figura 3.2 – Alimentador de arame cabeçote: onde, 1 – Roletes do alimentador de arame; 2 – Encoder para aquisição da velocidade de alimentação (com 50 pulsos/minuto); 3 – Saídas de gases de proteção; 4 – Rolo de arame para realizar a soldagem: (A) Vista lateral do alimentador, com detalhe do sistema de roletes para alimentação de arame; (B) vista frontal, com detalhe do painel de seleção de programa e regulagem do programa

Uma diferenciação para soldagens realizadas com o processo MIG/MAG e o processo Eletrodo Tubular está entre os roletes. Como ilustrado pela Figura 3.3; para o primeiro utilizam-se roletes com rasgo de superfície lisa, enquanto que para o segundo utilizam-se roletes com rasgo de superfície estriada, para promover um maior atrito no

deslizamento do arame, uma vez que o arame tubular, por se tratar de uma fita metálica que envolve um fluxo, é muito dútil. Com base na mesma justificativa, o arame tubular deve sofrer uma pressão menor, pois há a possibilidade de amassar o arame e o mesmo não conseguir passar livremente no bico de contato, dessa forma impossibilitando o avanço (a alimentabilidade) do arame e provocando instabilidades no processo.



Figura 3.3- A) Roletes lisos para soldagem com o MIG/MAG; B) Roletes estriados para soldagem com o processo Eletrodo Tubular

Para averiguação da velocidade de alimentação regulada no equipamento de soldagem é utilizado um medidor de velocidade, que funciona como um transdutor que transforma a velocidade de alimentação (linear) em velocidade de rotação através de um disco perfurado e um gerador de pulsos proporcionais aos furos. Esse medidor, denominado aqui de encoder (por ser baseado nesse princípio) e fabricado pela IMC Soldagens, tem resolução de 50 pulsos por volta.

3.2.3 Tocha

Foi utilizada uma tocha automática do modelo Aut 511 fabricação TBI com refrigeração a água. Uma das variações operacionais entre o processo MIG/MAG e o processo Eletrodo Tubular encontra-se nas características dos bocais. Ambos os bocais apresentam diâmetro de 24 mm, mas o bocal para o arame tubular apresenta um comprimento maior do que o bocal empregado para as soldagens com o arame maciço, como ilustra a Figura 3.4. Analisando os bocais em relação ao bico de contato da tocha,

o bocal (A) não encobre totalmente o bico, deixando à mostra 2 mm de bico, ao passo que o bocal (B) encobre totalmente o bico, ultrapassando este em 5 mm. Esta diferença entre os bocais é em função das características operacionais de cada processo, sendo que o Eletrodo Tubular exige uma distância bico contato peça (DBCP) maior do que para o processo MIG/MAG na condição de curto-circuito (como será usado neste trabalho).

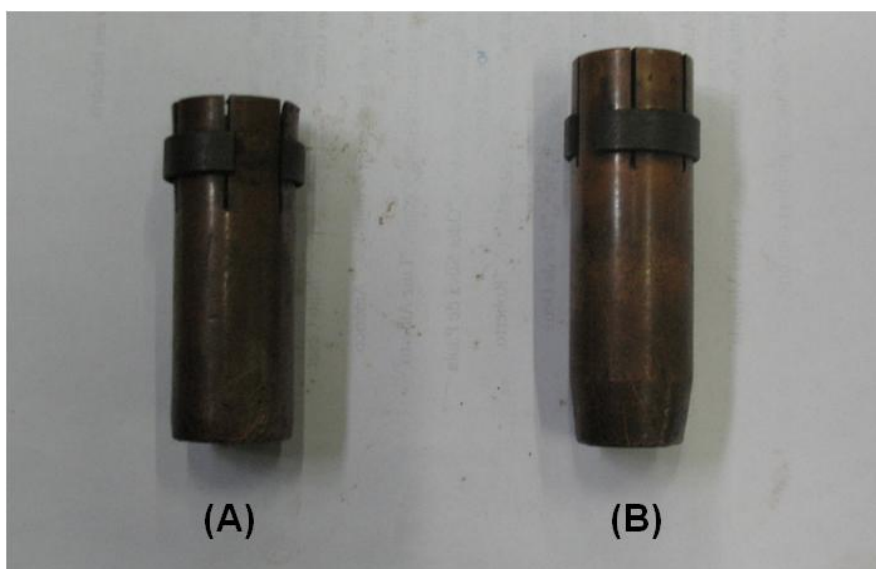


Figura 3.4 – (A) Bocal para soldagem com o processo GMAW com formato cilíndrico para saída do gás de proteção; (B) Bocal para soldagem com o processo FCAW, com o formato cônico para saída do gás de proteção

A refrigeração da tocha ocorre por meio de uma bomba de refrigeração que permite a circulação de água em canais internos à tocha, garantindo o resfriamento dos componentes da tocha e evitando o superaquecimento de regiões como o bico e o bocal, o que pode causar a obstrução destes componentes. O resfriamento destas regiões permite uma maior conservação destes componentes e reduz o desgaste, aumentando o tempo de vida útil dessas peças. A desvantagem da refrigeração à água em relação à refrigeração a gás é o maior índice de ruído gerado pela bomba durante as soldagens.

3.2.4 Robô

A utilização de robôs em processos de soldagens possibilita a uma maior constância nos valores de parâmetros como DBCP e velocidade de soldagem, minimizando efeitos da variância devido ao operador e outras imprecisões de regulagem

do processo. O robô que foi utilizado neste trabalho é um robô de 6 GDL (**G**raus **D**e **L**iberdade), fabricado pela Fanuc, modelo Arcmate 100 iB, com capacidade máxima de carga 6 kg na flange, acionado por um controlador Teach Pendant (TP). A **Erro! Fonte de referência não encontrada.**5 mostra a tocha automática modelo Aut 511 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 por interrupção do caminho).

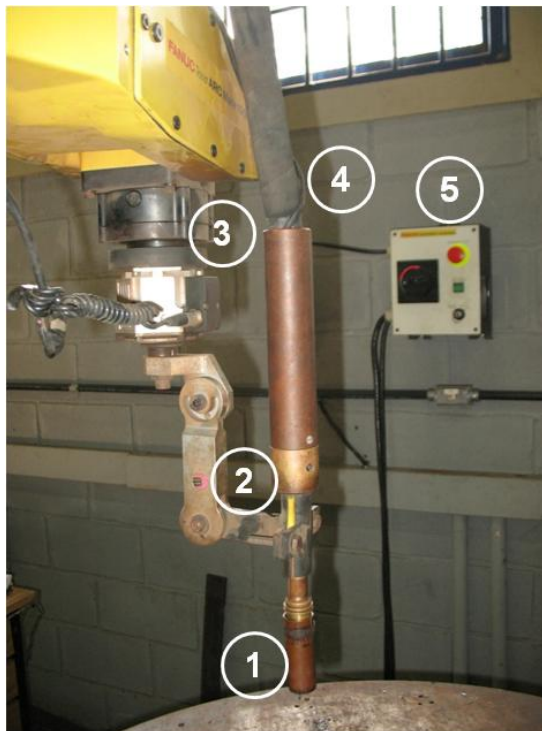


Figura 3.5– Detalhe de fixação da tocha, onde, 1 – Tocha de soldagem; 2 – Suporte para a tocha; 3 – Sensor de impacto; 4 – Indicação do cabo para a coleta dos sinais elétricos de tensão (que internamente vai até o suporte do bico de contato); 5 – Painel de acionamento do robô

3.2.5 Suporte de Fixação das chapas de testes

A fixação da chapa de teste é necessária para evitar a deformação da mesma durante a soldagem, devido à alta densidade de calor envolvida com os processos de soldagens. Assim, foi utilizado um suporte metálico (Figura 3.6), no qual a fixação da placa ocorre por meio de parafusos distribuídos ao longo do comprimento da chapa de teste, para garantir uma fixação rígida e uniforme. O suporte foi construído de forma que

a raiz da solda permanecesse suspensa, eliminando possíveis variações de transferência de calor peça-suporte para as diferentes soldagens realizadas.



Figura 3.6- Visão geral do suporte para fixação das chapas de teste

3.2.6 Sistema de aquisição de sinais elétricos e tratamento de dados

Na realização de procedimentos experimentais, há sempre a necessidade de monitoramento de parâmetros, como corrente, tensão e velocidade de alimentação. Isto porque durante a execução de procedimentos experimentais existe a possibilidade de erros envolvidos no processo, oriundos tanto da falha de equipamentos bem como de caráter humano. Sendo assim, através de um sistema de aquisição de sinais elétricos, é possível monitorar os valores dos parâmetros regulados durante a execução de um teste e, desse modo, detectar possíveis oscilações dos parâmetros e justificativas para ocorrência das mesmas.

O sistema de aquisição de sinais usado está esquematizado pela Figura 3.7. É composto por um sensor Hall para monitoramento da corrente, com uma faixa de medição de ± 600 A, um divisor de tensão (DTS) para monitoramento da tensão, com uma faixa de medição de ± 100 V, um encoder para monitoramento da velocidade de alimentação e uma placa de aquisição de sinais elétricos da National Instruments NI USB 6009 (Figura 3.8), com frequência de aquisição de 5 KHz e 16 bits.

As curvas de calibração dos sensores são utilizadas para calibração do programa de aquisição. A Eq. 3.1 apresenta a curva para calibração da corrente, a Eq. 3.2 da tensão e a Eq. 3.3 da velocidade de alimentação.

$$y=70,58x+6,8$$

(3.1)

Onde y = corrente de soldagem (A) e x = tensão de saída do condicionador de sinais (V)

$$y=10,7x$$

(3.2)

Onde y = tensão de soldagem (V) e x = tensão de saída do condicionador de sinais (V).

$$y=2,57x$$

(3.3)

Onde y = velocidade de alimentação (m/min) e x = tensão de saída do condicionador de sinais (V).

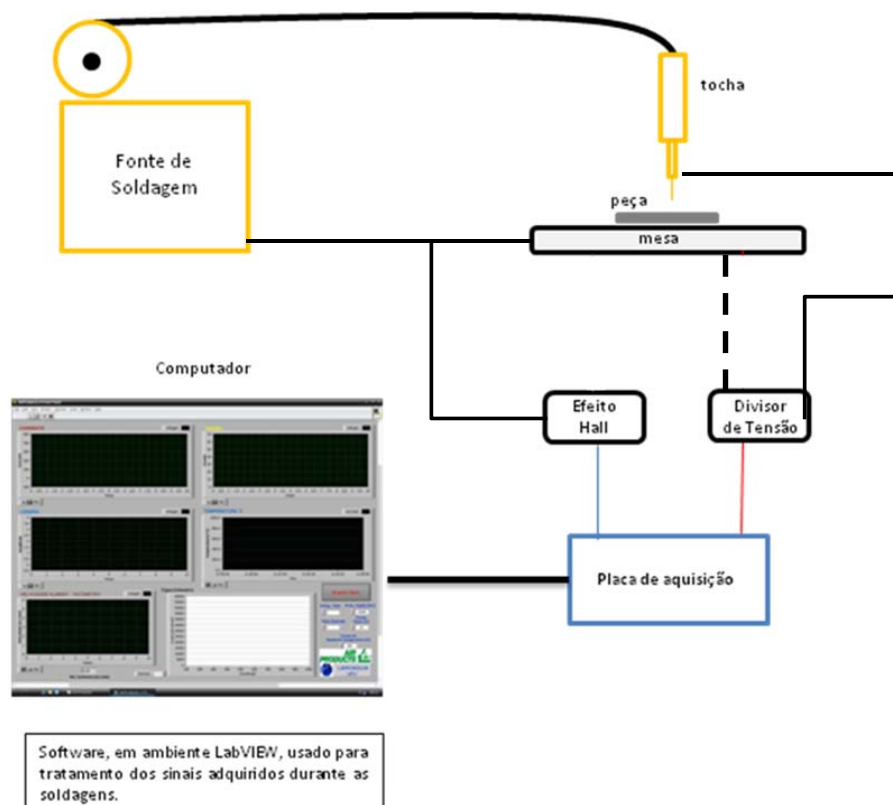


Figura 3.7- Esquema da montagem do sistema de aquisição de dados

A visualização, o tratamento preliminar e o arquivamento dos sinais elétricos oriundos da placa ocorre por meio de um programa implementado no ambiente Labview, denominado “Airproducts.Vi”, onde são coletados e armazenados os sinais de corrente, tensão e velocidade de alimentação. Para tanto, os sinais de tensão foram adquiridos entre a região equivalente ao final da tocha (região do bico de contato) e a mesa de soldagem. No programa em Labview, podem ser ajustados os valores de frequência de aquisição, o tempo de aquisição e os canais a serem utilizados para aquisição dos sinais elétricos.



Figura 3.8 - Placa de aquisição tipo “Plug and Play” da National Instruments modelo: NI USB-6009

O tratamento estatístico dos dados coletados durante a realização dos testes é realizado por meio do software OriginPro 7.5[®], que permite avaliar, manipular (selecionar faixas de tempo dos sinais que se deseja trabalhar) e calcular os valores médios de tensão, corrente e velocidade de alimentação, bem como construir gráficos dos sinais monitorados

3.3 Bancada Experimental para o Ensaio de Respingo

Para a realização dos testes para o ensaio de Respingos, foi utilizada a bancada experimental geral com o acréscimo do equipamento para a coleta de respingos, de uma balança de precisão (resolução 0,01 g) e de um dispositivo para análise granulométrica. O equipamento para coleta de respingo, desenvolvido pelo Laprosolda e denominado de “Coletor de Respingos”, é todo confeccionado em cobre. É composto por uma caixa coletora (base), Figuras 3.9, e um extensor da área de coleta de respingos (coifa), Figuras 3.10. A caixa coletora, por sua vez, é constituída por uma

placa que forma a base e quatro barras laterais, sendo que três destas barras são totalmente fixas à base e entre si, e uma não. No interior da caixa há cinco barras de perfil quadrado, dispostas na caixa coletora de forma a constituir três regiões de alcances distintos de posicionamento do respingo (até 80 mm, de 81 a 160 mm e acima de 160 mm). O extensor da área de coleta de respingos, “a coifa”, tem por função coletar respingos de maior alcance. Maiores detalhes sobre os aspectos funcionais do equipamento podem ser verificados no Procedimento Laprosolda para realização do ensaio (Fernades e Scotti, 2009a).



Figura 3.9- Caixa coletora de respingos com as respectivas barras que realizam as divisões para se obter os três alcances distintos



Figura 3.10- Extensor de área de coleta de respingo (“coifa”), posicionado sobre a base, deixando a mostra à região do encaixe com a base

Como o coletor de respingos é um equipamento diferenciado cujo objetivo principal é coletar o máximo possível de respingos gerados durante a soldagem, a barra sobre a qual se faz a soldagem deve atender alguns requisitos tais como:

- a) Não possuir área livre para evitar a fixação de respingos sobre a placa, pois estes não poderiam ser contabilizados;
- b) E ao mesmo tempo possuir área suficiente para garantir uma fixação adequada da placa de teste à base da caixa coletora e suportar o calor gerado durante a soldagem, pois caso contrário poderia ocorrer a fusão da placa de teste com os parafusos utilizados para fixação do mesmo, o que inviabilizaria algumas análises propostas por este ensaio.

Com base nos requisitos necessários para garantir uma maior eficiência do teste, foi definido uma barra para se fazer as soldagens de aço ao carbono, com dimensões de 480 x 9,5 x 9,5 mm (comprimento x largura x espessura), com tolerância de ± 5 mm no comprimento e $\pm 0,5$ mm nas outras dimensões. A superfície na qual se deposita o cordão de solda deve ser lixada, visando diminuir a influência indesejada de elementos provenientes de oxidação do material, a superfície oposta a esta deverá possuir três furos M3 x 6 mm, sendo um central e os outros dois espaçados de $203,2 \pm 0,5$ mm, permitindo a fixação deste à base da caixa coletora.

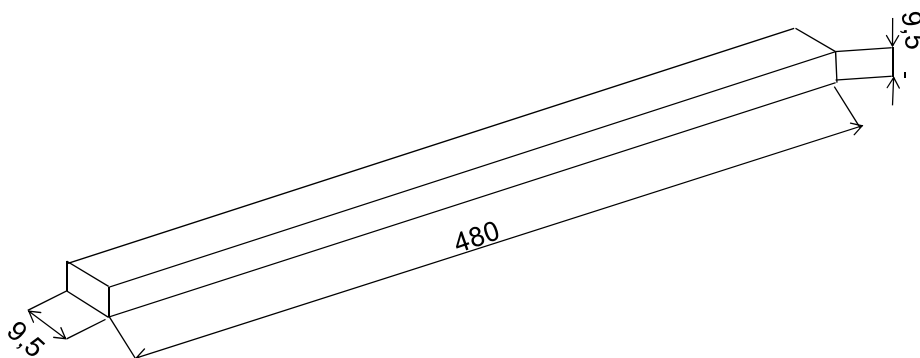


Figura 3.11- Placa de teste para realização do ensaio de respingo, de aço comum ao carbono de dimensões 480 x 9,5 x 9,5 mm

Para análise granulométrica dos respingos coletados, é usado um dispositivo constituído por três peneiras granulométricas redondas, compostas de telas de fundo com espaçamento de 0,60, 1,18 e 2,00 mm, e um prato de fundo, sendo suas dimensões externas de 3" de diâmetro por 2" de altura. Para facilitar a separação dos respingos, utiliza-se uma base metálica vibratória, cujo movimento é dado manualmente. A Figura 3.11 ilustra o referido dispositivo.

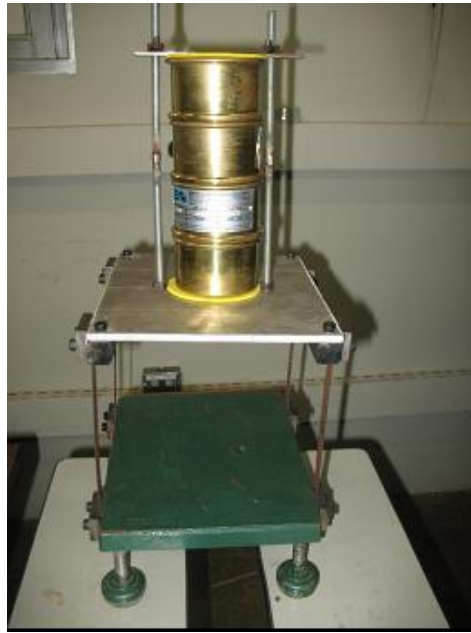


Figura 3.12- Dispositivo para análise granulométrica, constituído de três peneiras, um fundo e um sistema vibratório mecânico

3.4 Bancada Experimental para o Ensaio de Fumos

A bancada experimental para o ensaio de fumos é constituída pela bancada experimental geral (exceto pela substituição da tocha automática modelo Aut 26KD/36 KD fabricação Binzel), acrescida dos seguintes equipamentos: estufa para ressecamento dos filtros, com faixa de trabalho entre 0°C e 150 °C; termômetro (analógico ou digital), calibrado, para controle da temperatura da estufa; cronômetro digital, para controle do tempo de execução do teste; um coletor de fumos; e uma balança.

O coletor de fumos, visto na Figura 3.12, é um equipamento constituído por elementos tais como:

- ✓ Um exaustor capaz de manter uma vazão constante entre 709 e 989 litros/minuto;
- ✓ Um exaustor, alimentado por um motor trifásico, que permite a regulação de sua rotação, e conseqüentemente a regulação da vazão da sucção desejada;
- ✓ Uma mesa giratória de 500 mm de diâmetro, movimentada por um eixo central que permite imprimir velocidades angulares entre 0,3 e 7,8 rpm,
- ✓ Uma coifa móvel, em forma de cone, que possibilita a condução dos fumos na direção do filtro;

✓ Um manômetro com escala de 0 a 54,7 mmH₂O (0 a 2,0 inH₂O), conectado ao tubo de sucção, com a função de indicar a vazão imposta pelo sistema de sucção e outro manômetro (com escala de 0 a 254 mmH₂O (0 a 10 inH₂O), conectado à câmara de sucção, com a função de indicar a queda de pressão que o filtro causa à medida que o mesmo coleta os fumos durante a execução do teste.

Maiores detalhes do funcionamento do equipamento podem ser obtidos no documento Ensaio Laprosolda de Geração de Fumos (Fernandes e Scotti, 2009b).

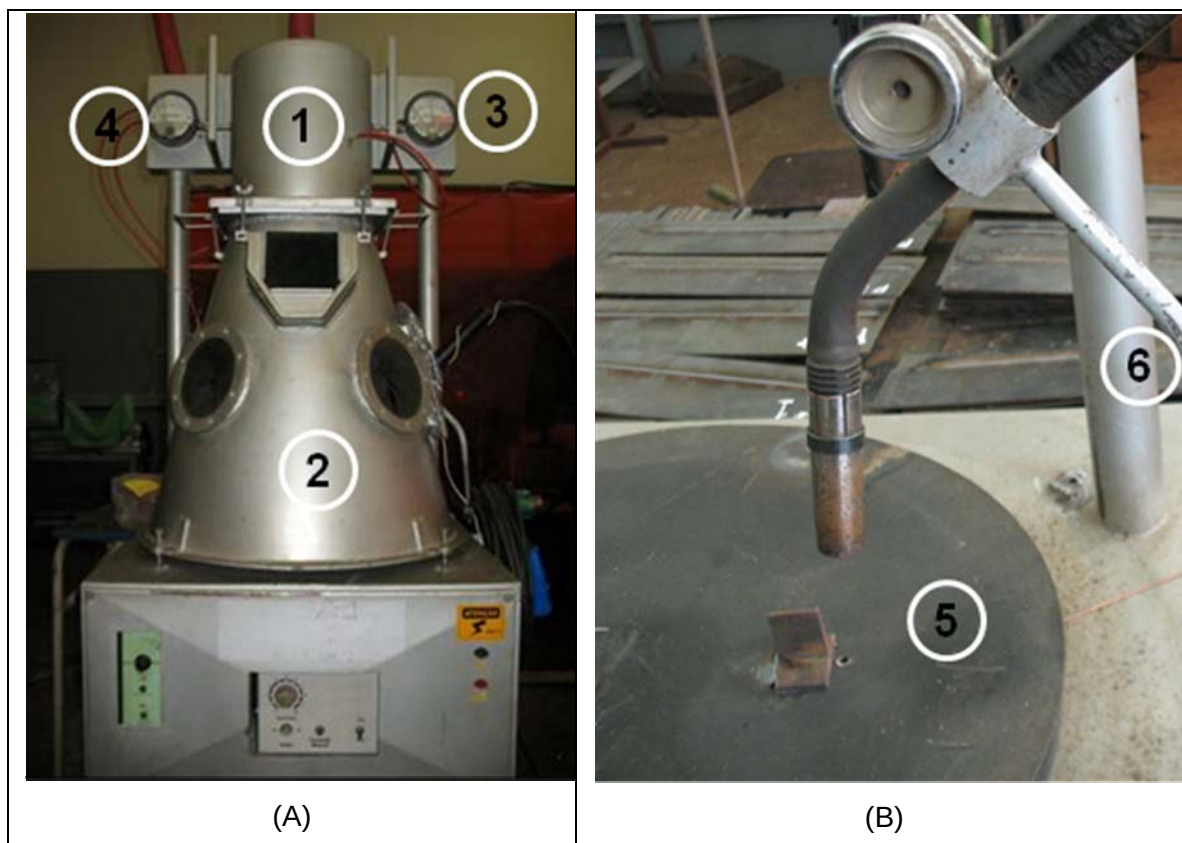


Figura 3.13 – Visão Geral do Coletor de Fumos constituído por: 1- Câmara de sucção; 2- Coifa coletora; 3- Manômetro que indica a queda de pressão no filtro; 4- Manômetro que indica a pressão imposta pelo sistema de sucção; 5- Mesa giratória; 6- posicionamento da tocha para a realização das soldagens

3.5 Consumíveis

3.5.1 Gases

Para o estudo desenvolvido neste trabalho buscou se avaliar o efeito de duas proteções gasosas (100%CO₂ e Ar+25%CO₂) sobre os processos MIG/MAG e Eletrodo Tubular, adotando vazões coerentes com as características de cada processo.

3.5.2 Metal de adição

Como metal de adição para o processo MIG/MAG foi utilizado o arame maciço de aço ao carbono da classe AWS ER70S-6, de 1,2 mm de diâmetro, de fabricação da Belgo Bakaert. Para as soldas realizadas com o processo Eletrodo Tubular, foi utilizado o metal de adição AWS E71T-1M do tipo rutílico, de 1,2 mm, fabricado pela Lincoln Electric. (é também importante referenciar os fabricantes devido ao fato de que, mesmo sob a mesma classificação, produtos de diferentes fabricantes proporcionam propriedades e características distintas). A composição química e propriedades mecânicas desses arames, de acordo com dados fornecidos pelos fabricantes, são apresentados na Tabela 3.1. A seleção do tipo e diâmetro de eletrodo está relacionada com o fato de que esses arames são comercialmente mais utilizados no mercado, cada qual dentro do seu seguimento de atuação.

Tabela 3.1- Composição química e propriedades mecânicas dos arames utilizados para o desenvolvimento do trabalho (informações fornecidas pelos fabricantes)

ARAME AWS E 71T-1Mh				
Composição Química%				
C - 0,12 max	Mn - 1,75 max	P – 0,03 max	S – 0,03 max	Si – 0,90 max
Propriedades Mecânicas				
L. R. (Mpa)	L. E. (Mpa)	Alongamento [%]	Charpy[J] -29° C	
480 – 655	400	22	27	
ARAME AWS ER 70S-6				
Composição Química%				
C – 0,08	Si – 0,90		Mn – 1,50	
Propriedades Mecânicas				
L. R. (Mpa)	L. E. (Mpa)	Alongamento [%]	Charpy[J] -29° C	
560	470	25	70	

3.5.3 Metal de base

O material base para a confecção das placas de teste utilizadas neste trabalho foi o aço comum (adquirido no comércio local), sendo que os formatos e dimensões destas placas sofreram variações para atender as peculiaridades de cada tipo de ensaio realizado. Desse modo a especificação de cada tipo de placa teste será realizada nos capítulos referentes aos ensaios desenvolvidos, juntamente com o procedimento característico de cada ensaio.

CAPÍTULO IV

TESTES PRELIMINARES

Neste capítulo é definido a faixa de parâmetros operacionais que permitem a realização dos testes bem como a realização dos primeiros testes que permitiram a verificação da eficiência de tais parâmetros.

4.1 Definição da Faixa Operacional

4.1.1 Introdução

A primeira etapa deste trabalho consistiu em obter uma faixa de parâmetros que fossem ideais para se atender a metodologia proposta e, desse modo, realizar uma análise comparativa eficiente entre o processo MIG/MAG e o processo Eletrodo Tubular, sob a proteção de diferentes gases (100% CO₂ e a mistura Ar+25%CO₂). Num primeiro momento buscou-se determinar a faixa de corrente que seria fixada como a adequada para os dois processos e que permitisse a realização dos ensaios propostos.

O fator limitante para a determinação desta faixa foram os valores de corrente (mínimo e máximo) do arame tubular indicado pelo fabricante (140 A – 255 A) para este diâmetro de arame. O arame maciço para o mesmo diâmetro, conforme recomendação do fabricante permite uma variação bem maior nos valores de corrente (120 A – 380 A). Dessa forma, foi necessário adotar um valor de faixa de corrente para a realização dos ensaios que atendesse os valores limites tanto para o arame tubular como para o arame maciço. Para tanto, foram estabelecidos quatro níveis de corrente (150 A, 200 A, 250 A e 300 A) para avaliar o comportamento dos arames, sendo que o último nível de corrente extrapola o valor recomendado pelo fabricante para o arame tubular, mas com

uso justificável para não prejudicar um possível bom desempenho do arame maciço em maiores corrente.

Esse estudo exploratório foi constituído de três etapas, sendo estas: determinação da velocidade de alimentação que fornecesse cada nível de corrente desejada; determinação dos limites operacionais de tensão; e definição da velocidade de soldagem que resultasse no volume de cordão de solda adequado para cada condição. Estas etapas ocorreram de forma distinta para cada uma das duas misturas que constituem os gases de proteção e, conseqüentemente, para os dois processos, encontrando valores ideais para cada combinação de gás e arame. Isto para atender as premissas básicas do estudo em questão, que é a de garantir, para cada nível de corrente, o mesmo volume de cordão por unidade de comprimento para os dois processos.

A distância bico contato peça (DBCP) também foi fixada, adotando-se um valor característico para cada processo em função dos valores recomendados pelos fabricantes, representando, desta forma, a condição ideal de trabalho para os processos em questão. Desse modo, fixou-se uma DBCP de 12 mm para o processo MIG/MAG e uma de 20 mm para o processo Eletrodo Tubular.

Para a execução dos testes preliminares, foi utilizada a bancada experimental geral descrita no capítulo III. Como placa de teste, utilizou-se uma chapa de aço carbono de 12 mm de espessura, com 80 mm de comprimento e 40 mm de largura, fixada por um suporte de grandes dimensões, conforme ilustra a Figura 4.1. O uso desse suporte foi para evitar deformações na chapa, o que poderia comprometer o trabalho de definição de parâmetros, uma vez que variações de DBCP, ocasionadas por distorções na chapa, resultam diretamente em variações nos valores de corrente. Uma das vantagens da realização de soldas por robôs é a possibilidade de correção na trajetória de soldagem podendo eliminar os efeitos de distorções pré-existentes.



Figura 4.1 - Placa de teste para a realização dos testes preliminares fixa ao suporte para minimizar as distorções

4.1.2 Definição das velocidades de alimentação

Uma vez fixado os valores de corrente de trabalho, a segunda etapa do processo foi determinar os valores de velocidade de alimentação que correspondessem às correntes selecionadas. Para início do estudo exploratório de definição das velocidades de alimentação, foi adotado como referência os parâmetros definidos por Souza et al (2009), que utilizando o arame ER 70S-6 com a proteção gasosa Ar+25%CO₂ e DBCP de 12 mm, encontraram uma velocidade de alimentação de 2,71 m/min para obter-se uma corrente de 148 A .

Nesta etapa não houve muita preocupação com a regulação da tensão, pois o objetivo era se obter os valores de corrente. Porém, tomou-se o cuidado de adotar tensões que garantissem o modo de transferência por curto-circuito para o arame maciço. Dessa forma adotou-se o seguinte procedimento para a definição dos parâmetros para o arame maciço:

- a) Para o gás de proteção Ar+25%CO₂ e o arame maciço, regularam-se na máquina de soldagem os parâmetros de referência 2,71 m/min para a velocidade de alimentação e 20 V para a tensão, realizando-se a soldagem e simultaneamente a aquisição de sinais;
- b) Realizou-se o tratamento dos dados coletados pelo sistema de aquisição obtendo-se assim o valor médio de corrente para os parâmetros regulados;

c) Realizou-se o aumento progressivo do valor de regulação da velocidade de alimentação até se obter o primeiro nível de corrente fixado, 150 A, que no caso correspondeu a um valor de 2,9 m/min (esclarece-se que para cada aumento da velocidade de alimentação foi realizada uma solda e determinado o valor médio de corrente, adotando-se, como aceitável, uma tolerância de ± 5 A);

d) De forma análoga, determinaram-se as velocidades de alimentação que correspondiam aos demais níveis de corrente desejados (200 A, 250 A, 300 A, com as devidas tolerâncias aceitáveis) para o arame maciço e para os gases de proteção Ar+25%CO₂ e 100%CO₂;

e) Enfim, realizou-se o mesmo procedimento para obtenção das velocidades de alimentação e suas respectivas correntes para o arame tubular para os dois tipos de proteção gasosa. Partiu-se inicialmente da velocidade de alimentação de 5,1 m/min para obteve-se uma corrente de 140 A, conforme recomendação do fabricante para o gás de proteção Ar+25%CO₂ com DBCP de 20 mm.

Conforme a metodologia proposta e aplicada, os primeiros resultados encontrados na realização dos testes preliminares são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valores de Velocidade de alimentação definidos para obter os níveis de corrente desejados para os dois tipos de gases e arames

	Corrente Desejada I (A)	Val(m/min)/ 100%CO ₂ Regulada	Val(m/min)/Ar+25%CO ₂ Regulada
Maciço	150	3,2	2,9
	200	5,2	4,5
	250	6,8	6,6
	300	8,7	8,6
Tubular	150	5,0	4,6
	200	8,0	7,2
	250	10,7	9,7
	300	14,5	13,8

Nestes primeiros resultados já é possível observar a influência do gás de proteção, sobre a velocidade de alimentação (e conseqüentemente também sobre a taxa de fusão do arame), tanto para o arame maciço quanto para o tubular. Para ambos os arames, a mistura de argônio e gás carbônico fornece menores valores de

velocidade de alimentação para se obter um mesmo nível de corrente, ou seja, a mistura reduz a taxa de fusão dos arames em relação ao CO₂ puro.

4.1.3 Definição das faixas para tensão de regulação.

A faixa operacional da tensão de regulação é outro parâmetro a ser determinado de forma que atenda as premissas propostas pelo trabalho em condições operacionais adequadas para cada combinação arame-gás de proteção. Para tanto, adotou-se uma metodologia para a definição da faixa de trabalho da tensão. Tal metodologia consistiu em realizar uma varredura por vários valores de tensão para cada combinação arame-gás-corrente, a fim de detectar o valor mínimo e máximo de tensão que fornecesse um arco estável e um cordão visualmente adequado. Para isso, utilizou-se o seguinte procedimento:

- a) Tomaram-se como valores iniciais de tensão os valores recomendados pelo fabricante do arame, conforme Tabela 4.2 para o arame maciço e Tabela 4.3 para o arame tubular.
- b) O primeiro passo foi definir um cordão apropriado para uma dada corrente, conseguido com o ajuste da velocidade de soldagem apropriada para a velocidade de alimentação. Para tal, foi utilizado o arame maciço sob a proteção gasosa do Ar+25%CO₂. Para o nível de corrente de 150 A e para o primeiro valor de tensão 18 V, realizou-se um cordão de solda com 150 mm de comprimento, mantendo-se fixo o valor da corrente e seqüencialmente variando-se o valor da tensão de 2 em 2 volts ao longo da faixa sugerida pelo fabricante (18 V-22 V). Dentre os cordões realizados, através de uma análise visual do aspecto do cordão, da largura e do reforço, adotou-se um cordão como padrão;

Obs: O cordão adotado como padrão foi obtido com 150 A de corrente e 20 V de tensão (por meio de um paquímetro foram realizadas medições ao longo do cordão e observado um valor médio de 9 mm para a largura do cordão, com uma variação ± 1 mm, e um reforço médio de 3 mm, com uma variação de ± 1 mm).

- c) Uma vez obtido o cordão padrão promoveu-se uma varredura do valor de tensão a níveis máximos e mínimos de tensão, ou seja, a partir do valor de tensão definido como de referência, reduziu-se gradativamente o valor de tensão (de um e um volt) até o cordão não apresentar mais as mesmas características do cordão padrão, definindo assim o início da faixa. O mesmo procedimento foi realizado para se obter o limite superior da faixa, aumenta-se progressivamente o valor da tensão;

d) Na definição da faixa de tensão para o arame maciço, além da realização de todo esse procedimento foi verificado ainda a faixa de tensão que garantisse o modo de transferência por curto-circuito,

Realizou-se o mesmo procedimento com o arame maciço e o gás de proteção 100% CO₂, assim como para o arame tubular com os dois tipos de proteção (Ar+25%CO₂ e 100%CO₂). Para a realização das soldas foi utilizada uma chapa de aço carbono de 12 mm de espessura 80 mm de comprimento e 40 mm de largura acoplada a um suporte conforme Figura 4.2, na qual foram anotados os valores da tensão regulada para obtenção de cada cordão de solda. Desse modo, determinou-se a faixa operacional para o conjunto de parâmetro (arames + gás de proteção), como apresentado na Tabela 4.4 (observa-se que a estratificação da faixa de corrente mostrou valores razoavelmente concordantes com os recomendados pelos fabricantes, Tabelas 4.2 e 4.3).

Tabela 4.2 – Parâmetros de soldagem recomendados pelo fabricante Belgo Bakaert do arame maciço (informação fornecida pelo fabricante)

Bitola do Arame	Tensão (V)	Corrente (A)
1,2 mm	18-22	120-210
Ar+25%CO ₂ ou	22-28	200-290
100%CO ₂	28-34	290-380

Tabela 4.3 – Parâmetros de soldagem recomendados pelo fabricante Lincoln Electric para o arame tubular (informação fornecida pelo fabricante)

Bitola do Arame	Alimentação de Arame (m/min)	Tensão (V)	Corrente (A)
1,2 mm Ar+25%CO ₂	5,1	25-27	140
	6,4	26-28	160
	7,6	27-29	185
	8,9	27-29	205
	10,2	28-30	220
	12,7	30-32	255



Figura 4.2- Aspectos do cordão sob diferentes valores de tensão de regulação para o arame tubular, com proteção gasosa 100% CO₂ a 200 A. Etapa de definição do cordão padrão com variação da tensão de 2 em 2 volts

Tabela 4.4- Faixa de tensão de regulação definidas

		100%CO ₂	25%CO ₂ +75%Ar
	I(A)	U(V)	U(V)
Maciço	150	19-23	17-21
	200	22-25	19-23
	250	23-26	20-23
	300	28-30	26-28
Tubular	150	23-27	23-27
	200	25-29	25-29
	250	28-32	28-32
	300	30-34	30-34

Pela Tabela 4.4, é possível verificar novamente a influência do gás de proteção nos parâmetros definidos. Observa-se que para o arame maciço com proteção gasosa de 100% CO₂ se requer valores maiores de tensão do que com a mistura Ar+25%CO₂ para formar cordões com características visuais similares, devido, provavelmente, ao fato do gás puro (100%CO₂) apresentar um maior potencial de ionização e maior condutividade térmica e, assim, necessitar de maior tensão para operar com estabilidade. Já para o arame tubular não se verifica o aumento da tensão na faixa de operação com a variação do gás de proteção, possivelmente pela ação dos fluxos que estabilizam o arco e passam a dominar a formação do plasma. Os maiores valores de

tensão de soldagem observados para o arame tubular podem ser justificados pela maior queda de tensão ao longo desse arame (maior comprimento e menor área de seção transversal condutora de corrente)

É ainda interessante notar por estes resultados dois outros pontos, com a ajuda da Figura 4.3. O primeiro se refere a maior faixa de trabalho que se consegue com o tubular, ou seja, o tubular é mais robusto (menos sensível) à regulagem de tensão. O segundo ponto é que a característica estática ($U \times I$) dos dois arames, com os dois gases mantém o mesmo comportamento (crescente).

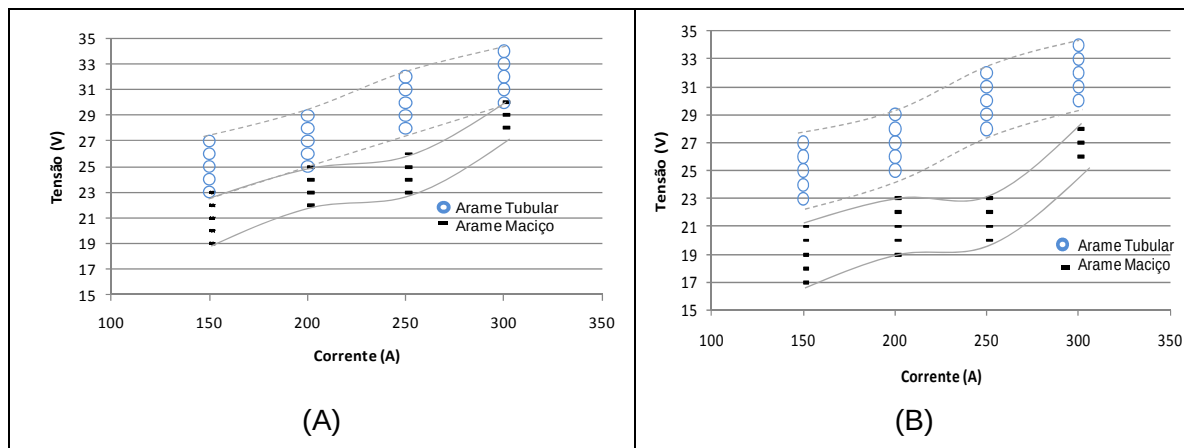


Figura 4.3- Representação da faixa de trabalho para o arame maciço AWS ER 70S-6 (DBCP 12 mm) e do arame tubular AWS E71T-1(DBCP 20 mm), ambos com 1,2 mm: A) para proteção gasosa 100%CO₂; B) para proteção gasosa Ar+25% CO₂

4.1.4 Definição das velocidades de soldagens

Através da regulagem da velocidade de soldagem, é possível obter o volume de cordão de solda desejado para cada nível de corrente, garantindo, assim, a fabricação do mesmo cordão de solda para ambos os processos. É importante chamar atenção para o fato de que na seção 4.1.1 foi encontrada a velocidade de alimentação (taxa de fusão), para cada valor de corrente e cada tipo de arame. Porém, a mesma taxa de fusão não significa obter a mesma taxa de deposição, já que a formação do cordão depende essencialmente da taxa de deposição.

A velocidade de soldagem que atendesse a taxa de deposição por unidade de comprimento poderia ser determinada de duas formas. A primeira, utilizando somente a taxa de deposição (T_d) e a taxa de deposição por unidade de comprimento (T_D). A segunda forma de se determinar a velocidade de soldagem seria em função das variáveis taxa de fusão (T_F), rendimento de deposição (N_D) e taxa de deposição por unidade de comprimento (T_D). A segunda maneira foi utilizada para o cálculo inicial da velocidade de soldagem, pois assim não seria necessária a realização de soldas, para

se definir os valores iniciais de soldagem, uma vez que para a primeira seria preciso soldar e determinar a taxa de deposição. Desse modo, calculou-se a taxa de fusão e adotou-se um rendimento hipotético para cada arame, permitindo o cálculo inicial da velocidade de soldagem, como demonstrado na Tabela 4.5. Na sequência, realizaram-se soldagens com os valores calculados e determinaram-se os valores reais para o rendimento de deposição e, assim, efetuar a correção nas velocidades de soldagem, definindo os valores reais para esta variável.

A variável taxa de deposição por unidade de comprimento (T_D) é resultado do rendimento de deposição (N_D) característico de cada processo pela velocidade de soldagem e taxa de fusão (T_F). Assim, para efetuar-se o cálculo da (T_D) é necessário o conhecimento dessas variáveis. O rendimento de deposição é uma variável que depende de vários fatores operacionais, inclusive do tipo de chanfro e do tamanho da poça, podendo, desse modo, sofrer variações durante as realizações dos testes para um mesmo conjunto de parâmetros. Essas alterações nos valores do rendimento de deposição influenciam diretamente nos valores da taxa de deposição por unidade de comprimento (T_D).

Assim, como os dois processos apresentam diferenças significativas no desempenho operacional, principalmente no que tange a taxa de fusão e modo de transferência metálica para uma dada corrente, procurou-se determinar a velocidade de soldagem para ambos os processos que fornecessem a mesma taxa de deposição por unidade de comprimento (T_D) e resultasse num cordão visualmente aceitável para os processos. Para tal foi realizada a seguinte sequência de passos:

- a) Iniciando-se com o arame tubular, adotou-se aleatoriamente um valor de velocidade de soldagem ($V_{sol} = 30$ cm/min) para parâmetros definidos no item anterior (corrente e tensão) sendo inicialmente trabalhado o nível de corrente de 150 A, com o valor médio da faixa de tensão estabelecida, 25 V;
- b) Uma vez estabelecidos os parâmetros de soldagem, foram realizados cordões sobre chapa, para analisar o cordão gerado. A chapa utilizada como placa de teste foi de aço carbono ABNT 1020, apresentando as dimensões de 9 mm de espessura, 50,8 mm de largura e um comprimento de 250 mm;
- c) Analisando-se visualmente o cordão realizado e avaliando-se a convexidade do mesmo, observou-se que com uma velocidade de soldagem de 30 cm/min não se obteve um cordão conforme o desejado, ou seja, para este nível de corrente o volume de material depositado é baixo, insuficiente para preenchimento de um chanfro (a velocidade de soldagem foi alta para a taxa de deposição fornecida para este nível de corrente);

d) Foi reduzida, assim, a velocidade de soldagem para 25 cm/min e averiguado o cordão resultante. Este cordão foi considerado como adequado, apresentando 10 mm de largura e 4 mm de reforço. Em seguida, fornecido como base esse cordão, procurou-se determinar os valores de velocidade de soldagem para os demais níveis de corrente. Para isso, calculou-se a taxa de deposição por unidade de comprimento (T_D), utilizando a expressão das Eq. 4.1:

$$T_D = (N_D * T_F) / V_{sol} \quad [g / cm] \quad (4.1)$$

Onde:

N_D - rendimento de deposição;

T_F - Taxa de fusão do eletrodo, [g/min];

V_{sol} - velocidade de soldagem, [cm/min].

A taxa de fusão (T_F), por sua vez, é calculada através da Eq. 4.2..

$$T_F = \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) * V_{al} * \rho \quad [g / min] \quad (4.2)$$

Onde:

d – diâmetro do arame [mm];

V_{al} - velocidade de alimentação do arame [cm / min];

ρ - densidade do arame [g / cm³];

O ρ foi medido como o explicado no Capítulo III de Metodologia, sendo que para o arame maciço a densidade é de 7,48 g/cm³ e para o arame tubular é de 6,37 g/cm³. Já a taxa de deposição (T_d) é calculada pela Eq. 4.3, onde:

$$T_d = \frac{(M_f - M_i)}{T_{ab}} \quad [g / min] \quad (4.3)$$

M_f - massa final [g];

M_i - massa inicial [g];

T_{ab} - tempo de arco aberto [min].

Finalmente, o rendimento de deposição (N_D) pode ser calculado pela Eq. 4.4:

$$N_D = \frac{T_d}{T_F} (\%) \quad (4.4)$$

e) Para o cordão considerado adequado no item “d”, foi encontrada uma taxa de deposição (T_D) de 1,35 g/cm para a corrente de 150 A. Considerando como aceitável

uma variação da taxa de $\pm 0,10$ g, foi fixado este valor para efetuar o cálculo da velocidade de soldagem para os demais níveis de corrente;

f) O cálculo inicial das velocidades de soldagem para as demais combinações é realizado de forma interativa, ou seja, somente por meio de cálculos, para se atingir uma aproximação dos valores das velocidades de soldagem. Posteriormente, com estes valores calculados, foram realizadas as soldagens e com os dados obtidos da aquisição de sinais determinou-se as velocidades reais de soldagem. Adotando-se inicialmente um valor hipotético para o rendimento de deposição (N_D) de 80%, efetuou-se o cálculo da taxa de fusão (T_F). Utilizando-se o valor de (T_D) de 1,35 g/cm, efetuou-se o cálculo da velocidade de soldagem por meio da Eq. 4.1;

g) Utilizando as velocidades de soldagem calculadas no item anterior, realizaram-se cordões para cada nível de corrente e para cada gás de proteção. Por meio da Eq. 4.4 determinou-se o rendimento de deposição real do processo Eletrodo Tubular, o qual permaneceu em média em torno de 88%. E, então, foi refeito o cálculo das velocidades de soldagens para cada nível de corrente;

Realizou-se o mesmo procedimento para definição das velocidades de soldagem para o arame maciço, adotando inicialmente um rendimento de deposição hipotético de 90% para o cálculo da velocidade de soldagem inicial. Seqüencialmente realizaram-se os testes para determinar o rendimento real de deposição que permaneceu em torno de 96%, quando foram refeitos os cálculos das velocidades de soldagem, obtendo assim todos os parâmetros para os dois arames e para os dois gases.

Os parâmetros calculados encontram-se dispostos na Tabela 4.5, na qual se tem a velocidade de soldagem (calculada pelo rendimento adotado hipoteticamente), corrente, tensão e a velocidade de alimentação definidos, de forma a garantir o mesmo volume de cordão de solda para o processo MIG/MAG e para o processo Eletrodo Tubular.

Tais parâmetros foram monitorados pelo sistema de aquisição, ferramenta esta que auxiliou na determinação dos valores numéricos. O ρ foi medido como o explicado no Capítulo III de Metodologia, sendo que para o arame maciço a densidade é de 7,48 g/cm³ e para o arame tubular é de 6,37 g/cm³. Porém, como eram testes exploratórios, não houve a confecção de placa de teste para a realização dos testes (os mesmos foram realizados sobre material de descarte - sucata).

Tabela 4.5- Parâmetros de regulação e as velocidades de soldagens calculadas inicialmente para as soldagens com arame maciço e tubular para se obter T_D de 1,35 g/cm para os rendimentos hipotéticos de 90% e 80%

	I(A)	100%CO ₂			25%CO ₂ +75%Ar		
		U(V)	V _{al} (m/min)	V _{sol} (cm/min)	U(V)	V _{al} (m/min)	V _{sol} (cm/min)
Maciço	150	19-23	3,2	18	17-21	2,9	17
	200	22-25	5,2	30	19-23	4,5	26
	250	23-26	6,8	39	20-23	6,6	38
	300	28-30	8,7	49	26-28	8,6	48
Tubular	150	23-27	5	21	23-27	4,6	20
	200	25-29	8	34	25-29	7,2	31
	250	28-32	10,7	46	28-32	9,7	42
	300	30-34	14,5	62	30-34	13,8	58

4.2 Testes de certificação dos parâmetros

Com a obtenção dos rendimentos de deposição reais calculados nos itens “g” e “h” da seção anterior, efetuou-se o cálculo das velocidades de soldagem correspondentes a cada combinação gás-aramé, as quais são apresentadas na Tabela 4.6. Com o objetivo de averiguar a eficácia desses parâmetros calculados, foram realizados testes para cada nível de corrente e para cada conjunto gás-aramé, adotando os valores médios da faixa operacional de tensão. Para a realização dos testes de certificação dos parâmetros, foi seguida a seqüência de passos a seguir:

- Foram confeccionados placas de teste de aço ao carbono ABNT 1020 com 9 mm de espessura, 50,8 mm de largura e um comprimento de 250 mm. Uma vez confeccionadas as placas de teste realizou-se a numeração das mesmas e, em seguida, realizou-se a pesagem;
- Realizou-se a soldagem sobre as placas de teste;
- Promoveu-se a limpeza dos cordões de solda, retirando escória e respingos, para posteriormente realizar a pesagem dos corpos de prova soldados (massa depositada sobre a chapa) e, desse modo, efetuar o cálculo do rendimento de deposição.

Foram realizados 16 testes com os parâmetros da Tabela 4.6, que foram definidos ao longo do capítulo, a fim de verificar se os mesmos atendiam as condições operacionais estabelecidas como premissas deste trabalho. A Tabela 4.7 apresenta os

resultados obtidos com as soldagens realizadas, na qual é possível verificar o que já era previsto, que o tubular possui uma maior taxa de fusão que o maciço e, conseqüentemente, uma velocidade de alimentação maior.

Tabela 4.6- Parâmetros de regulação definidos (corrente, tensão, velocidade de alimentação) e calculado (velocidade de soldagem corrigida) para o arame maciço e tubular para se obter T_D de 1,35 g/cm

		100%CO ₂			25%CO ₂ +75%Ar		
	I(A)	U(V)	V _{al} (m/min)	V _{sol} (cm/min)	U(V)	V _{al} (m/min)	V _{sol} (cm/min)
Maciço	150	19-23	3,2	19	17-21	2,9	18
	200	22-25	5,2	31	19-23	4,5	28
	250	23-26	6,8	41	20-23	6,6	41
	300	28-30	8,7	52	26-28	8,6	52
Tubular	150	23-27	5	25	23-27	4,6	24
	200	25-29	8	38	25-29	7,2	35
	250	28-32	10,7	52	28-32	9,7	48
	300	30-34	14,5	69	30-34	13,8	66

Porém, apresenta um menor rendimento de deposição (este comportamento foi observado para os dois tipos de proteção gasosa). Também é possível observar que as velocidades de alimentação definidas fornecem as correntes desejadas. Bem como que a relação entre as velocidades soldagem e a taxa de deposição resulta na taxa de deposição por unidade de comprimento estabelecida. Para a realização de todos os testes não foi considerado o efeito da indutância, o equipamento de soldagem foi mantido no modo operacional com a indutância média, conforme características do equipamento.

Tabela 4.7- Parâmetros monitorados para as soldagens com arame maciço e tubular
para se obter T_D de 1,35 g/cm

	Teste	U_{Reg} (V)	I(A)	U (V)	V_{al} (cm/min)	Tx. Fusão (g/min)	Tx. Dep. (g/min)	V_{sol} (cm/min)	$N_D(\%)$
Maciço	100% CO ₂ (Teste 1)	21	148,7	21,6	329,07	28,73	25,85	19	90
	100% CO ₂ (Teste 2)	23	203,8	23,2	523,75	45,73	42,98	31	94
	100% CO ₂ (Teste 3)	25	253,3	24,9	694,01	60,59	55,13	41	91
	100% CO ₂ (Teste 4)	29	298,1	29,1	871,70	76,11	72,30	52	95
	Ar+25% CO ₂ (Teste 5)	19	147,5	19,5	299,33	26,13	25,08	18	96
	Ar+25% CO ₂ (Teste 6)	21	196,8	20,7	458,28	40,01	38,20	28	95,5
	Ar+25% CO ₂ (Teste 7)	21	250,2	21,5	669,16	58,42	56,66	41	97
	Ar+25% CO ₂ (Teste 8)	27	302,3	27,3	869,47	75,91	71,35	52	94
Tubular	100% CO ₂ (Teste 9)	25	149,3	25,2	505,26	37,18	31,97	25	86
	100% CO ₂ (Teste 11)	27	203,8	26,8	798,28	58,75	49,64	38	84,5
	100% CO ₂ (Teste 10)	30	248,6	30,2	1075,87	79,17	64,92	52	82
	100% CO ₂ (Teste 12)	32	304,3	31,9	1434,41	105,56	90,78	69	86
	Ar+25% CO ₂ (Teste 13)	25	148,4	25,2	455,88	33,55	29,18	24	87
	Ar+25% CO ₂ (Teste 14)	27	202,7	27,2	716,86	52,76	45,66	35	86,5
	Ar+25% CO ₂ (Teste 15)	30	247,5	29,7	963,46	70,90	61,12	48	86,2
	Ar+25% CO ₂ (Teste 16)	32	304,8	31,8	1357,32	99,89	87,28	66	87,4

CAPÍTULO V

ANÁLISE DA CAPACIDADE DE PRODUÇÃO E ECONÔMICA PARA O ARAME TUBULAR E PARA O ARAME MACIÇO

Neste capítulo, é apresentada uma metodologia para a realização de testes que possibilitem obter como resposta características diversas das quatro combinações arame-gás, tais como, taxa de fusão, taxa de deposição e rendimento de deposição. Tais características são importantes por permitir uma análise da capacidade produtiva e econômica dos processos MIG/MAG e Eletrodo Tubular. O objetivo principal dessas análises não é identificar qual processo é melhor do que o outro, mas sim demonstrar as potencialidades de cada processo em função de sua aplicação.

5.1 Procedimento Experimental

Para a determinação das características taxa de fusão (T_F), taxa de deposição (T_d) e rendimento de deposição (N_D) tanto para o arame maciço como para o arame tubular foram realizados vários testes, conforme metodologia proposta no Capítulo III. Essa metodologia consiste em manter uma taxa de deposição por unidade de comprimento do cordão de solda constante (T_D), para todos os níveis de corrente a estudar, ou seja, comparar cordões de mesmo volume e depositados em mesma corrente, e avaliar os processos comparativamente a uma mesma corrente.

Neste contexto, para a realização dos testes foram utilizados os parâmetros estabelecidos no Capítulo IV, para o qual cada nível de corrente determinado (150 A, 200 A, 250 A e 300 A) e para cada combinação arame-gás (100% CO_2 e a mistura $Ar+25\%CO_2$), utilizou-se como tensão de regulação o valor médio da faixa operacional

de tensão (os parâmetros de regulagem encontram-se disponíveis na Tabela 5.1. Cada condição foi replicada duas vezes, resultando num total de 32 testes. Foi, assim, utilizado os valores médios entre dois testes como parâmetro de resposta, permitindo uma maior confiabilidade dos resultados obtidos e das análises sugeridas.

Tabela 5.1- Parâmetros de regulagem definidos (corrente, I; tensão, U; velocidade de alimentação, V_{al}) e calculado (velocidade de soldagem, V_{sol}) para os arames maciço e tubular

	I(A)	100%CO ₂			25%CO ₂ +75%Ar		
		U(V)	V_{al} (m/min)	V_{sol} (cm/min)	U(V)	V_{al} (m/min)	V_{sol} (cm/min)
Maciço	150	21	3,2	19	19	2,9	18
	200	23	5,2	31	21	4,5	28
	250	25	6,8	41	21	6,6	41
	300	29	8,7	52	27	8,6	52
Tubular	150	25	5	25	25	4,6	24
	200	27	8	38	27	7,2	35
	250	30	10,7	52	30	9,7	48
	300	32	14,5	69	32	13,8	66

Para tornar o resultado mais próximo do aplicado na prática, optou-se por avaliar o rendimento de deposição em juntas chanfradas, como a da Figura 5.1. As placas de teste foram fixadas utilizando-se o mesmo suporte descrito no Capítulo IV, a fim de prevenir distorções em ocorrência do alto aporte de calor desenvolvido durante a soldagem para ambos os processos.

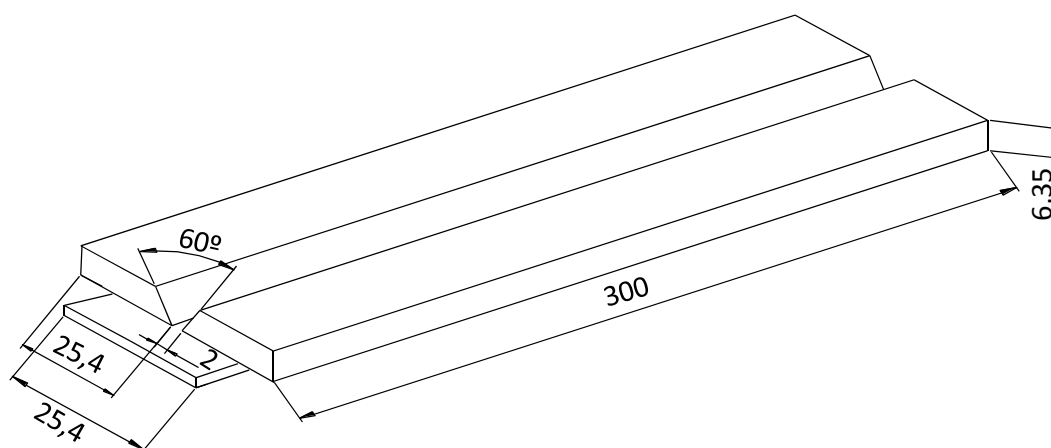


Figura 5.1- Geometria das placas de teste de aço comum ao carbono para a realização do ensaio para avaliar o rendimento de deposição (cotas em milímetros)

Foram definidas as seguintes condições experimentais para desenvolvimento do trabalho:

a) Uma vez confeccionados as placas de testes de acordo com o padrão estabelecido na Figura 5.1, todas foram identificadas numa seqüência numérica a partir do número um, para facilitar análises futuras. Na seqüência, todas as placas de teste foram devidamente pesadas e os valores de suas massas anotados conforme a numeração das mesmas;

Obs: Para eliminar, a possibilidade de erros de medição, pesou-se a mesma placa por três vezes, adotando-se como valor da massa final a média dos valores obtidos.

b) Utilizando-se a bancada experimental geral definida no Capítulo III, um cordão de solda foi realizado por chapa de teste, sob aquisição dos sinais elétricos de tensão e corrente;

c) Após soldado, promoveu-se a limpeza de todas as placas de teste, realizando a remoção dos respingos que se encontravam sobre a superfície da chapa e das escórias que se alojam sobre cordão dentro da área chanfrada, pesou-se novamente as placas.

d) Por diferença de massas, efetua-se o cálculo da massa depositada sobre cada placa de teste. Utilizando-se dos valores monitorados de velocidade de alimentação e tempo de arco aberto, juntamente com o valor determinado de massa depositada, obteve-se (conforme metodologia sugerida no Capítulo IV item 4.1.4) as características taxa de fusão, da taxa de deposição e, conseqüentemente, o rendimento de deposição.

5.2 Resultados

Na Tabela 5.2 estão apresentados os valores médios monitorados de corrente e tensão e os valores calculados das variáveis de resposta (rendimento de deposição, taxa de fusão e taxa de deposição) alvo de análise desse estudo, estes resultados são obtidos fazendo-se média entre os dois testes realizados. Por meio desta tabela, foi possível verificar que a grande maioria dos valores monitorados de corrente e tensão durante a execução dos testes encontram-se dentro da faixa operacional de trabalho estabelecida. Apenas os testes 8 e 16 tiveram a corrente extrapolada aos limites de tolerância ($I \pm 5 \text{ A}$), mas muito pouco. Ainda referente a esta tabela, é possível salientar que os valores da taxa de deposição por unidade de comprimento (T_D) apresentaram variações dentro do limite estabelecido como aceitável ($T_D \pm 0,1 \text{ g/cm}$). Estes dados

mostram que o objetivo de se trabalhar com o mesmo volume de cordão e mesma corrente para comparações foi alcançado.

Tabela 5.2 – Valores médios monitorados de tensão (U) e corrente (I) e valores calculados de taxa de fusão (T_F), taxa de deposição (T_d), rendimento de deposição (N_D), velocidade de soldagem (V_{sol}) e taxa de deposição por unidade de comprimento (T_D), para as diferentes combinações gás-aramé-nível de corrente desejada

		Teste	U_{Ref} [V]	V_{sol} [cm/min]	U [V]	I[A]	T_F [g/min]	T_d [g/min]	N_D [%]	T_D [g/cm]
Tubular	100%CO ₂	Teste 1	25	25	25,4	148,2	37,29	32,04	85,9	1,28
		Teste 2	27	38	27,2	203,7	59,28	50,39	85,0	1,33
		Teste 3	30	52	30,5	254,3	79,39	66,65	84,0	1,28
		Teste 4	32	69	32,4	303,5	106,26	92,49	87,0	1,34
	Ar+25% CO ₂	Teste 5	25	24	25,2	148,6	34,53	30,05	87,0	1,25
		Teste 6	27	35	27,5	201,6	53,40	47,20	88,4	1,35
		Teste 7	30	48	30,7	252,6	71,47	61,97	86,7	1,29
		Teste 8	32	66	32,5	307,2	100,51	88,32	88,0	1,34
Maciço	100%CO ₂	Teste 9	21	19	21,5	148,8	28,54	26,68	93,5	1,40
		Teste 10	23	31	23,3	203,7	45,66	43,38	95,0	1,40
		Teste 11	25	41	25,2	253,4	58,76	55,24	94,0	1,35
		Teste 12	29	52	29,1	300,0	74,73	71,30	95,5	1,37
	Ar+25% CO ₂	Teste 13	19	18	19,6	147,8	25,85	24,20	93,6	1,27
		Teste 14	21	28	21,5	195,2	39,63	37,85	95,5	1,35
		Teste 15	21	41	21,4	247,2	57,50	54,63	95,0	1,33
		Teste 16	27	52	27,3	303,8	75,46	73,20	97,0	1,40

Buscou-se analisar o tipo de transferência metálica predominante nas soldagens realizadas e avaliar possíveis irregularidades na transferência metálica que pudessem influenciar nas variáveis de resposta, objeto de estudo deste capítulo. Para tanto, os testes foram representados graficamente por meio de oscilogramas de corrente e tensão, como ilustrados nas Figuras 5.2 e 5.3 para o arame maciço e proteção gasosa de 100% CO₂ nos 4 valores de corrente estudados. Observa-se para este arame, sob esta proteção gasosa a ocorrência de transferência metálica tipo curto-circuito. Este comportamento se repetiu para o gás de proteção Ar+25% CO₂, como pode ser verificado pelas Figuras 5.4 e 5.5(a). Porém, pela Figura 5.5(b) observa-se que a transferência metálica é do tipo quase-goticular, não comum para gases tão ricos em CO₂, mas justificável pela elevada corrente. Transferência não por curto-circuito foge do escopo deste trabalho, mas para esse nível de corrente a redução da tensão leva a instabilidade operacional.

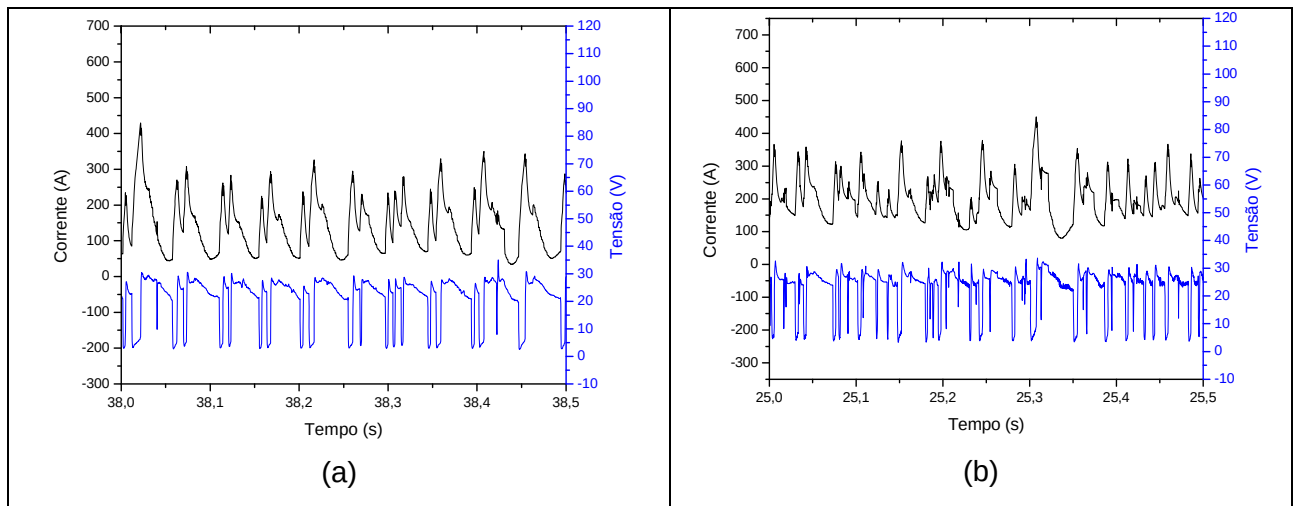


Figura 5.2- Oscilogramas de corrente e tensão para o processo MIG/MAG com gás de proteção 100% CO₂: a) Corrente de 150 A e tensão regulada 21 V; b) Corrente de 200 A e tensão regulada 23 V

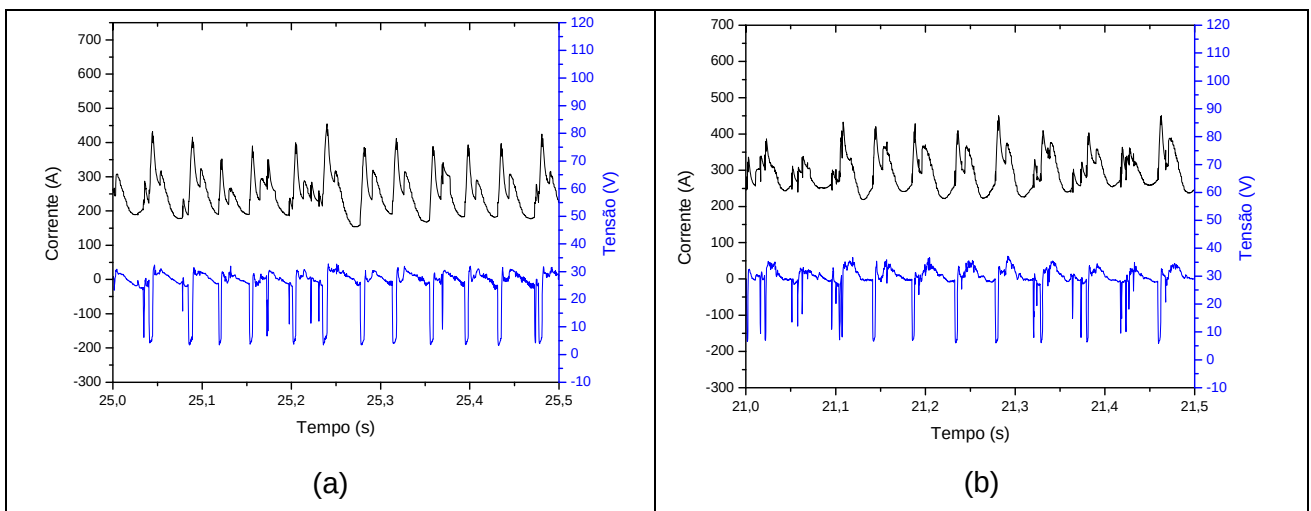


Figura 5.3- Oscilogramas de corrente e tensão para o processo MIG/MAG com gás de proteção 100% CO₂: a) Corrente de 250 A e tensão regulada 25 V; b) Corrente de 300 A e tensão regulada 29 V

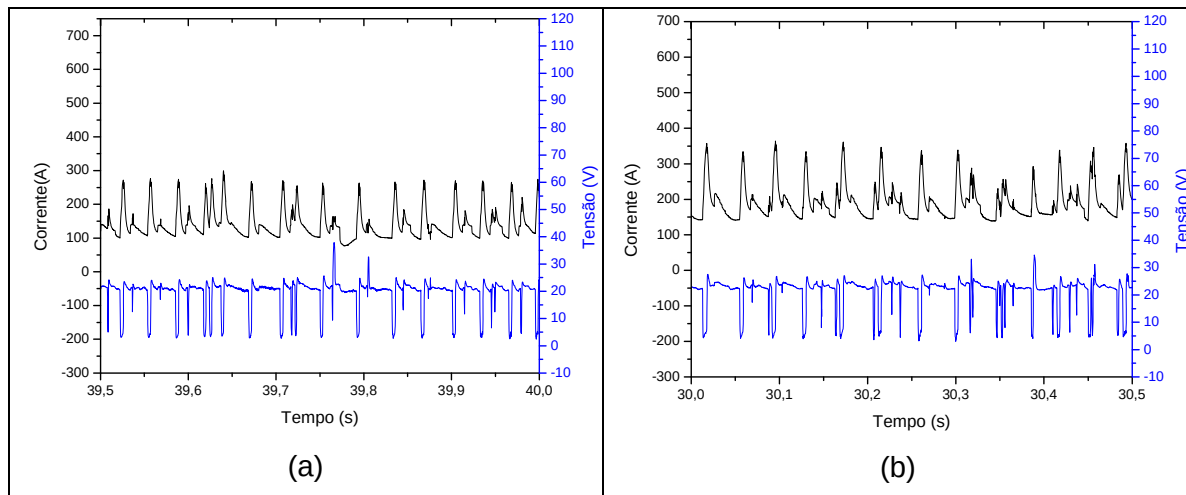


Figura 5.4- Oscilogramas de corrente e tensão para o processo MIG/MAG com gás de proteção Ar+25% CO₂: a) Corrente de 150 A e tensão regulada 19 V; b) Corrente de 200 A e tensão regulada 21 V

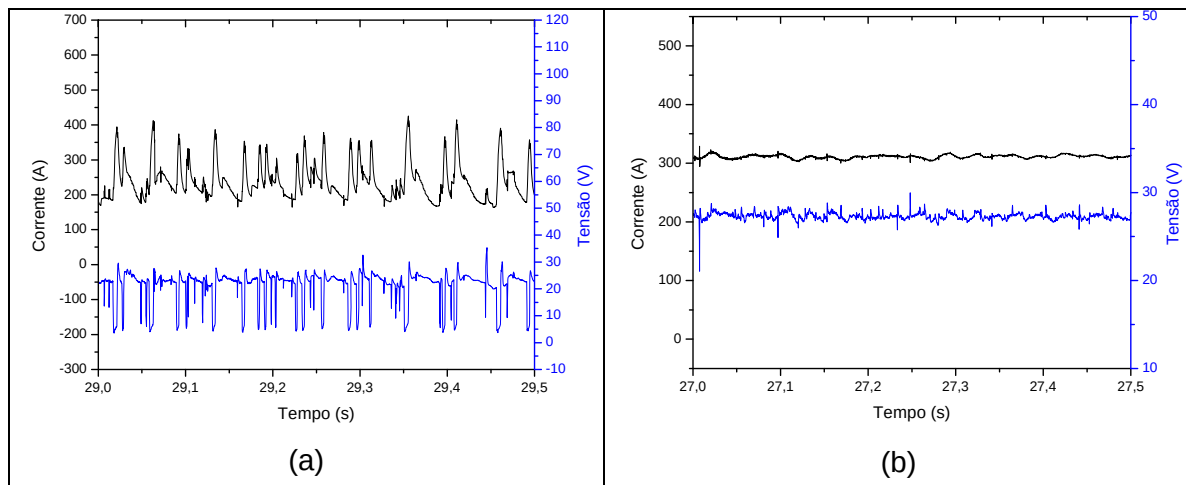


Figura 5.5- Oscilogramas de corrente e tensão para o processo MIG/MAG com gás de proteção Ar+25% CO₂: a) Corrente de 250 A e tensão regulada 21 V; b) Corrente de 300 A e tensão regulada 27 V

Para avaliar as características da transferência metálica dos arames maciço, foram calculados, a princípio para a proteção gasosa com 100% CO₂, para cada nível de corrente, a frequência de curto circuito (F_{CC}), o tempo de arco aberto (t_{ab}) e tempo de curto circuito (t_{CC}). Para a realização dos cálculos foi utilizado um programa implementado na linguagem Matlab, conforme Anexo I. O cálculo da frequência de curto-circuito também pode ser efetuado por meio da Eq. 5.1, como segue abaixo:

$$F_{cc} = \frac{3V_{al} * d^2}{2d_g} \quad [Hz] \quad (5.1)$$

Onde:

V_{al} - velocidade de alimentação [cm / min];

d - diâmetro do eletrodo [mm];

d_g - diâmetro da gota [mm];

Os resultados obtidos para estas variáveis são apresentados na Tabela 5.3, na qual é possível observar que à medida que a corrente aumenta, há uma redução das frequências de curto-circuito, bem como um crescimento do tempo de curto-circuito e de arco aberto. Isso provavelmente ocorra porque, para se atingir uma maior estabilidade em altas correntes, foi necessário maiores níveis de tensão, em função da própria característica estática do arco. Nota-se uma maior irregularidade nos curtos-circuitos que ficaram mais longos e com menor frequência, resultando em gotas com diâmetros maiores, o que é um indício que também o comprimento de arco aumentou para a parametrização considerada como de maior estabilidade operacional para altas correntes. Deve-se também imaginar que em 250 e 300 A tenha havido forte repulsão de gotas, o que fez que pelo critério adotado se procurasse maiores comprimentos de arco para definir as condições de estabilidade operacional.

Tabela 5.3 Valores medidos para frequência de transferências de gotas (F_{cc}), tempos de arco aberto (t_{ab}) e tempos de curto-circuito (t_{cc}) e valores calculados do tamanho teórico da gota $\varnothing_{gota}$ em transferência para as soldagens MIG/MAG com o arame maciço

	F_{cc} (Hz)	t_{cc} (s)	t_{ab} (s)	$\varnothing_{gota}$ (mm)
100%CO2 /150 A	68,65	0,0025	0,012	1,18
100%CO2 /200 A	48,53	0,0044	0,016	1,56
100% CO2 /250 A	36,58	0,0043	0,022	1,88
100%CO2 /300 A	23,44	0,0054	0,037	2,37

Apesar destas poucas discordâncias entre planejado e esperado na parte experimental (2 testes com tolerâncias de corrente superadas e 1 teste com transferência não por curto-circuito), as tendências do comportamento da influência do tipo de gás e do nível de corrente sobre as características taxas de fusão e deposição se mantiveram. Assim, pode-se dizer que os parâmetros selecionados para as soldagens foram adequados para os propósitos do trabalho.

De forma análoga, as Figuras 5.6 e 5.7, para proteção gasosa de 100%CO₂, e Figuras 5.8 e 5.9, para proteção gasosa Ar+25% CO₂, mostram o comportamento das transferências das soldas com o arame tubular através de oscilogramas. Pode-se observar não haver variações significativas na transferência metálica, para esta faixa de parâmetros regulados. Numa primeira análise, poder-se-ia dizer que a transferência metálica com a proteção gasosa 100%CO₂ tende a ocorrer do tipo globular e que para a proteção com a mistura tende para uma transferência metálica do tipo goticular. Porém, é conhecido que a transferência metálica do eletrodo tubular ocorre de forma diferente do que para os maciços, já que o fluxo influencia diretamente na formação da gota e no modo como está gota se transfere para a poça de fusão. Assim, o oscilogramas não conseguem sozinhos reproduzir o tipo real de transferência. Mas pode-se, através destes e do conhecimento de como a transferência em eletrodos tubulares acontecem, inferir que com 100% CO₂ a gota cresce mais antes de se destacar (oscilando mais o comprimento do arco e, respectivamente a tensão).

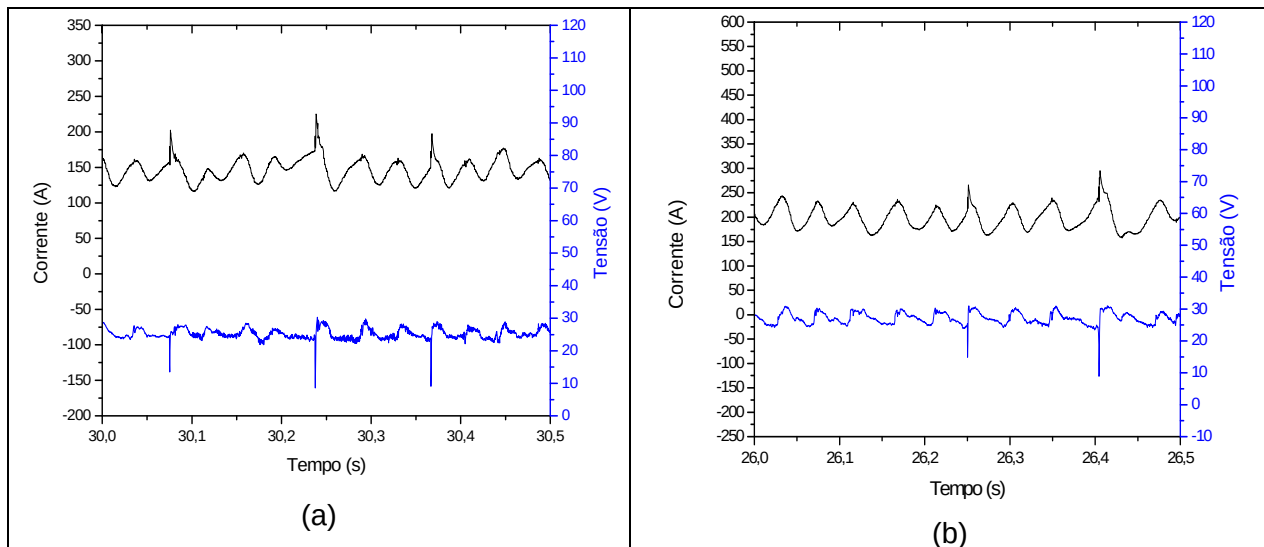


Figura 5.6- Oscilogramas de corrente e tensão para o processo Eletrodo Tubular com gás de proteção 100% CO₂: a) Corrente de 150 A e tensão regulada 25 V; b) Corrente de 200 A e tensão regulada 27 V

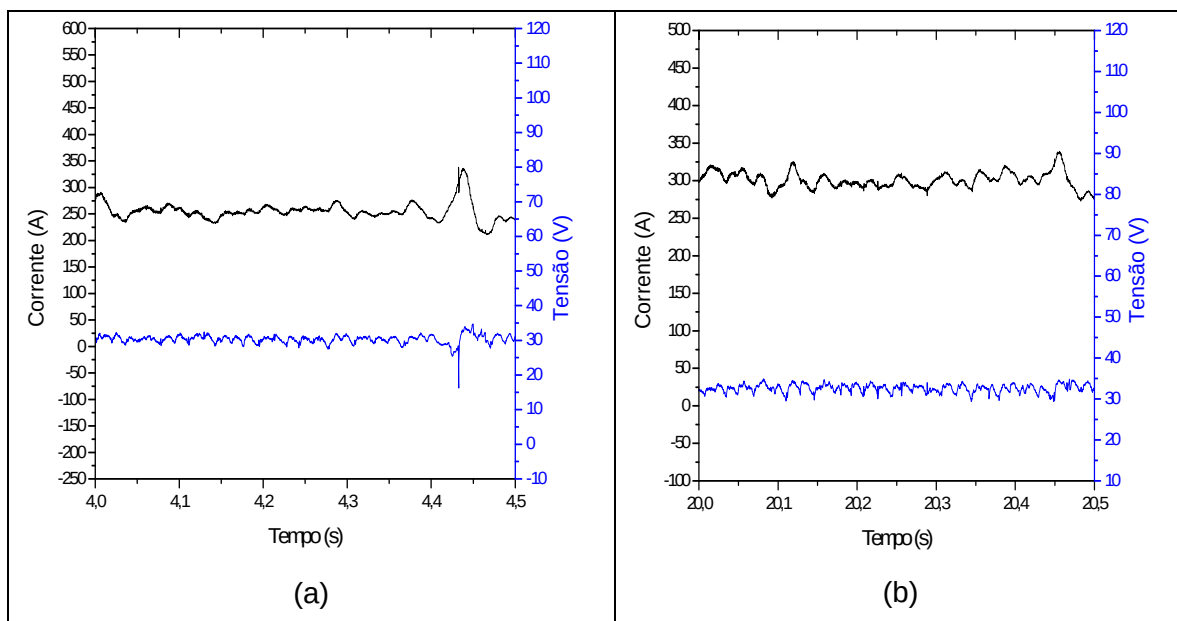


Figura 5.7- Oscilogramas de corrente e tensão para o processo Eletrodo Tubular com gás de proteção 100% CO_2 : a) Corrente de 250 A e tensão regulada 30 V; b) Corrente de 300 A e tensão regulada 32 V

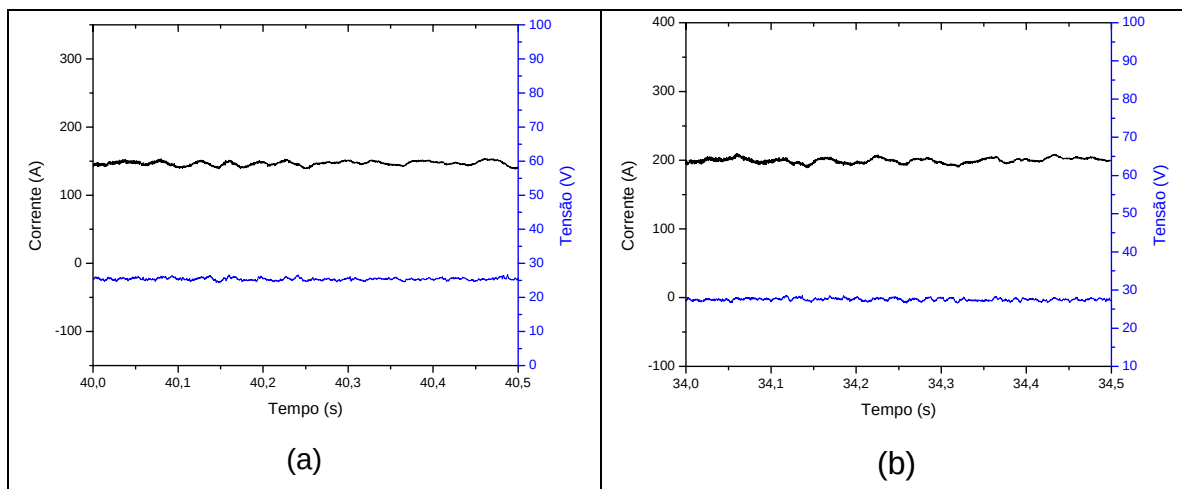


Figura 5.8- Oscilogramas de corrente e tensão para o processo Eletrodo Tubular com gás de proteção $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$: a) Corrente de 150 A e tensão regulada 25 V; b) Corrente de 200 A e tensão regulada 27 V

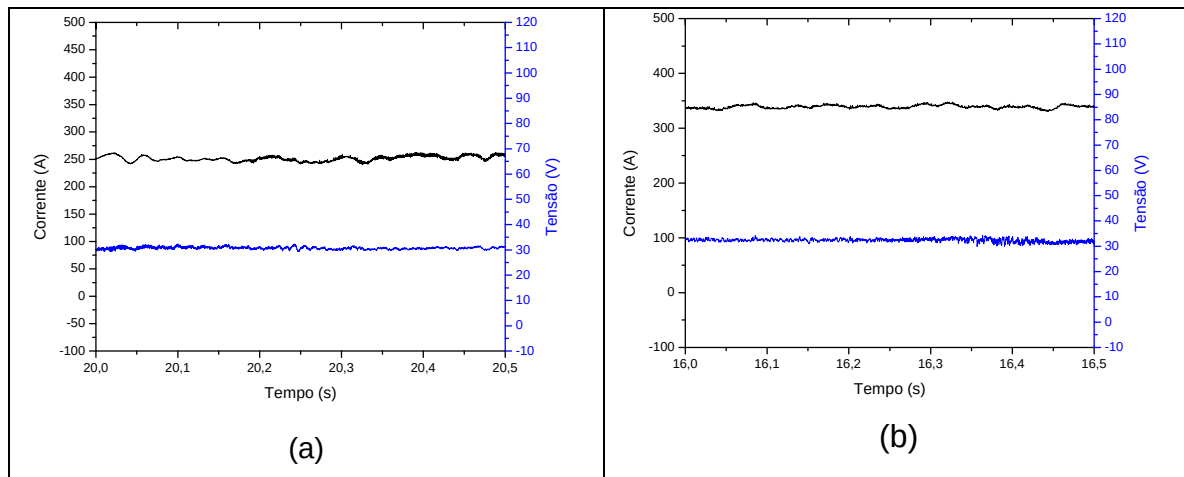


Figura 5.9- Oscilogramas de corrente e tensão para o processo Eletrodo Tubular com gás de proteção Ar+25%CO₂: a) Corrente de 250 A e tensão regulada 30 V; b) Corrente de 300 A e tensão regulada 32 V

Voltando aos resultados da Tabela 5.2, é possível verificar que o processo Eletrodo Tubular apresenta maior taxa de fusão do que o processo MIG/MAG, quando comparados sobre as mesmas condições (o mesmo nível de corrente e a mesma proteção gasosa). Por exemplo, comparando o teste 9 com o teste 1, para a proteção gasosa de 100% CO₂ e 150 A de corrente, verifica-se uma taxa de fusão de 27,66 g/min para o maciço contra 36,51 g/min para o tubular, representando uma diferença de 8,87 g/min, que é um valor significativo (cerca de 24% maior). Em todos os outros níveis de corrente e para os dois tipos de proteção gasosa é possível observar que o arame tubular também apresenta uma taxa de fusão superior ao arame maciço.

As Figuras 5.10 e 5.11, que ilustram os dados da Tabela 5.2 para a taxa de fusão, mostram que os resultados obtidos estão de acordo com o descrito na literatura, como por Modenesi e Reis (2007), entre outros autores (o aumento da corrente provoca um crescimento da taxa de fusão). Porém, observa-se que o processo Eletrodo Tubular apresenta uma inclinação da curva para o arame tubular visivelmente maior do que para o arame maciço. Segundo Lesnewish (1958), para o processo MIG/MAG a fusão do eletrodo é controlada pelo efeito Joule e pelo calor gerado na ponta do eletrodo. Desse modo, o aumento da corrente influencia diretamente nestas duas parcelas, resultando no aumento da taxa de fusão. Para o processo Eletrodo Tubular, a fita metálica que envolve o fluxo é que conduz à corrente (menor área superficial para a condução da corrente), sofrendo assim uma ação maior do Efeito Joule (maior densidade de corrente), resultando, então, em valores maiores de taxa de fusão e uma maior influência desta parcela na taxa de fusão para este processo (como o efeito Joule é função quadrática da corrente, o peso maior dessa parcela dá uma característica mais

exponencial para a curva). Ainda avaliando as Figuras 5.10 e 5.11, outro fator que pode ser observado é que a proteção gasosa 100% CO₂ resulta em taxas de fusão levemente superiores em valor, em relação à proteção gasosa Ar+25% CO₂ para ambos os processos. Provavelmente essa pequena diferença ocorra devido ao maior aquecimento na região anódica (ponta do arame) para a proteção gasosa 100% CO₂.

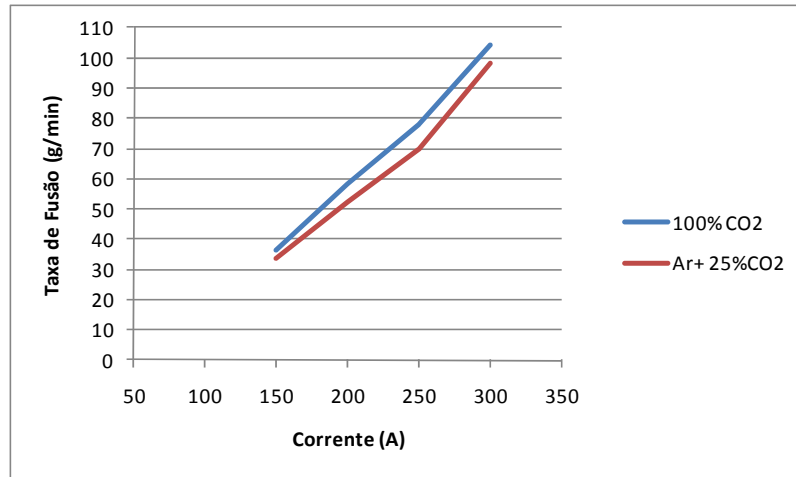


Figura 5.10 – Variação da taxa de fusão com o aumento da corrente para o arame tubular E71T-1 em função do tipo de proteção gasosa

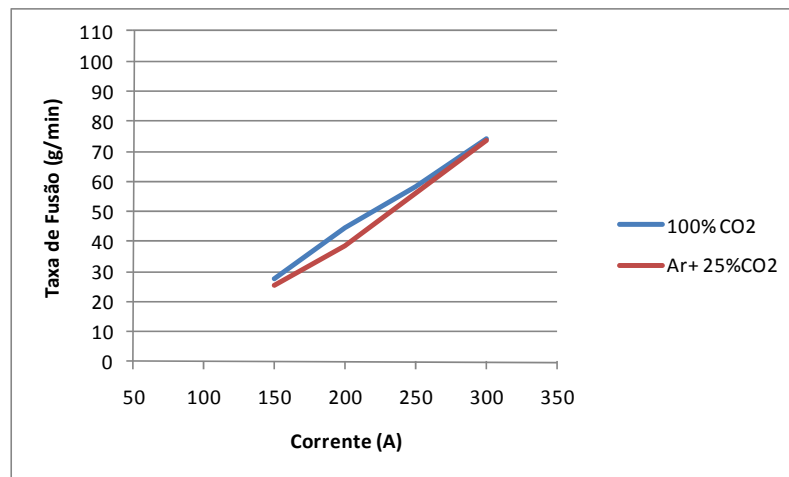


Figura 5.11 – Variação da taxa de fusão com o aumento da corrente para o arame maciço ER70S-6 em função do tipo de proteção gasosa

Os resultados de taxa de fusão obtidos com a realização dos testes se assemelham com dados encontrados na literatura corrente. Starling, Modenesi e Borba (2009), por exemplo, realizando um estudo comparativo entre diferentes arames tubulares, fixou a velocidade de alimentação do arame em dois níveis (7 m/min e 9 m/min) para um arame tubular rutílico (similar ao arame deste trabalho), com a proteção

gasosa de Ar+25% CO₂ e um comprimento energizado de eletrodo de 16 mm e um comprimento de arco 3,5 mm. Eles encontraram as correntes de 177 A e 215 A, respectivamente para a menor e maior velocidade de alimentação, as quais resultaram em taxas de fusão de 48,5 g/min e 62,30 g/min, valores estes que estão em concordância com os valores disponíveis na Tabela 5.2.

Para um arame maciço do tipo E70S-6 com proteção gasosa de argônio puro, Modenesi e Reis (2007) encontraram velocidades de alimentação (taxa de fusão) similares aos valores estabelecidos na Tabela 5.1, como pode ser averiguado por meio da Figura 5.12. Por exemplo, para a corrente de 150 A com argônio puro eles encontraram uma velocidade de alimentação de aproximadamente 3,5 m/min, ao passo que os testes realizados neste trabalho com o gás e proteção 100% CO₂ resultou numa velocidade de alimentação de 3,2 m/min para se obter o mesmo nível de corrente de 150 A (a mesma analogia pode ser realizada para os demais níveis de corrente apresentados na Figura 5.12).

Suban e Tusek (2001), a partir de experimentos com diferentes gases de proteção para o arame maciço, concluíram que a influência do gás de proteção sobre a taxa de fusão é mínima, podendo ser desprezadas. Até certo ponto, os resultados deste trabalho estão de acordo com estes autores.

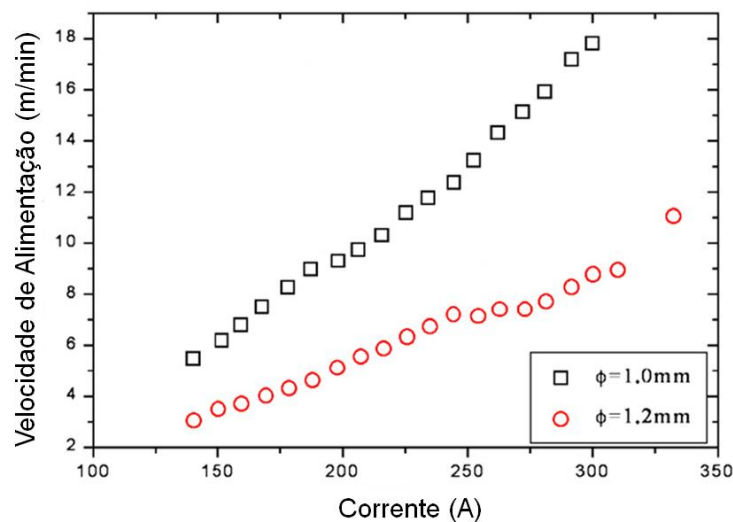


Figura 5.12- Velocidade de alimentação do arame pela corrente, arame maciço AWS E70S-6 com proteção gasosa Argônio puro (adaptado de Modenesi e Reis, 2007)

A taxa de deposição é uma característica que pode sofrer influência de vários parâmetros de soldagem tais como, transferência metálica, tipo de gás de proteção, diâmetro de eletrodo entre outros (instabilidades de qualquer ordem no arco podem resultar num índice maior de respingos e numa menor taxa de deposição). Observando

a Tabela 5.2, verifica-se que o aumento da corrente também promove um aumento da taxa de deposição. A Figura 5.13 apresenta para cada tipo de arame as curvas de tendências das taxas de fusão e de deposição, para proteção gasosa 100%CO₂. Verifica-se, para estas condições, que o arame tubular também apresenta para todos os níveis de corrente (se bem que mais nítido para maiores corrente) uma taxa de deposição superior ao do maciço (por meio da Tabela 5.2, observa-se o mesmo comportamento para a proteção gasosa Ar+25% CO₂). Pode-se observar também que as linhas para o maciço estão mais próximas entre si, ilustrando que o rendimento de deposição do maciço é maior do que do tubular (fato quantificado pela Tabela 5.2). Segundo Miranda (1999) o rendimento de deposição pode sofrer influência de diversos fatores, tais como variações no diâmetro do eletrodo, na composição química, na extensão do eletrodo e na corrente de soldagem.

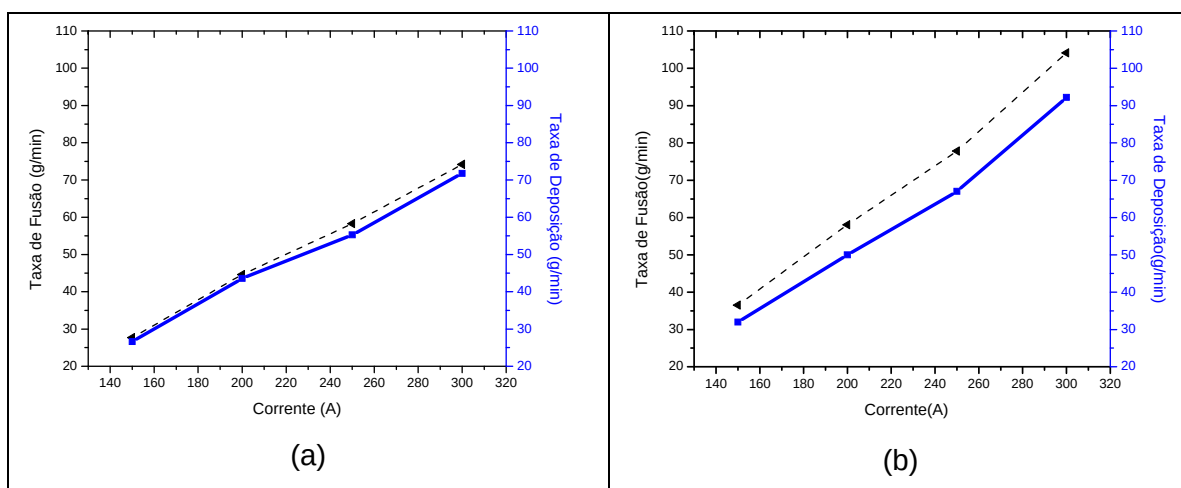


Figura 5.13 – Taxa de fusão (linha de cima) e taxa de deposição (linha de baixo) em função da corrente: (a) arame maciço com proteção gasosa de 100% CO₂; (b) arame tubular com proteção gasosa de 100% CO₂

O menor rendimento de deposição do tubular (cerca de 10%) pode ser justificado nas perdas não somente com respingos, similar ao maciço, mas também na forma de escória e/ou fumos. Uma melhor avaliação destas diferenças entre os rendimentos de deposição pode ser feita pela visualização gráfica das Figuras 5.14 (proteção gasosa 100% CO₂) e Figura 5.15 (proteção gasosa Ar + 25% CO₂). Observa-se que o nível de corrente não influenciou muito a geração de respingo, mas que houve uma pequena melhora de desempenho (mais rendimento) quando se usou a mistura gasosa ao invés do CO₂ puro. Finalmente, pode-se notar ainda que em todos os casos os rendimentos foram bastante altos, evidenciando que o propósito de uma escolha dos

parâmetros para se obter sempre regulagens de parâmetros adequadas e típicas para cada combinação arame-gás-corrente foi atingido.

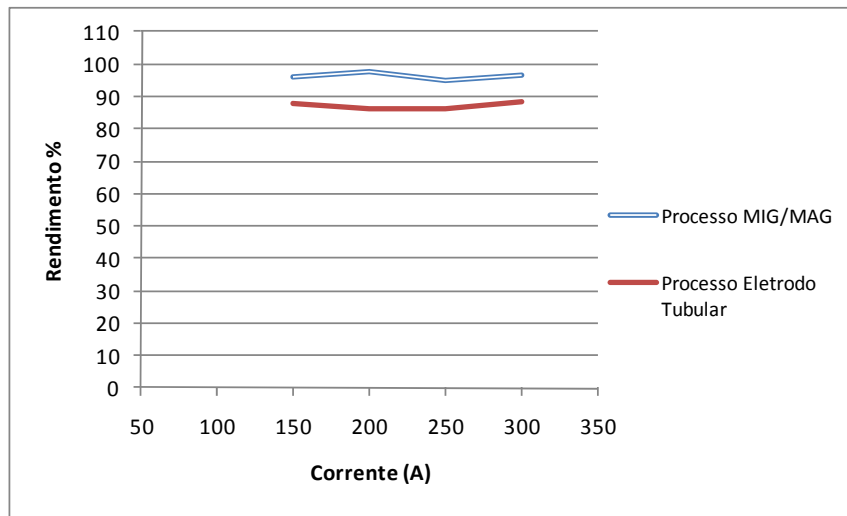


Figura 5.14- Comparação do rendimento de deposição (N_D) entre os processos MIG/MAG e Eletrodo Tubular com proteção gasosa 100% CO₂

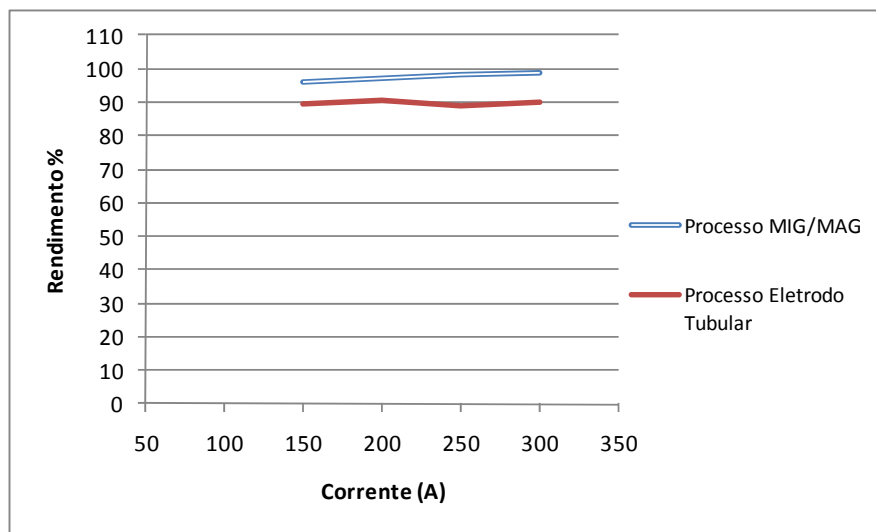


Figura 5.15- Comparação do rendimento de deposição (N_D) entre os processos MIG/MAG e Eletrodo Tubular com proteção gasosa Ar + 25% CO₂

Starling, Modenesi e Borba (2009) encontraram para a proteção gasosa Ar + 25% CO₂ um rendimento de deposição (N_D) de 89% e para a proteção gasosa de 100% CO₂ encontrou um rendimento de 85%, valores estes bem similares aos valores de rendimento de deposição determinados pelos testes aqui realizados que foram em média da ordem de 90% para a primeira proteção gasosa citada e 87% para a segunda. Deve-se lembrar que estes autores usaram algumas condições um pouco diferenciadas,

como a DBCP e tipo de chanfro. Já para o arame maciço em condições de curto-circuito forçado com a mistura Ar + 25% CO₂, Dobignies (2008) encontrou valores de rendimento de deposição variando de 92% a 97,8% em função das variáveis por ele estudadas. Nos testes realizados neste trabalho com esta proteção gasosa foram encontrados rendimentos de deposição variando de 96% a 98,7%, valores que também apresentam similaridade com os citados na literatura.

No que tange ao aspecto visual dos cordões realizados, é possível perceber que o processo Eletrodo Tubular, conforme Figura 5.16, apresenta cordões de solda com aspecto liso e de boa molhabilidade. Este comportamento ocorre provavelmente devido ao efeito dos elementos do fluxo, que melhora a molhabilidade e conforma os cordões, como ocorre com os processos arco submerso ou eletrodo revestido rutílico. Já para o processo MIG/MAG, de acordo com a Figura 5.17, observa-se a formação de um cordão com uma superfície de aspecto irregular, relacionada à existência de curtos-circuitos que promovem uma fusão/solidificação da poça menos estável do ponto de vista térmico, porém também apresentando boa molhabilidade.



Figura 5.16- Aspectos dos cordões de solda realizados com o processo Eletrodo Tubular com a proteção gasosa de 100% CO₂, para as correntes de 150 A, 200 A, 250 A e 300 A



Figura 5.17- Aspectos dos cordões de solda realizados com o processo MIG/MAG com proteção gasosa de 100%CO₂, para as correntes respectivamente de 150 A, 200 A, 250 A e 300 A.

5.3 Determinação do Custo de Soldagem e da Capacidade Produtiva

Desenvolveu-se erroneamente o conceito de que altas taxas de fusão (consumo) ou altos rendimentos de deposição representam elevada produtividade. Se fosse assim, por uma análise simplista o arame tubular apresentaria de longe melhor aspecto econômico do que o arame maciço, devido às altas taxas de fusão verificadas para este processo. Mas, neste mesmo trabalho, foi obtido que o arame tubular tem um menor rendimento de deposição. Mas, para Scotti (2008), não se deve confundir consumo com taxa de deposição (quantidade de material que realmente forma o cordão de solda), sendo esta sim um fator indicativo de produção.

Vale à pena ressaltar que para a indústria e usuários em geral, dois fatores são decisivos para seleção de um processo de soldagem, os custos envolvidos para fabricação de uma junta e a capacidade produtiva (tempo para realizar uma unidade de comprimento de junta). Ainda assim é muito difícil realizar uma análise econômica entre os dois processos baseada nas características obtidas para de cada consumível. Muitas vezes estas características sozinhas até mascaram a análise econômica, pois pode ser necessário também levar em conta o aspecto do cordão desejado para determinadas aplicações os custo de limpeza de respingos, custo e tempo despendido para manuseio de consumíveis, etc. Mas de uma forma mais simplista, um requisito que pode apresentar um caráter conciliatório entre aspectos antagônicos é o tempo de soldagem.

Isso porque se pode consumir mais, para depositar mais em menos tempo. Mas outro requisito seria o custo do consumível gasto para se fazer o mesmo trabalho.

Uma vez esclarecido o conceito de produção que este trabalho adotou como base, na procura por realizar uma análise comparativa justa entre os processos MIG/MAG e Eletrodo Tubular, tentou-se fazê-la uma metodologia um pouco diferente do convencional, tentando criar uma base igualitária de comparação entre os processos. Para tal, fixou-se o mesmo nível de corrente para comparar os dois processos e, além disto, conseqüentemente como efeito de maior importância, fixou-se a mesma taxa de deposição por unidade de comprimento para todos os níveis de corrente trabalhados, ou seja, os parâmetros foram dimensionados de forma a permitir a reprodução do mesmo volume cordão de solda, independente do processo de soldagem (na prática o que se quer é preencher um volume de junta).

Inicialmente o custo total de soldagem pode ser expresso pela Equação 5.2, utilizada por Silva, Ferraresi e mScotti (2000):

$$CTS = CM + CT + CEQ + CEL \quad \text{Eq. 5.2}$$

onde CTS é o custo total de soldagem, CM é o custo de material, CT é o custo de trabalho, CEQ é o custo de equipamento e CEL é o custo de eletricidade.

Pode-se considerar CT, CEQ e CEL como sendo semelhantes ao se comparar estes processos. Dessa forma, para o cálculo do custo total de soldagem a parcela que exerce maior influência é o custo de material. Sendo assim, foi realizada uma análise para avaliar o custo da utilização do arame tubular em relação ao arame maciço. Para isto, utilizou-se a taxa de fusão encontrada para cada tipo de arame e depois, se utilizando a velocidade de soldagem, calculou-se o valor da massa fundida por unidade de comprimento de solda. Tendo-se em mãos o preço dos arames por quilograma, calculou-se o preço por unidade de comprimento de solda. É importante salientar que o preço estimado tem relação com a massa depositada, ou seja, depende da taxa de deposição, mas não da velocidade de soldagem utilizada, pois se está calculado por metro de cordão de solda depositado.

A Tabela 5.4 apresenta os valores de parâmetros levantados para os dois processos que permitem uma análise econômica de forma comparativa. O valor do consumível por kg foi definido de forma estimativa baseado em consultas a revendedores locais. Nesta tabela, pode-se observar que, para se fazer um mesmo volume de material adicionado (mesma taxa de deposição) por unidade de comprimento, o arame tubular tem uma taxa de fusão de aproximadamente 26% maior

do que o arame maciço, o que vai conduzir num custo maior de compra de consumíveis, mesmo se o preço/kg fosse o mesmo. Mas, pode-se notar que o preço de mercado do arame tubular com alma com fluxo é aproximadamente 95 % maior do que o do maciço. Por outro lado, consegue fazer a mesma junta com uma velocidade de soldagem cerca de 22,6% maior do que para o arame maciço, reduzindo o tempo de soldagem.

Tabela 5.4 - Valores de taxa de deposição, velocidade de soldagem, taxa de fusão e preço por quilograma de arame para um T_D de 0,13 kg/m, trabalhando com os dois arames com uma corrente de 200 A e proteção gasosa de 100% CO_2

Tipo de Junta	Tipo de arame-eletrodo	Taxa de fusão (kg/h)	Taxa de deposição (kg/h)	V_{sold} (m/h)	Preço/kg
Chanfrada	Maciço	2,73	2,60	18,6	R\$ 4,31
	Tubular	3,55	3,00	22,8	R\$ 8,43

A Equação Eq. 5.3 mostra o cálculo da massa por unidade comprimento de solda (Mc), enquanto a Equação 5.4 mostra o cálculo do preço por unidade de comprimento de solda (Pc).

$$Mc = \frac{Tf}{V_{sold}} \left[\frac{kg}{m} \right] \quad \text{Eq. 5.3}$$

$$Pc = Pk \times Mc \left[\frac{R\$}{m} \right] \quad \text{Eq. 5.4}$$

onde Tf = taxa de fusão [kg/h]; V_{sold} = velocidade de soldagem [m/h] e Pk = preço por quilograma [R\$/kg].

Assim, utilizando-se as Equações 5.3 e 5.4 e a Tabela 5.4, tem-se os valores do preço por metro de solda para cada tipo de arame e o aumento de custo percentual da utilização do arame tubular, mostrados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Custos de arame por metro de solda para os arames maciço e tubular ao se trabalhar com uma mesma taxa de deposição por unidade de comprimento de 0,13 kg/m

Tipo de Junta	Tipo de arame-eletrodo	Mc (kg/m)	Preço/m	Relação de Custo do Tubular (%)
Chanfrada	Maciço	0,14	R\$ 0,66	83%
	Tubular	0,15	R\$ 1,21	

Observando-se a Tabela 5.5 é possível perceber que para cada metro de cordão de solda a se realizar tem-se que o custo do arame tubular é aproximadamente 83% maior do arame maciço. Podendo então afirmar que para este caso, com esta seleção de parâmetros, o fator realmente influente no maior custo de utilização do arame tubular é o preço de comercialização do referido arame.

Outra forma interessante de analisar o custo do arame tubular em relação ao maciço seria a análise de custo, levando em conta o tempo de soldagem. Para isto, foram utilizados aleatoriamente os testes com o nível de corrente de 200 A, uma vez que para dos os níveis de corrente o arame tubular apresentou melhor desempenho em relação à velocidade de soldagem, ou seja, onde o arame tubular obteve uma maior capacidade de produção devido ao menor tempo de soldagem. Para isto, foram utilizados os dados dos referidos testes, apresentados na Tabela 5.6 que mostra o tipo de junta e as velocidades de soldagem para cada tipo de arame.

Tabela 5.6 – Valores do aumento do custo e tempo de soldagem utilizando-se o arame tubular

Tipo de junta	Custo do arame tubular	Ganho de tempo utilizando arame tubular
Chanfrada	83%	22%

Mas neste caso, o custo de mão de obra pode ser significativo, ou um menor tempo de operação um fator essencial para a produção, o ganho de tempo alcançado para estes tipos de junta com o arame tubular podem até superar nos custos finais este maior custo de arame. Então, cada caso deve ser analisado separadamente e de uma forma global em função do tipo de aplicação do processo.

CAPÍTULO VI

ANÁLISE DA GERAÇÃO DE RESPINGOS DOS PROCESSOS ELETRODO TUBULAR E MIG/MAG

Este capítulo apresenta o desenvolvimento experimental, os resultados e uma análise sobre a geração de respingos, tanto para o processo MIG/MAG quanto para o processo Eletrodo Tubular, além de estabelecer um procedimento próprio para avaliação dos respingos gerados. Os respingos são analisados sobre diferentes aspectos tais como, alcance dos respingos, classificações por tamanho e massa gerada de respingos. Com base nesses dados, foram feitas análises comparativas e qualitativas.

6.1 Procedimento Experimental

O conjunto de experimentos deste capítulo objetiva verificar as características dos respingos gerados por processos tais como Eletrodo Tubular e MIG/MAG. É perceptível que a formação dos respingos, assim como o rendimento de deposição, depende de variáveis múltiplas, sendo necessário criar uma metodologia de trabalho capaz de caracterizar a geração de respingo de uma combinação arame-gás de proteção em condições adequadas de desempenho operacional.

Inicialmente, os testes realizados foram fundamentados nas premissas metodológicas estabelecidas no Capítulo III, ou seja, comparar usando-se o mesmo volume de material depositado por unidade de comprimento, bem como o mesmo nível de corrente para ambos os processos. A partir daí, soldas foram feitas com os arames a estudar em condições padronizadas, o que inclui o uso de três regulagens de tensão

(para se encontrar a mais adequada) em um único nível de corrente, pois a geração de respingos depende não somente do arame, mas também dos parâmetros de soldagem (faixa de corrente, comprimento de arco, volume do cordão, DBCP, etc.), do gás de proteção e da fonte. O equipamento e procedimento de ensaio utilizados estão descritos em Fernandes e Scotti (2009) permite uma comparação quantitativa entre os dois processos, por meio de análise do rendimento de deposição, da distribuição percentual por alcance e da distribuição percentual por tamanho de respingo para cada alcance. Os resultados são avaliados de forma relativa por meio da porcentagem da massa gerada.

A distribuição percentual por alcance determina a massa de respingo que se concentra em cada divisória existente no equipamento de coleta de respingo. Já a distribuição percentual por tamanho de respingo para cada alcance define as dimensões dos respingos em suas devidas regiões de alcance, conforme as divisões de alcance do equipamento de coleta. O rendimento de deposição (N_D) é utilizado para determinar, por comparação com a quantidade de respingos gerados, o que foi perdido como escória e fumos. Isto por que quando se mede o rendimento de deposição pela relação de material consumido com a quantidade de material depositado (ver Capítulo V), está se medindo todas as perdas (fumos, escória e respingos metálicos). Já quando se determina só os respingos se trabalha apenas com a parte metálica.

Para a realização dos testes foi utilizada a bancada experimental para o ensaio de respingo definida no Capítulo III. Para as soldagens, utilizou-se uma fonte eletrônica micro processada Digitec 600 trabalhando no modo tensão constante.

Para a obtenção dos resultados que representassem adequadamente os conceitos das análises que este ensaio tem por objetivo realizar, faz necessário o desenvolvimento de um procedimento experimental sistêmico, com a seqüência de passos a seguir:

- a) Realiza-se a confecção das placas de teste, identificando-as numa seqüência numérica com início a partir do número um, sendo então estas placas devidamente pesadas antes da execução da soldagem;
- b) Fixar a barra à base da caixa coletora. Encaixar a coifa sobre a caixa coletora. As soldagens são realizadas exatamente no centro da barra, em relação à largura, sendo o robô posicionado cuidadosamente a 15 mm de uma extremidade e finalizando a 15 mm da outra (totalizando 440 mm de comprimento, com tolerância de 10 mm), sendo assim realizado para evitar colisões do robô com a coifa;
- c) Fazer a aquisição dos sinais elétricos para posteriormente efetuar os cálculos dos índices estabelecidos pelo ensaio;
- d) Retirar a coifa da caixa coletora e levantar a lateral móvel da caixa coletora;

- e) Os alcances definidos na caixa coletora recebem a seguinte denominação: até 80 mm de centro (C), de 81 a 160 mm de meio (M) e acima de 160 mm de borda (B). A partir dessa denominação os sacos plásticos utilizados para a coleta dos respingos são pesados, e numerados com o número do teste e com a letra do alcance correspondente;
- f) Recolhe-se os respingos com o auxílio de um ímã nos sacos plásticos devidamente identificados, sendo que para cada alcance entre as divisórias de mesma distância em relação à posição central, deverá ser utilizado um único saco;
- g) Realiza-se a pesagem de todos os sacos enumerados por alcance e então por diferença de massa (massa inicial e final dos sacos) obtém-se a massa de respingo por alcance;
- h) Retira-se a coifa da caixa coletora e então remove a placa de teste, realiza-se a pesagem da placa de teste soldada e por diferença de massa (massa inicial e final da placa de teste) obtém-se a massa de material depositado;
- i) Para a classificação por tamanho são pesados de três a quatro sacos plásticos e a referida massa é anotada no próprio saco. A mesma numeração do saco que está sendo classificado (classificação dos sacos obtidos pela separação por alcance) é adotada para os sacos de classificação por tamanho;
- j) Encaixar as peneiras no prato, mantendo-o abaixo de todas, e uma peneira na outra, de forma que a granulometria fique crescente de baixo para cima (0,60, 1,18 e 2,00), então despejar o conteúdo do saco de recolhimento (respingos separados por alcance) na peneira superior e fechar com a tampa. Colocar o conjunto de peneiras no agitador mecânico e agitar por dez minutos para garantir a separação dos respingos;
- k) Armazenar o conteúdo de cada peneira nos sacos plásticos devidamente pesados no item “h” acrescentando na numeração do saco a identificação da granulometria da peneira, então se realiza pesagem dos sacos obtendo assim a classificação do respingo por tamanho para cada alcance definido.

O tratamento dos sinais elétricos (corrente, tensão) e velocidade de alimentação obtidos pela aquisição é realizado pelo programa OriginPro® 7.5. Com o auxílio da “Planilha de Ensaio e Gráficos – Coleta e Análise de Respingos”, criada e padronizada para o referido ensaio, conforme Fernandes e Scotti (2009a) obtém-se as classificações por alcance e por granulometria, em gramas dos respingos. Sendo assim, foi possível obter o rendimento de deposição (calculado pela relação entre massa depositada por tempo e material consumido por tempo), índice de estabilidade, distribuição percentual por alcance e distribuição percentual por tamanho de respingo para cada alcance de cada soldagem.

6.2 Definição dos Parâmetros para o Ensaio de Coleta de Respingo

O ensaio em questão apresenta muitas características particulares, sendo necessário atender tanto as premissas fundamentais propostas por este trabalho que possibilitem a comparação entre o processo Eletrodo Tubular e o processo MIG/MAG como também atender as particularidades exigidas para a realização do ensaio.

Devido às características dimensionais da barra de teste, parâmetros como a corrente e velocidade de soldagem foram dimensionados para atender estas peculiaridades. Foi definido apenas um nível de corrente de regulagem, atingindo um valor limite para que a barra de teste suportasse o calor imposto sem causar deformações na mesma. Além disso, o valor de corrente de regulagem para o processo MIG/MAG deveria garantir a existência de transferência metálica por curto-circuito. Já para a velocidade de soldagem, a preocupação seria gerar um volume de solda suficiente para cobrir toda a superfície da barra de teste sem escorrer metal fundido para as laterais da mesma.

Sendo assim, foi definido um nível de corrente de 190 A, sendo permissível uma variação de ± 5 A. Desse modo, foram estabelecidas velocidades de alimentação que correspondessem a esse valor de corrente, encontrando os valores adequados para cada tipo de proteção gasosa e para cada arame-gás de proteção. Definiu-se para o arame tubular a velocidade de soldagem limite para que não escorresse material fundido sobre a barra de teste e, de acordo com o procedimento do Capítulo IV (item 4.1.4: Definição das velocidades de soldagens), definiu-se também a velocidade de soldagem do arame tubular. Na seqüência, definiu-se o mesmo para o arame maciço, para garantir um mesmo volume de material depositado por unidade de comprimento (T_D). Tal variável foi determinada conforme procedimento definido no Capítulo IV (item 4.1.4: Definição das velocidades de soldagens), encontrando-se um valor de 1,40 g/cm, sendo aceitável uma variação de $\pm 0,1$ g/cm. Tal definição de parâmetros ocorreu para arame maciço e para o arame tubular, tanto para a proteção gasosa de 100% CO₂ como para a mistura Ar+25%CO₂. Foram realizados testes preliminares para a seleção da faixa de tensão de regulagem, buscando definir para o arame maciço regiões de maior estabilidade do curto-circuito e minimizar os efeitos da instabilidade do arco na geração de respingos.

Para se selecionar a melhor condição de regulagem de tensão para o arame maciço (MIG/MAG) para a dada corrente, foi testado 3 valores de regulagem de tensão dentro da faixa já sabidamente de estabilidade operacional. Sobre as três condições, foi aplicado o denominado Índice Vilarinho de Regularidade em Transferência por Curto-circuito, cujo símbolo é IV_{cc} : O referido índice é um fator numérico desenvolvido no

Laprosolda com o intuito de analisar o quanto a transferência metálica por curto-circuito pode ser considerada regular, sendo que o cálculo deste parâmetro é possível através da soma de duas razões apresentadas na Equação 6.1.

$$IV_{cc} = \frac{\sigma_{t_{CC}}}{\overline{t_{CC}}} + \frac{\sigma_{t_{AA}}}{\overline{t_{AA}}} \quad (6.1)$$

Onde:

- $\sigma_{t_{CC}}$: desvio padrão do tempo médio de curto-circuito calculado;
- $\overline{t_{CC}}$: tempo médio de curto-circuito calculado;
- $\sigma_{t_{AA}}$: desvio padrão do tempo médio de arco aberto calculado;
- $\overline{t_{AA}}$: tempo médio de arco aberto calculado.

O cálculo dos tempos de arco aberto e de curto-circuito, seus respectivos desvios padrão, e o próprio valor de IV_{cc} , é realizado por um programa implementado pelo grupo de pesquisadores do Laprosolda no ambiente do MATLAB (um roteiro de utilização está disponível no Anexo I). Com base nos termos da Equação 6.1, pode se concluir que quanto menores os desvios padrão encontrados em um determinado teste, menor será o índice de estabilidade. Sendo assim, se avaliou os respingos apenas da soldagem que proporcionou o menor IV_{cc} .

Porém a análise feita com o IV_{cc} só faz sentido para o processo MIG/MAG, onde tem transferência por curto-circuito. Para o arame tubular, a condição de soldagem foi escolhida seguindo recomendação do fabricante. A Tabela 6.1 apresenta a parametrização determinada para cada combinação arame-gás de proteção.

Tabela 6.1- Parâmetros de regulação definidos para as soldagens com arame maciço e tubular, com a respectiva proteção gasosa

	I(A)	100%CO ₂			IV _{cc}	25%CO ₂ +75%Ar			IV _{cc}
		U(V)	V _{ai} (m/min)	V _{sol} (cm/min)		U(V)	V _{ai} (m/min)	V _{sol} (cm/min)	
Maciço	190	20	5,0	30	1,6	20	4,6	28	0,9
		21	5,0	30	1,3	21	4,6	28	1,0
		22	5,0	30	1,1	22	6	28	1,1
Tubular	190	26	7,6	35	-	26	6,9	33	-
		27	7,6	35	-	27	6,9	33	-
		28	7,6	35	-	28	6,9	33	-

Os parâmetros regulados no equipamento de soldagem foram monitorados durante a execução das soldagens das barras de teste. O sistema de aquisição de dados foi instalado e configurado para se adquirir os sinais de tensão, corrente e velocidade de alimentação do arame, a uma frequência de 2 kHz, permitindo assim obter também o tempo de arco aberto, importante no cálculo dos índices que avaliam a geração de respingo. A análise de respingos foi realizada por uma seqüência de testes conforme procedimento definido anteriormente no Capítulo III.

6.3 Resultados

Como visto na revisão da literatura, o tipo de transferência metálica atua significativamente na geração de respingos. Por isso, torna-se importante conhecer o modo de transferência metálica referente aos dois processos para os parâmetros de regulação definidos neste trabalho. Pode ser observada por meio da Figura 6.1 a ocorrência de transferência metálica por curto-circuito para o processo MIG/MAG, o que não ocorre com o processo Eletrodo Tubular Figura 6.2.

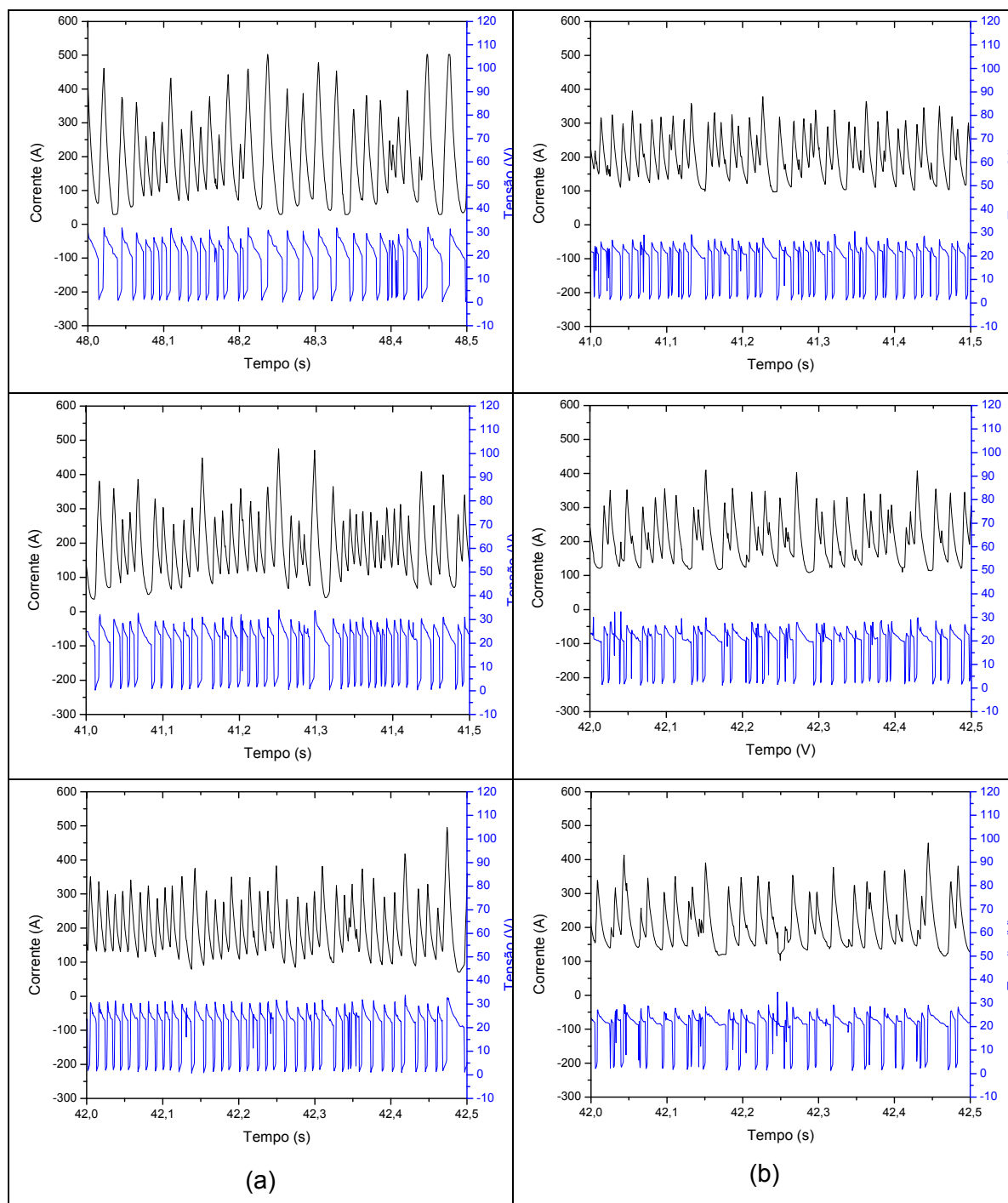


Figura 6.1- Oscilogramas de corrente e tensão para o processo MIG/MAG, corrente de 190 A,: a) Gás de proteção 100% CO₂ e tensões de regulação 20 V, 21 V, 22 V; b) Gás de proteção Ar+25 CO₂% e tensões de regulação 20 V, 21 V e 22

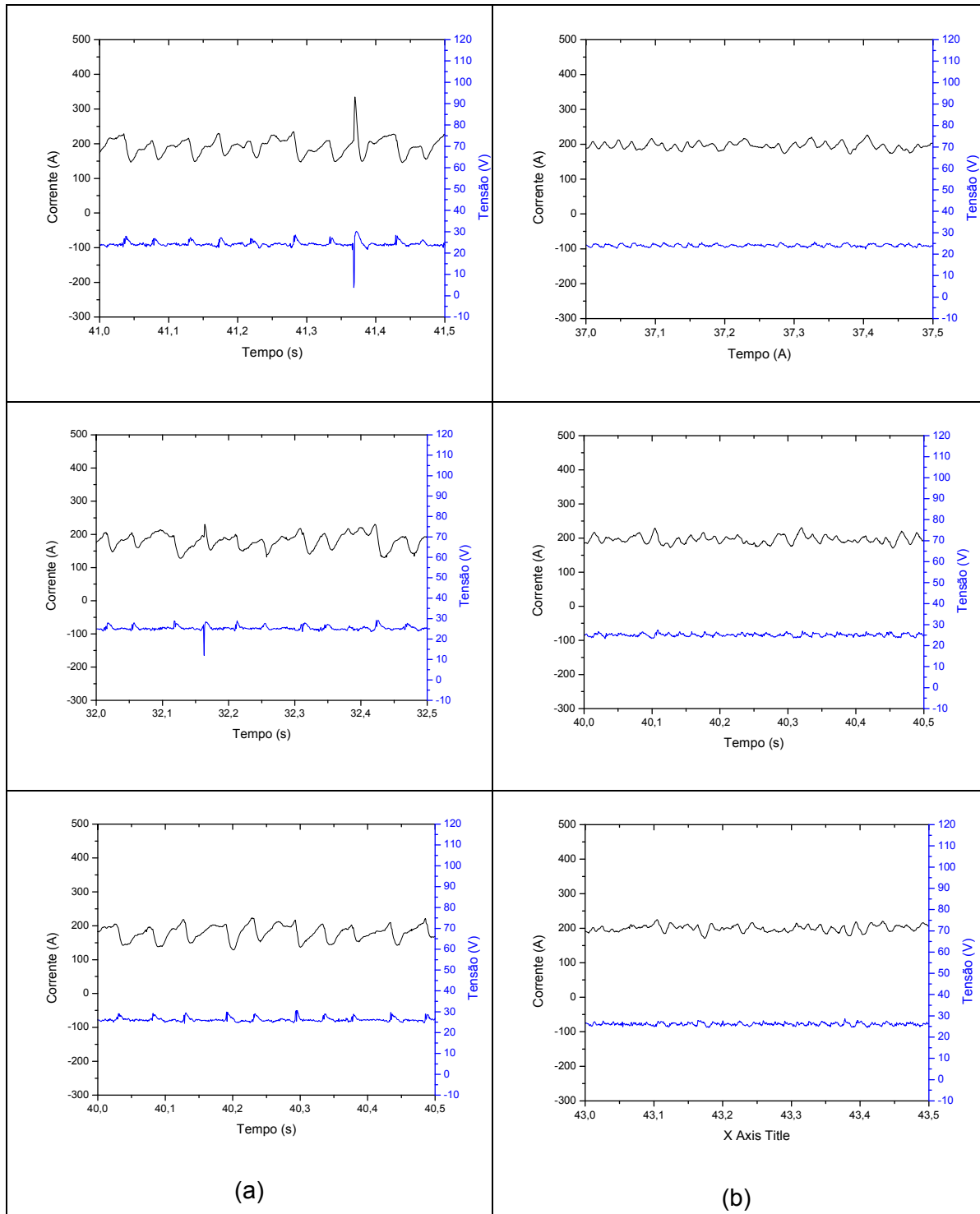


Figura 6.2- Oscilogramas de corrente e tensão para o processo Eletrodo Tubular, corrente de 190 A: a) Gás de proteção 100% CO₂ e tensões de regulagem 26 V, 27 V, 28 V; b) Gás de proteção Ar+25 CO₂% e tensões de regulagem 26 V, 27 V e 28

Parte dos resultados obtidos com a realização dos testes é apresentada na Tabela 6.2, na qual se encontram os valores médios dos parâmetros monitorados de corrente e tensão e os valores calculados de taxa de fusão, taxa de deposição,

rendimento de deposição, taxa de deposição por unidade de comprimento e massa de respingo gerada durante a execução de cada teste. Os demais resultados são apresentados na Tabela 6.3, onde são demonstrados os índices percentuais de distribuição de massa por alcance e o índice de distribuição percentual de respingo por tamanho. Através destes dados é possível realizar uma análise comparativa entre os processos de soldagem do ponto de vista quantitativo e qualitativo da geração de respingos. Relembrando de que tomou-se como base a realização de um mesmo cordão, ou seja, o que cada processo é capaz de gerar de respingos para a deposição de um mesmo volume de material por metro.

Tabela 6.2 - Parâmetros monitorados de tensão (U) e corrente (I) e valores calculados para taxa de fusão (T_F), taxa de deposição (T_d), massa de respingo (M_R), rendimento de deposição (N_D) e taxa de deposição por unidade de comprimento (T_D)

		Teste	U_{Ref} [V]	V_{sol} [cm/m in]	U [V]	I[A]	T_F [g/min]	T_d [g/min]	M_R [g]	N_D [%]	T_D [g/cm]
Tubular	100% CO ₂	Teste 1	26	35	24,9	191,3	56,20	48,55	2,96	86,4	1,39
		Teste 2	27	35	26,3	184,0	56,22	48,63	3,17	86,5	1,39
		Teste 3	28	35	27,2	185,5	56,25	49,38	2,53	87,8	1,41
	Ar+25 % CO ₂	Teste 4	26	33	25,1	193,7	51,00	44,98	2,65	88,2	1,37
		Teste 5	27	33	26,2	195,8	51,08	45,66	1,88	89,4	1,38
		Teste 6	28	33	27,1	197,8	50,93	46,04	1,82	90,4	1,39
Maciço	100% CO ₂	Teste 7	20	30	19,8	188,0	44,63	42,04	2,77	94,2	1,40
		Teste 8	21	30	20,8	192,6	44,49	43,32	1,15	97,4	1,44
		Teste 9	22	30	21,3	192,1	44,58	43,62	0,92	97,8	1,45
	Ar+25 % CO ₂	Teste 10	20	28	19,3	192,8	40,31	39,58	0,63	98,2	1,41
		Teste 11	21	28	20,5	190,5	40,27	38,29	0,97	95,1	1,37
		Teste 12	22	28	21,4	191,8	40,32	38,98	0,95	96,7	1,39

Também vale a pena ressaltar que, mesmo a barra de teste estando fixa por três parafusos, a mesma ainda sofre distorções devido ao grande aporte de calor imposto durante a soldagem. Este fato ocorreu com maior intensidade para o processo MIG/MAG do que para o processo Eletrodo Tubular. Mesmo assim os rendimentos de deposição para este ensaio foram calculados como um parâmetro de controle da estabilidade do processo de soldagem, até porque se tem os dados obtidos no Capítulo V como referência. Assim, analisando a Tabela 6.2, observa-se que a taxa de fusão para o arame tubular é maior do que para o arame maciço, para os dois gases de proteção, bem como a taxa de deposição, ratificando os resultados já encontrados.

Tabela 6.3 - Distribuição percentual de massa de respingo por alcance (DPA),
distribuição de respingo por tamanho (DPT) e alcances do coletor (AL)

TESTE			DPT(mm)			
	AL (mm)	DPA (mm)	≤ 0,50	0,51 a 1,00	1,01 a 2,00	> 2,00
Teste 1 100%CO ₂ Tubular	≤ 80	70,6%	36,8%	8,1%	31,6%	23,4%
	81 a 160	18,6%	78,2%	16,4%	5,5%	0,0%
	>160	10,8%	87,5%	12,5%	0,0%	0,0%
Teste 2 100%CO ₂ Tubular	≤ 80	72,6%	15,7%	4,8%	37,8%	41,7%
	81 a 160	16,4%	86,5%	11,5%	1,9%	0,0%
	>160	11,0%	85,7%	14,3%	0,0%	0,0%
Teste 3 100%CO ₂ Tubular	≤ 80	71,9%	54,4%	4,4%	28,6%	12,6%
	81 a 160	15,4%	79,5%	20,5%	0,0%	0,0%
	>160	12,6%	84,4%	15,6%	0,0%	0,0%
Teste 4 25%CO ₂ Tubular	≤ 80	69,8%	45,9%	15,7%	34,1%	4,3%
	81 a 160	19,2%	84,3%	5,9%	9,8%	0,0%
	>160	10,9%	86,2%	13,8%	0,0%	0,0%
Teste 5 25%CO ₂ Tubular	≤ 80	63,3%	30,3%	10,9%	51,3%	7,6%
	81 a 160	23,4%	90,9%	6,8%	2,3%	0,0%
	>160	13,3%	84,0%	16,0%	0,0%	0,0%
Teste 6 25%CO ₂ Tubular	≤ 80	63,7%	72,4%	11,2%	16,4%	0,0%
	81 a 160	22,5%	95,1%	4,9%	0,0%	0,0%
	>160	13,7%	96,0%	4,0%	0,0%	0,0%
Teste 7 100%CO ₂ Maciço	≤ 80	47,3%	39,7%	32,1%	28,2%	0,0%
	81 a 160	25,6%	64,8%	29,6%	5,6%	0,0%
	>160	27,1%	65,3%	29,3%	5,3%	0,0%
Teste 8 100%CO ₂ Maciço	≤ 80	31,3%	69,4%	13,9%	16,7%	0,0%
	81 a 160	46,1%	60,4%	18,9%	20,8%	0,0%
	>160	22,6%	69,2%	19,2%	11,5%	0,0%
Teste 9 100%CO ₂ Maciço	≤ 80	46,7%	60,5%	23,3%	16,3%	0,0%
	81 a 160	28,3%	76,9%	15,4%	7,7%	0,0%
	>160	25,0%	87,0%	13,0%	0,0%	0,0%
Teste 10 25%CO ₂ Maciço	≤ 80	28,6%	88,9%	11,1%	0,0%	0,0%
	81 a 160	39,7%	80,0%	12,0%	8,0%	0,0%
	>160	31,7%	75,0%	10,0%	15,0%	0,0%
Teste 11 25%CO ₂ Maciço	≤ 80	30,9%	86,7%	13,3%	0,0%	0,0%
	81 a 160	47,4%	67,4%	17,4%	15,2%	0,0%
	>160	21,6%	90,5%	9,5%	0,0%	0,0%
Teste 12 25%CO ₂ Maciço	≤ 80	34,7%	72,7%	24,2%	3,0%	0,0%
	81 a 160	34,7%	81,8%	18,2%	0,0%	0,0%
	>160	30,6%	86,2%	13,8%	0,0%	0,0%

Observa-se também que, apesar das condições adversas, os arames ainda apresentaram uma elevada eficiência de deposição, sendo que o arame maciço assumiu um valor médio de aproximadamente 96,5%, ao passo que o arame tubular assumiu um valor médio de 88,1%. Os níveis de massa de respingo produzidos pelo arame maciço são bem inferiores aos gerados pelo arame tubular. Além disso, a proteção gasosa Ar+25% CO₂ resulta em menores índices de massa de respingo do que o gás 100% CO₂, provavelmente isso ocorra porque o gás puro reage com o metal fundido em regiões de altas temperaturas provocando o destacamento da gota de forma abrupta gerando um maior número de respingos, conforme afirmam Chen, Sun e Fanli (1996) ao explicar o mecanismo de formação do respingo.

Para se pensar na validação dos resultados, fez-se uma comparação com os valores obtidos por Hashimoto e Morimoto (2007), obtidos para um arame maciço com proteção gasosa de 100% CO₂ em uma corrente em torno de 190 A. Esses autores encontraram uma taxa de geração de respingo de aproximadamente 1,2 g/min, enquanto na condição mais próxima do presente trabalho, teste 8, a massa de respingo seria de 0,82 g/min. As diferenças podem ser justificadas pela regulação dos parâmetros, principalmente da tensão de regulação, como também pela influência do tipo de fonte.

Em relação ao efeito da regulação da tensão, em estudos realizados por Kang e Rhee (2001), utilizando o arame AWS ER70S-6 com proteção gasosa de 100% CO₂ e como parâmetros uma distância bico contato peça de 15 mm, velocidade de alimentação de 3,4 m/min e vazão de gás de 20 litros por minuto, obteve-se os resultados representados na Figura 6.3, na qual a geração de respingos pode ser influenciada por variações de tensão. Um valor ótimo de tensão gera uma menor quantidade de respingos.

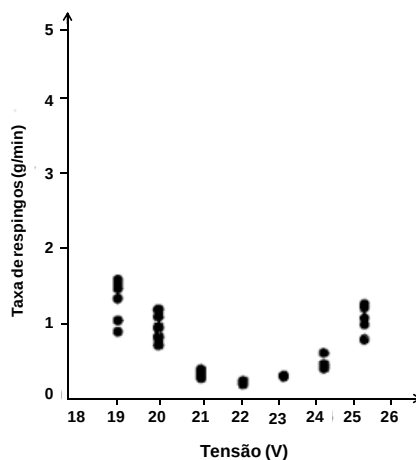


Figura 6.3 - Taxa de respingo gerado para diferentes níveis de tensão de regulação (adaptado Kang e Rhee, 2001)

As Figuras 6.4 e 6.5 representam a massa de respingo gerada em gramas em função da variação da tensão de regulagem para os testes realizados. Como a faixa de variação da tensão estudada é pequena não foi possível identificar o ponto ótimo de tensão que propicia a geração mínima de respingos, como verificado na Figura 6.3. Porém, observa-se que para o arame tubular na Figura 6.4 a menor massa de respingo é obtida para a tensão de 28 V para os dois tipos de proteção gasosa. Já para o arame maciço com proteção gasosa Ar+25%CO₂, a menor massa de respingo obtida foi para a tensão de 20 V, e para a proteção gasosa 100% CO₂ a tensão que resultou na menor massa de respingos foi de 22 V, que corresponde ao ponto ótimo encontrado pelo autor citado anteriormente e que corresponde ao melhor valor para o índice de regularidade (IV_{cc}).

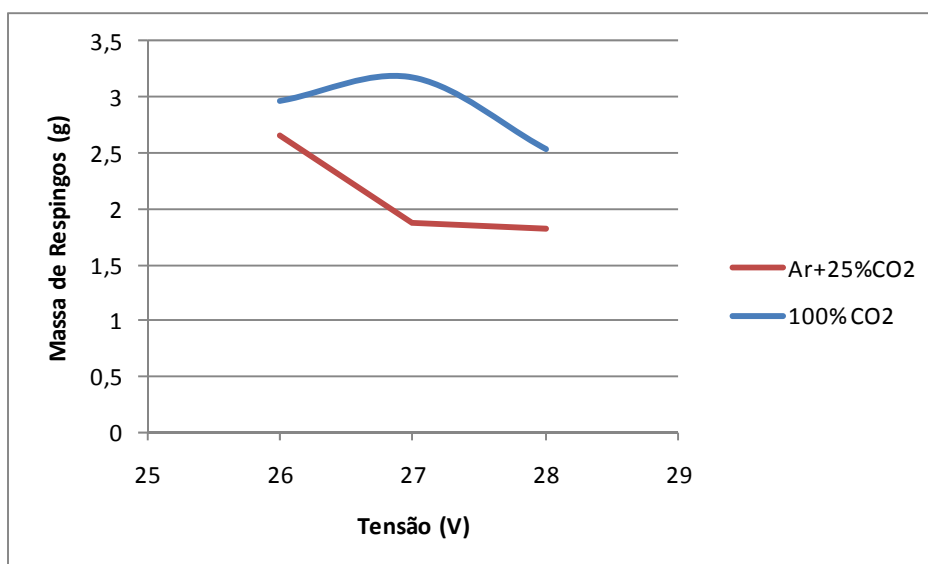


Figura 6.4- Massa de respingo em gramas em função da variação de tensão de regulagem para os dois tipos de proteção gasosa para o processo Eletrodo Tubular

Para o processo MIG/MAG operando no modo de transferência por curto-circuito, a formação do respingo ocorre quando o curto-circuito começa ou quando o curto-circuito acaba. Então, se houver irregularidades na relação tempo de curto-circuito e tempo de arco aberto pode existir uma maior geração de respingos. A Tabela 6.4 demonstra que os testes que apresentaram menor índice de regularidade de curto-circuito também resultaram numa menor massa de respingos gerados, o que confirma uma maior estabilidade entre os tempos de arco aberto e tempo de curto-circuito.

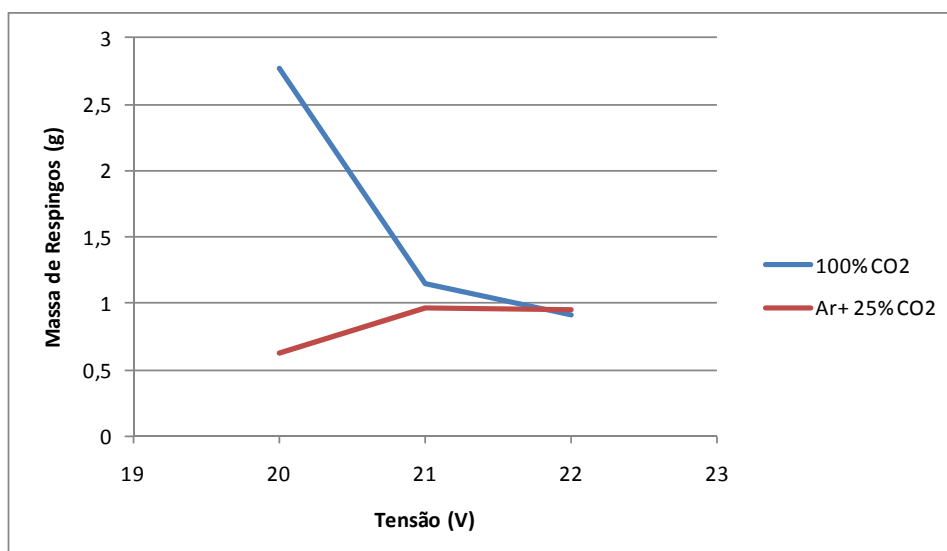


Figura 6.5- Massa de Respingo em gramas em função da variação de tensão de regulagem para os dois tipos de proteção gasosa para o processo MIG/MAG

Tabela 6.4 - Valores medidos para frequência de transferências de gotas (F_{cc}), tempos de arco aberto (t_{ab}) e tempos de curto-circuito (t_{cc}) e valores calculados para o índice de regularidade (IV_{cc}), do tamanho teórico da gota $\varnothing_{gota}$ em transferência e massa de respingo gerada (M_R) para as soldagens MIG/MAG

	F_{cc} (Hz)	t_{cc} (s)	t_{ab} (s)	IV_{cc}	$\varnothing_{gota}$ (mm)	M_R (g)
Teste 7	53,40	0,005	0,013	1,7	1,50	2,77
Teste 8	68,70	0,003	0,011	1,3	1,38	1,15
Teste 9	68,05	0,003	0,011	1,1	1,35	0,92
Teste 10	90,60	0,002	0,008	0,9	1,26	0,63
Teste 11	77,80	0,002	0,011	1,0	1,33	0,97
Teste 12	63,87	0,002	0,013	1,1	1,42	0,95

Dessa forma é possível perceber que há uma série de variáveis que influenciam na geração de respingo e que o arame tubular gera um índice de massa de respingos muito superior aos índices obtidos para o maciço, com respingos com dimensões maiores que são capazes de alojarem-se mais distantes do cordão de solda.

Avaliando-se a Tabela 6.3 no tocante à distribuição por alcance, é possível perceber que o arame tubular, nos dois tipos de proteção gasosa, os respingos gerados concentram-se em sua maioria na região do primeiro alcance (até 80 mm), ou seja, em sua maioria os respingos gerados pelo arame tubular concentram-se próximos à região do cordão de solda. Por exemplo, no teste 2 para o arame tubular, 72,6% da massa de respingo gerada encontra-se no primeiro alcance, ao passo que 16,4% no segundo alcance (de 81mm até 160 mm) e 11% no terceiro alcance (acima de 160 mm). Percebe-se que os demais testes realizados para o arame tubular apresentam

semelhanças a este quanto a forma de distribuição dos respingos. Essa tendência de comportamento da distribuição de respingos para os testes realizados pode ser observada nas Figuras 6.6 e 6.7.

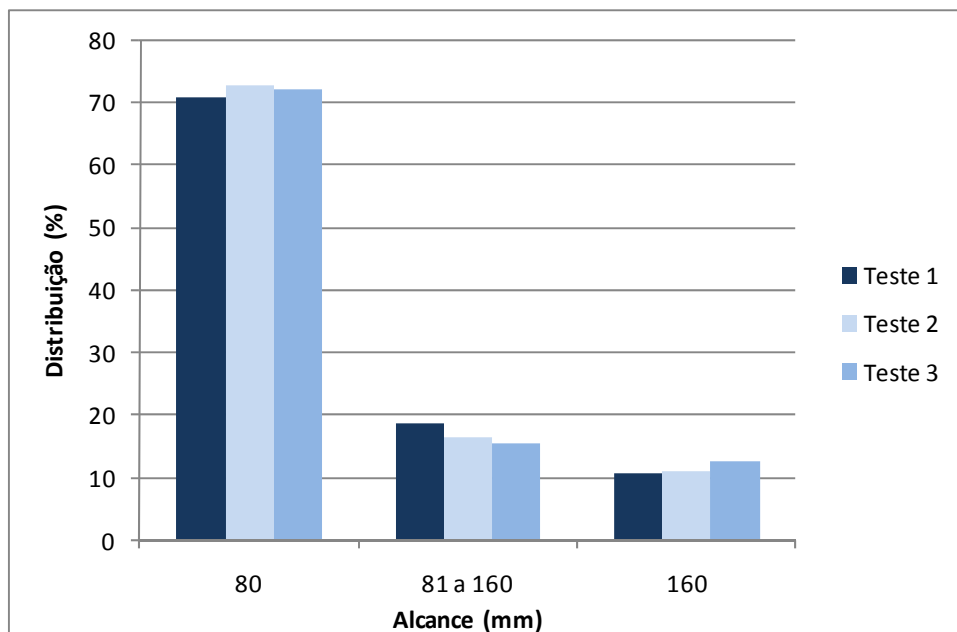


Figura 6.6 – Distribuição dos respingos por alcance para o arame tubular com proteção gasosa de 100% CO₂

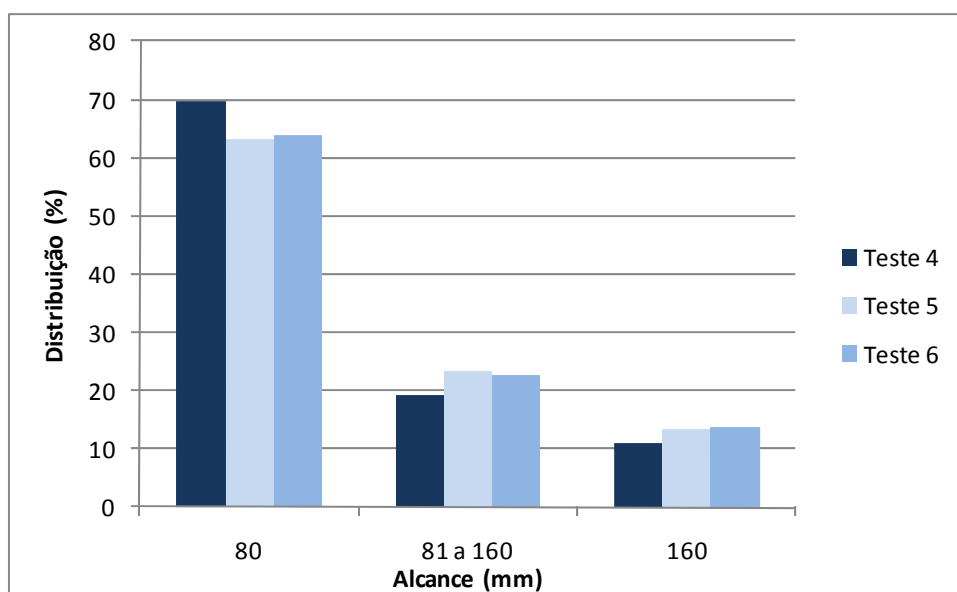


Figura 6.7 – Distribuição dos respingos por alcance para o arame tubular com proteção gasosa de Ar+25% CO₂

Para o arame maciço, a distribuição de respingos por alcance ocorre de forma mais homogênea entre os alcances definidos, porém apresentando algumas

inconstâncias. Por exemplo, para os testes 7 e 9, acima de 47% dos respingos gerados encontram-se no primeiro alcance, já para os testes 8,10 e 11 um maior número de respingos concentram-se no segundo alcance. O comportamento da distribuição dos respingos gerados pelo arame maciço conforme explicitado anteriormente está representado pelas Figuras 6.8 e 6.9.

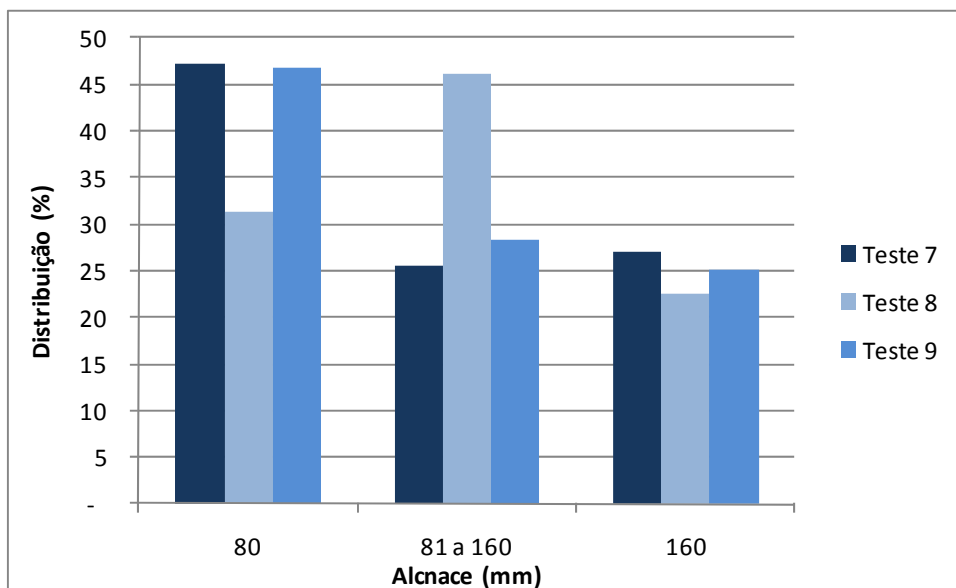


Figura 6.8 – Distribuição dos respingos por alcance para o arame maciço com proteção gasosa de 100% CO₂

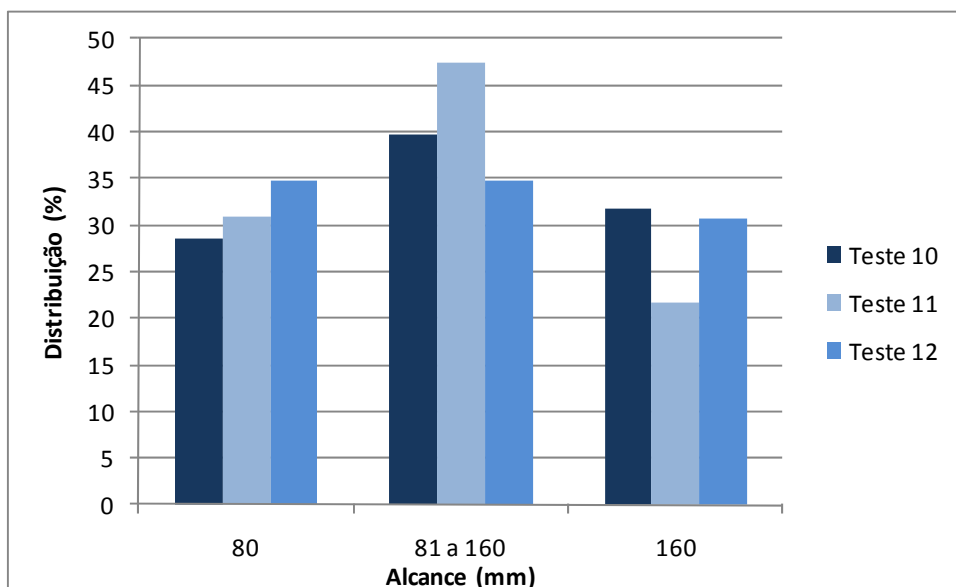


Figura 6.9 – Distribuição dos respingos por alcance para o arame maciço com proteção gasosa de Ar+25% CO₂

Ainda avaliando a Tabela 6.2, é possível analisar a distribuição de alcance dos respingos por tamanho (dimensão dos respingos gerados). Verifica-se que o arame tubular, para os dois tipos de proteção gasosa, gera respingos com diâmetro superior a 2 mm (que, como já comentado, concentram-se somente na região do primeiro alcance). Também se observa que, em média, 80% dos respingos alojados no segundo e terceiro alcances possuem diâmetro inferior a 0,5 mm. Já para o arame maciço, não há formação de respingos com diâmetro superior a 2 mm. Para os três alcances mencionados, os respingos possuem predominantemente diâmetro inferior a 0,5 mm,

Não se observa a influência do gás de proteção na distribuição dos respingos gerados por alcance para nenhum dos processos analisados, tão pouco nas dimensões dos respingos gerados.

CAPÍTULO VII

ANÁLISE DA GERAÇÃO DE FUMOS PARA O PROCESSO ELETRODO TUBULAR E O PROCESSO MIG/MAG

Este capítulo tem por objetivo apresentar um estudo comparativo da geração de fumos entre o processo MIG/MAG com transferência metálica por curto-circuito e o processo Eletrodo Tubular, sob dois tipos de proteção gasosa, bem como avaliar os fatores que exercem influência na geração dos fumos.

7.1 Procedimento Experimental

Para avaliar a taxa de fumo gerada foi realizada uma série de testes, tomando como base o dispositivo de medição e metodologia proposta no Capítulo III, bem como os padrões para realização de testes de fumos estabelecidos pela norma AWS F1.2:2006.

Do ponto de vista metodológico, os resultados de emissão de fumos para este trabalho foi avaliado sob dois ângulos. O primeiro, referente ao aspecto da maior ou menor capacidade de um consumível em gerar fumos. Desta forma, torna-se importante expressar os resultados como massa de fumos coletadas por unidade de massa de arame consumido, como recomendado por Rosado, Pires e Quintino. (2009). O segundo ângulo refere-se à exposição do soldador aos fumos, o que a princípio requer os resultados expressos como massa de fumo coletado por unidade de tempo. Seja por um ângulo ou por outro, acredita-se que só é possível realizar uma comparação justa entre os consumíveis por meio das premissas estabelecidas, ou seja, fixar um mesmo volume de cordão solda e uma mesma corrente. Entretanto, no caso da exposição ao fumo,

aplicar-se-ia uma nova correção, pois um material que produza uma grande quantidade de fumos por unidade de tempo, mas gaste menos tempo para ser fazer uma soldagem, pode ser menos problemático. Assim, o resultado correto do ponto de vista de exposição seria massa de fumos coletado por unidade de comprimento de solda (já que os volumes são iguais).

Durante a realização dos testes para a coleta do fumo na câmara coletora foi utilizado um filtro de fibra de vidro especificado conforme ASTM C800, a qual determina a temperatura e espessura adequadas para o manuseio do filtro. A câmara coletora de fumos foi devidamente calibrada conforme descrito na referida norma. O padrão de calibração da norma prevê a utilização do eletrodo ER 70S-3, com diâmetro de 1,2mm. Foi utilizada a tensão de 24 V, corrente de aproximadamente 225A, uma distância bico contato-peça (DBCP) de 19 mm, gás de proteção 100% CO₂, com uma vazão de 18 l/min, velocidade de alimentação do arame de 7,6 m/min. A norma define que para testes realizados com este valor de tensão resultem uma taxa de fumos de 0,32 g/min, conforme a Tabela 7.1 que apresenta valores de tensão de soldagem para ensaios de calibração e as respectivas taxas de geração de fumos esperadas. A execução dos testes da calibração do equipamento com estes parâmetros levou a uma taxa de fumos de 0,35 g/min, valor considerado aceitável pelo estabelecido pela norma.

Tabela 7.1 – Valores nominais da taxa de fumos gerada para a calibração do coletor de fumos em função da tensão, segundo norma AWS F1.2:2006

Tensão do Arco [V]	Taxa de Geração de Fumos [g/min]
24	0,32 ± 20%
26	0,46 ± 20%
28	0,61 ± 20%

Para a realização dos testes, foi utilizada a bancada experimental para o ensaio de fumos definida no Capítulo III. A placa de teste possui dimensões para atender as características estruturais do coletor. Assim sendo, a placa de teste é circular, de aço comum ao carbono, de dimensões 460 mm x 12,7 mm (diâmetro x espessura), com tolerância de ± 5 mm no diâmetro e ± 0,5 mm na espessura. A superfície na qual se deposita o cordão de solda deve ser lixada com lixadeira, visando padronizar a superfície para diminuir a influência indesejada de elementos provenientes de oxidação do material, e que não são constituintes do arame. Cada condição de teste foi realizada no mínimo três vezes, para garantir uma maior significância estatística dos resultados. Quando houve dispersão muito grande de um dos 3 resultados, foi repetido o teste até que se alcançassem três resultados com pequena variância, rejeitando-se os valores

dísparos (em alguns casos foi necessário medir 5 vezes a mesma condição). Para o arame maciço foi utilizada uma distância bico de contato-peça (DBCP) de 12 mm e uma vazão de gás de 15 litros por minuto. Para o tubular, uma DBCP de 20 mm com uma vazão de 20 litros por minuto foi aplicada (condições típicas para estes consumíveis).

Para a obtenção dos resultados que permitissem as análises propostas por este ensaio, foi necessário o desenvolvimento de um procedimento experimental sistêmico, com a seqüência de passos a seguir:

- a) Ajustar a temperatura da estufa em 100°C, sendo que é permitido pela norma uma variação de temperatura na estufa de 96°C a 107°C, utilizando o termopar para monitoramento da temperatura da estufa.
- b) Quando atingido a temperatura de 100°C no forno, colocar o filtro na estufa para ressecar por no mínimo uma hora, a fim de eliminar toda umidade existente no filtro;
- c) Retirar a coifa da estrutura principal e posicionar a placa de teste no centro da mesa giratória e, em seguida, realizar a limpeza da região a ser soldada;
- d) Ajustar a velocidade de soldagem pela mesa giratória. Para tal, define-se o raio (medida do centro da placa de teste até a região de realização do cordão) e com o valor da velocidade de soldagem previamente determinando obtém-se o tempo correspondente a essa velocidade de soldagem. Desse modo, ajusta-se o controlador da mesa giratória para completar uma volta no tempo estabelecido (o monitoramento do ajuste do tempo é realizado por meio do cronômetro);
- e) Posicionar a coifa na estrutura principal do equipamento de coleta de fumos;
- f) Posicionar a tocha no interior da coifa pela abertura lateral, fixando-a de forma que a DBCP permaneça com o valor especificado para cada processo;
- g) Ajustar a rotação do motor do sistema de sucção, através do potenciômetro, de forma que a pressão no manômetro (M1) indique 15 mmH₂O;
- h) Monitorar a pressão do sistema de sucção durante a realização de todo o teste e que não pode ser inferior a 14 mmH₂O;
- i) Regular os parâmetros de soldagem na fonte;
- j) Obter a massa inicial do filtro (após retirado na estufa);
- k) Depositar um cordão sobre a placa de teste por um tempo mínimo de 1 minuto e no máximo de 3 minutos, suficiente para que seja coletada uma quantidade sensível de fumos. O teste deve ser finalizado ao final dos 3 minutos ou quando ocorrer a saturação do filtro, fato verificado por meio da queda de pressão no sistema (de 75 a 130 mmH₂O);
- l) Manter o sistema de sucção ligado durante 30 segundos após a finalização do teste, assegurando que os fumos ainda presentes no interior da coifa sejam recolhidos;
- m) Retirar o filtro do coletor e averiguar se não há ruptura do mesmo (caso tenha ocorrido, descartá-lo e repetir o teste). Obter a massa final do filtro;

n) Por diferença de massa (massa final e inicial) obtém-se a massa de fumo absorvida pelo filtro durante as soldagens;

Obs: O posicionamento para a realização das soldagens na placa de teste deve ocorrer de forma alternada entre o centro e a extremidade para minimizar os efeitos de distorção devido ao calor imposto à placa de teste durante as soldagens.

Para a realização deste ensaio foram selecionados dois níveis de corrente dentre aqueles definidos no Capítulo IV. Foi fixada uma faixa de baixa corrente (de 150 ± 5 A) e uma faixa de alta corrente (de 250 ± 5 A). Mais uma vez, o critério de seleção para estes parâmetros foi definido pelo recomendado pelo fabricante do arame tubular, pois não é de interesse deste trabalho avaliar a taxa geração de fumos fora das condições estabelecidas pelo fabricante. O arame maciço, conforme recomendação pelo fabricante, permite uma faixa de variação de corrente maior do que a faixa estabelecida pelo arame tubular, por esta razão o arame tubular foi o limitante da faixa.

Para evitar o efeito de volumes diferentes de poça, que poderia também afetar a geração de fumos, foram definidos duas taxas de deposição por unidade de comprimento (T_D) uma para cada nível de corrente. As velocidades de soldagem foram definidas de acordo com o procedimento do Capítulo IV (item 4.1.3: Definição das velocidades de soldagens) para garantir um mesmo volume de material depositado por unidade de comprimento; definiu-se a velocidade de soldagem do arame tubular e, na seqüência, para o arame maciço, encontrando-se os valores de T_D de 1,35 g/cm para a corrente de 150 A e de 1,77 g/cm para a corrente de 250 A. Os demais parâmetros, como a faixa operacional de regulação de tensão e velocidade de alimentação, permanecem idênticos aos definidos no Capítulo IV, porém sendo utilizados os valores médios da faixa operacional de tensão. O conjunto de parâmetros (condições) necessário para a realização deste ensaio encontra-se disponíveis na Tabela 7.2.

Tabela 7.2- Valores regulados de tensão (U_{Reg}), velocidade de alimentação (V_{al}) e velocidade de soldagem (V_{sol})

			U_{Reg} [V]	V_{al} [m/min]	V_{sol} [cm/min]
Maciço	1	100% CO ₂ /150 A	21	3,20	20,14
	2	100% CO ₂ /250 A	24	6,80	32,23
	3	Ar+25% CO ₂ /150 A	19	2,90	19,03
	4	Ar+25% CO ₂ /250 A	21	6,60	30,46
Tubular	5	100% CO ₂ /150 A	26	5,00	25,00
	6	100% CO ₂ / 250 A	30	10,70	39,00
	7	Ar+25% CO ₂ /150 A	26	4,60	23,00
	8	Ar+25% CO ₂ /250 A	30	9,70	35,00

Os parâmetros das soldagens das placas de teste devem ser rigorosamente monitorados. O sistema de aquisição de dados deve ser instalado e configurado para se adquirir os sinais de tensão, corrente e velocidade de alimentação dos arames a uma taxa de 5 kHz, permitindo assim também obter o tempo de soldagem, importante no cálculo dos índices de comparação entre os dois processos pertinentes a este ensaio.

7.2 Resultados

A Tabela 7.3 apresenta os parâmetros de regulação e os valores médios monitorados para os testes realizados. Verifica-se que os dois níveis de corrente foram obtidos dentro dos níveis de tolerância estabelecidos, assim como que os valores médios monitorados dos parâmetros estão conforme previsto pela metodologia proposta. Já a Tabela 7.4 apresenta as três repetições de cada teste e os respectivos valores de tempo de soldagem, massa inicial e final do filtro e a massa final de fumos gerados.

Tabela 7.3 - Valores de regulação dos parâmetros e valores médios monitorados

	Teste	Gás/Corrente	Regulados			Monitorados		
			U _{reg} (V)	V _{al} (m/min)	V _{sol} (cm/min)	U (V)	I(A)	V _{al} (m/min)
Maciço	1	100% CO ₂ /150 A	21	3,20	20,14	20,8	151,5	3,2
	2	100% CO ₂ /250 A	24	6,80	32,23	23,8	254,8	6,8
	3	Ar+25% CO ₂ /150 A	19	2,90	19,03	19,5	149,5	3,0
	4	Ar+25% CO ₂ /250 A	21	6,60	30,46	20,7	253,1	6,6
Tubular	5	100% CO ₂ /150 A	26	5,00	25,00	25,7	152,7	5,0
	6	100% CO ₂ / 250 A	30	10,70	39,00	29,5	254,8	10,6
	7	Ar+25% CO ₂ /150 A	26	4,60	23,00	25,7	154,1	4,6
	8	Ar+25% CO ₂ /250 A	30	9,70	35,00	29,5	251,3	9,7

A Tabela 7.5 apresenta as taxas de geração de fumos do ponto de vista de avaliação do desempenho de um consumível quanto a geração de fumos pela massa fundida (TGF1) e também sobre a óptica de exposição do soldador (TGF2 e TGF3). As Figuras 7.1 e 7.2 apresentam a TGF₁, em mg/kg, como função da corrente para os dois gases de proteção (100% CO₂ e Ar+25% CO₂). Nesta Figura, fica evidente que o eletrodo tubular produz fumos em taxas maiores, o que já era previsto. Entretanto, ao se usar esta figura para se avaliar os efeitos do gás de proteção e da corrente, os comportamentos são diferentes entre o Eletrodo Tubular e o MIG/MAG. Observa-se a ocorrência de um incremento na taxa de geração de fumos com o aumento da corrente para o processo Eletrodo Tubular, fato provavelmente devido a um aumento na taxa de

fusão, onde há uma maior evaporação de material fundido oriundo da ponta do eletrodo, conforme Yamame (2007). Porém, para o processo MIG/MAG não ocorreu um aumento da TGF_1 , em mg/kg, com a elevação da corrente.

Tabela 7.4 – Valor monitorado de tempos de realização de soldagem e valores calculados de massa inicial do filtro (M_i), massa final (M_F) e massa de fumos (M_{Fumos})

	Tempo (min)	M_i (g)	M_F (g)	M_{Fumos} (g)
Teste 1	3,042	11,45	12,31	0,86
	3,020	11,91	12,72	0,81
	3,009	11,17	11,97	0,80
Teste 2	3,008	10,97	11,50	0,53
	3,022	11,20	11,74	0,54
	3,017	11,03	11,59	0,56
Teste 3	3,021	11,70	12,17	0,47
	3,021	11,60	12,10	0,50
	3,013	10,91	11,41	0,50
Teste 4	3,014	11,33	12,13	0,80
	3,028	11,21	12,02	0,81
	3,016	11,00	11,80	0,80
Teste 5	3,016	11,67	12,53	0,86
	3,008	11,52	12,41	0,89
	3,024	11,07	11,99	0,92
Teste 6	1,414	12,92	13,92	1,00
	1,423	12,80	13,81	1,01
	1,491	13,05	14,11	1,06
Teste 7	3,006	12,09	12,72	0,63
	3,023	11,70	12,36	0,66
	3,034	11,90	12,56	0,66
Teste 8	1,829	12,43	13,38	0,95
	1,418	12,70	13,41	0,71
	1,643	12,75	13,58	0,83

Tabela 7.5- Valores das taxas de geração de fumos

	Teste	Gás/Corrente	TGF_1 (mg/kg)	TGF_2 (g/min)	TGF_3 (g/m)
Maciço	1	100% CO ₂ /150 A	6659,00	0,18	0,89
	2	100% CO ₂ /250 A	4789,00	0,27	0,85
	3	Ar+25% CO ₂ /150 A	5555,50	0,14	0,74
	4	Ar+25% CO ₂ /250 A	5400,50	0,29	0,97
Tubular	5	100% CO ₂ /150 A	8201,50	0,29	1,18
	6	100% CO ₂ / 250 A	9338,30	0,71	1,83
	7	Ar+25% CO ₂ /150 A	6305,40	0,21	0,91
	8	Ar+25% CO ₂ /250 A	7296,60	0,51	1,45

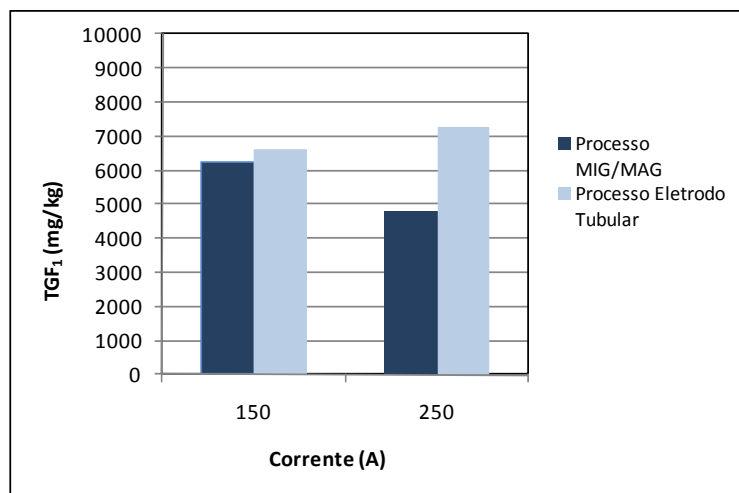


Figura 7.1- Comparação da TGF₁(mg/kg) para o processo MIG/MAG e Eletrodo Tubular para gás de proteção Ar + 25% CO₂

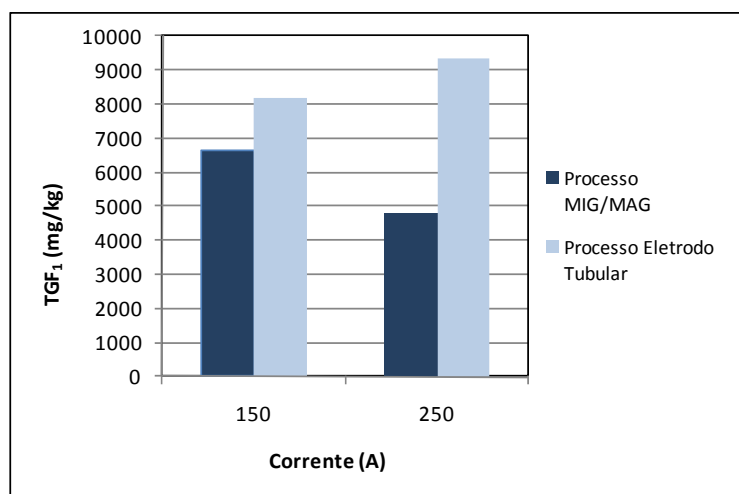


Figura 7.2- Comparação da TGF₁(mg/kg) para o processo MIG/MAG e Eletrodo Tubular para gás de proteção 100% CO₂

Antes de se analisar o comportamento apontado no parágrafo acima, procurou-se analisar as diferenças de transferência entre a condição de 150 A e a de 250 A, tomando-se como base a proteção mais crítica, com 100% CO₂. Na Figura 7.3, não se observa diferenças significativas nos oscilogramas das soldas feitas com Eletrodo Tubular. Já para o processo MIG/MAG, como visto na Figura 7.4, percebe-se uma maior irregularidade dos curtos da maior corrente (os curtos-circuitos ficaram mais longos e com menor frequência), como quantificados na Tabela 7.6. Este é um comportamento incomum, pois esperava-se que maiores correntes (proporcionalmente maiores taxa de fusão) resultassem em frequências maiores e não num maior tempo de curto. Mas este fato é justificável, pois ao se corrigir o comprimento do arco, através do aumento da

tensão, para maiores correntes, alcançou-se a maior taxa de fusão com menor frequência pelo destacamento de gotas maiores na transferência metálica (baseado na redução da frequência de transferência e pelo cálculo do diâmetro teórico das gotas). Pode-se agora imaginar também que quanto menor a relação de tempo de arco aberto (t_{ab}) sobre tempo de curto-circuito (t_{cc}), menor a emissão de fumos. Ou seja, os resultados na Tabela 7.6 corroboram a menor taxa de geração de fumos no processo MIG/MAG com aumento da corrente para a dada condição. Desse modo, neste caso em particular, uma diferença significativa no modo de transferência metálica levou a uma condição na qual a massa de fumos não cresce proporcionalmente com o aumento da taxa de fusão para o processo MIG/MAG, como o foi para o Eletrodo Tubular.

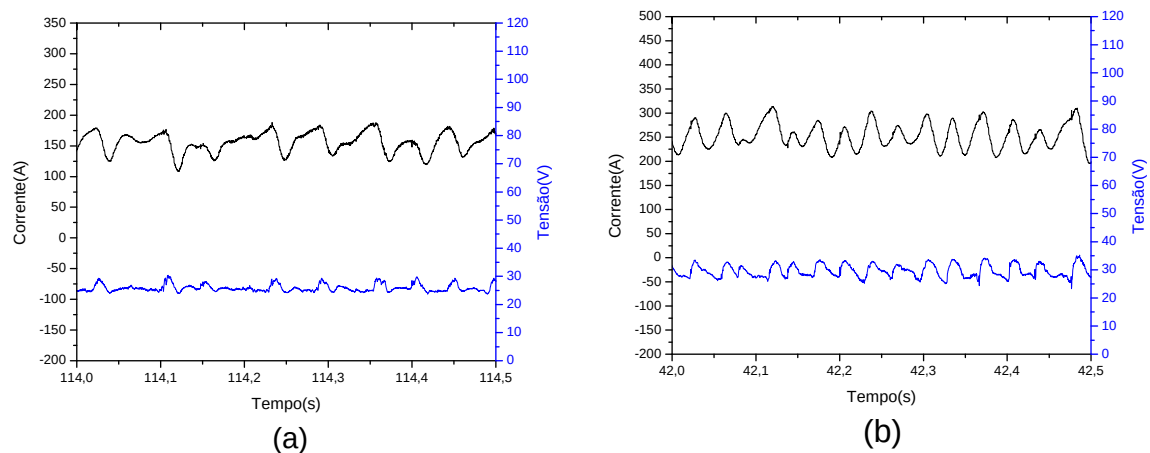


Figura 7.3- Oscilogramas de corrente e tensão para o processo Eletrodo Tubular com gás de proteção 100% CO₂: a) Corrente de 150 A e tensão regulada 26 V; b) Corrente 250 A e tensão regulada 30 V

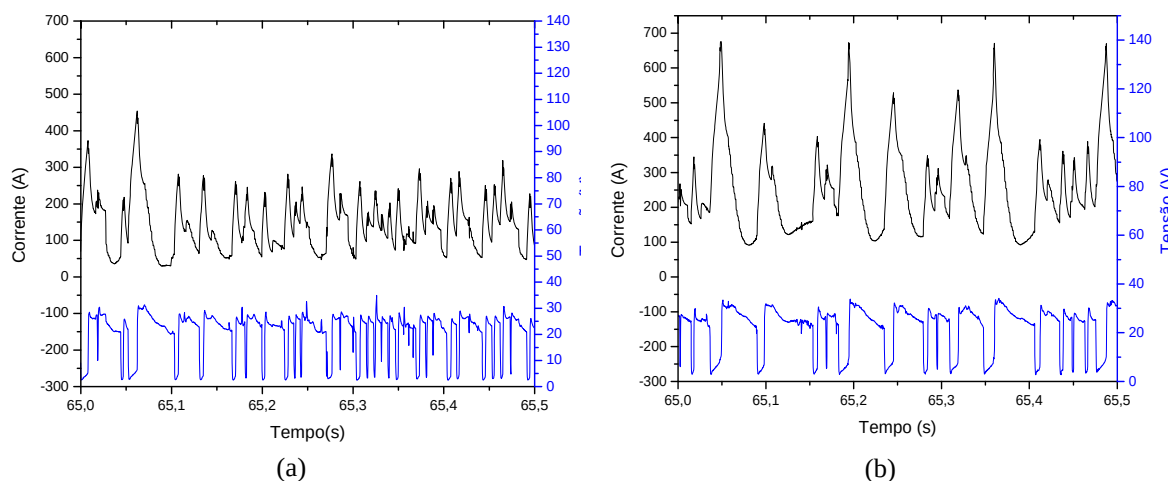


Figura 7.4. Oscilogramas de corrente e tensão para o processo MIG/MAG com gás de proteção 100% CO₂: a) Corrente de 150 A e tensão regulada 21 V; b) Corrente 250 A e tensão regulada 24 V

Tabela 7.6. Valores médios medidos para frequência de transferências de gotas (F_{cc}), tempos de arco aberto (t_{ab}), tempos de curto-circuito (t_{cc}) e os valores calculados da razão entre esses tempos e o tamanho teórico da gota $\varnothing_{gota}$ em transferência para as soldagens MIG/MAG

	F_{cc} (Hz)	t_{cc} (s)	t_{ab} (s)	t_{ab}/t_{cc}	$\varnothing_{gota}$ (mm)
100% CO ₂ /150 A	66,23	0,0032	0,012	3,75	1,61
100% CO ₂ /250 A	39,52	0,0061	0,020	3,28	3,05

Verifica-se ainda nas Figuras 7.1 e 7.2 que o arame tubular com a mistura Ar+25% CO₂ gerou uma TGF₁, em mg/kg, significativamente menor do que com o gás de proteção 100% CO₂, para os dois níveis de corrente. Este resultado era esperado frente ao maior poder de oxidação da mistura mais rica em CO₂. O arame maciço também apresentou um aumento na taxa de fumos quando utilizada a proteção com 100% CO₂ no nível de corrente de 150 A. Porém, para o nível de corrente de 250 A, o que se verificou foi uma redução da TGF₁ em mg/kg quando utilizado como gás de proteção 100% CO₂, contrariando o esperado por Castner (1995) e Yamame (2007). Acredita-se que a mesma justificativa encontrada para o gás de proteção 100% CO₂ (menor tempo de arco aberto) se aplique ao gás de proteção Ar +25% CO₂.

Na verdade as análises realizadas anteriormente para o processo MIG/MAG demonstram que o tipo de transferência metálica (embora, para os dois níveis de corrente, o modo de transferência seja por curto-circuito, porém diferenciada) apresentou um maior efeito sobre a TGF₁ em mg/kg (taxa relativa de fumos em relação ao material fundido) do que parâmetros como corrente e gás de proteção, mas isso sob a óptica de massa de fumo gerada em função de material consumido. Neste caso é facilmente compreensível a possibilidade da taxa de emissão de fumos não crescer com a mesma razão da taxa de fusão do consumível, o que não aconteceria ao se expressar TGF₁ em g/min, que representa a taxa absoluta de fumos gerados. Pelas Figuras 7.5 e 7.6, verifica-se novamente a maior geração de fumos pelo arame tubular (maior exposição do soldador à taxa de fumos em função do tempo de soldagem). Verifica-se ainda que para ambos os processos a taxa de emissão em g/min cresce com o aumento da corrente e com a mudança do gás de proteção para 100% CO₂.

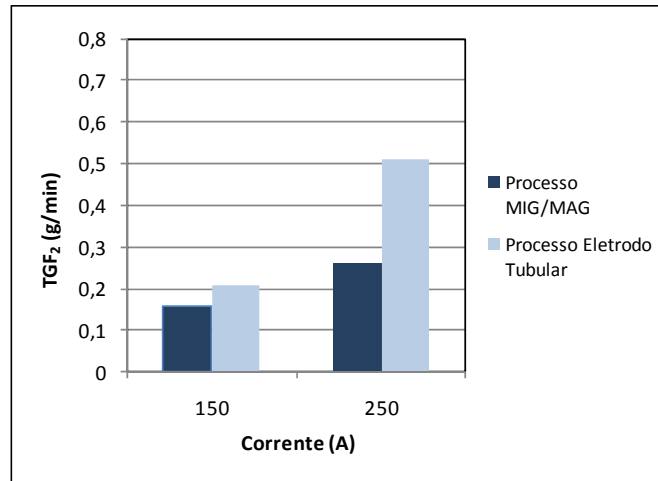


Figura 7.5- Comparação da TGF₂ (g/min) para o processo MIG/MAG e Eletrodo Tubular para gás de proteção Ar + 25% CO₂

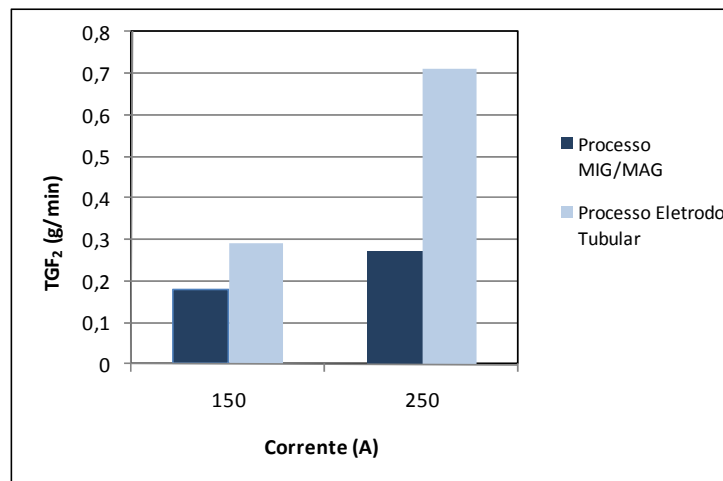


Figura 7.6 Comparação da TGF₂ (g/min) para o processo MIG/MAG e Eletrodo Tubular para gás de proteção 100% CO₂

Mas outro aspecto de suma importância sobre a geração de fumos é a análise sob a óptica de exposição do soldador a estes fumos gerados. Tal análise pode ser feita por meio das Figuras 7.7 e 7.8, nas quais estão as taxas que expressam os valores de massa de fumo gerado por unidade de comprimento de solda realizada (TGF₃). A análise desta figura torna-se interessante porque através da Tabela 7.3 verifica-se que o arame tubular apresenta velocidades de soldagens superiores às velocidades empregadas para o arame maciço, ou seja, para produzir um mesmo volume de cordão (premissa deste trabalho) o tubular requer menos tempo de soldagem. Porém, verifica-se nas Figuras 7.7 e 7.8 que mesmo o arame tubular efetuando soldagens em um tempo menor que o arame maciço, o volume de fumos gerados ainda é maior. Ainda analisando estes gráficos, observa-se novamente o efeito do aumento da corrente e da

mudança de gás volta a ser diferente entre o Eletrodo Tubular e o MIG/MAG. É importante ressaltar que novamente o índice de medida de emissão passa a ser relativo, já que as massas depositadas eram as mesmas para cada arame. E que as mesmas justificativas baseado no efeito da transferência se aplicam aqui.

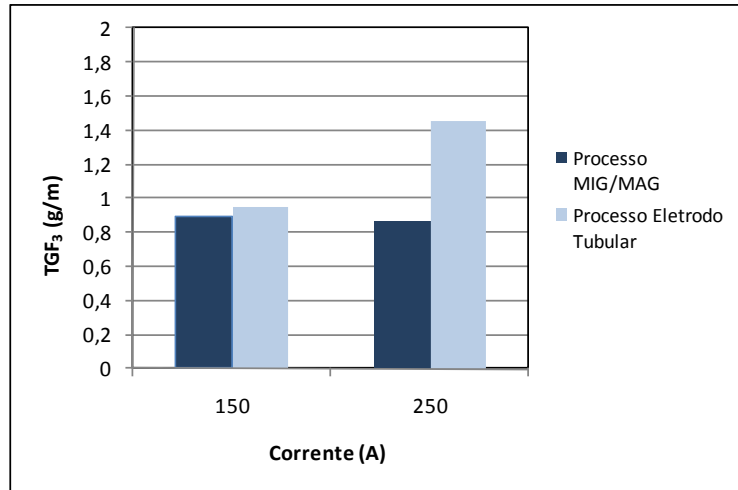


Figura 7.7- Comparação da TGF₃ (g/m) para o processo MIG/MAG e Eletrodo Tubular para gás de proteção Ar + 25% CO₂

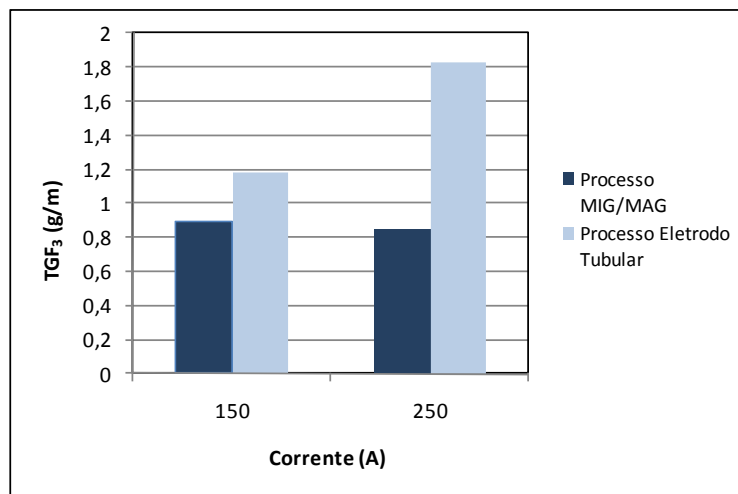


Figura 7.8- Comparação da TGF₃ (g/m) para o processo MIG/MAG e Eletrodo Tubular para gás de proteção 100% CO₂

A Tabela 7.7 refere-se aos testes realizados para avaliar o efeito da tensão sobre a taxa de geração de fumos. Os testes foram realizados apenas para um nível mais baixo de corrente e um tipo de gás de proteção (100% CO₂), usando-se para regulagem da tensão,

além do valor médio da faixa operacional da tensão de regulação dos dois processos para as dadas correntes, os valores limites desta faixa (desta forma, mesmo que com variação de tensão, a mesma foi aplicada em condições que se poderia usar na prática).

Tabela 7.7- Cálculo da geração da taxa de fumos em função da tensão (valores monitorados e regulados)

	Teste	$U_{reg}(V)$	$I(A)$	$U(V)$	$TGF_2(g/min)$
Tubular	100% CO_2 (Teste 10)	23	142,7	23	0,29
	100% CO_2 (Teste 5)	26	152,7	25,7	0,29
	100% CO_2 (Teste 9)	29	155,7	29,2	0,34
Maciço	100% CO_2 (Teste 12)	19	152,9	19,2	0,16
	100% CO_2 (Teste 2)	21	151,5	20,8	0,18
	100% CO_2 (Teste 11)	23	148,2	22,9	0,18

A Figura 7.9 enfatiza que o processo Eletrodo Tubular gera níveis mais altos de taxa de fumos do que o processo MIG/MAG, tanto de forma relativa (ao volume de arame fundido ou depositado) ou absoluta (em termos de tempo). Para o arame maciço, não se percebe variação na taxa de fumos com o aumento da tensão. Por outro lado, para o tubular verifica-se que, quando se variou a tensão, houve um pequeno aumento dessa taxa, mas não muito significativo. É importante ressaltar que a variação da tensão de regulação aconteceu para o tubular em uma faixa mais larga do que para o maciço (6 V contra 4 V). Estes resultados estão em desacordo com o apresentado na literatura por Gray et al apud Quimby e Ulrich (1999), onde o aumento da tensão resulta em um aumento da taxa de geração de fumos. Uma justificativa para tal desacordo seria que neste estudo, apesar da variação da tensão, não houve variação no tipo de transferência metálica. Estes resultados, juntamente com os anteriores, sugerem que o tipo de transferência tem forte influência sobre a geração de fumos, mais até do que a corrente.

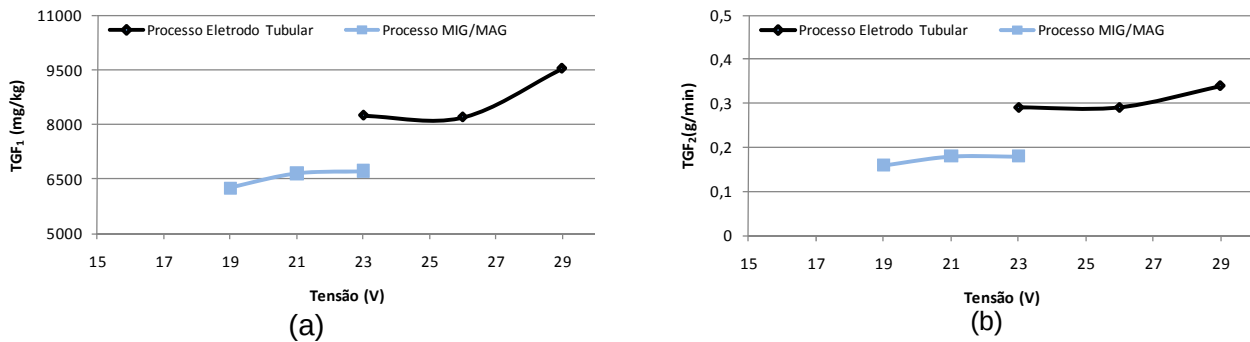


Figura 7.9-Taxa de fumos relativa TGF_1 em mg/Kg (a) e absoluta TGF_2 em g/min (b) em função da variação da tensão para o processo Eletrodo Tubular e MIG/MAG

Dessa forma fica evidente que o arame tubular gera uma quantidade de fumos bem superior ao arame maciço, sob os diversos aspectos que este estudo propôs avaliar. E que o aumento da corrente e da tensão gera uma maior quantidade de fumos para os dois processos (em taxa absoluta de massa de fumo por tempo de soldagem), e que o tipo de transferência metálica para o arame maciço pode influenciar bastante a taxa relativa de fumos gerados.

CAPÍTULO VIII

DISCUSSÃO GERAL

O presente trabalho, como proposto inicialmente, estabeleceu uma metodologia própria diferente do convencional para a realização de técnicas que permitissem uma comparação justa entre o processo MIG/MAG e o Eletrodo Tubular, ou seja, buscou se trabalhar com a melhor condição de operacionalidade de cada processo, respeitando as características operacionais de cada um. Procurou-se ainda focar em características operacionais importantes para a aplicação de cada processo, como a capacidade de produção, a tolerância de regulação dos parâmetros, a geração de respingos e a geração de fumos. Desse modo, os conjuntos de características operacionais analisadas para cada processo, aliadas a metodologia utilizada, conferiram ao trabalho um aspecto prático, tornando a comparação entre os processos clara e objetiva, mas não menos complexa que a correlação das variações que envolvem os mesmos.

No estágio inicial, a comparação entre o arame maciço e o arame tubular constituiu-se pela definição da faixa operacional de trabalho dos parâmetros de regulação para cada combinação arame-gás de proteção, buscando definir a melhor condição operacional de cada processo e definindo os níveis de corrente, tensão e velocidade de soldagem que assegurassem as premissas estabelecidas na metodologia. Os testes realizados inicialmente confirmaram a obtenção da faixa operacional estabelecida, o que permitiu a realização das primeiras observações sobre os processos. No que tange a regulação de parâmetros e operacionalidade do processo observou-se que o arame tubular apresentou uma maior robustez, ou seja, capacidade de suportar variações nas regulações de tensão sem causar modificações significativas tanto no aspecto do cordão, como variações na estabilidade do arco (em

média pode-se variar em até 3 V). Ao passo que, para o arame maciço, variações na regulação de tensão da ordem de 1 V resultam tanto em variações no aspecto do cordão bem como na perda de eficiência do processo, como uma geração maior de respingos, por exemplo. Provavelmente isso ocorra devido ao fluxo do arame tubular que possui elementos para estabilizar o arco e controla a transferência e poça de fusão, permitindo um maior comprimento de arco sem desestabilizá-los.

Ao se avaliar a capacidade produtiva dos arames, foi possível verificar que para os parâmetros e condições de soldagem estabelecidas, o arame tubular apresenta uma maior capacidade de produção frente ao arame maciço. Observa-se que o arame tubular resulta numa taxa de fusão e deposição maior frente ao maciço, apesar de menor rendimento de deposição. Mas é importante salientar que a comparação foi realizada sempre com o arame maciço em curto-circuito, que utiliza uma DBCP menor. Uma maior DBPC como usada no modo de transferência goticular, aliada a uma maior capacidade de uso de corrente do arame maciço, poderia inverter esta relação encontrada para os dois arames.

Observou-se também que ao atender o objetivo de comparar dois cordões que fossem capazes de preencher uma mesma junta, ou seja, mesmo volume de material depositado, a maior taxa de deposição obtida com o arame tubular permitiu uma velocidade de soldagem maior. Este fato teve implicação direta na análise econômica que pode ser avaliada sob dois aspectos. O primeiro aspecto refere-se ao tempo de soldagem, ou seja, uma maior velocidade de soldagem, no caso para o arame tubular resulta num tempo menor de soldagem. O segundo aspecto refere-se ao fato de que um tempo menor de soldagem requer uma ocupação menor de mão-de-obra e dos equipamentos de soldagem. Tais resultados obtidos são pertinentes ao arame tubular utilizado neste trabalho, uma vez que um arame tubular com uma constituição química do fluxo diferente, pode não resultar nas características obtidas.

Quanto à geração de respingos, buscou-se analisar de forma quantitativa e qualitativa os respingos gerados, observando que o arame tubular apresenta maior quantidade de respingos de maiores dimensões e que se distribuem em regiões mais distantes ao cordão de solda do que os do arame maciço. A geração de respingos pode apresentar como principal inconveniente o retrabalho para a remoção dos mesmos, além de gerar avaria dos componentes ou partes próximas da região soldada, sem contar que respingos que são capazes de atingir maiores distâncias podem provocar o risco de incêndio. Ainda pode-se fazer uma análise preliminar e não conclusiva baseada apenas em observações verificadas durante a realização dos testes, a respeito da geração de respingos e escória, onde se observou que para o arame tubular a remoção

de ambos é mais fácil do que para o arame maciço. Porém ainda para o arame tubular verificou-se também que a remoção da escória em chanfros é mais difícil do que em soldagens sobre chapas, mais ainda assim, a remoção da escória é mais fácil do que para o arame maciço. Estas são observações práticas realizadas durante a realização do testes, não sendo conclusivas para isso, seria necessário a realização de um estudo mais detalhado. A variação de tensão influencia na geração de respingo, bem como a regularidade dos curtos circuitos também pode minimizar a geração de respingos, assim como diâmetros de gotas maiores também possibilitam uma maior geração de respingos.

Do ponto de vista de geração de fumos é possível realizar duas análises sob diferentes perspectivas, primeiro a geração de fumos sob a ótica da capacidade de cada consumível em gerar fumos e segundo sob a ótica de exposição do soldador aos fumos gerados. Observou-se que o tubular apresentou uma maior capacidade de geração de fumos do que o arame maciço. E que mesmo o tubular necessitando de um tempo menor de soldagem ainda assim, gera uma maior quantidade de fumos do que o arame maciço, resultando numa maior exposição do operador. É importante salientar que, uma geração maior de fumos não implica necessariamente em um maior poder de contaminação do ambiente, inclusive no que se refere ao cumprimento de normas de saúde ocupacional, pois se precisaria analisar o tipo de fumos (análise química e dimensões).

Dessa forma as características operacionais aqui avaliadas, constituem um conjunto de informações teóricas e práticas que podem servir de base de comparação entre os processos de soldagem, quanto à tomada de decisão em utilizar um ou outro processo, avaliando diversos aspectos em função de sua aplicação

CAPÍTULO IX

CONCLUSÕES

A partir dos objetivos propostos, tomando em relação às condições de realização desse trabalho, incluindo os consumíveis (fato que se vincula aos fabricantes e produto especificamente e aplicação dos mesmos) e as limitações em termos de alcance dos resultados (como diâmetros, posição de soldagem, tipo de transferência para o maciço, etc), concluiu-se que:

- É possível se comparar processos/consumíveis em condições paramétricas diferenciadas e apropriadas a cada um, para que cada um evidencie suas características;
- Ambos consumíveis trabalharam bem com os dois tipos de proteção, mas:
 - a) O gás de proteção 100% CO₂ requer maiores valores de tensão do que mistura Ar+25% CO₂ para se trabalhar em condições de estabilidade operacional para o processo MIG/MAG, mostrando que para se trabalhar com gases diferentes com um mesmo consumível, os parâmetros de soldagem devem ser adequadamente regulados;
 - b) O gás de proteção 100% CO₂ requer maiores valores de velocidade de alimentação para que resultem em um mesmo nível de corrente, o que indica uma maior capacidade de produção tanto para o arame tubular como para o maciço;
- O arame tubular usado apresenta maior taxa de fusão, porém menor eficiência de deposição, do que o arame maciço para os dois tipos de proteção gasosa em um mesmo nível de corrente média. Entretanto, as diferenças em taxa de fusão

superaram, pelo menos para esse produto, as de rendimento de deposição, permitindo que o tubular também apresentasse maior taxa de deposição;

- Devido à maior taxa de deposição alcançada, o arame tubular permite velocidades de soldagem superior do que as empregadas para o arame maciço, reduzindo, então, o tempo para realização da soldagem para a confecção de um cordão de mesmo volume.

Essa maior velocidade alcançada caracteriza um aspecto importante em termos de aumento de produtividade (em favor do tubular);

- Devido ao menor rendimento de deposição do arame tubular usado (parâmetro que leva em consideração não somente respingos, mas fumos, escórias, etc.) consome-se muito mais arame tubular do que maciço para se preencher uma junta com cordões do mesmo volume. Esse maior consumo, em balanço com os custos de consumíveis, caracteriza um aspecto importante em termos de redução de produtividade (em desfavor ao tubular);

- A variação da taxa de fusão com o aumento da corrente é mais significativa para o arame tubular, isto é, a diferença em termos de aumento da taxa de fusão do tubular para o maciço se caracteriza mais para maiores níveis mais altos de corrente;

- Os cordões realizados com o arame tubular apresentam um aspecto visual melhor do que os cordões obtidos com o arame maciço;

- O arame tubular permite uma robustez maior para a regulação de tensão do que o arame maciço, proporcionando uma maior facilidade operacional;

- O arame tubular gera uma quantidade maior de massa de respingos do que o arame maciço, ambos trabalhando em regulagens apropriadas a cada consumível e produzindo o mesmo volume de cordão com a mesma corrente:

- a) O gás de proteção influi na geração de respingos, fazendo com que a mistura Ar + 25%CO₂ produza menor massa de respingos do que a proteção gasosa 100% CO₂;
- b) No que se refere à distribuição dos respingos por alcance e tamanho, o arame tubular gera respingos maiores (predominantemente maiores do que 2 mm) e mais próximos ao cordão de solda, enquanto que o maciço gera respingos mais finos

- (predominantemente inferiores a meio milímetro) e a distribuição ocorre de forma mais homogênea entre os três alcances estabelecidos para a realização do ensaio;
- c) A variação de tensão influencia na geração de respingo, bem como a regularidade dos curtos-circuitos também pode minimizar a geração de respingos, assim como diâmetros de gotas maiores também possibilitam uma maior geração de respingos;
- O arame tubular gera maior quantidade de fumos do que o arame maciço, ambos trabalhando em regulagens apropriadas a cada consumível e produzindo o mesmo volume de cordão com a mesma corrente:
- a) Tanto um aumento da corrente (aumento da taxa de fusão do arame), como o uso do gás de proteção mais rico em CO₂ favorecem uma maior geração de fumos, a menos que outro efeito concorrente os superem;
 - b) A taxa de geração de fumos é fortemente influenciada pelas características da transferência metálica (volume da poça, frequência de transferência, tempo de arco aberto, etc.), podendo até superar o efeito da corrente e/ou gás de proteção (efeito da taxa de fusão do arame) na geração de fumos, como aconteceu com o processo GMAW;
 - c) A variação da tensão dentro da faixa de regulagem apropriada para cada consumível, tanto para o processo com arame maciço quanto para o processo com arame tubular, não demonstrou alterar a taxa de emissão de fumos (não se pode garantir esse resultado se comparado com valores de tensão além da faixa apropriada de regulagem de tensão);
- A maior capacidade de produção do arame tubular usado neste trabalho, que permitiu a realização de um mesmo cordão em menor tempo frente ao maciço, ainda assim não é capaz de reduzir a exposição do soldador aos fumos.

Mas é importante ressaltar que os resultados que geraram as conclusões acima se referem a específicos produtos e específicos fabricantes. Esses resultados poderiam ser totalmente diferentes se mudasse, por exemplo, o tipo de arame tubular. Também se mudasse a bitola dos arames (outra faixa de corrente a ser estudada) e a posição de soldagem. Mas o fator mais importante no que tange aos aspectos limitantes dos resultados é que esta comparação foi feita com o arame maciço trabalhando somente em curto circuito, que ao se mudar para goticular exigiria outra faixa de corrente e outra DBCP típica, fatores que afetariam principalmente a capacidade de produção desse tipo de arame.

CAPÍTULO X

PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Como forma de complementar os estudos realizados neste trabalho, sugerem-se os seguintes temas:

- ✓ Avaliar as características do processo MIG/MAG e do processo Eletrodo Tubular em outras posições de soldagem e em diferentes tipos de juntas;
- ✓ Avaliar sobre os mesmos aspectos de rendimento de deposição, geração de respingos e fumos para arames eletrodos de diâmetro 1,6 mm;
- ✓ Realizar de análise macrográficas de seções transversais de soldas realizadas, tanto com o arame maciço como com arame tubular, visando avaliar área fundida penetração e reforço, mas em condições práticas, como em chanfros típico;
- ✓ Avaliar os processos de soldagem para diferentes DBCP;
- ✓ Realizar ensaios mecânicos, como de tração, dobramento e Charpy, em juntas soldadas, tanto com arame maciço como com arame tubular, e promover uma análise comparativa entre os processos;
- ✓ Avaliar a destacabilidade de escória em juntas chanfradas, conforme, por exemplo, Ensaio de Destacabilidade de Escória Laprosolda para o processo MIG/MAG e o processo Eletrodo Tubular, mas visando principalmente condições dentro de junta,

onde o efeito escória é mais pronunciado (isto exigiria adaptações no ensaio proposto);

- ✓ Avaliar a geração de respingos para diferentes níveis de corrente e avaliar uma faixa mais ampla de tensão buscando averiguar a geração de respingos em função destas variáveis;
- ✓ Realizar uma análise química da composição dos fumos gerados tanto para o arame maciço como para o arame tubular, para verificar a presença de elementos nocivos à saúde do homem. Completar essa análise com a análise dos tamanhos médio dos fumos, que como sabido também afeta a saúde operacional;
- ✓ Avaliar o efeito da indutância sobre as características operacionais tanto para o processo MIG/MAG e Eletrodo Tubular, verificando os efeitos sobre variáveis como taxa de fusão, taxa de deposição e eficiência de deposição;
- ✓ Comparar o MIG/MAG pulsado com o Eletrodo Tubular para não se ter a influência do modo de transferência.

CAPÍTULO XI

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLUM C.J., QUINTINO, M.L. Pulse MIG/MAG, **Interactions and Process Parameters** - Parts 1 E 2, Weld & Metal. Fab, 52(3) E (4), 1984.

ANTONINI J. M.; MURTHY G. G. K. **How welding fumes affect the welder**. Welding journal 1998, vol. 77, nº10, p. 55-59 .

ARAÚJO, W.R., “**Comparação entre a Soldagem Robotizada com Arame Sólido e Metal Cored** – A Ocorrência do Finger”. Dissertação de Mestrado, UFMG, 2004.

ASM, 1993, **ASM Handbook**, ASM International, “Welding, Brazing and Soldering” vol, 6, USA 1229 p.

AWS F1.2:2006 **An American National Standard**; Laboratory Method For Measuring Fume Generation Rates and Total Fume Emission of Welding and Allied Processes.

BAUNÉ, E.; BONNET, C.; LIU, S., (2000), “**Reconsidering the Basicity of a FCAW Consumable- Part 1 – Solidified Slag Composition of a FCAW Consumable as Basicity Indicator**”. Welding Journal, March, pp. 57s-64s.

CASTNER, H.R. Gas Metal Arc Welding Fume Generation using Pulsed Current, Welding Journal, 1995, vol. 74, nº2, p. 59-68

CHEN, J.H.; SUN, Z.C.; FAN, D. **Study on the Mecanism of spatter produced by basic welding electrodes**. Welding Journal Vol 75, 1996, p.312-316.

COOPER ORDÓÑEZ, R.E. **“Soldagem e Caracterização das Propriedades Mecânicas de Dutos de Aço API 5L-X80 com Diferentes Arames Tubulares”**, Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Janeiro, 111p. 2004

DANTAS, M. S.; COSTA, S. C. **Uma Contribuição ao Estudo da Influência dos Parâmetros de Pulso na Qualidade da Solda em um Processo MIG/MAG Pulsado através da Técnica DOE**, XXIV Enegep, 2004.

DEAM, R.; BOSWOTH, M.; CHEN, Z.; FRENCH, I.; HAIDAR, J.; LOWKE, J.; NORRISH, J.; TYAGI, V.; WORKMAN, A. **Investigation of fume formation mechanisms in GMAW**, IIW UFUME Paper Version 1 Draft, 1997.

DENNIS, H.J.; HEWITT, P.J.; REDDING, C.A.J.; WORKMAN, A.D. **A Model for Prediction of Fume Formation Rate in Gas Metal Arc Welding (GMAW), Globular and Spray Modes, DC Electrode Positive**. Annals of Occupational Hygiene, 2001, vol 45, nº 2,p.105-113.

DOBIGNIES, A. A.; OKIMOTO, P. C.; GUIMARÃES, B. **Estudo do Rendimento de Deposição de Material na Soldagem MIG/MAG em condições de Transferência Metálica por Curto-Circuito Forçado**,-----

DUTRA, J.C.; BAIXO, C.E.I., (1990), **“O Estudo da Transferência Metálica no Processo de Soldagem MIG/MAG”**. Revista Soldagem e Materiais, nº 21, Jan./Mar., pp. 32-36.

FERNANDES, D.B.; SCOTTI A. **Procedimento para o Ensaio Laprosolda de Geração de Respingos em Soldagem MIG/MAG de Aço ao Carbono e Baixa Liga 13/2009a**, versão 9-1, p. 1-12.

FERNANDES, D.B.; SCOTTI A. **Procedimento para o Ensaio Laprosolda de Geração de Fumos em Soldagem MIG/MAG 14/2009b**, versão 9-1, p. 1-12.

FORTES, C., (2004), **“Arames Tubulares”**. Apostila ESAB S/A, Contagem, pp. 2-40.

GIMENES J. L.; RAMALHO J. P.; **Conceitos De Soldagem Mig/Mag**. Disponível no site Infosolda.

GOMES, E. B. **Análise do Comportamento da Soldagem por Curto-Circuito Aplicado ao Processo Eletrodo Tubular Através da Metodologia Taguchi**, 2006. 99 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

GRAY, C.N.; HEWITT, P.J.; DARE, P.R.M. **New approach would help control welding fumes at source (MIG and MMA) Part two: MIG fumes**. Welding and Metal Fabrication, 1982, October, p. 393-397.

HAIDAR, J.; LOWKE, J. J. **Effect of CO₂ Shielding Gas on Metal Droplet Formation in Arc Welding**. **IEEE Transactions on Plasma Science**. Volume 25, nº 5, p. 931-936, Oct 1997. Haidar e Lowke (1997)

HASHIMOTO, T.; MORIMOTO, T. **Reduction of Spatter Generation on Gas Shielded Arc Welding from the Viewpoint of Welding Material**, Welding International, vol 5, 2007. p. 331-336.

HEWITT, P. J; HIRST, A. A.; **Development and Validation of a model to predict the metallic composition of flux-cored arc welding fumes**, Annals of Occupational Hygiene, 1991, vol 35 p. 223-232.

HEWITT, P.J.; HIRST, A. A. **A systems approach to the control of welding fumes at source**. **Annals of Occupational Hygiene**, 1993, vol 37 p. 297-306.

JENKINS, N.T.; MENDEZ, P.F.; EAGAR, T.W. **Effect of Arc Welding Electrode Temperature on Vapor and Fume Composition**. Proceedings of the Gas Metal Arc Welding for the 21 st Century Conference; Orlando, FL, Dec 6-8, 2000, p. 2.

KANG, J.; RHEE, S. **The Statical Models for Estimating the Amount of Spatter in the Short Circuit Transfer Mode of GMAW**. Welding Journal, vol 80, n 1, 2001

KANG, M.J.; KIM, Y.; AHN, S.; RHEE, S. **Spatter Rate Estimation In The Short-Circuit Transfer Region Of MIG/MAG**. Welding Journal, September: 2003.

KANG, S.K.; NA S.J. **A Mechanism of Spatter Production From The Viewpoint Of Integral Of Specific Current Action**. Welding Journal, P. 188-196, December, 2005.

KIM, Y-S.; EAGAR T. W. **Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding**. Welding Journal. Welding Research Supplement, Volume 72, nº 6, p. 269-278, Apr 1993 Kim e Eagar (1993)

KOBAYASHI, M.; SUGA, T.; TETSUO. **Fume generation in CO2 arc welding, R&D, Research and Development** (Kobe Steel, Ltda), 35, p.12-16 (1985).

LANCASTER, J. F. **The Physics of Welding**. 2º ed, Oxford, Pergamon Press, 1986 340 p.

LESNEWICH, A. Control of Melting Rate ands Metal Transfer- Part , Welding Journal, Miami, n.8, p.343s-353s,. 1958

LUCAS, W.; IORDACHESCU, D.; PONOMAREV, V. **Classification of metal transfer modes In GMAW**, IIW Doc. No XII-1859-05, 2005, 9p.

MACHADO, I. G. **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos**. Porto Alegre: editado pelo autor, 1996. 477 p

MILLER ELETRIC MFG. CO. GMAW-P. **Pulsed Spray transfer**. 1995

MIRANDA, H.C. **“Influência da Indutância na Soldagem MIG/MAG na Posição Sobre-Cabeça”**. Dissertação de Mestrado; UFU; Uberlândia, Fevereiro, 1999.

MODENESI, P.J.; REIS, R.I. **A model for melting rate phenomena in GMA welding**, Journal of Materials Processing Technology, n.189, p.199-205, 2007.

NORRISH, J. **Advanced welding process**. IOP Publishing Ltd, 1992. 375 p. ISBN:0-85274-325-4.

QUIMBY, B.J.; ULRICH G.D. **Fume Formation Rates in Gas Metal Arc Welding**. Welding Journal, Apr 1999, p. 142-149.

RESENDE, A.A. **Uma Contribuição à Análise dos Parâmetros de Soldagem do Processo Plasma-MIG com Eletrodos Concêntricos**. Dissertação de Mestrado; UFU; Uberlândia, Março, 2009.

ROSADO, T., PIRES I., QUINTINO L. **Opportunities to Reduce Fume Emissions in Gas Metal Arc Welding**, ISQ-doc. VIII-2094-09.

SALES, J.C. (2001), “**Estudo da Geometria do Cordão de Solda usando CO₂ e uma Mistura de Ar e CO₂ na Soldagem com Arame Tubular AWS E71T-1**”. COBEM, Uberlândia –MG, V4, ref 172, pp 543-551.

SCOTTI A.; RODRIGUES, E. CARLOS – **Efeito da Força das Gotas Em Transferência na Penetração de Soldas Mig/Mag em Aço Carbono: Uma Investigação Experimental** – Congresso Brasileiro De Engenharia de Fabricação – Cobef: 2002.

SCOTTI, A. **Mapping the Transfer Modes for Stainless Steel GMAW**. J. of Science and Technology of Welding and Joining. Institute of Materials Publ, UK, Volume 5, Nº 4, p.227-234, 2000.Scotti (2000)

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

SILVA CÉSAR; FERRARESI ALTAIR; SCOTTI AMERICO. **A Quality And Cost Approach For Welding Process Selection**. J. of the Braz. Soc. Mechanical Sciences, Vol. XXII, No 3. p 389- 398, 2000.

STARLING, C.M.D.; MODENESI P.J.; BORBA, T.M.D. **Comparação do Desempenho Operacional e das Características do Cordão na Soldagem com Diferentes Arames Tubulares**, Soldagem e Inspeção, n. 14, p. 10-25, 2009.

STARLING, C.M.D; MODENESI, P.J. **Caracterização do Cordão na Soldagem FCAW com um Arame Tubular Básico**. Soldagem e Inspeção, vol 13, nº 4, 2008, p. 304-318.

STARLING, D.M.C. ; MODENESI, P.J. “**Efeito da Polaridade do Eletrodo na Velocidade de Fusão de Arames Tubulares**”, Universidade Federal de Minas Gerais, Soldagem & Inspeção, Jul/set, vol.10, nº 3, pp.101-108, 2005.

SUBAN,M; TUSEK,J. **Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used**, Journal of Materials Processing Technology, n.119, p.185-192, 2001.

SUBRAMANIAN, S.; WHITE, D.R.; JONES, J.E.; LYONS, D.W., (1998), **“Droplet Transfer in Pulsed Gas Metal Arc Welding of Aluminum”**. Welding Journal, November, pp.459-465.

USHIO, M.; IKEUCHI, K.; TANAKA, M.; SETO, T. **Effects of Shielding Gas on Metal Transfer**. Welding International. Volume 9, nº 6, p. 36-40, 1995. Ushio et al (1995)

VILARINHO, L. O. **Modos Fundamentais de Transferência Metálica: Naturais e Controlados**. Revista da Soldagem, 10 maio 2007. p. 14 – 19.

WIDGERY, D. **Tubular Wire Welding**, Published by Abington Publishing Cambridge, 1994. 145 p. ISBN1-85573-008X
www.infosolda.Com.br/download/61dpe.Pdf - 2005

YAMAME, K. **Low Fume Types of Welding Materials improve the Welding Environment**. Welding International, vol 21, nº 5, 2007, p. 337 – 346.

ANEXO I

GUIA DE UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE DE CALCULO DO INDICE VILARINHO DE REGULARIDADE DA TRANSFERENCIA POR CURTO- CIRCUITO

A.1 Objetivo

O objetivo deste guia é fornecer aos usuários as informações básicas e essenciais para a operação do software que realiza o cálculo do Índice Vilarinho de Regularidade por curto Circuito e os tempos de arco aberto e de curto circuito, bem como o cálculo da frequência de curto circuito e foi extraído do procedimento completo Laprosolda para a realização do Ensaio de Geração de Respingo, segundo Fernandes e Scotti (2009a) .

A.2 Roteiro de Utilização do Programa

1. Campo que deve conter o caminho e o nome completo do arquivo a ser analisado;
2. Botão para procurar o arquivo a ser analisado;
3. Campo numérico para indicar qual coluna é a coluna da Corrente;
4. Campo numérico para indicar qual coluna é a coluna da Tensão;
5. Campo numérico para indicar o tempo, em segundos, que deve iniciar a análise;
6. Campo numérico para indicar o tempo, em segundos, que deve parar a análise;

7. Campo numérico para indicar qual a tensão de referência, em volts, para considerar curto circuito;
8. Campo numérico para indicar qual a frequência de aquisição, em Hertz, que foi utilizada;
9. Campo que deve ser marcado se quiser verificar se o número de curtos circuitos utilizados é uma amostra válida utilizando o “erro do tipo I”;
10. Se marcado o campo 9 deve-se indicar qual o valor de α que deve ser utilizado;
11. Botão para carregar o arquivo na memória e .

The screenshot shows a software window titled "programa" with a subtitle "Informe abaixo o Arquivo para análise". The interface is divided into several sections:

- Top Section:** A text input field (1) for the file path and a "Procurar Arquivo" button (2).
- Colunas dos Dados:** Two input fields for "Corrente" (3) and "Tensão" (4).
- Intervalos de Tempo (s):** Two input fields for "Tempo Inicial (s)" (5) and "Tempo Final (s)" (6).
- Dados da Aquisição:** Two input fields for "Tensão de curto (V)" (7) and "Frequência de aquisição (Hz)" (8).
- Verificar o número de amostras:** A checkbox "Utilizar o Erro do Tipo 1" (9) and an input field for α (10).
- Bottom Section:** A "Pré-Análise" button (11).
- Graph Area:** A plot area on the right with axes ranging from 0 to 1, containing a single data point labeled 12.

Figura A.1 – Tela inicial do programa

Digite o caminho e o nome completo do arquivo a ser analisado no campo 1 ou utilize o botão 2 para abrir uma caixa de procura para encontrar o arquivo desejado. Depois deve ser informado nos campos 3 e 4 o intervalo de tempo para a análise e a tensão de referência e frequência de aquisição nos campos 5 e 6. Caso queira utilizar o “erro do tipo I” para verificar se o número de curtos circuitos são o suficiente para caracterizar a amostra. Após indicar ao programa todos os dados necessários para a

análise, deve-se apertar o botão 11 e esperar os cálculos do programa e a apresentação do histograma no campo 12.

ATENÇÃO: Se o usuário alterar algum dos campos acima citados depois de ter feito a pré-análise, o usuário deverá apertar novamente o botão 11 para que o programa adquira os novos parâmetros informados antes de ele fazer a análise final.

Em seguida o programa irá apresentar outros elementos que permitirão remover alguns curtos circuitos e realizar a análise final.

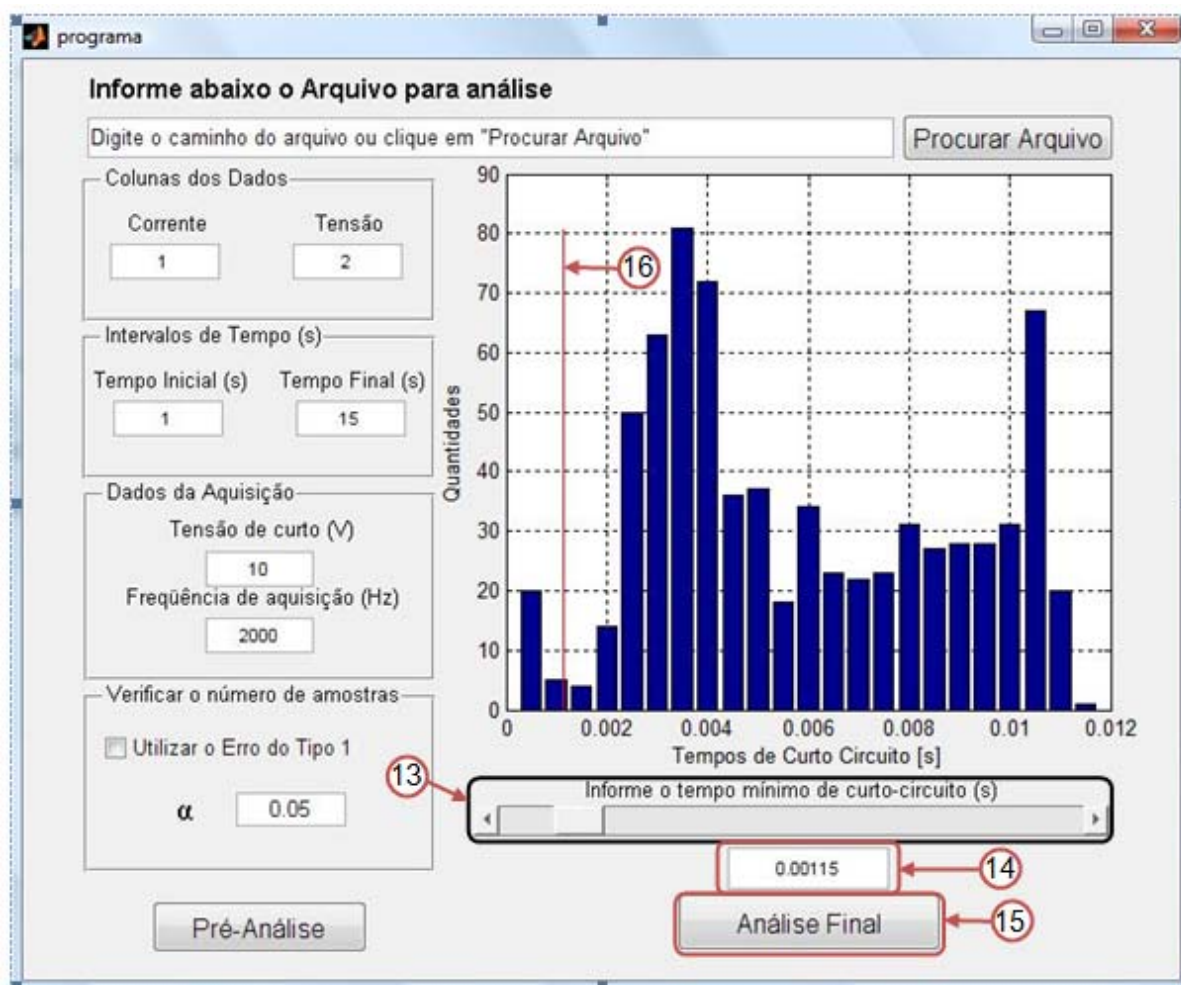


Figura A.1- Programa preparado para a análise final

- 12. Barra de rolagem para a escolha do tempo mínimo de curto-circuito
- 13. Campo numérico para indicar qual o tempo mínimo de curto-circuito
- 14. Botão para realizar a análise final

15. Linha para indicar no histograma onde está o tempo mínimo de curto-circuito

Para remover alguns curtos circuitos o usuário deve utilizar a barra de rolagem, item 13, ou informar o tempo mínimo no campo 14 e então apertar o botão 15 para obter a resposta final. A linha 16 é uma indicativa visual para a escolha do tempo mínimo de curto-circuito.

As respostas fornecidas pelo programa serão indicadas no “Command Windows” do MatLab.

ATENÇÃO: Caso o usuário queira adicionar ou remover curtos-circuitos apenas alterando os campos 13 e 14, ele precisará apenas de apertar novamente o botão 15, sem a necessidade de apertar o botão 11. Porém se o usuário alterara os campos de 1 a 8 ele deve utilizar o botão 11 para que o programa possa recarregar os novos parâmetros e então ajustar novamente os campos 13 e 14 para a análise final.