



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DA VIABILIDADE OPERACIONAL DO PROCESSO DE
SOLDAGEM MAG COM ALIMENTAÇÃO ADICIONAL DE ARAME
FRIO

ALBERTO DIAS SÁBIO

UFPA/ ITEC /PPGEM
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO GUAMÁ
BELÉM-PARÁ-BRASIL

2007



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DA VIABILIDADE OPERACIONAL DO PROCESSO DE
SOLDAGEM MAG COM ALIMENTAÇÃO ADICIONAL DE ARAME FRIO.**

AUTOR: ALBERTO DIAS SÁBIO

Dissertação submetida à banca examinadora e aprovada pelo colegiado do Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica do Instituto Tecnológico da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Materiais e Processos de Fabricação.

APROVADO EM: 09 /11/2007

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. EDUARDO DE MAGALHÃES BRAGA (UFPA)
Orientador

Prof. Dr. MARCELO FERREIRA MOTTA (UFC)
Membro externo

Prof. Dr. JOSÉ HILTON FERREIRA DA SILVA (CEFET-PA)
Membro convidado

Prof. Dr. CALOS ALBERTO MENDES DA MOTA (UFPA)
Membro interno

Prof. PhD. MANOEL FERNANDES MARTINS NOGUEIRA
Coordenador do PPGEM/ITEC/UFPA

Aos meus pais

Alípio Dias Sábio e Mary Sebastiana Moreira Sábio

pelo exemplo e abnegação que sempre demonstraram na vida.

Às minhas queridas esposa e filha: Selma Sábio e

Judy Sábio pelo carinho, incentivo,

paciência e pelo irrestrito apoio.

AGRADECIMENTOS

Principalmente ao senhor nosso Deus por iluminar os meus caminhos e dar-me sabedoria.

Ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo de Magalhães Braga pela contribuição técnica e científica a este trabalho e incentivos.

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes da Mota pelo seu valor altíssimo como educador na transmissão de conhecimentos, como companheiro e amigo no ato de incentivar e mostrar como progredir e evoluir na educação tecnológica e, também, por proporcionar o primeiro contato no mestrado.

Ao Programa de Pós Graduação da Engenharia Mecânica da UFPA e ao CEFET-PA pelo suporte infra-estrutural.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação da Engenharia Mecânica, em especial àqueles da área de Materiais e Processos de Fabricação, que contribuíram na transmissão de conhecimentos científicos voltados ao ensino-aprendizagem e pelo apoio.

Ao CEFET-PA pela liberação de parte da minha carga horária de trabalho para a realização deste pleito.

Aos alunos de iniciação científica e em especial aos amigos Engenheiros Thiago Barrozo, Nelson Mendonsa, Fábio Marinho e Alderi Fernandes pela importante contribuição na fase experimental deste trabalho.

Ao Prof. MSc Arildomá Lobato Peixoto, com muita estima, pela ajuda e contribuição científica no desenvolvimento deste trabalho de pesquisa voltado a área de soldagem.

Ao Professor do CEFET/PA e amigo José do Carmo Smith Mesquita – Empresa TORNAMA, que contribuiu na idealização e confecção do suporte alimentador de arame frio, acoplado à tocha de soldagem.

A todos os amigos e companheiros professores do CEFET-PA que direta ou indiretamente contribuíram e apoiaram a realização desta obra literária científica.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	x
SIMBOLOGIA.....	xiv
RESUMO.....	xvii
ABSTRACT.....	xix
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Justificativa para o trabalho.....	3
1.2 Motivação.....	5
3 OBJETIVOS.....	6
3.1 Objetivo geral.....	6
3.1.1 Objetivos específicos.....	6
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 Introdução.....	7
2.2 A histórico do processo de soldagem MIG/MAG.....	7
2.2.1 Evolução do processo.....	7
2.3 Processo de soldagem MIG/MAG.....	9
2.4 Princípios do processo MIG/MAG.....	10
2.4.1 Obtenção do Arco Voltaico.....	11
2.4.2 Pistola (tocha) de soldagem MIG/MAG.....	12
2.4.3 Influência da inclinação da pistola.....	14
2.4.4 Bico (tubo) de contato.....	15
2.4.5 Distância entre bico de contato peça (DBCP).....	16
2.4.6 Distância do bocal de gás.....	17
2.4.7 Fonte de soldagem.....	17
2.4.8 Consumíveis.....	20
2.4.9 Gás de proteção.....	20
a) Argônio.....	23
b) Hélio.....	24
c) Dióxido de Carbono (CO ₂).....	24
d) Misturas.....	25
2.5 Soldagem MIG/MAG com duplo arame.....	24

2.5.1	Fundamentos do processo MIG/MAG duplo arame.....	26
2.5.2	Característica do processo.....	27
	a) MIG/MAG duplo arame com potencial único (DAPU).....	27
	b) MIG/MAG duplo arame com potenciais isolados (DAPI).....	28
2.6	Configuração do processo duplo arame.....	29
	a) Quanto à disposição dos arames.....	29
2.6.3	Gás de proteção no processo duplo arame.....	30
	a) Efeito dos gases de proteção no processo duplo arame.....	31
2.6.4	Parâmetros de soldagem e tópicos a fins.....	31
	a) Tensão de soldagem (U_s).....	32
	b) Corrente de soldagem (I_s).....	32
	c) Velocidade de soldagem.....	33
	d) Velocidade de alimentação dos arames.....	34
	e) Penetração em soldagem.....	34
2.6.5	Transferência metálica.....	34
	a) Transferência metálica por curto-circuito.....	39
2.6.6	Campo de aplicação econômica.....	42
2.6.7	Estabilidade do Arco Voltaico.....	42
	a) Oscilograma.....	45
	b) Histograma.....	46
2.6.8	Características econômicas.....	47
2.6.9	Características geométricas.....	48
2.7	Ensaio por Líquidos Penetrantes.....	49
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	51
3.1	Materiais utilizados.....	51
	3.1.1 Consumível.....	51
	a) Arame-eletrodo / arame frio.....	51
	b) Gás de Proteção.....	52
	c) Metal base.....	52
3.2	Equipamentos.....	53
	3.2.1 Bancada de soldagem.....	53
	a) Central de soldagem multiprocessos.....	53

b) Sistema de alimentação de arame-eletrodo.....	54
c) Sistema de posicionamento e deslocamento automático da tocha de soldagem.....	55
d) Tocha de Soldagem.....	55
e) Sistema auxiliar de alimentação de arame frio.....	56
f) Suporte guia do arame frio.....	56
3.2.2 Balança digital.....	58
3.2.3 Sistema de medição de tempo, comprimento e velocidade de alimentação do arame eletrodo.....	58
3.2.4 Máquina de serrar de fita.....	59
3.2.5 Lixadeira / Politriz.....	59
3.2.6 Máquina de corte (cut-off) e disco de corte.....	60
3.3 Dispositivos auxiliares para aquisição de dados.....	60
3.3.1 Programas computacionais.....	61
3.4 Material de ensaio líquido penetrante.....	61
3.5 Planejamento e técnica experimental.....	62
3.5.1 Metodologia experimental.....	62
a) Configuração do processo MAG-CW.....	63
b) Sistema de alimentação de arame /suporte de fixação da tocha e guia do arame frio.....	65
3.5.2 Obtenção das Amostras.....	69
3.5.3 Obtenção das Amostras dos Corpos de Prova Soldados.....	70
3.5.4 Estabilidade do arco voltaico.....	71
a) Metodologia.....	71
b) Metodologia empregada para o levantamento dos histogramas.....	74
3.5.5 Tratamento dos dados experimentais.....	79
3.5.6 Características econômicas.....	80
a) Equações convencionais.....	80
b) Equações modificadas.....	80
3.5.7 Características geométricas.....	83
3.5.8 Ensaio por Líquidos Penetrantes.....	84
3.5.9 Aspecto Superficial do metal depositado.....	85
3.5.10 Pacote operacional.....	85
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	88
4.1 Análise e resultados da estabilidade do arco.....	88

4.1.1 Tempos de curtos-circuitos através dos histogramas.....	93
4.2 Análise e Resultados das características econômicas.....	98
4.3 Análise e Resultados das características geométricas.....	103
4.4 Análise do aspecto superficial do cordão de solda.....	110
4.4.1 Análise e resultado do ensaio por Líquido Penetrante (LP).....	114
5 CONCLUSÃO.....	117
6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	119
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	120

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Classificação de transferência metálica pelo IIW.....	35
TABELA 2 - Composição química do arame.....	52
TABELA 3 - Fatores e Níveis para os Processos MAG e MAG-CW.....	66
TABELA 4 - Apresentação do pacote operacional fatores/níveis.....	86
TABELA 5 - Planejamento experimental dos ensaios.....	87
TABELA 6 - Apresentação dos parâmetros obtidos de I_m e V_m	89
TABELA 7 - Dados da estabilidade do arco referentes à transferência metálica.	98
TABELA 8 - Resultados das características econômicas.....	99
TABELA 9 - Dados da ANOVA. Características Econômicas.....	100
TABELA 10 - Resultados das características geométricas.....	104
TABELA 11 - Dados da ANOVA. Características geométricas.....	105

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Representação esquemática do conjunto para soldagem MIG/MAG Barra (1998);.....	10
FIGURA 2.2 - Região do arco na soldagem GMAW, Modenesi (2006).....	12
FIGURA 2.3 - Tocha para soldagem GMAW semi-automática. (a) Detalhes da tocha e (b) tocha completa (Modenesi, 2006).....	13
FIGURA 2.4 - Tocha para soldagem GMAW semi-automática. Fonte: Modenesi (2001).....	14
FIGURA 2.5 - Ângulo de posicionamento da tocha, (Barra, 2003).....	15
FIGURA 2.6 - Representação da distância bico de contato peça (DCP) e projeção do arame (stickout). Barra (1998).....	15
FIGURA 2.7 - Parâmetros de soldagem para os processos de alta produção. Quites (2002).....	17
FIGURA 2.8 - Característica estática da fonte x curva do arco. a) tensão constante e b) corrente constante. Barra (1998).....	19
FIGURA 2.9 - Efeito do tipo de gás de proteção no formato do cordão (Wainer et al, 2002).....	21
FIGURA 2.10 - Representação do sistema duplo arame com potencial único, Motta (2002).....	28
FIGURA 2.11 - Representação do sistema duplo arame com potenciais isolados, Motta (2002).....	28
FIGURA 2.12 - Representação esquemática dos principais modos de transferência metálica (Barra, 1998).....	38
FIGURA 2.13 - Forma de onda da tensão e da corrente na soldagem com MIG/MAG, transferência por curto-circuito. Gorh (2002).....	40
FIGURA 2.14 - Seqüência de separação da gota metálica na transferência por curto-circuito: a) Gorh (2002) e b) Quites (2002).....	41
FIGURA 2.15 - Oscilograma (U x t) do processo MAG com tensão média (Um). Fonte: LABSOLDA/UFPA.....	46
FIGURA 2.16 - Oscilograma (I x t) do processo MAG com modo de transferência por curto circuito, indicando corrente média (Im).....	46
FIGURA 2.17 - Histograma típico de nº de ocorrências (nº.) x tempo (ms).....	47
FIGURA 2.18 - Esquema do perfil geométrico do cordão de solda.....	49
FIGURA 2.19 - Resumo da seqüência do ensaio de LP (Andreucci, 2006)	50
FIGURA 3.1 - Central de soldagem multiprocessos - Detalhes da bancada de soldagem MIG/MAG. Fonte: (LABSOLDA/UFPA).....	54
FIGURA 3.2 - Cabeçote de alimentação de arame. Modelo: STA20D. Fonte: (LABSOLDA/UFPA).....	54
FIGURA 3.3 - Sistema de posicionamento e deslocamento automático da tocha.....	55
FIGURA 3.4 - Aspecto da pistola “push” adaptada para soldagem com o arame frio, posição tandem, utilizada neste trabalho.....	55
FIGURA 3.5 - Detalhes do sistema de alimentação auxiliar do arame frio.....	56
FIGURA 3.6 - Suporte da tocha de alimentação do arame não energizado.....	57
FIGURA 3.7 - Representação esquemática atual do suporte guia.....	57
FIGURA 3.8 - Detalhe do suporte guia de alimentação do arame frio.....	58

FIGURA 3.9 - Sistema de monitoração da produtividade em operações de soldagem.....	59
FIGURA 3.10 - Máquina automática de serrar (serra em fita).....	60
FIGURA 3.11 - Máquina politriz.....	60
FIGURA 3.12 - Máquina de corte – cut-off.....	60
FIGURA 3.13 - Material para ensaio líquido penetrante; (a) Penetrante (b) revelador.....	61
FIGURA 3.14 - Tocha de soldagem com sentido de alimentação do arame frio Twin.....	63
FIGURA 3.15 - (a) Ângulos de entrada dos arames e (b) tocha de soldagem...	64
FIGURA 3.16 - Tocha de soldagem com sentido de alimentação do arame frio tandem com os ângulos de entrada dos arames.....	64
FIGURA 3.17 - Foto do dispositivo de fixação e suporte guia do arame frio acoplado a tocha de soldagem.....	66
FIGURA 3.18 - Representação esquemática da amostra.....	69
FIGURA 3.19 - Esquema do corte para obtenção dos corpos de prova.....	70
FIGURA 3.20 - Oscilograma de tempo x tensão sem filtragem.....	75
FIGURA 3.21 - Oscilograma após primeiro filtro.....	75
FIGURA 3.22 - Oscilograma após segundo filtro.....	76
FIGURA 3.23 - Apresenta o oscilograma após o terceiro filtro.....	77
FIGURA 3.24 - Apresenta o oscilograma após o quarto filtro.....	77
FIGURA 3.25 - Esquema de parte do oscilograma de tensão ampliado.....	79
FIGURA 4.1 - Oscilogramas de corrente e tensão, Processo MAG para VAE= 6m/min e sentido de soldagem empurrando.....	90
FIGURA 4.2 - Oscilogramas de corrente e tensão, Processo MAG para VAE= 6m/min e sentido de soldagem puxando.....	90
FIGURA 4.3 - Oscilogramas de corrente e tensão, Processo MAG-CW para VAE= 6 m/min e VAF= 3 m/min, sentido de soldagem empurrando e posição de alimentação do arame não energizado Tandem.....	90
FIGURA 4.4 - Oscilogramas de corrente e tensão, Processo MAG-CW para VAE= 6 m/min, VAF= 3 m/min, sentido de soldagem puxando e posição do arame não energizado Twin.....	91
FIGURA 4.5- Oscilogramas de corrente e tensão, Processo MAG-CW para VAE = 7,5 m/min e VAF= 4 m/min, sentido de soldagem empurrando e posição de alimentação do arame não energizado Tandem	91
FIGURA 4.6 - Oscilogramas de corrente e tensão, Processo MAG-CW para VAE= 7,5 m/min, VAF= 4 m/min, sentido de soldagem puxando e posição do arame não energizado Twin.....	91
FIGURA 4.7 - Oscilogramas de corrente e tensão, Processo MAG-CW para VAE = 9 m/min e VAF= 5 m/min, sentido de soldagem empurrando e posição de alimentação do arame não energizado Tandem.....	92
FIGURA 4.8 - Oscilogramas de corrente e tensão, Processo MAG-CW para VAE = 9 m/min, VAF= 5 m/min, sentido de soldagem puxando e posição do arame não energizado Twin.	92
FIGURA 4.9 - Histograma: Tempo x freqüência de curto-circuito com transferência da gota metálica. VAE 6 m/min; Soldagem empurrando.....	93
FIGURA 4.10 - Histograma: Tempo x freqüência de curto-circuito com transferência da gota metálica. VAE 6 m/min; Soldagem puxando.....	93
FIGURA 4.11- Histograma: Tempo x freqüência de curto-circuito com transferência da gota metálica. VAE 7,5 m/min; Soldagem puxando.	94

FIGURA 4.12 - Histograma: Tempo x frequência de curto-circuito com transferência da gota metálica. VAE 7,5 m/min; Soldagem empurrando.....	94
FIGURA 4.13 - Histograma: Tempo x frequência de curto-circuito com transferência da gota metálica. VAE 9 m/min; Soldagem empurrando.....	94
FIGURA 4.14 - Histograma: Tempo x frequência de curto-circuito com transferência da gota metálica. VAE 9 m/min; Soldagem puxando.....	95
FIGURA 4.15 - Histograma: Tempo x frequência de curto-circuito com transferência da gota metálica. VAE-VAF (6-3) m/min; Soldagem empurrando; Tandem.....	95
FIGURA 4.16 - Histograma: Tempo x frequência de curto-circuito com transferência da gota metálica. VAE-VAF (6-3) m/min; Soldagem puxando; Twin.....	95
FIGURA 4.17 - Histograma: Tempo x frequência de curto-circuito com transferência da gota metálica. VAE-VAF (7,5-4) m/min; Soldagem empurrando; Tandem.....	96
FIGURA 4.18 - Histograma: Tempo x frequência de curto-circuito com transferência da gota metálica. VAE-VAF (7,5-4) m/min; Soldagem puxando; Twin.....	96
FIGURA 4.19 - Histograma: Tempo x frequência de curto-circuito com transferência da gota metálica. VAE-VAF (9-5) m/min; Soldagem empurrando; Tandem.....	96
FIGURA 4.20 - Histograma: Tempo x frequência de curto-circuito com transferência da gota metálica. VAE-VAF (9-5) m/min; Soldagem puxando; Twin.....	97
FIGURA 4.21 - Efeito da VAE sobre a taxa de fusão (TF) para os processos de soldagem MAG e MAG-CW ensaiados.....	101
FIGURA 4.22 - Efeito da VAE sobre a taxa de deposição (TD) para os processos de soldagem MAG e MAG-CW ensaiados.....	102
FIGURA 4.23 - Efeito da VAE sobre o Rendimento de deposição (R) para os processos de soldagem ensaiados.....	103
FIGURA 4.24 - Efeito das VAE e dos Processos de Soldagem sobre a penetração.....	106
FIGURA 4.25 - Efeito da VAE e dos Processos de Soldagem sobre o Reforço do cordão de solda.....	107
FIGURA 4.26 - Efeito da VAE sobre a largura do cordão de solda.....	108
FIGURA 4.27 - Efeito das VAE e dos Processos de Soldagem sobre a diluição.....	109
FIGURA 4.28 - Cordão de solda destacando áreas do reforço e penetração....	109
FIGURA 4.29 - Cordão de solda executado por processo de soldagem MAG, VAE= 6 m/min; sentido de soldagem empurrando.....	110
FIGURA 4.30 - Cordão de solda executado por processo de soldagem MAG, VAE= 6 m/min; sentido de soldagem puxando.....	110
FIGURA 4.31 - Cordão de solda executado por processo de soldagem MAG, VAE= 7,5 m/min; sentido de soldagem empurrando.....	111
FIGURA 4.32 - Cordão de solda executado por processo de soldagem MAG, VAE= 7,5 m/min; sentido de soldagem puxando.....	111
FIGURA 4.33 - Cordão de solda executado por processo de soldagem MAG, VAE= 9 m/min; sentido de soldagem empurrando.....	111
FIGURA 4.34 - Cordão de solda executado por processo de soldagem MAG, VAE= 9 m/min; sentido de soldagem puxando.....	111

FIGURA 4.35 - Cordão de solda executado por processo de soldagem MAG-CW, VAE= 6 m/min, VAF= 3 m/min, sentido de soldagem puxando, posição do arame não energizado Twin.....	112
FIGURA 4.36 - Cordão de solda executado por processo de soldagem MAG-CW, VAE= 6 m/min, VAF= 3 m/min, sentido de soldagem empurrando, posição do arame não energizado Twin.....	112
FIGURA 4.37 - Cordão de solda executado por processo de soldagem MAG-CW, VAE= 7,5 m/min, VAF= 4 m/min, sentido de soldagem puxando, posição do arame não energizado Twin.....	112
FIGURA 4.38 - Cordão de solda executado por processo de soldagem MAG-CW, VAE= 7,5 m/min, VAF= 4 m/min, sentido de soldagem empurrando, posição do arame não energizado Tandem.....	112
FIGURA 4.39 - Cordão de solda executado por processo de soldagem MAG-CW, VAE= 9 m/min, VAF= 5 m/min, sentido de soldagem puxando e posição do arame não energizado Twin.....	113
FIGURA 4.40 - Cordão de solda executado por processo de soldagem MAG-CW, VAE= 9 m/min, VAF= 5 m/min, sentido de soldagem empurrando e posição do arame não energizado Tandem.....	113
FIGURA 4.41 - Qualidade superficial dos cordões depositados pelo processo MAG-CW com VAE= 6 m/min e VAF= 3 m/min - E13R-Tandem.....	114
FIGURA 4.42 - Qualidade superficial dos cordões depositados pelo Processo MAG-CW com VAE= 7,5 m/min e VAF= 4 m/min - P17-R-Tandem.....	114
FIGURA 4.43 - Qualidade superficial dos cordões depositados pelo processo MAG-CW com VAE= 7,5 m/min e VAF= 4 m/min - P20-Twin.....	114
FIGURA 4.44 - Qualidade superficial dos cordões depositados pelo processo MAG-CW com VAE= 9 m/min e VANE= 5 m/min - E24-Twin.....	114
FIGURA 4.45 - Qualidade superficial dos cordões depositados pelo processo MAG-CW com VAE= 6 m/min e VAF= 3 m/min - E25R-Twin.....	115
FIGURA 4.46 - Qualidade superficial dos cordões depositados pelo processo MAG-CW com VAE= 7,5 m/min e VAF= 4 m/min - P29R-Twin.....	115
FIGURA 4.47 - Qualidade superficial dos cordões depositados pelo processo MAG com VAE 6= m/min - E1.....	115
FIGURA 4.48 - Qualidade superficial dos cordões depositados pelo processo MAG com VAE= 9 m/min - E5.....	115
FIGURA 4.49 - Qualidade superficial dos cordões depositados pelo processo MAG com VAE= 9 m/min - P6.....	115
FIGURA 4.50 - Qualidade superficial dos cordões depositados pelo processo MAG-CW com VAE= 9 m/min e VAF= 5 m/min - E9-Tandem.....	116
FIGURA 4.51 - Qualidade superficial dos cordões depositados pelo processo MAG-CW com VAE= 9 m/min e VAF= 5 m/min - P12-Tandem.....	116
FIGURA 4.52 - Qualidade superficial dos cordões depositados pelo processo MAG-CW com VAE= 6 m/min e VAF= 3 m/min - E7-Tandem.....	116
FIGURA 4.53 - Qualidade superficial dos cordões depositados pelo processo MAG-CW com VAE= 6 m/min e VAF= 3 m/min - P19-Twin.....	116

SIMBOLOGIA

A	⇒	Ampere
Ar	⇒	Argônio
Ar-He	⇒	Mistura Argônio-Hélio
Ar+CO ₂	⇒	Mistura Argônio dióxido de carbono
AE	⇒	Arame-eletrodo
AWS	⇒	“American Welding Society”
α	⇒	Índice de significância
b	⇒	Largura do cordão
C	⇒	Carbono
CC ⁺	⇒	Corrente contínua com o eletrodo no pólo positivo
CO ₂	⇒	Dióxido de carbono
C ⁰⁻¹ cm ⁻¹ s ⁻¹	⇒	Condutividade térmica
d	⇒	Diluição
DAPI	⇒	Duplo arame com potencial isolado
DAPU	⇒	Duplo arame com potencial único
DBCP	⇒	Distância bico de contato peça
Δt	⇒	Variação de tempo de curto-circuito
ΔU	⇒	Variação de tensão
et al	⇒	Et alili (e outros)
ev	⇒	Potencial de ionização
EEF	⇒	Equilíbrio estático de forças
F	⇒	Índice de Ficher
He	⇒	Hélio
I	⇒	Intensidade de corrente
Im	⇒	Intensidade média de corrente
Is	⇒	Corrente de soldagem
IEP	⇒	Instabilidade como decorrência do efeito Pinch
IIW	⇒	“International Institute of Welding”
KHz	⇒	Freqüência
l	⇒	Comprimento do arame consumido

l_1	⇒	Comprimento linear do arame-eletrodo
l_2	⇒	Comprimento linear do arame-frio
l/min	⇒	Vazão de gás
l_0	⇒	Comprimento do arco
MAG	⇒	“Metal Active Gas”
MAG-CW	⇒	“Metal Active Gas – Cold Wire”
m_f	⇒	Massa final da junta depois da soldagem
m_i	⇒	Massa inicial da junta antes da soldagem
Mn	⇒	Manganês
ms	⇒	Milisegundos
MJm^{-1}	⇒	Potencial de ionização
n	⇒	Instante
O	⇒	Oxigênio
O_2	⇒	Gás oxigênio
P	⇒	Fósforo
p	⇒	Significância
pe	⇒	Penetração
%	⇒	Percentual
R	⇒	Rendimento do processo
r	⇒	Reforço do cordão
ρ	⇒	Densidade linear do arame consumível
ρ_1	⇒	Densidade linear do arame-eletrodo
ρ_2	⇒	Densidade linear do arame frio
S	⇒	Enxofre
s	⇒	Segundos
Si	⇒	Silício
t	⇒	Tempo
“Tander Wire”	⇒	Tocha de soldagem com a disposição do arame frio em posição longitudinal ao sentido de deslocamento da tocha
t_m	⇒	Tempo médio de soldagem dos arames
t_1	⇒	Tempo do arame-eletrodo
t_2	⇒	Tempo do arame frio

t_{min}	⇒	Tempo mínimo de curto-circuito
t_{max}	⇒	Tempo máximo de reabertura do arco
TD	⇒	Taxa de deposição
TF	⇒	Taxa de fusão
t_n	⇒	Tempo de soldagem referente ao vale
t_{n-1}	⇒	Tempo de soldagem relativo ao início de formação da gota
t_{n+1}	⇒	Tempo de soldagem relativo a reignição do arco
tr_n	⇒	Tempo relativo no instante “n”
tr_{n+1}	⇒	Tempo relativo no instante “n+1”
“Twin Wire”	⇒	Tocha de soldagem com arranjo do arame frio em posição transversal ao sentido de deslocamento da tocha
U	⇒	Tensão
U_n	⇒	Tensão no vale ou tensão de curto-circuito
U_{n-1}	⇒	Tensão de início de formação da gota,
U_{n+1}	⇒	Tensão de no pico (reignição do arco)
U_r	⇒	Tensão de referência
U_s	⇒	Tensão de soldagem
V	⇒	Velocidade
V_0	⇒	Tensão em vazio (U_0)
V_s	⇒	Velocidade soldagem
VAE	⇒	Velocidade de Alimentação do Arame-eletrodo
VANE	⇒	Velocidade de Alimentação do Arame Não Energizado
Z	⇒	Altura da tomada de corrente
ZTA	⇒	Zona termicamente afetada

Sábio, A. D., 2007, "Estudo da viabilidade operacional do processo de soldagem MAG com alimentação adicional de arame frio". Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Belém-Pa.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo experimental da viabilidade operacional, econômica, geométrica e da qualidade da solda com o uso do processo intitulado MAG-CW (Metal Active Gas–Cold Wire); entendido como: processo de soldagem MAG com adição de arame frio ou não energizado. Neste contexto, para o desenvolvimento deste trabalho utilizou-se os processos de soldagem MAG e o MAG-CW, sendo utilizados arames consumíveis sólidos de 1,2 mm de diâmetro, da classe AWS E-70S6 e o dióxido de carbono puro, CO₂, como gás de proteção com vazão de 17 l/min, para os dois processos empregados. A soldagem automatizada foi realizada com o auxílio de uma fonte eletrônica ajustada em CC⁺, no modo tensão constante e interfaceada a um microcomputador. Para ambos os processos, os cordões de solda foram depositados sobre corpos de prova de aço carbono SAE 1020 medindo 76x155x12,7 mm, com passes em simples deposição, na posição plana puxando e empurrando o arco voltaico. Para o processo MAG-CW adicionou-se o arame frio, na região do arco elétrico, por um sistema de alimentação auxiliar de arame de forma seqüencial Tandem e Twin, também, na posição plana. As variáveis de influência foram a Velocidade de Alimentação do Arame-Eletrodo, VAE, que variou em três níveis: 6, 7,5 e 9 m/min, respectivamente, a Velocidade de Alimentação de Arame Frio, VAF, que também variou em três níveis, sendo: 3, 4 e 5 m/min combinadas com VAE. As variáveis de resposta para a avaliação experimental foram a estabilidade do arco elétrico, as características econômicas, as características geométricas e a qualidade superficial do cordão de solda. Os resultados mostraram satisfatória estabilidade do arco, bem como, elevada produção em relação ao processo MAG e bom aspecto superficial das soldas. Neste sentido, o processo MAG-CW, quando comparado ao processo MAG, foi superior na taxa de fusão (TF) em 57% para a VAE igual a 6 m/min, 59 % para VAE igual a 7,5 m/min e de 53 % para a VAE igual a 9 m/min. Observou-se, ainda, que o mesmo ocorreu para a taxa de deposição (TD) aumentando em todos os níveis de velocidade: 62% para a VAE na condição igual a 6 m/min e 7,5 m/min e de 57 % para a VAE na

condição igual a 9 m/min. A boa performance no aumento das taxas obtidas pelo processo MAG-CW demonstra vantagem, com maior evidência no desempenho destas características, em função da adição de arame frio ao arco.

Palavras chave: MIG/MAG; MAG-CW; Duplo Arame; Arame frio; Transferência Metálica. Características Econômicas; Características Geométricas.

“Operational Viability Study about the MAG welding process with cold wire additional feeding”. Master's Degree Monography - Universidade Federal do Pará, Belém – Pará – Brasil.

ABSTRACT

The present study shows experimental research of the weld concerning operational, economic and geometric viability as well as its superficial quality when using MAG-CW (Metal Active Gas – Cold Wire), understood as: MAG welding process with non-energized wire or cold wire. For the development of this research, welding MAG and MAG-CW processes have been used together with 1,2 mm of diameter consumable solid wires, class AWS E-70S6 and carbon dioxide pure, CO₂, as protection gas with 17 l/min release for both processes. Automated welding was performed with electronic source adjusted in CC+, in constant tension mode, interfaced by a microcomputer. In both processes the welds were put on steel carbon samples SAE 1020, 76x155x12,7 mm size, with simple disposition passes, pulling and pushing the voltage arc. The MAG-CW process added cold wire on the electric arc region, fed by the Tandem and Twin sequential wire shape auxiliary system on plane position. The variables of influence were: Velocidade de Alimentação do Arame-Eletrodo, VAE, which varied in three levels: 6; 7,5 and 9 m/min, respectively, Velocidade de Alimentação do Arame-Fio, VAF, which also varied in three levels: 3; 4 and 5 m/min combined with VAE. Response variables for experimental evaluation were electric arc stability, economic features, geometric features and weld superficial quality. The results demonstrated satisfactory arc stability as well as high production concerning MAG process and also good superficial aspect of welds. Rising rates obtained by MAG-CW process demonstrates the superiority due to non-energized wire addition to the arc. Thus, the MAG-CW process, in comparison with MAG process, demonstrated superiority concerning the 57% in rate of fusion (RF) for the VAE of 6 m/min, 59 % for the VAE of 7,5 m/min and 53 % for the VAE in 9 m/min. It has also been observed that the same occurred with the rate of deposition (RD) increasing in all speed levels: 62% for the VAE in both conditions of 6 m/min and 7,5 m/min and in 57 % for the VAE in 9 m/min. The good performance in the increase of the rates obtained by the process MAG-CW demonstrates advantage, with larger evidence in the acting of these characteristics, in function of the addition of cold wire to the arch.

Key words: MIG/MAG; MAG-CW; Double Wire; Cold Wire; Metal Transference; Economic Features and Geometric Features.

1- INTRODUÇÃO

O processo de soldagem MIG/MAG foi introduzido no mercado somente em 1948 quando se tornou viável comercialmente, pois o propósito era majorar a produtividade e a versatilidade da fabricação soldada de ligas ferrosas e não ferrosas. Esse processo de união de materiais é um dos mais utilizados nos países industrializados (Bohme et al, 1996).

O avanço da tecnologia impulsionou as indústrias para o aumento da produtividade tornando o mercado cada vez mais competitivo, e com este salto, o processo de soldagem MIG/MAG talvez, de forma limitada, não atenda a demanda de produção das indústrias que buscam a redução de custos e de tempo com taxas superiores de deposição de solda.

Neste sentido, o LabSolda da UFPa estuda a viabilidade operacional, econômica, metalúrgica e de propriedades mecânicas da soldagem MAG com a adição de um arame frio ou não energizado, Metal Active Gas-Cold Wire – MAG-CW, sugerindo esta técnica como variante do processo MIG/MAG duplo arame.

A soldagem com duplo arame foi aplicada em 1948 especificamente na soldagem com arco submerso, sendo esta técnica logo aceita como um método de aumento na produção soldada (Michie et al, 1999).

Esta variante do processo de soldagem MIG/MAG, o duplo arame, também foi explorada em 1955, porém, já no campo da soldagem com proteção gasosa, cuja alternativa baseia-se na formação de dois arcos elétricos entre a peça e dois arames-eletrodos alimentados continuamente. A poça de fusão é inteiramente protegida por um fluxo de gás inerte, ativo ou mistura de ambos, como na soldagem MIG/MAG, (Michie et al, 1999).

O projeto de pesquisa da soldagem MAG com alimentação adicional de arame frio surgiu a partir da idéia do processo de soldagem MIG/MAG duplo arame.

O duplo arame, além de alto rendimento, também trabalha com altas taxas de densidade de corrente, proporcionando elevadas taxas de fusão e, conseqüentemente, pela possibilidade de maiores taxas de velocidade de soldagem ou cordões mais volumosos, garantindo menor tempo de soldagem em relação ao processo de soldagem MIG/MAG, (Berge, 2001; Groetelaars, 2005).

Em 1955 quando o processo duplo arame foi introduzido através da soldagem com proteção gasosa, as limitações da tecnologia empregada nas fontes de soldagem da época não permitiram a evolução ou o impulsionamento do processo de soldagem. Com a pesquisa e o avanço tecnológico no mundo, houve o aperfeiçoamento das fontes permitindo, então, o meio necessário para o suprimento de energia ao arco voltaico viabilizando a utilização deste processo que apresenta atualmente um aumento da produção com redução no tempo de operação

Esta nova técnica de operação de soldagem utilizando o processo de soldagem duplo arame é especialmente utilizada com vantagem na soldagem de revestimento e no enchimento de chanfros (Bacelar & Ferraz, 2005).

A proposta da soldagem MAG-CW se estabelece como uma alternativa técnica e econômica em relação à soldagem MAG. Esta nova versão da soldagem utiliza apenas um equipamento convencional (uma fonte de tensão constante) com um cabeçote extra para alimentação do arame frio conjugado à tocha de soldagem.

A diferença entre o duplo arame e o arame frio está na inserção de apenas um arame maciço energizado conectado à fonte de soldagem e responsável por único arco voltaico e outro arame maciço não energizado, dito “frio”, adicionado à poça de fusão por um cabeçote alimentador. O arco elétrico funde simultaneamente os dois arames. Neste contexto, a adição de arame frio é uma técnica nova diante do que se pesquisou na bibliografia de soldagem com duplo arame, o que revela a possibilidade de pesquisas no desenvolvimento dessa nova alternativa de soldagem.

A alimentação do arame frio é realizada através de um segundo cabeçote alimentador e um sistema acoplado à extremidade da tocha de soldagem a fim de conduzi-lo até a poça de fusão. A energia elétrica fornecida ao cabeçote extra de alimentação de arame frio é proveniente da mesma fonte de energia o qual está conectado.

Existem duas possibilidades de arranjo dos arames na tocha de soldagem podendo ser em posição transversal “Twin” ou longitudinal “Tandem”.

As vantagens do emprego do processo de soldagem MAG-CW estão associadas ao controle das características econômicas e geométricas, a alimentação dos arames em diferentes velocidades, ao emprego de arame-eletrodo e frio com

diferentes diâmetros. O processo MAG-CW também apresenta algumas limitações, como a capacidade mecânica do dispositivo guia do arame frio, a combinação das velocidades de alimentação do arame-eletrodo com a do arame frio limitando as taxas de fusão e de deposição.

1.1 - Justificativa para o trabalho

A escolha do processo é de fundamental importância para o desenvolvimento do projeto. O processo MAG é tido como uma das alternativas mais econômicas para a substituição do processo a arco voltaico com eletrodo revestido, em função da facilidade para a soldagem de grandes estruturas metálicas e de sua elevada produção.

A característica inovadora do processo utilizando duplo arame apresenta-se hoje como uma das mais promissoras alternativas no intuito de aumentar a produtividade da indústria que utiliza processo de soldagem para união e revestimento de materiais de engenharia.

Os diversos setores da indústria de fabricação experimentam, no mundo todo, um acelerado processo de expansão em busca de produtividade e competitividade. As inovações tecnológicas na indústria da soldagem não param, abrangem desde a concepção de novas fontes de energia, programas, consumíveis e adequações de processos as novas e desafiadoras exigências de mercado. Este trabalho consiste na concepção de uma técnica de soldagem com a introdução de um arame não energizado adaptado à soldagem a arco voltaico MAG, a essência deste trabalho. O processo de soldagem MAG se caracteriza pela sua elevada produtividade, diversidade de arames comerciais, qualidade e resistências do metal depositado. A introdução de um arame não energizado independente do arame energizado visa aumentar ainda mais essa produtividade com a garantia de manutenção da qualidade e da resistência mecânica. Existem problemas relacionados ao uso da técnica de soldagem com duplo arame (energizados). Destacam-se os custos adicionais e elevados com investimentos em novos e modernos equipamentos, instrumentos e dispositivos de posicionamento e de deslocamento das pistolas de soldagem, além de sérias dificuldades para o ajuste dos parâmetros operacionais. Este último caso exige a presença de um especialista.

Soma-se ainda a todos esses fatores a concorrência dos processos de soldagem a arco, já tradicionais, e com características consolidadas de altas taxas de produção como é o caso, por exemplo, da soldagem a arco submerso.

Devido às características do processo de soldagem MAG, planejou-se a soldagem de revestimento sobre superfícies metálicas de aços baixo carbono introduzindo suplementação de arame não energizado, através de um sistema auxiliar de alimentação de arame. O objetivo é contribuir para o melhoramento do desempenho econômico do processo com características de uma técnica alternativa de baixo custo e investimento.

Constituiu-se no desafio a ser enfrentado para o desenvolvimento deste projeto de pesquisa o estudo comparativo do desempenho do processo MAG com o desempenho do processo MAG-CW em soldagem de simples deposição sobre superfície metálica.

1.2 - Motivação

Este projeto de pesquisa está em fase conclusiva no GETSOLDA/UFPA (Grupo de Estudo em Tecnologia da Soldagem da Universidade Federal do Pará), intitulado *ESTUDO DO PROCESSO DE SOLDAGEM MAG COM ALIMENTAÇÃO ADICIONAL DE ARAME NÃO ENERGIZADO*.

A contribuição tecnológica esperada relaciona-se à expectativa dos resultados obtidos na soldagem nos modos MAG e MAG-CW.

- **Uma contribuição tecnológica bastante significativa é o estabelecimento de pacotes operacionais para o processo MAG-CW como função das velocidades de alimentação, do tipo e do diâmetro do arame para a geração de um banco de dados auxiliar.**

Existem problemas relacionados ao uso da técnica de soldagem com o duplo arame energizado. Destacam-se os custos adicionais e elevados com investimentos em novos e modernos equipamentos, instrumentos e dispositivos de posicionamento e de deslocamento das pistolas de soldagem, além de sérias dificuldades para o ajuste dos parâmetros operacionais. Este último caso exige a presença de um especialista. Soma-se ainda a todos esses fatores a concorrência dos processos de soldagem a arco, já tradicionais e com características consolidadas de altas taxas de produção. Portanto, isto dá motivação para não medir esforços na pesquisa, para que as metas estabelecidas para este projeto alcancem o sucesso desejado.

A expectativa para resultados futuros através da soldagem a arco voltaico pelo processo MAG-CW é que a técnica empregada possa contribuir para o melhoramento do desempenho econômico do processo MAG ao se inserir um outro arame maciço frio na atmosfera do arco, como também de uma técnica alternativa de baixo custo e investimento.

A principal contribuição científica nesta dissertação está relacionada à **motivação** para estudos avançados de pesquisa, com vistas ao desenvolvimento de conhecimentos sobre a soldagem MIG/MAG.

3 - OBJETIVOS

3.1 - Objetivo geral

Estudar a viabilidade operacional da soldagem MAG-CW (Metal Active Gas-Cold Wire) com ênfase na estabilidade do arco, na economia, na geometria e na sanidade do metal depositado.

3.1.1 - Objetivos específicos

Comparar o desempenho da soldagem MAG com o desempenho da soldagem MAG-CW com destaque nos seguintes aspectos:

- a-** Estabilidade do arco – dinâmica do arco e oscilogramas de tensão e corrente de soldagem;
- b-** Análise econômica – taxa de deposição, taxa de fusão e rendimentos de deposição;
- c-** Análise geométrica – largura, reforço, penetração da solda e diluição;
- d-** Sanidade da solda – inspeção visual (LP).

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- Introdução

Este capítulo tem por objetivo oferecer as bases tecnológicas forçosamente inevitáveis para a clareza de compreensão, conhecimento e entendimento no desenvolvimento deste projeto.

O processo de soldagem MIG/MAG duplo arame vem sendo comercializado, pesquisado e avaliado no mundo, com potencial de aplicação em franco desenvolvimento, (Groetelaars, 2005; Motta, 2002; Mulligan & Melton, 2002; Ketron et al, 2002; Michie et al, 1999). Conforme Michie et al (1999), as variantes deste processo vêm sendo investigadas desde os anos 1950 e somente com a chegada de equipamentos de soldagem eletrônicos, o mesmo se tornou disponível ao mercado comercial.

Em função do desenvolvimento dos processos de fabricação e da engenharia de materiais no mundo, os processos de soldagem sofreram um grande avanço tecnológico nos últimos anos, tanto relacionado com o processo quanto ao desenvolvimento de novos consumíveis. Entretanto, com o intuito de conseguir processos mais econômicos e contínuos que os processos manuais, nos últimos anos foram desenvolvidos o aperfeiçoamento das fontes permitindo o meio necessário para o suprimento de energia ao arco voltaico e um maior controle operacional dos processos com alimentação contínua de arame, como: MIG/MAG, Arco Submerso e o Arame Tubular (AT).

Durante a investigação para a obtenção de dados na bibliografia deste trabalho, sobre a soldagem MIG/MAG com duplo arame, percebeu-se a carência de trabalhos científicos relativos ao processo, o que torna relevante a possibilidade de pesquisas no desenvolvimento dessa nova alternativa de soldagem com adição de arame frio ao processo MAG (MAG-CW).

2.2 - A história do processo de soldagem MIG/MAG

2.2.1 - Evolução do processo

No passado e por volta dos anos 1920 as experiências com processos de soldagem com proteção gasosa provaram que podia alcançar melhores

propriedades do cordão de solda, desde que o arco elétrico e a poça de fusão fossem protegidos por um gás inerte da contaminação atmosférica, (Wainer, 1978).

O processo de soldagem TIG (Tungsten Inert Gas) foi o primeiro processo de soldagem com proteção gasosa introduzido no final dos anos 1930, mas só foi disponibilizado para o comércio no início dos anos 1940. Este processo utilizando gases como o argônio e o hélio para a proteção gasosa soldava magnésio, aço inoxidável, alumínio e outros metais, com a alimentação manual de um metal de adição (vareta de adição) introduzida através do arco voltaico mantido entre um eletrodo de tungstênio não consumível e o metal de base. Este processo é ainda muito usado hoje. A idéia TIG ajudou a desenvolver e aprimorar um novo processo com maior velocidade, o MIG, haja vista, que o processo TIG utilizava baixa velocidade de soldagem.

O processo de soldagem MIG (Metal Inert Gas) ou Metal Gás Inerte surgiu no final dos anos 40 do século XX e o eletrodo de Tungstênio foi substituído por um arame-eletrodo consumível com diâmetro reduzido, que através de uma bobina e uma tocha de soldagem era impulsionado por um motor para alimentar diretamente o arco voltaico. Entretanto, somente em 1948 é que o processo de soldagem MIG tornou-se viável comercialmente com os primeiros equipamentos semi-automáticos com alimentação contínua de arames maciços em condições de uso sendo entregues ao mercado americano. Naquele tempo, o processo foi chamado de "Processo de Soldagem S.I.G.M.A.", o que foi a forma abreviada de Shielded Inert Gas Metal Arc e significa aproximadamente o mesmo que a designação atual: Soldagem MIG (APENGSOLD, 1997).

Este processo foi utilizado para a soldagem dos metais não ferrosos, porém, como eram utilizados gases inertes e com custos elevados não foi possível utilizar o mesmo para a soldagem dos aços comuns e aços ligas.

Novas pesquisas, a partir dos anos 1930, realizadas com gases produzidos na desintegração dos revestimentos dos eletrodos direcionaram as pesquisas a ensaios com gás carbônico com atmosfera protetora do arco voltaico. Com o avanço das pesquisas os primeiros trabalhos foram desenvolvidos com gás ativo dióxido de carbono, CO₂, na soldagem dos aços (Wainer, Brandi & Mello, 2002). Com isto, começa a ser usado um novo processo de soldagem com a sigla

MAG (Metal Active Gas) ou Metal Gás Ativo e se torna bastante popular no início dos anos 1950 (Wainer, Brandi & Mello, 2002).

Esse processo foi mais empregado também na Alemanha para a soldagem de aços ao carbono e de baixa liga porque o argônio ainda era muito caro naquele tempo. Com a queda do preço do argônio, empregaram-se nos anos 60 os gases mistos - inicialmente a base de argônio/dióxido de carbono, Ar/CO₂ (embora 40% mais caro que o dióxido de carbono) – cuja aplicação se estende cada vez mais como gases de proteção usados para soldagem MAG (APENGSOLD, 1997).

No final da década de 50 do século XX a empresa Norte Americana Lincool Electric Company patenteou um processo chamado Innershield (inglês, indicando que a proteção vem de dentro). A idéia era que confiando no grande desempenho da dupla combinação fluxo e arame contínuo fosse introduzido no interior do arame eletrodo o fluxo contendo elementos desoxidantes e estabilizantes à semelhança dos revestimentos dos eletrodos. E assim nasceu o processo de soldagem arame tubular, atualmente conhecido com a sigla FCAW – Flux Cored Arc Welding e definido como um processo de soldagem por fusão, semelhante ao processo de soldagem MIG/MAG diferenciando-se por carregar no interior do arame o fluxo, composto por materiais inorgânicos e metálicos (Wainer et al, 1992).

Esses arames foram primeiramente estudados na década de 1920 e desenvolvidos posteriormente por russos e americanos.

Atualmente, vêm sendo continuamente aperfeiçoado várias alternativas de soldagem baseada nas investigações do contexto exposto acima, com a implantação dos processos de soldagem MIG/MAG duplo arame para atender a atual modernização da indústria.

2.3 - Processo de soldagem MIG/MAG

Nos Estados Unidos o processo de soldagem MIG/MAG é mais conhecido pela sigla GMAW (Gas Metal Arc Welding), Figura 2.1, ou ainda, “Soldagem a Arco Voltaico com Atmosfera Gasosa”. Conceitualmente pode ser descrito como um processo de soldagem que utiliza o arco voltaico como fonte de calor para aquecer o metal de base, bem como, um arame-eletrodo maciço consumível ou metal de alimentação contínua, para a união de metais. Emprega uma fonte externa de gás

de proteção para a poça de solda suprida com pressão e vazão adequadas, responsável pelo ambiente formado pelo arco elétrico e por proteger da oxidação as gotas metálicas em transferência e a poça de fusão contra a atmosfera vizinha a este arco (Gohr, 2002).

Quando o processo de soldagem utilizar um arco em atmosfera de gás inerte entre o eletrodo nu consumível e a peça a soldar, recebe a denominação de MIG (Metal Inert Gas), ou no caso de utilizar um gás ativo, o processo recebe a denominação de MAG (Metal Active Gas), (APENGSOLD, 1997).

Outra característica do processo MIG/MAG é a sua aplicação em corrente contínua CC+ tendo-se ainda a vantagem da limpeza do filme de óxido, crítico na soldagem do alumínio e magnésio, permitindo uma adequada coalescência e um perfil do cordão de solda mais uniforme (ALCAN, 1993).

A Figura 2.1 ilustra esquematicamente o processo de soldagem MIG/MAG sendo composto por uma fonte de soldagem, um sistema de alimentação de arame-eletrodo, uma tocha de soldagem normalmente com um modo independente de refrigeração e um sistema de abastecimento de gás externo.

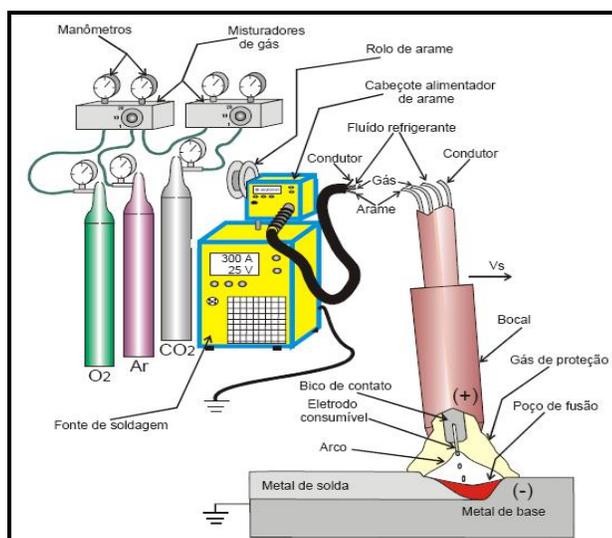


Figura 2.1 – Representação esquemática do conjunto para soldagem MIG/MAG (Barra, 2003)

2.4 - Princípios do Processo MIG/MAG

Fundamentalmente, os principais processos de soldagem contínua empregados mundialmente utilizam a energia calorífica gerada no arco voltaico para

acontecer de fato à solda e dentre estes processos destaca-se o MIG/MAG, considerado por ter qualidade própria de se distinguir como um dos mais admitidos pelas indústrias em face da boa flexibilidade, alta qualidade das soldas produzidas e elevado nível de produtividade (Miranda, 2002; Gohr, 2002).

O processo MIG/MAG em condições de soldagem normalmente trabalha com intensidades de correntes na faixa de 60 a 600 A e tensões de soldagem na faixa de 15 a 35 V (AWS, 1992) em corrente contínua com polaridade inversa (CC^+) resultando em um arco estável com transferência metálica regular e com baixa quantidade de salpicos. A solda resultante geralmente apresenta penetração adequada dentro de uma boa gama de correntes, assim como boas propriedades mecânicas e estéticas.

O processo de soldagem GMAW foi inicialmente desenvolvido e primeiro usado principalmente para soldar alumínio e ainda é popular para este propósito. Mas logo converteu-se em um método de manufatura eficiente para união de juntas e componentes em aço. Porém, também é usado amplamente por soldar todos os principais metais comerciais inclusive aço carbono, ligas e aços inoxidáveis, como também metais não ferrosos como o cobre (Sadler, 1999). As principais aplicações são convergidas para onde o desejo pelo bom acabamento é esperado, como a indústria automobilística e agrícola, fabricação de tanques e tubulações e fabricação de estruturas leves e pesadas.

A elevada quantidade de solda depositada por tempo em kg/h; a relativa facilidade de mecanização ou automatização do processo; o alto ciclo de operação com tempo de arco aberto/tempo total de produção caracteriza-se como vantagens e são as razões do empenho em aperfeiçoar o processo de soldagem para torná-lo menos passível ao aparecimento de defeitos de deposição.

A soldagem pode ser praticada em todas as posições, de forma automática e semi-automática, com estabilidade do processo.

2.4.1 - Obtenção do Arco Voltaico

O arco consiste de uma descarga de corrente elétrica, relativamente alta, entre dois eletrodos, que é sustentado por um gás ionizado, denominado plasma, AWS (1987). A formação do arco voltaico é determinada por meio do contato

provocado pelo curto-circuito entre o arame-eletrodo e a peça, conforme a Figura 2.1 e a Figura 2.2. Isto facilita a passagem de uma elevada corrente causando um aquecimento ao longo do arame-eletrodo com uma conseqüente ruptura do curto circuito, ocasionada através da fusão do arame na região de contato com a peça. Entretanto, já que um pólo da fonte de energia está ligado na peça e outro no eletrodo, então, nesse instante se estabelece o arco voltaico. O eletrodo, portanto, é ao mesmo tempo suporte do arco elétrico e metal de adição. Com o arco elétrico instalado e o arame-eletrodo sendo continuamente alimentado, parte da energia responsável pela fusão da extremidade do eletrodo é devida ao *efeito Joule* gerado pela passagem da corrente através do arame na parte que corresponde ao espaço entre o bico de contato e o arco elétrico, causando um aquecimento do mesmo. No entanto, a maior parte da energia provém do próprio arco na região de contato, transformando a ponta do eletrodo em pequenas gotículas de metal fundido e logo transferido-as para a poça de fusão da peça a soldar, determinando a geometria do cordão de solda (Gohr, 2002).

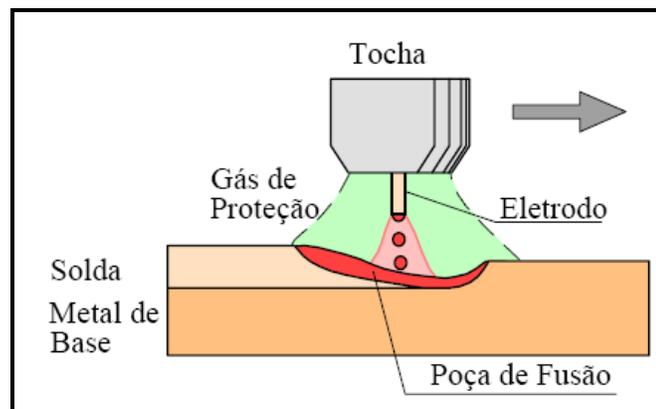


Figura 2.2 – Região do arco na soldagem GMAW. (Modenesi, 2006)

2.4.2 - Pistola (tocha) de soldagem MIG/MAG

A tocha para a soldagem MIG/MAG, Figura 2.3 tem a função de abastecer a região da soldagem com o gás protetor, guiar o arame-eletrodo e conduzir a corrente de soldagem através do tubo de contato para o arame-eletrodo e metal de base.

A Figura 2.3 apresenta uma pistola típica para a soldagem MIG/MAG.

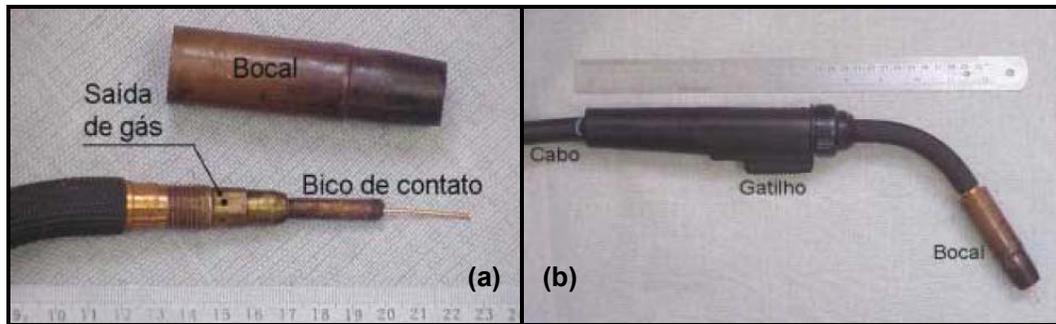


Figura 2.3 – Tocha para soldagem GMAW semi-automática. (a) Detalhes da tocha e (b) tocha completa (Modenesi, 2006)

Os diversos tipos de tochas de soldagem são projetados para se obter a máxima eficiência do processo, para as mais severas operações de manuseio, para a passagem de corrente elétrica em um duto interno, para proporcionar a máxima produção devendo ser leves e não afetar o soldador.

Estas tochas para soldagem manuais são normalmente em forma de tromba (pescoço curvilíneo). Consiste de um bico de contato deslizante para transmitir corrente ao arame, Figura 2.3a, orifícios para a passagem de gás de proteção, de um bocal que orienta o fluxo de gás protetor à região do arco e da poça de fusão e de um gatilho (interruptor) de acionamento do sistema, Figura 2.3b. Em seguida, o acionamento do sistema põe em ação um contactor que está ligado ao primário do transformador da fonte, energizando o circuito de soldagem, além de acionar o alimentador de arame e válvula solenóide para comandar o fluxo de gás protetor a tocha (APENGSOLD, 1997).

Na soldagem manual com o processo MAG, são empregadas tochas refrigeradas a ar, para intensidades de correntes abaixo de 300 A, e acima de 300 A refrigeradas à água. Na soldagem manual MIG solda-se também abaixo de 300 A com tochas refrigeradas à água, por causa da mais forte carga térmica, em virtude do gás protetor inerte (Ar, He), assim como na soldagem mecanizada pelo maior tempo que permanece ligado.

2.4.3 - Influência da inclinação da pistola

A inclinação da tocha de soldagem forma com a reta vertical situada perpendicularmente a linha de soldagem, um ângulo de deslocamento ou de ataque que pode ser para frente ou para trás, negativo ou positivo, Figuras 2.4 e 2.5.

A utilização da pistola de soldagem pode ser contra ou a favor à direção de soldagem e pode influenciar na geometria de solda. A pistola se inclinando para frente, Figura 2.4, ângulo positivo e a favor da direção da soldagem, imaginando-se que esta direção seja efetuada da esquerda para a direita, tem-se a chamada soldagem “à direita”, Neste caso, o jato de plasma empurra o metal líquido para trás e o arco incide mais diretamente no metal de base. Assim, a largura do cordão será menor, com maior penetração e reforço convexo, embora o controle da operação de soldagem seja mais difícil e o efeito da proteção de gás tende a diminuir gerando porosidades.

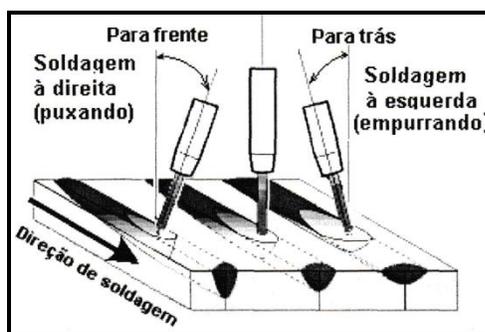


Figura 2.4 – Efeito da inclinação do eletrodo (Quites, 2002)

Com a pistola juntamente com o eletrodo inclinados para trás, para o lado da solda, ângulo de deslocamento negativo, Figuras 2.4 e 2.5, imaginando-se que a direção de soldagem seja efetuada da esquerda para a direita, têm-se a chamada soldagem “à esquerda”. Desta forma o jato de plasma espalha o material líquido na forma de um colchão fluido. Isto faz aumentar a largura do cordão de solda e diminuir o reforço e a penetração (Quites, 2002).

A utilização de um ângulo de deslocamento ou ataque compreendido entre 0 a 20°, já que seu valor depende da posição de soldagem empregada, corresponde à aplicação de ângulos negativos, Figuras 2.5, apesar da facilidade na operação, também provoca baixa penetração além de um cordão largo e chato e com reduzida incidência de salpicos (Barra, 2003).

O ângulo de trabalho localiza-se transversalmente à solda, conforme representa na Figura 2.5, e corresponde normalmente entre 35 a 115° em relação à vertical, que apresenta influência sobre a simetria do cordão de solda. A seleção do ângulo de trabalho dependerá da posição de soldagem e do tipo de junta.

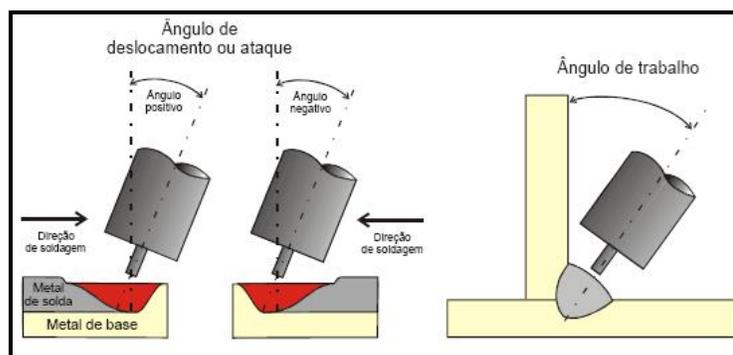


Figura 2.5 – Ângulo de posicionamento da tocha, (Barra, 2003).

2.4.4 - Bico (tubo) de Contato

O bico de contato é um tubo a base de cobre ou liga de cobre, cujo diâmetro interno é ligeiramente maior que o diâmetro do arame-eletrodo (0,13 a 0,25 mm), servindo para energizar o arame-eletrodo e de contato deslizante permitindo a passagem do arame sem restrições.

A posição do bico de contato, mostrado na Figura 2.6, dependerá do modo de transferência com o qual se deseja soldar. De uma maneira simples para a soldagem no modo curto-circuito, o bico de contato deverá permanecer faceado ou projetado do bocal e, para a soldagem goticular o bico de contato deverá permanecer recuado em relação ao bocal (Barra, 2003).

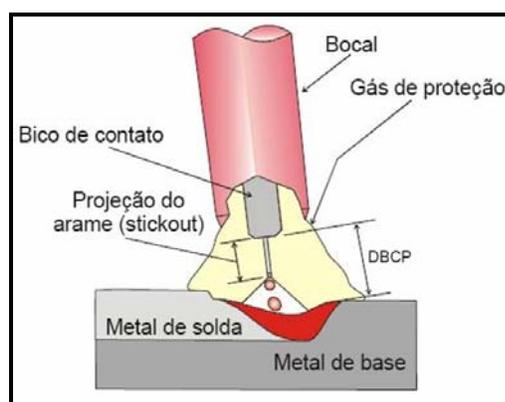


Figura 2.6 – Representação da distância bico de contato peça (DBCP) e projeção do arame (stickout) (Barra, 2003)

2.4.5 - Distância entre Bico de Contato e Peça (DBCP)

Valores baixos da distância bico de contato e peça (metal de base) DBCP podem ocasionar penetração profunda, reforços altos e cordões estreitos (pela redução no valor de tensão) e aderência de salpico no bocal. Valores altos de DBCP podem prejudicar a proteção do local de soldagem e facilitar a oscilação do arame projetado, aumentar a incidência de respingos e porosidade e tornar o cordão irregular (Barra, 2003).

O comprimento do arame entre o bico de contato e sua extremidade é relativamente curto, assim podem ser empregadas altas densidades de corrente (100 A/mm^2), apesar do pequeno diâmetro dos eletrodos (APENGSOLD, 1997).

Segundo Quites (2002), o comprimento do arame-eletrodo no processo de soldagem MIG/MAG é muito importante porque o diâmetro deste é muito pequeno. Nele é produzida uma perda de energia por efeito Joule, (aquecimento já citado anteriormente). Esta perda aumenta com o comprimento do arame-eletrodo (stick-out). Para uma velocidade de alimentação de arame constante no modo tensão constante, o aumento do comprimento do eletrodo implica em redução da corrente. Por isto, este comprimento deve ser mantido, durante a soldagem, o mais invariável possível. Por sua vez, o comprimento do arco também deve ser mantido constante. Logo, o comprimento do arame influi decisivamente na geometria da solda.

A distância da tomada de corrente (DBCP) pode ser calculada pela soma do comprimento do arco com o comprimento do eletrodo, Figura 2.6, no entanto, deve ser estabelecida a princípio e conservada constante durante a operação. Para o processo MAG, Quites (2002), informa que comumente se trabalha tornando DBCP igual a Z, Figura 2.7, logo:

$$Z = I / 20 ; \quad (1)$$

onde "I" é a intensidade de corrente em (A) e "Z" em (mm).

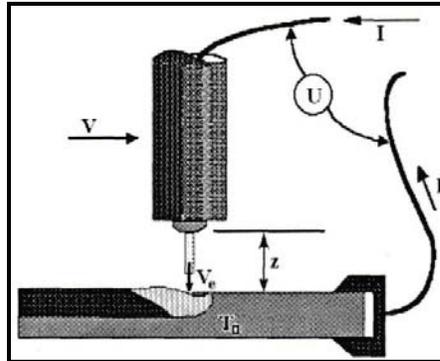


Figura 2.7 - Parâmetros de soldagem para os processos de alta produção.
(Quites, 2002)

V = velocidade; V_e = velocidade de mergulho do eletrodo; Z = altura da tomada de corrente; U = tensão de soldagem; I = corrente de soldagem.

2.4.6 - Distância do Bocal de Gás

No processo de soldagem MAG com gás de proteção ativo (CO_2), Quites, (2002) cita que para garantir uma melhor proteção gasosa é freqüente, para intensidades de correntes entre 200 e 300 A, que as alturas do bocal e da tomada de corrente (Z) sejam iguais (extremidade do tubo de contato e bocal esta no mesmo plano) e a altura da tomada de corrente seja de 10 mm para correntes da ordem de 100 A e de 15 mm para corrente de 400 A.

2.4.7 - Fonte de Soldagem

O início da utilização do processo MIG/MAG foi perturbado e negativo devido à falta de controle efetivo sobre a transferência metálica em face da pouca evolução tecnológica das fontes de energia. Esta dificuldade apresentada levou o processo a ser considerado como passível de contrair defeitos de fusão. Em aplicações industriais como na soldagem de componentes estruturais de grande responsabilidade, o processo não foi utilizado, embora, atualmente o processo MIG/MAG seja considerado uma ferramenta de manufatura eficaz (Gohr, 2002).

Em decorrência dos avanços tecnológicos, nas últimas décadas, de instrumentos e equipamentos empregados na soldagem, através da pesquisa tem ocorrido apreciável benefício para a indústria permitindo metodologias de controle da transferência por meio de informações fornecidas pelas próprias variáveis de soldagem. O avanço tecnológico proporcionou o desenvolvimento de componentes

eletrônicos do estado sólido como o dos diodos que viabilizaram o controle, os tiristores SCR, os transistores IGBT e os sistemas de memória – EPROM, FLASH ROM e outras. O avanço da informática, iniciado nos anos 80, também proporcionou o desenvolvimento e disponibilidade de computadores (hardware) e programas computacionais (software) com velocidade de processamento cada vez maior. A dupla “eletrônica/informática” possibilitou o progresso tecnológico de fontes de soldagem eletrônicas com controle sobre a dinâmica de resposta, como: tensão e velocidade de alimentação do arame em função do tempo; flutuação da corrente (Ting, 2000; Altshuller, 1998; Machado, 1996; Dutra, 1995) apud Barra (2003) cita que tal controle viabiliza o melhoramento, o desenvolvimento e a inserção de novas variantes na soldagem MIG/MAG.

A fonte de energia, conforme esquematizado na Figura 2.1 pode ser do tipo tensão constante sendo a corrente uma variável dependente baseada na velocidade de alimentação do arame. Assim, as variáveis básicas e independentes, previamente ajustadas, são a tensão e a velocidade do arame-eletrodo. Portanto, a fonte de energia é responsável pelo controle dos principais parâmetros de soldagem, sendo considerada a mais importante dos equipamentos.

No processo MIG/MAG existe a possibilidade da utilização de fontes de soldagem retificadoras convencionais ou de fontes eletrônicas. Entretanto, estas fontes podem apresentar duas características estáticas: tensão cte ou curva corrente cte. A característica do arco determinará qual o tipo de fonte a ser utilizada, ou seja, característica estática do tipo tensão constante (ou plana) ou do tipo corrente constante (ou tombante), conforme esquematizado, respectivamente na Figura 2.8a e 2.8b (Barra, 2003).

A tensão em vazio V_0 , chamada de tensão de circuito aberto, está situado na ordem de 70 V (com valor máximo normalizado de 100 V). Em regime, este valor decresce para o patamar da tensão de soldagem U_s ou tensão do arco de 15 a 40 V.

A escolha pela aplicação de fontes do tipo tensão constante, Figura 2.8a recai no controle interno da máquina, onde qualquer variação na distância entre o bico de contato e a peça (DBCP) provocará uma mudança no comprimento do arco em relação à condição do equilíbrio (l_0), além de uma alteração na taxa de fusão. Entretanto, a alteração brusca na corrente de soldagem (I_s) tende a manter o

comprimento do arco constante em ℓ_0 e, conseqüentemente, alterando a projeção do arame, sem alteração na velocidade de alimentação do arame.

As vantagens do uso destas fontes eletromagnéticas de curva característica do tipo tensão constante são:

- ☞ Facilidade na abertura do arco.
- ☞ Prevenção de fusão do bico de contato;
- ☞ Manutenção do comprimento do arco ℓ_0 .

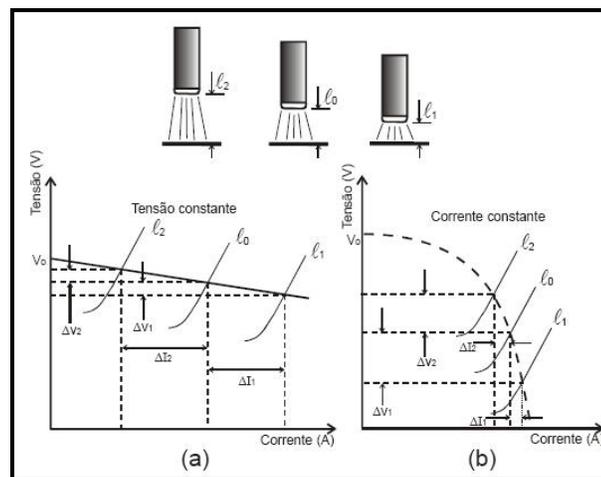


Figura 2.8 – Característica estática da fonte x curva do arco. a) tensão constante e b) corrente constante (Barra, 2003)

Barra (2003) cita e destaca como desvantagem das fontes convencionais a variação no aporte térmico que gera perfis diferenciados na penetração e na zona termicamente afetada (ZTA),

Apenas como informação, para a escolha de fontes de energia convencional com características estáticas do tipo curva tombante ou corrente constante, Figura 2.8b, o controle da manutenção do comprimento ℓ_0 , será através do controle externo, de forma que, qualquer variação de ℓ_0 é detectada através da tensão de soldagem, o que implica em corrente de soldagem com pequenas variações ou aproximadamente constante.

2.4.8 - Consumíveis

Os consumíveis empregados na soldagem MIG/MAG são basicamente o arame-eletrodo e o gás de proteção. Para a soldagem de aços não ligados e com baixo teor de carbono, o arame-eletrodo geralmente apresenta composição química próxima à do metal de base. Scotti (1991) ressalta que a escolha do tipo de arame-eletrodo deve ser realizada em função das finalidades e exigências do processo de soldagem, pois alguns elementos de liga que são adicionados ao arame-eletrodo a fim de melhorar uma determinada qualidade podem afetar outras.

O eletrodo é constituído de um arame delgado, com diâmetros reduzidos e bitolas que variam entre 0,8 mm e 1,6 mm, podendo chegar a certos casos até 2,4 mm, o qual é bobinado em carretéis apropriados e impulsionados até o local de contato da corrente elétrica por pequenos rolos acionados por um motor elétrico (Quites, 2002).

Sabendo que o pólo negativo (-) da fonte de energia está ligado a obra e o outro pólo positivo ao arame-eletrodo, o arco voltaico se estabelece entre o arame consumível e o metal de base. O eletrodo, portanto, é ao mesmo tempo suporte do arco elétrico e metal de adição. O calor do arco funde a extremidade do arame-eletrodo e a superfície do metal de base, a fim de formar a poça de fusão na junta soldada. O arame eletrodo se funde no calor do arco e o metal líquido é impelido por um conjunto de forças, predominantemente eletromagnéticas, em direção ao metal de base, formando a poça de fusão, conforme a Figura 2.2. O ambiente que se formou o arco voltaico, as gotas metálicas em transferência, juntamente com o metal de base fundido na poça de fusão são inteiramente protegidos pelo gás de proteção, da oxidação causada pelo contato com o ar atmosférico. O gás é alimentado externamente e flui por um bocal concêntrico da tocha de soldagem, Figura 2.6 (Quites, 2002; Gohr, 2002).

2.4.9 - Gás de Proteção

O tipo de gás de proteção influi no modo de transferência e nos formatos do arco e do cordão de solda, entre outros fatores, como mostra na Figura 2.9, que em (a) o gás é o argônio e em (b) é o CO₂ (Wainer et al, 2002; Baum, L & Ficher,

1981). Na figura 2.9 observa-se, também, a mudança no comprimento do arco voltaico.

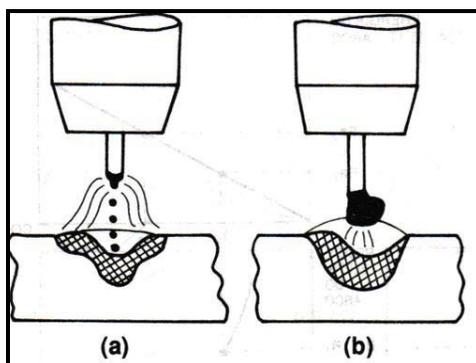


Figura 2.9 - Efeito do tipo de gás de proteção no formato do cordão (Wainer et al, 2002)

A proteção do arco é realizada através de gases e os mais utilizados na soldagem MIG/MAG são: o argônio (Ar), o hélio (He) ou de gases ativos como o oxigênio (O_2) e o dióxido de carbono (CO_2) ou ainda de misturas de gases inerte mais gás ativo. Estes gases têm a função de proteger a poça de fusão (região do arco) contra elementos nocivos contidos no meio atmosférico, melhorar a estabilidade do arco elétrico e proporcionar um cordão de solda com boa geometria (Miranda, 2002; Norrih, 1992; Lyttle & Stapon, 1990).

A escolha do gás de proteção, para o uso no processo MIG/MAG deve ser levado em consideração a sua eficácia na proteção do arco, na qualidade do metal depositado, na estabilidade do arco, na geometria do cordão de solda e nas propriedades mecânicas da solda (Groetelaars, 2005).

O gás de proteção é alimentado por um sistema adequado através do bocal da pistola de soldagem, Figura 2.2, para proteger o arame, o arco e a poça de fusão. Segundo Miranda (2002), as características físicas do gás de proteção, como a condutibilidade térmica, a resistência elétrica e o potencial de ionização têm influência direta sobre o comportamento da soldagem e Bennet (1989) classificou os gases de proteção para soldagem MIG/MAG através dos efeitos sobre as características do arco, a transferência metálica e o comportamento da poça fundida. Assim, os gases de proteção têm duas características físicas importantes que são o potencial de ionização e a condutibilidade térmica.

☞ Potencial de Ionização: energia necessária à produção de um elétron livre ou tensão necessária para remover um elétron de um átomo tornando este em um íon. A formação do plasma é dependente do potencial de ionização e dos gases vizinhos. Variações nesta propriedade criam algumas das diferenças distintas de desempenho entre os gases de proteção (Lyttle & Stapon, 1990; Groetelaars, 2005).

O arco é subdividido em três regiões distintas: região de queda catódica; coluna de plasma e região de queda anódica. As quedas de tensão são medidas nestas regiões catódicas e anódicas são da ordem de 1 a 15 V, o que confere um significativo gradiente de tensão. Considerando-se o volume do arco, este é formado quase que exclusivamente pela coluna do arco. A queda de tensão na coluna de plasma é aproximadamente proporcional ao comprimento do arco e está associada à composição do gás do plasma e outros fatores como rigidez do arco, intensidade de corrente etc.

A coluna do plasma é formada de partículas neutras (moléculas e átomos), de íons e de elétrons livres. Os íons e elétrons livres são os principais responsáveis pela passagem da corrente elétrica entre os eletrodos. A ionização do gás se dá através do aquecimento do mesmo a altas temperaturas provocando uma agitação térmica do gás e promovendo choques entre seus constituintes, ocorrendo a ionização parcial e em função disto a formação do plasma. No caso dos arcos elétricos de soldagem, o interesse está voltado para a ionização térmica, que é a ionização por colisão entre partículas bastante aquecidas.

Quando o eletrodo entra em contato com o metal base, a tensão cai instantaneamente a um valor muito baixo e a corrente cresce a um valor bem próximo da corrente de curto-circuito. A região do eletrodo em contato com o metal de base se aquece por efeito joule imediatamente até atingir a incandescência favorecendo o fenômeno chamado de “efeito termiônico”. Esses elétrons emitidos se chocam com os átomos dos gases que compõem a atmosfera do local e fornecem mais energia térmica. Assim, esses gases promovem o fenômeno da ionização térmica, tendo elétrons livres e íons positivos, significando que os gases passam para o estado de plasma, formando conseqüentemente um meio condutor de energia elétrica.

A coluna do plasma requer uma temperatura suficiente para manter o grau de ionização, quanto maior for o potencial de ionização dos constituintes da

coluna, maior será a energia necessária para manter o nível de ionização desejada, logo maior será a temperatura do arco voltaico. O gás hélio apresenta potencial de ionização de $2,37 \text{ Mjmol}^{-1}$ e o gás argônio apresenta potencial de ionização de $1,37 \text{ Mjmol}^{-1}$ ambos são empregados na soldagem.

Os autores Lyttle & Stapon (1990) citam que o acendimento e a estabilidade do arco elétrico são influenciados pelo potencial de ionização dos gases de proteção empregados nos processos de soldagem. Um gás com baixo potencial de ionização, como o argônio, pode transformar átomos em íons facilmente, auxiliando a manter o arco suave e estável.

☞ **Condutividade Térmica:** diferenças nas características dos depósitos do metal de solda resultante são proporcionadas pelas diferenças na condutividade térmica dos componentes do gás protetor. Os gases que possuem mais alta condutividade térmica transferem mais calor para a peça, influenciando a forma e o perfil da penetração da solda. Melhor transferência de calor para o metal de base proporciona melhor penetração na junta e mais fluida será a poça de fusão. Neste sentido, alta condutividade térmica é crítica, especialmente quando se solda metais muito condutores, isto é, metais que cedem calor com muita rapidez, como o cobre e o alumínio. Estes materiais necessitam de um arco que transfira mais calor para a peça, para que as soldas efetuadas nestes materiais não apresentem problemas de falta de fusão e/ou penetração, (Lyttle & Stapon, 1990 apud Groetelaars, 2005).

a) Argônio

O argônio é um dos gases mais utilizados no processo de soldagem MIG/MAG. É inerte e possui densidade maior que o ar com baixo potencial de ionização (15,8 eV) facilitando a reignição do arco, baixo potencial de oxidação, baixa condutividade térmica e promove proteção e arco estável e eficiente. De acordo com Dillebeck & Castagno (1987), Norrish et al (1988) e Lyttle & Stapon (1990), a elevada densidade do argônio é maior que a do ar (cerca de 1,37 em relação ao ar) proporciona uma efetiva ação protetora em fluxo de gás moderado, porque facilmente ele substitui o ar em torno da solda.

O gás argônio, por ter característica não oxidante, propicia soldas livres de inclusões, logo nos aços carbonos comuns a coluna do arco fica mais estreita e o

arco elétrico instável, além de uma pobre molhabilidade. A adição de gases ativos como O_2 ou CO_2 ao argônio supera esta dificuldade, porque os óxidos formados por estes gases promovem a fixação de cátodos, aumentando a estabilidade do arco. Devido o gás ser inerte e não reativo, a proteção a base de argônio propicia retenção de elementos de liga, melhorando a qualidade das propriedades mecânicas do metal depositado, permite também transferência goticular (“spray”), além da estabilidade de arco e do bom acendimento em baixas intensidades de correntes de soldagem. O menor potencial de oxidação reduz a tensão do arco, gerando menor potência no arco e, portanto, menor penetração na junta, mordedura e um perfil irregular do cordão (Groetelaars et al, 2005).

b) Hélio

O gás hélio é inerte possui densidade baixa e menor que a do ar (cerca de 0,137 em relação ao ar) com alto potencial de ionização (24,6 eV) tendo maiores dificuldades para reignição do arco e demanda uma maior tensão para uma dada corrente e comprimento do arco quando comparado com argônio. A utilização deste gás é mais onerosa e requer maior vazão, porém o emprego deste gás é evidenciado em aplicações que requerem velocidade de soldagem e/ou penetração mais elevada no perfil de solda.

c) Dióxido de Carbono (CO_2)

O gás Dióxido de Carbono é um gás ativo na soldagem que possui condutibilidade térmica elevada sendo responsável por uma alta transferência de calor para o metal de base e núcleo de condução do arco de pequeno diâmetro (Groetelaars, 2005; Scotti, 1991; Lyttle & Stapon, 1990). As duas últimas características citadas, geralmente prejudicam a estabilidade do arco e produzem uma quantidade excessiva de respingos. As vantagens do CO_2 são: velocidade de soldagem e penetração elevadas com baixo custo. Comercialmente o CO_2 é o de custo mais baixo, sendo 4 vezes mais barato que o gás argônio e o mais utilizado gás de proteção para soldagem MIG/MAG e eletrodo tubular, sendo amplamente utilizado sozinho no processo MAG em aplicação exclusivamente para a soldagem

de aços carbono e aços de baixa liga com transferência por curto-circuito (Lyttle & Stapon, 1990; Pierre, 1987; Dillebeck & Castagno, 1987).

De outro lado, são desvantagens o excesso de respingos e a atmosfera do arco oxidante podendo causar porosidade, caso o arame-eletrodo não ofereça desoxidantes em sua constituição, e podendo influir na qualidade das propriedades mecânicas do metal depositado.

A tensão do arco voltaico é 1 a 2 vezes maior em CO_2 do que em misturas a base de argônio, para uma intensidade de corrente e comprimento de arco equivalente (Norris et al, 1998; Scotti, 1991; Lyttle & Stapon, 1990). Como o calor de entrada é ligeiramente maior, resulta em uma maior fusão do metal de base. Apresenta um perfil de penetração mais largo e arredondado quando comparado com o argônio e maior distorção no metal de base (Lucas, 1992).

d) Misturas

A American Welding Society (AWS) é uma Sociedade Americana de Soldagem que rege entre outros, trabalhos para desenvolver especificações e recomendações de uso para os gases de proteção.

As misturas de gases de proteção são formuladas para soldagem de tipos específicos de metais. A seleção da mistura é baseada na disponibilidade e nas necessidades específicas do trabalho.

A adição de pequenas quantidades de CO_2 em argônio é mais conveniente para trabalhos de soldagem em chapas finas enquanto maiores adições de CO_2 são melhores para seções grossas (Hilton, 1990; Lyttle & Stapon, 1990).

O CO_2 é geralmente aplicado para proporcionar maior penetração na junta soldada, entretanto uma mistura de argônio mais dióxido de carbono ($\text{Ar}+\text{CO}_2$) com níveis de intensidade de corrente controlados e arco mais estável possa propiciar ótima penetração. Para grandes penetrações de soldagem na junta, devem ser aumentados os níveis de intensidade de corrente de soldagem favorecendo também maior produtividade (Hilton, 1990 e Lyttle & Stapon, 1990).

2.5 - Soldagem MIG/MAG Duplo Arame

O processo tem sido aplicado comercialmente, embora atualmente esteja em pleno desenvolvimento como advento da evolução tecnológica das fontes eletrônicas e nos últimos anos este processo vem passando por avaliações (Michie et al, 1999; Ketron et al, 2002; Mulligan & Meltron, 2002 e Motta, 2002).

Michie et al (1999) e Motta (2002) citam que a aplicação deste processo tem aumentado na indústria, principalmente, em atividades que solicitem um baixo aporte de energia sobre as peças, permitindo a imposição de maior velocidade de deslocamento e ainda proporcionar alta taxa de metal depositado. Além disto, estes autores citam que estas são algumas das principais vantagens do processo com duplo arame em relação ao processo de soldagem MIG/MAG e destacam, ainda, que os problemas como falta de fusão, porosidade e mordedura são reduzidas com a aplicação do duplo arame na soldagem.

2.5.1 - Fundamentos do Processo MIG/MAG Duplo Arame

Os processos de soldagem MIG/MAG Duplo Arame surgem no mercado industrial como uma alternativa para aumento de produção, haja vista, que atualmente há uma busca incessante das empresas industriais modernas por aumento de competitividade, e por isso um crescente investimento em novas tecnologias. Dentro deste contexto, nasceu a idéia de gerar uma alternativa que reunisse as características de versatilidade do processo MIG/MAG com a alta produtividade do processo arco submerso multi-eletrodos. Neste sentido, surgiu o processo de soldagem GMAW duplo arame.

Michie et al (1999) citam que o processo de soldagem com duplo arame foi primeiramente utilizado com o processo de soldagem arco submerso, no final dos anos 1940 e essa técnica foi rapidamente admitida como um método de aumento na produtividade. Na metade dos anos 50 (século XX) essa técnica inovadora foi introduzida no campo da soldagem com proteção gasosa não tendo grandes repercussões. Porém, atualmente avanços tecnológicos nas fontes estão relacionados ao uso de componentes eletrônicos que permitem controlar de forma eficiente os parâmetros elétricos. Logo, a tecnologia forneceu o suporte necessário

que estava faltando para o desenvolvimento e viabilização do processo MIG/MAG duplo arame.

Comparativamente à soldagem MIG/MAG, as principais diferenças são caracterizadas pela maior taxa de deposição de metal, possibilidade de soldagens com velocidades de deslocamento mais elevadas e menor aporte térmico sobre a peça. Este último como consequência da utilização de velocidades de soldagem mais altas.

2.5.2 - Característica do processo

O processo MIG/MAG com dois arames caracteriza-se pela formação de um par de arcos elétricos entre uma única poça fundida e a extremidade de dois eletrodos consumíveis (Motta, 2002).

O processo duplo arame apresenta uma diferença em relação ao processo MIG/MAG, sendo o emprego de alimentação contínua de dois arames, formando uma ou duas poças de fusão, protegidas por gases protetores previamente selecionados.

Encontra-se na literatura pesquisada duas alternativas implementadas como variações para o processo de soldagem duplo arame. O processo apresenta duas variações principais: *MIG/MAG Duplo Arame Potencial Único*, Figura 2.10, e *MIG/MAG Duplo Arame com Potenciais Isolados*, Figura 2.11.

a) MIG/MAG Duplo Arame com Potencial Único (DAPU)

Os eletrodos são fornecidos ao local de solda através de alimentadores de arames independentes e submetidos ao mesmo potencial elétrico, uma vez que ambos estão em contato elétrico no bico da tocha, conforme Figura 2.10. Neste sistema pode-se utilizar uma ou duas fontes de potência para a realização das soldagens. No entanto, quando se trata de uma única fonte de potência, essa deverá ser capaz de fornecer corrente suficiente para fundir ambos os arames simultaneamente, conforme a taxa de deposição de material solicitada. A vantagem deste sistema com duplo arame potencial único em relação ao duplo arame com potenciais isolados é o menor custo operacional, tendo em vista que a quantidade,

necessária de acessórios e equipamentos para a soldagem por este processo, é inferior (Motta, 2002).

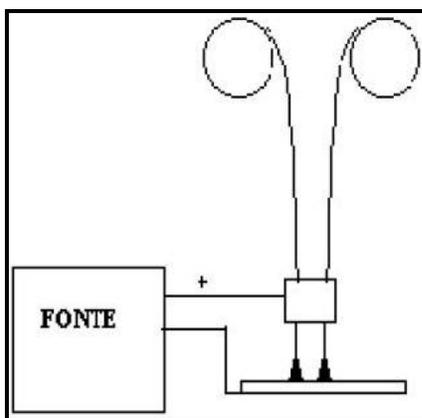


Figura 2.10 – Representação do sistema duplo arame com potencial único (Motta, 2002)

b) MIG/MAG Duplo Arame com Potenciais Isolados (DAPI)

No segundo sistema, Figura 2.11, os dois eletrodos são isolados eletricamente e os arcos são mantidos por duas fontes de soldagem separadas. O isolamento elétrico entre os eletrodos e a manutenção dos arcos por fontes de soldagem separadas são as características que identificam este processo (Motta, 2002). Portanto, assim como no processo duplo arame com potencial único os eletrodos são fornecidos por dois alimentadores de arames. Uma vantagem deste sistema é a possibilidade de se atuar de forma independente sobre a manipulação dos parâmetros de soldagem de cada arco elétrico, através de ambas as fontes, conferindo-se funções distintas a cada um dos dois arcos.

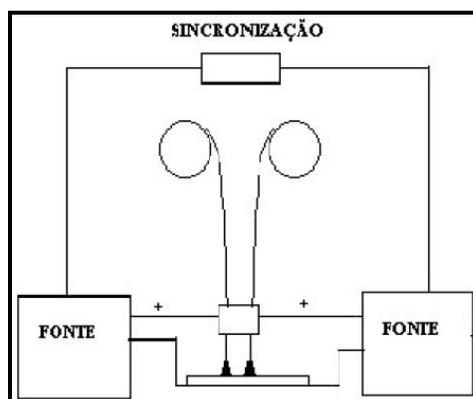


Figura 2.11 – Representação do sistema duplo arame com potenciais isolados, (Motta, 2002)

Os dois sistemas DAPU e DAPI empregam dois alimentadores de arame-eletrodo. Logo, podem ser usados arames com diferentes composições químicas e obter distintas velocidades de alimentação.

2.6.2 - Configuração do processo duplo arame

Alinhamento dos arames em relação à direção da tocha.

De acordo com a aplicação, o processo de soldagem duplo arame permite ao usuário alternar o posicionamento dos arames em relação à direção de deslocamento da tocha.

Não há uma terminologia própria empregada para caracterizar as técnicas operacionais dos processos envolvendo o duplo arame. Em alguns casos, como neste trabalho, usaremos os mesmos termos “Twin” e “Tandem” utilizados nos processos DAPU e DAPI para caracterizar o posicionamento dos arames em relação ao sentido de soldagem.

a) Quanto à disposição dos arames

Com o emprego de dois arames o processo permite alterar a disposição geométrica relativo às pontas dos mesmos em relação à peça. Basicamente, são duas as principais possibilidades de arranjo de alinhamento nas aplicações do processo, cujas características estão descritas a seguir:

☞ Em posicionamento transversal “Twin Wire”

A tocha de soldagem com a disposição dos arames em posição transversal “Twin Wire”, que apenas indica tratar de arames gêmeos (duplo) em que os dois arames estão lado a lado numa posição transversal ao sentido de deslocamento da tocha (González, 1999). A utilização do alinhamento transversal twin é referenciada como vantajosa na soldagem de juntas de topo e revestimentos soldados.

Segundo González (1999), no caso de revestimentos soldados, o processo configurado desta forma também encontra grandes vantagens, pois foram

obtidos depósitos de solda com pequena penetração e baixa diluição, características desejáveis nesta aplicação.

Motta (2002) encontrou bons resultados em aplicações de cordões uniformes para revestimento utilizando o processo duplo arame com duas tochas acopladas, tanto na posição plana quanto na posição sobre cabeça.

☞ **Em Posicionamento Longitudinal “Tandem Wire”**

A tocha de soldagem com a disposição dos arames em posição longitudinal “Tandem Wire”, em que neste arranjo os arames são dispostos na posição longitudinal tandem ao longo do cordão de solda, ou seja, os eletrodos estão em cooperação posicionados um em frente ao outro na direção da velocidade de soldagem (González, 1999; Motta 2002). Esta disposição é empregada com o intuito de aumentar a velocidade de soldagem.

2.6.3 - Gás de proteção no processo duplo arame

Groetelaars (2005) resume os fatores que contribuem e direcionam a seleção de gases de proteção para a soldagem MIG/MAG. Destacam-se entre eles o metal de base a ser soldado, o diâmetro do eletrodo, o tipo e posição de soldagem bem como a transferência metálica desejada.

Em temperatura ambiente o CO_2 exibe uma característica de gás inerte por não reagir com outros elementos, embora em temperaturas elevadas como as de soldagem ele tem comportamento de gás ativo, por se dissociar-se no arco para formar CO e O_2 gerando uma proteção oxidante (Lucas, 1992; Dillebeck & Castagno, 1987). Groetelaars (2005) cita que a porosidade no cordão de solda pode ser prevenida pela presença de desoxidantes no metal de adição, por exemplo, pelo uso de um arame-eletrodo AWS ERXXS6.

A condutividade elétrica do CO_2 é baixa. Uma complexa interação de forças ocorre no arco a medida que as gotas metálicas se formam na ponta do arame. A resultante destas forças age no sentido de reter as gotas havendo um crescimento excessivo e instável destas na ponta do eletrodo, sendo repelidas pelo arco, transferindo-se de modo explosivo gerando excesso de salpicagem (Lucas, 1992; Lyttle & Stapon, 1990; Dillebeck & Castagno, 1987; Pierre, 1987).

Groetelaars (2005) relata que o uso de arcos curtos e controle de indutância, obtêm-se transferência por curto-circuito mais estável, podendo melhorar o desempenho do processo duplo arame.

a) Efeito dos gases de proteção no processo duplo arame

Groetelaars (2005) menciona que o desempenho dos gases de proteção na soldagem com duplo arame é parecido com o do processo MIG/MAG, sendo que o efeito de diferentes misturas é bem conhecido. Dillthey et al (1998) investigaram esse efeito para aços carbono no processo MIG/MAG duplo arame e constataram que com um aumento do teor de CO₂ (mais de 18%) em misturas com Argônio, houve um aumento da penetração lateral no perfil do cordão soldado, formando assim perfis com formato mais simétrico. Os autores ainda observaram que velocidades de soldagem acima de 2 m/min não puderam ser alcançadas com gases de alto teor de CO₂, pois com tal velocidade a poça de fusão tomou-se mais viscosa e maiores gotas são formadas pela união da transferência metálica dos dois arames (efeito de interferência do campo magnético), ocasionando a transferência por curto-circuito, gerando assim muito respingo.

2.6.4 - Parâmetros de soldagem e tópicos afins

Na soldagem MIG/MAG a penetração da solda está diretamente ligada à pressão que o arco exerce sobre a poça fundida. A pressão do arco tem influência sobre a transferência metálica, a penetração da solda e o formato do cordão. A pressão do arco é composta pelo jato de gás de plasma, pela componente axial da força de Lorents e pela inércia das gotas que se chocam com a poça de fusão. É ainda, responsável pela compressão da superfície líquida abrindo um canal que permite ao calor fluir para o metal de base (Motta, 2002).

A correta utilização do processo dependerá do perfeito entendimento como as diversas variáveis envolvidas na operação de soldagem podem influenciar na estabilidade do arco e na qualidade final do metal depositado.

As variáveis mais importantes do processo e sua influência no cordão de solda, conforme (Barra, 2003), são:

- ☞ Tensão do arco;
- ☞ Intensidade de corrente;
- ☞ Velocidade de soldagem;
- ☞ Extensão livre do eletrodo;
- ☞ Inclinação e diâmetro do arame-eletrodo.

Um aproveitamento melhor do processo de soldagem MIG/MAG duplo arame passa pelo conhecimento dos efeitos das variáveis, tais como:

a) Tensão de soldagem (U_s)

A tensão de soldagem influencia no insumo de calor e apresenta uma relação direta com o comprimento do arco e a largura do arco.

De uma maneira geral, tensões baixas favorecem a transferência por curto-circuito.

Para uma mesma intensidade de corrente, provocará cordões de solda mais estreitos e maior penetração. O oposto ocorrendo para tensões mais altas, além da ocorrência de salpicos grosseiros.

Valores elevados de tensão podem proporcionar o aparecimento de salpicos, mordedura e porosidade e já para valores baixos de tensão podem propiciar o aparecimento de sobreposição de metal na margem do cordão de solda e porosidade.

b) Corrente de soldagem (I_s)

A corrente de soldagem alta poderá influenciar diretamente na geometria do cordão de solda, no volume da poça fundida, no incremento da taxa de fusão, na largura da ZTA e no efeito sobre o aporte térmico mexendo com a microestrutura do metal depositado.

A corrente de soldagem pode alterar o modo de transferência metálica.

Para a soldagem com o processo MAG-CW, usou-se basicamente corrente contínua CC (+), na qual o pólo positivo está ligado ao arame-eletrodo.

Para o processo duplo arame, a corrente de soldagem é dependente direta da velocidade de alimentação do arame-eletrodo no processo e pode variar de acordo com as velocidades de alimentação do mesmo.

É possível controlar a corrente e a tensão no arco mantendo ou não o consumo.

c) Velocidade de soldagem (V_s)

A velocidade de soldagem é quem da à possibilidade de aumento de produção, portanto é um parâmetro de grande importância para o processo MIG/MAG duplo arame.

O processo MIG/MAG soldando em altas velocidades proporciona descontinuidades nos cordões de solda ocasionadas por uma intensa força do arco voltaico, que se origina de altas correntes de soldagem (Michie et al, 1999).

Um aumento na velocidade de soldagem proporciona uma diminuição na largura do cordão e um aumento na penetração, num primeiro instante e diminuição desta em valores mais altos. Em velocidades muito elevadas poderá ocorrer o surgimento de trincas de solidificação e de mordeduras (geometria irregular do cordão). Mantidos os outros parâmetros fixos, o incremento na velocidade de soldagem acarretará em um nível de distorção menor, tamanho da ZTA e modificação na microestrutura do metal depositado.

O processo duplo arame oferece um grande número de características que podem atuar com solução de alguns problemas ocorridos no processo MIG/MAG utilizando altas velocidades de soldagem. O emprego de dois eletrodos, para uma dada corrente, aumenta a área da poça de fusão onde a força do arco atua possibilitando o uso de maiores correntes totais ante do aparecimento de mordeduras e de outros efeitos. Maiores correntes de soldagem resultam em maiores taxas de deposição e de fusão (Groetelaars, 2005).

d) Velocidade de alimentação

A soldagem com o processo duplo arame emprega dois arames, logo há a possibilidade de variar a velocidade de alimentação dos dois arames, pois o processo trabalha independentemente com dois cabeçotes alimentadores de arame.

Uma das grandes vantagens do MIG/MAG duplo arame com potencial isolado é justamente a possibilidade de obter maiores variações de velocidade de alimentação para cada arame, por causa da maior capacidade de ajustes de parâmetros para cada arame (Groetelaars, 2005). Segundo esse autor, para uma aplicação em chapa fina a opção empurrando parece mais atrativa.

e) Ângulo da tocha

A tocha pode ser posicionada de três maneiras diferentes em relação ao ângulo de ataque: puxando a poça de fusão, empurrando a poça de fusão e perpendicular. Classicamente, a posição puxando favorece a penetração no metal de base e a posição empurrando favorece um cordão menos convexo em detrimento da penetração (Groetelaars, 2005).

2.6.5 - Transferência metálica

O conhecimento dos fenômenos envolvidos na transferência metálica é de fundamental importância para o melhor controle do processo de soldagem.

Basicamente, a transferência metálica significa a forma com que o metal líquido superaquecido (gota metálica) que se formou na extremidade do arame-eletrodo, é transferido até a poça de fusão, o que é uma característica operacional da soldagem a arco voltaico afetando de forma significativa a sua estabilidade. Um dos principais requisitos para o melhoramento no sistema de controle da soldagem MIG/MAG é a capacidade de monitoramento no modo de transferência metálica, que depende de vários parâmetros de soldagem. Segundo Abreu (2003); AWS (1991); Machado (1996); Modenesi (1994), o modo pelo qual a gota metálica irá se transferir, em determinada condição de soldagem, dependerá, entre outros, da combinação dos seguintes fatores:

- ☞ Tipo de corrente (CC, CA ou pulsada);

- ☞ Tipo de gás de proteção e nível de vazão
- ☞ Projeção do arame em relação ao bico de contato;
- ☞ Diâmetro e composição química do eletrodo;
- ☞ Polaridade do arco;
- ☞ Tensão de soldagem;
- ☞ Comprimento energizado do arame-eletrodo.

A Tabela 1 apresenta a classificação completa dos tipos de transferência metálica MIG/MAG junto com alguns tipos adicionais e esquematicamente ilustrada através da Figura 2.12 (Vilarinho, 2000; Stenbacka & Persson, 1989; Machado, 1996). A transferência metálica pode ser classificada, segundo o IIW (International Institute of Welding) por um sistema composto por três grupos principais: transferência por vô livre, transferência por contato e transferência guiada por escória, mas, em geral, três tipos são geralmente citados nas publicações científicas, como sendo: curto-circuito, globular e goticular (Groetelaars, 2005; Vilarinho, 2000; Machado, 1996; Liu & Siewert, 1989).

Tabela 1 - Classificação de transferência metálica pelo IIW.

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

Wang, Liu e Jones (1995) afirmam que de acordo com o tamanho e característica da transferência da gota fundida, diferentes modos de transferência metálica podem ser definidos, tais como, curto-circuito, globular e spray. Estes modos de transferência metálica apresentam diferenças na estabilidade de arco, poça de fusão, penetração, produção de salpicos, porosidade e nível de gás aprisionado (Kim et al, 1993).

O modo de transferência do metal de adição é importante na soldagem MIG/MAG, porque afeta a geometria e as propriedades da solda. Assim sendo, o modo também afeta as características do processo como exemplo, a quantidade de gases absorvida pela poça de fusão, a estabilidade do arco, a aplicabilidade do processo em determinadas posições, a geometria da solda, o modo operacional e a quantidade de salpicagem.

Os mecanismos de transferência metálica têm sido pesquisados desde a introdução dos processos com eletrodos consumíveis nas décadas de 1950 e 1960, quando técnicas de filmagem, com câmaras de alta velocidade, consideradas como uma das mais importantes ferramentas de observação foi usada para investigar o arco elétrico do processo de soldagem MIG/MAG. Portanto, para caracterizar o tipo de transferência metálica pode ser através de filmagens em alta velocidade, também chamada de "Shadowgrafia". Por este método, admite-se que se o diâmetro de uma gota for menor do que o diâmetro do arame eletrodo considera-se a transferência no modo spray. Entretanto, se o diâmetro da gota for maior do que o diâmetro do arame fica caracterizado a transferência no modo globular e se a gota tocar a poça de fusão fica reconhecido como transferência em curto-circuito (VILARINHO, 2000).

As investigações também foram realizadas com o osciloscópio que registra sinais de tensão e corrente simultaneamente com filmagem de alta velocidade (Groetelaars, 2005; Liu & Siewert et al, 1989).

Por estas razões, os mecanismos envolvidos são muito estudados havendo uma extensa bibliografia sobre o tema.

Para identificar o tipo de transferência metálica durante a soldagem, várias técnicas são empregadas, entre elas tem-se:

- ☞ Identificação por meio de filmagem em alta velocidade (Shadowgrafia);

- ☞ Identificação por meio dos sinais de tensão e de corrente de soldagem (oscilogramas);
- ☞ Identificação por meio dos sinais sonoros;
- ☞ Identificação por meio da intensidade luminosa.

Wang, Liu e Jones (1995) utilizaram o modo de identificação por meio de sinais de tensão e corrente de soldagem para classificar o modo de transferência metálica. Neste sentido, estes pesquisadores notaram que o comprimento de arco aumenta e diminui periodicamente com a formação e o destacamento de uma gota. Conseqüentemente, cada evento de transferência corresponde a um pico (extremidade superior do oscilograma de tensão x tempo) e um vale de tensão (extremidade inferior do oscilograma de tensão x tempo). No entanto, os picos e os vales de tensão são identificados através de programas computacionais, através dos quais pode-se obter uma variação de tensão (ΔU) para cada evento durante um determinado intervalo de tempo. Neste sentido, foi adotado um critério de variação de tensão (ΔU) que correlacionava o modo de transferência metálica com a variação entre o pico e o vale de tensão. Deste modo, os autores propuseram a seguinte relação para a transferência metálica com o eletrodo E71T-1 e com Ar-25%CO₂ como gás de proteção:

- ☞ Curto-circuito: $\Delta U > 10 \text{ V}$
- ☞ Globular: $1 < \Delta U < 10 \text{ V}$
- ☞ Spray: $0,3 < \Delta U < 1 \text{ V}$

Os mecanismos de transferência envolvidos se originam a partir da ação de forças de natureza distintas, como as de origem eletromagnéticas, gravitacional e tensão superficial, agindo simultaneamente, e se dão pela interação complexa deste conjunto de forças sobre a extremidade do eletrodo fundido, poça de fusão e arco voltaico (Gohr, 2002). A magnitude destas forças está sob a influência direta das variáveis elétricas tensão e corrente, do ambiente do arco com atmosfera inerte ou ativa e da composição química do eletrodo/peça.

Como foi visto, a transferência metálica é resultado de um conjunto de forças e a resultante destas forças determinará o destacamento da gota.

É sabido que existem algumas teorias para explicar e modelar o conjunto destas forças como a teoria do Equilíbrio Estático de Forças (EEF) e teoria da Instabilidade como Decorrência do Efeito Pinch (IEP).

Nesta revisão não são abordadas essas teorias e, portanto, é avaliada apenas a classificação quanto ao tipo de transferência, já abordado, e um estudo sobre a transferência por curto-circuito que ocorreu nos ensaios.

Na soldagem MIG/MAG a penetração da solda está diretamente ligada à pressão que o arco exerce sobre a poça fundida. A pressão do arco tem influência sobre a transferência metálica, a penetração da solda e o formato do cordão. A pressão do arco é composta pelo jato de gás de plasma, pela componente axial da força de Lorents e pela inércia das gotas que se chocam com a poça de fusão. É ainda, responsável pela compressão da superfície líquida abrindo um canal que permite ao calor fluir para o metal de base (Motta, 2002).

A Figura 2.12 apresenta esquematicamente os principais tipos de transferência metálica ocorridos no processo de soldagem MIG/MAG.

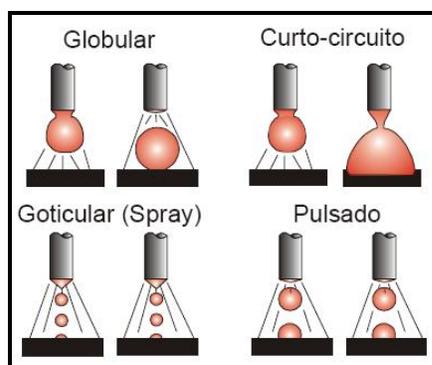


Figura 2.12 – Representação esquemática dos principais modos de transferência metálica (Barra, 1998)

Em situações comuns de soldagem, as transferências por curto-circuito, por vô livre na forma globular e a goticular pulsada projetada são as mais usadas no processo de soldagem MIG/MAG. Este fato desperta nos pesquisadores a atenção para a investigação dos princípios físicos e mecanismos de transferência.

a) Transferência metálica por curto-circuito

Para Abreu Filho (2003) o tipo de transferência por curto-circuito é caracterizado, principalmente, pela velocidade de alimentação de arame-eletrodo ser maior que a sua taxa de fusão.

Motta et al (2005) relatam que este modo de transferência ocorre na soldagem MIG/MAG em níveis de tensão (comprimento do arco) e de corrente mais baixa, apresenta uma poça de fusão de menor dimensão com intensidade de energia mais baixa em relação aos demais modos de transferência, caracterizando uma técnica de baixa energia térmica. Por estas características, normalmente é indicado para a soldagem fora da posição ou na soldagem de chapas finas de aço, quando estes baixos valores são necessários.

O ciclo de desprendimento da gota depende de fatores como a composição e o diâmetro do eletrodo, a intensidade e a oscilação da corrente de soldagem, entre outras e pode repetir-se em intervalos que variam entre 50 a 200Hz (Street, 1990)

Neste tipo de transferência, a intensidade de corrente em arco aberto é baixa, embora, o nível de corrente durante o período de curto-circuito seja elevado (Norrish, 1992).

➤ Descrição da transferência por curto-circuito

A Figura 2.13 ilustra os oscilogramas de tensão e corrente de soldagem deste tipo de transferência bem como a variação e a forma de onda destes sinais elétricos.

Gohr (2002) descreve de forma sucinta a transferência por curto-circuito considerando a soldagem em regime permanente. Pode-se observar que para uma melhor compreensão, a transferência será dividida em quatro etapas distintas e seqüenciais de separação da gota metálica, conforme a Figura 2.14.

Etapa A

☞ A extremidade do eletrodo encontra-se no ponto mais afastado da poça de fusão - o arco possui o estado de maior nível energético - a corrente e a tensão atingem seus máximos, Figura 2.14.

☞ O valor da corrente é reduzido exponencialmente a fim de conduzir a tensão ao valor de referência (valor de tensão ajustado para soldagem), a uma taxa de decréscimo determinada através da indutância da fonte de soldagem, Essa etapa é responsável pela maior parcela na formação da gota metálica, produto da elevada taxa de fusão do arame.

Etapa B

☞ O arco inicia um período de estabilização - a tensão do arco tende ao valor de referência e, devido à redução da energia, a gota continua crescendo, porém com uma taxa menor.

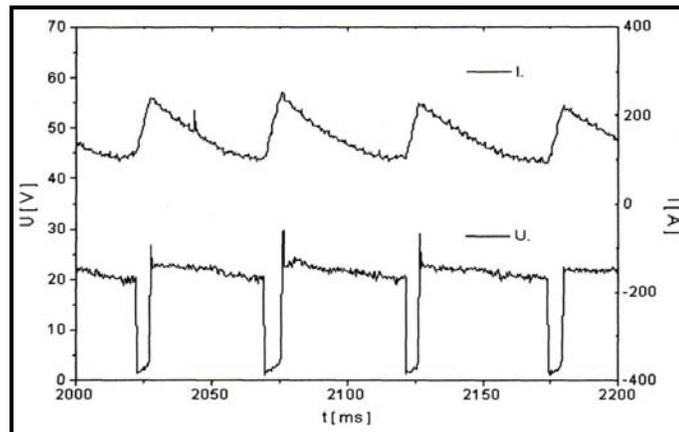


Figura 2.13 - Forma de onda da tensão e da corrente na soldagem com MIG/MAG usando controle da tensão e transferência por curto-circuito (Gohr, 2002)

Etapa C

☞ Em função do contato da gota com a poça de fusão (curto-circuito) - parte da gota é transferida por tensão superficial.

☞ Este contato causa, também, uma elevação na corrente elétrica fazendo com que as forças de origem eletromagnéticas, aumentem a intensidade da pressão sobre o eletrodo e a massa fundida.

☞ Durante o curto-circuito, a corrente tende a se elevar rapidamente, causando uma maior fusão do eletrodo por efeito joule e, ao mesmo tempo, o metal fundido tende a se transferir para a poça de fusão por ação da tensão superficial e das forças eletromagnéticas.

☞ A elevação do valor da corrente ocorre porque a fonte de soldagem tenta restabelecer o valor da tensão de referência. Neste caso, também, a indutância é que determina a taxa de subida da corrente.

Etapa D

☞ É iniciado o processo de constricção da parte restante da gota que forma a ponte de ligação entre o eletrodo e a peça.

☞ Uma das principais forças que atuam nesse momento é a eletromagnética (efeito "pinch"), sendo sua intensidade tanto maior quanto maior o valor da corrente e menor a espessura da ponte.

☞ Como a corrente é cada vez maior, a força também acompanha esse aumento, reduzindo cada vez mais, a espessura da ponte.

☞ Com a redução da espessura da ponte, a força aumenta ainda mais. Isso causa uma espécie de realimentação, acelerando o processo de constricção.

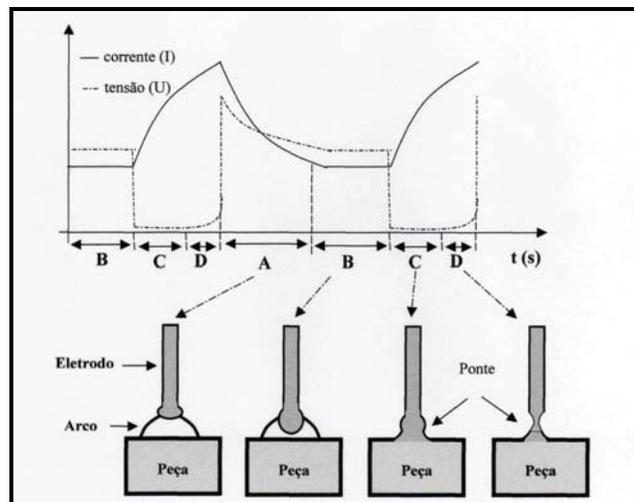


Figura 2.14 – Seqüência de separação da gota metálica na transferência por curto-circuito (Gohr, 2002)

Pode-se observar que, no momento do curto-circuito, a corrente é máxima e a tensão é mínima, havendo uma faixa de freqüência de curto-circuito na qual a estabilidade do arco é otimizada.

A regularidade da transferência metálica está condicionada a um equilíbrio entre a velocidade com que o eletrodo é introduzido no arco e a taxa de formação e a transferência das gotas à poça de fusão (taxa de fusão do eletrodo).

Este modo de transferência pode apresentar uma grande instabilidade no arco, podendo manifestar uma intensa salpicagem. Entretanto, esta dificuldade pode ser limitada pela seleção adequada dos parâmetros de soldagem e o correto ajuste da fonte de energia, de modo que os curtos-circuitos ocorram de forma muito mais regular.

Tem-se pouco conhecimento a respeito da influencia da mudança de alguns parâmetros de soldagem e aspectos construtivos de tochas e acessórios sobre o comportamento da transferência metálica no processo duplo arame MAG-CW.

Motta et al (2005) investigaram a transferência metálica, a influência dos campos eletromagnéticos entre os arcos para o processo MIG/MAG (DAPI) e verificaram ainda a diferença no comportamento dos arcos elétricos quando estão pulsando a corrente em fase e defasados, tendo identificado interferência eletromagnética entre os arcos. O modo de transferência metálica atuante pode ser influenciado por vários fatores, principalmente por aqueles relacionados com a intensidade de corrente, o comprimento do arco, a composição do gás, o diâmetro do arame, o comprimento do eletrodo e o metal de adição.

2.6.6 - Campo de aplicação econômica

O processo de soldagem MAG-CW poderá ser utilizado em trabalhos de pequeno, médio e grande porte na indústria em geral e setores de serviço, para produção e manutenção. O processo pode ser usado em soldagem semi-automática e em instalações automáticas (dependendo do desenvolvimento tecnológico).

2.6.7 - Estabilidade do Arco Voltaico

O arco elétrico é um fenômeno complexo e é a fonte de calor mais utilizada na soldagem por fusão de materiais metálicos, por apresentar uma

combinação de características que destaca a concentração adequada de energia por fusão localizada do metal de base (Modenesi, 1994).

Farias (1993) cita que de uma forma geral, a estabilidade implica tanto na facilidade de soldagem como na obtenção de uma geometria o mais regular possível do cordão de solda. Em ambos os casos, um arco estável deve atender a duas ordens de requisitos:

☞ A transferência de metal deve ser fácil e uniforme. A avaliação é a partir de índices, que quanto maiores, mais expressam a facilidade de ocorrência de curto-circuito e de transferência metálica por curto-circuito.

☞ A transferência de carga elétrica fácil e uniforme. Avalia também a partir de índices as condições de reabertura do arco após o curto circuito em CC e após a mudança de polaridade para o meio ciclo positivo em CA, a facilidade de transporte de carga elétrica, que quanto maior, maior a facilidade de transferência de carga elétrica em CC.

Mota (1998) cita que a estabilidade do arco voltaico é uma das condições básicas para o bom desempenho da soldagem, interferindo diretamente na qualidade final do metal depositado, na salpicagem, no consumo, na produção, no rendimento de deposição, na entrada de gás atmosférico na poça de fusão, nas propriedades mecânicas etc. Para uma mesma característica estática da fonte de energia, as propriedades físicas da atmosfera gasosa do arco são alguns dos pontos determinantes do comportamento dinâmico do arco. Deste modo, a energia de ionização, a condutibilidade elétrica e térmica, bem como, as suas variações com a temperatura devem ser adequadas para garantir um melhor comportamento do arco voltaico.

Hoje, com a evolução e o desenvolvimento da ciência, a soldagem emprega diversos processos a arco voltaico com características diferentes, podendo apresentar eletrodo consumível ou permanente, outros diferindo pelo modo de transferência metálica e/ou de carga elétrica, tipo de fluxo, tipo de arame maciço ou tubular, pela forma de proteção (escória ou gás) ou ainda pelo tipo de gás de proteção. Com a interferência das várias condições de soldagem, tais como: o valor da tensão, o tipo de corrente utilizada no processo, fonte de energia, a posição de soldagem e o comprimento eletrodo, estas diferenças aumentam acrescentando-se

a isto a complexidade e a dinâmica de fenômenos elétricos, magnéticos, químicos, metalúrgicos e mecânicos que ocorrem num reduzidíssimo intervalo de tempo e que interferem na transferência metálica e de carga elétrica (Norrissh, 1992; Lucas, 1997 e Mota, 1998).

Para Abreu Filho (2003) a estabilidade do arco voltaico é um requisito básico e fundamental para o sucesso de um projeto em estruturas soldadas. Logo, a manutenção, o controle e o ajuste adequado dos parâmetros de soldagem são importantes para que forneçam as melhores condições e características ao arco elétrico, sendo fundamentais na obtenção da soldagem livre de instabilidades e melhor qualidade do cordão depositado.

A estabilidade do arco não depende somente dos parâmetros, mas também de outros fatores que interferem e podem produzir instabilidade no processo de soldagem. Através da pesquisa foram investigadas estabilidades de arco na soldagem, como por exemplo: Modenesi e Nixon (1994) que estudaram a influência do comprimento do arco na soldagem, potencial de oxidação do gás de proteção e as características da fonte de soldagem sobre a estabilidade do arco na soldagem GMAW. Segundo os pesquisadores mencionados, a instabilidade do processo está associada às mudanças repentinas na corrente e tensão do arco, causando perturbações no modo de transferência metálica.

Modenesi et al (1994) estudaram a influência do aquecimento do bico de contato sobre a instabilidade do arco na soldagem MIG/MAG, foi observado por esses autores e através dos oscilogramas de tensão picos rápidos de tensão podendo ser uma indicação de operação do arco em modo instável. Entretanto, Abreu Filho (2003) observou o mesmo fato com a avaliação da estabilidade do arco na soldagem MIG duplamente pulsado através dos estudos em oscilogramas tensão/tempo, observando, ainda, que para velocidades de alimentação de arame acima de 8 m/min ocorreram sensíveis alterações no comportamento dinâmico do arco.

a) Oscilograma

A avaliação da estabilidade do arco e a maneira pela qual a transferência metálica está ocorrendo para o metal de base são realizadas com o auxílio de um oscilograma.

O oscilograma, assim é denominado pela forma gráfica com que a variação com o tempo da corrente e a tensão instantânea é apresentada. Portanto, é possível obter curvas, num determinado intervalo de tempo, que representam a variação da tensão em função da corrente. As Figuras 2.15 a 2.16 apresentam os oscilogramas relativos à variação instantânea da tensão e corrente no processo MIG/MAG. As figuras ilustram esta relação quando se observa que, no momento do curto-circuito, a corrente é máxima e a tensão é mínima no “vale” e o momento da reabertura de arco, para um valor de pico “P”, a tensão é máxima até que esta começa a decrescer. O arco é mais *instável* quanto maior for este valor máximo “P”, com tendência a diminuir se acontecer os seguintes fatores:

- ☞ Inserção de indutância no circuito;
- ☞ Aumento da frequência;
- ☞ Existência de elementos químicos de baixo potencial de ionização no arco;
- ☞ Eletrodos de alta emissividade eletrônica.

A Figura 2.15 mostra um oscilograma típico de Tensão x Tempo (Uxt), onde o destacamento da gota e a reabertura do arco são indicados pelo pico de tensão.

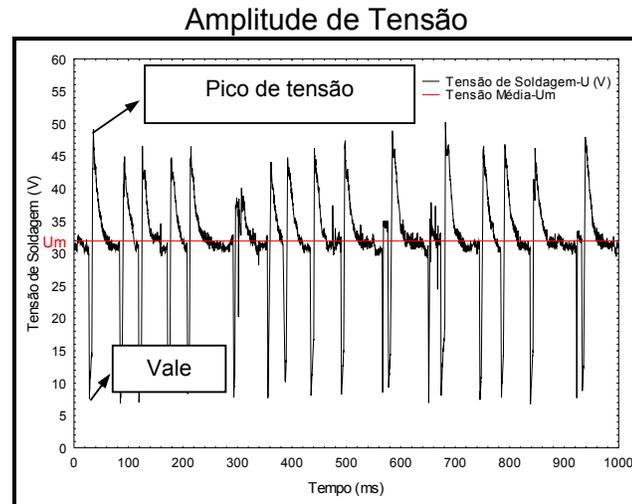


Figura 2.15 – Oscilograma (U x t) do processo MAG com tensão média U_m .
Fonte: LABSOLDA/UFPA.

A Figura 2.16 mostra um oscilograma típico de Corrente x Tempo (I x t).

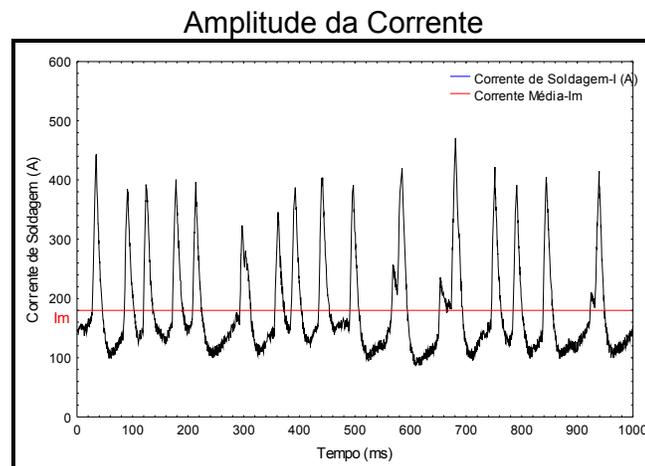


Figura 2.16 – Oscilograma (I x t) do processo MAG com modo de transferência por curto circuito, indicando corrente média I_m . Fonte: LABSOLDA/UFPA.

b) Histograma

Na estatística, um histograma é uma representação gráfica da distribuição de frequências de uma massa de medições, normalmente um gráfico de barras verticais.

O histograma é um gráfico composto por retângulos justapostos em que a base de cada um deles corresponde ao intervalo de classe e a sua altura à respectiva frequência. Quando o número de dados aumenta indefinidamente e o intervalo de classe tende a zero, a distribuição de frequência passa para uma

distribuição de densidade de probabilidades. A construção de histogramas tem caráter preliminar em qualquer estudo e é um importante indicador da distribuição de dados. Bastos (2001) cita que:

- ☞ O Histograma é um dos métodos gráficos mais utilizados para apresentar informação;
- ☞ Agrupando os dados em células evidencia-se a freqüência das ocorrências e a dispersão entre os valores superiores e inferiores dos dados;
- ☞ Os histogramas são especialmente usados quando se pretende analisar um grande volume de dados, realçando o impacto visual da informação;
- ☞ A distribuição de freqüência é uma "ferramenta" estatística muito útil para a apresentação de um grupo de fatos numerosos numa forma em que se torne mais evidente a tendência central e a dispersão.

A Figura 2.17 mostra a representação gráfica de barras verticais da distribuição do número de ocorrências em intervalos de tempo.

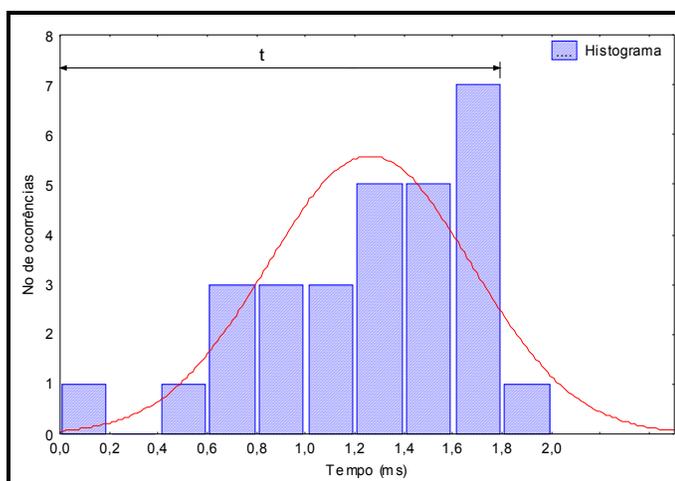


Figura 2.17 – Histograma típico de nº de ocorrências x tempo (ms).

2.6.8 - Características econômicas

O desejável na indústria é reduzir os custos de fabricação de um determinado produto, mantendo-se ou melhorando-se a sua qualidade. Uma alternativa para isto é minimizar o tempo de produção ou o tempo de operação. Para alcançar este fim, em relação à soldagem, é necessário melhorar a produtividade de

trabalho, ou seja, aumentar o rendimento do processo (Suban e Tusek, 2001 apud Nascimento, 2005).

As características econômicas do arame consumível são compostas através do consumo, da produção e dos rendimentos de deposição.

Segundo Mota (1998) e Farias (1993) um dos fatores de grande importância na seleção de um arame consumível ou eletrodo para soldagem é o seu desempenho econômico. No entanto, dentre as variáveis capazes de interferir ou influenciar no desempenho do consumível destacam-se: a composição química; o modo de transferência metálica; a natureza e o valor da corrente e a polaridade; os valores da tensão e do comprimento da distância do eletrodo (bico de contato peça “stick-out”), além das perdas de metal por salpicagem. Deve-se considerar, ainda, o diâmetro do arame consumível, o tipo de proteção e a fonte de energia, bem como, as condutividades elétricas e térmicas do consumível que, juntamente com as demais condições de soldagem, interferem de maneira bastante complexa no balanço energético do arco voltaico, responsável pela fusão do arame-eletrodo.

O comportamento das características econômicas de um consumível para soldagem a arco voltaico é analisado através do seu desempenho operacional e é representado por TF (taxa de fusão) que pode ser estabelecida pelo seu consumo, TD (taxa de deposição) determinada pela produção. O rendimento R pode ser definido como rendimento de deposição real através da razão entre a massa do consumível, incorporado ao metal de solda, e a massa de arame consumida durante a operação de soldagem, na mesma unidade de tempo, ou seja, o rendimento é a razão entre as taxas TD/TF adquiridas na soldagem (Machado, 1993).

2.6.9 - Características geométricas

A avaliação da geometria da superfície plana do cordão de solda é realizada pela análise dimensional de sua seção transversal.

Segundo Mota (1998) e Braga (1997), para o mesmo material e tipo de junta, a natureza do consumível, a corrente de soldagem, o comprimento do eletrodo, a tensão e a velocidade de soldagem interferem na geometria da solda. A geometria do cordão de solda tem influência básica na resistência mecânica da junta soldada

A Figura 2.18 ilustra o esquema do perfil geométrico do cordão de solda e nela estão indicadas as principais grandezas que caracterizam a geometria do cordão de solda: a penetração (p_e), o reforço (r) e a largura (b).

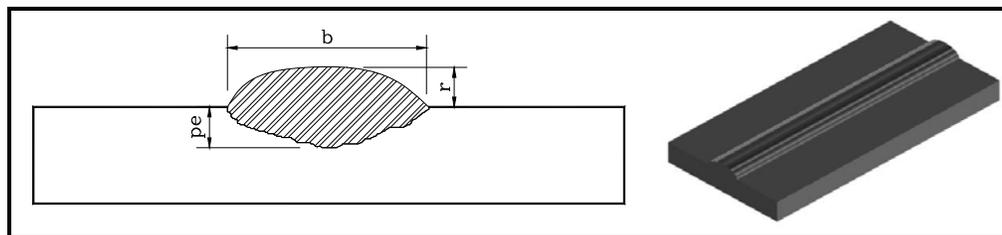


Figura 2.18 – Esquema do perfil geométrico do cordão de solda.

A análise da geometria da solda é realizada pela avaliação dimensional da seção transversal da Figura 2.18. As medidas de largura (b), reforço (r) e penetração (p_e), definem tais características geométricas do cordão de solda depositado na superfície da placa metálica. Portanto, a largura do cordão de solda tem relação diretamente proporcional a corrente de soldagem, a tensão do arco elétrico e ao diâmetro do consumível, porém, uma relação inversamente proporcional com a velocidade de soldagem (Farias, 1993). O reforço da solda tem relação direta com a corrente de soldagem e inversa com a tensão, com o diâmetro do consumível e com a velocidade de soldagem. Entretanto, alguns estudos com eletrodos revestidos, comprovam que a penetração da solda no metal de base tem relação inversa com a velocidade de soldagem, com o diâmetro do arame eletrodo e direta com a corrente de soldagem (Farias, 1993).

2.7 - Ensaio por Líquidos Penetrantes

O ensaio por líquidos penetrantes é um método desenvolvido especialmente para a detecção de descontinuidades essencialmente superficiais, e ainda que estejam abertas na superfície do material (Andreucci, 2007).

O objetivo do Ensaio por Líquido Penetrante é assegurar a confiabilidade do produto, por meio de:

- a) Revelação da natureza da descontinuidade sem danificar a peça;
- b) Obtenção de uma imagem visual, que revela a descontinuidade na superfície da peça (mancha);

c) Separação das peças aceitáveis das não aceitáveis segundo o critério estipulado.

A Figura 2.19 mostra um resumo da seqüência do ensaio por líquidos penetrantes.



Figura 2.19 – Resumo da seqüência do ensaio de LP (Andreucci, 2006).

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a especificação e a descrição dos materiais e equipamentos, bem como da metodologia experimental empregadas neste trabalho.

Para as análises teóricas e o processamento das informações, deve-se dispor de literatura técnica, programas e equipamentos especializados. Além disso, para o planejamento e o desenvolvimento das experiências foram utilizados os laboratórios da faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará e o laboratório do Curso Técnico de Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica do Pará.

3.1 - Material utilizado

3.1.1- Consumível

a) Arame-eletrodo / Arame frio

Na fase experimental deste trabalho foram utilizados dois arames sólidos consumíveis da classe AWS ER70S-6, norma AWS A5.18.

A seleção deste tipo de consumível esta relacionada as suas características de elevada produção, facilidade de manutenção da estabilidade do arco e, em especial, a sua adequação experimental ao processo de soldagem com alimentação de arame frio, ora em desenvolvimento. Além disso, trata-se de um arame largamente utilizado em diversas aplicações no setor metal-mecânica na soldagem de aços baixo carbono.

A Tabela 2 apresenta a composição química básica deste consumível, conforme AWS A5.18. Para a realização dos experimentos foram adotados os seguintes dados:

Diâmetro: 1,2 mm

Natureza e polaridade da Corrente: CC⁺

Tabela 2 – Composição química do arame, AWS ER70S-6.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)	
C	0,07
Si	0,80
Mn	1,20
P	0,010
S	0,005

b) Gás de Proteção

O gás de proteção utilizado neste trabalho experimental foi o Dióxido de Carbono (CO₂) puro. Caracteristicamente ativo quando decomposto às elevadas temperaturas do arco voltaico (Lucas, 1992; Dillebeck & Castagno, 1987).

➤ **Aplicações**

O CO₂ foi selecionado como gás de proteção por ser bastante utilizado na indústria de transformação mecânica, na soldagem de aços carbono e de baixa liga pelo processo de soldagem MAG. São fatores determinantes, o seu baixo custo em relação a outros gases de proteção e, também, suas características físico-químicas que proporcionam vantagens operacionais em aplicações ligadas à soldagem em estruturas em aço.

A utilização do gás CO₂ para a soldagem MAG-CW como gás de proteção é justificada, primeiro por ter custo economicamente viável e segundo por observações significantes na qualidade e desempenho do processo, quando foram utilizadas algumas práticas desenvolvidas em trabalhos experimentais no Labsolda da UFPA.

A norma AWS A5.18 recomenda a utilização de CO₂ para a soldagem MAG.

c) Metal base

O Aço SAE 1020 foi selecionado como metal de base para soldagem das amostras. Pertence à classe dos aços com baixo teor de carbono e é utilizado em componentes estruturais onde, em princípio, não se exigem grandes requisitos de propriedades mecânicas. Para os aços de especificação SAE, a norma apenas

garante a composição química. Tomou-se o cuidado de especificar uma amostra de dimensões apropriada, para resistir à alta carga de energia implementada pelo processo de soldagem MAG-CW. O material de base empregado foi na forma de barra chata com dimensões de 12,7 mm de espessura, 76 mm de largura e 155 mm de comprimento, (Figura 3.18).

O material de base a ser empregado determinará a composição química dos arames utilizados.

3.2 - Equipamentos

3.2.1 - Bancada de soldagem

Para por em prática a fase experimental foi montada uma bancada para ensaios, Figura 3.1, onde foi possível o controle dos diversos parâmetros de soldagem. Essa bancada de ensaios foi composta por uma fonte de soldagem com o respectivo cabeçote alimentador, um sistema de posicionamento da tocha, uma tocha de soldagem, um cabeçote auxiliar de alimentação para o arame frio, mesa de soldagem, um sistema de gás de proteção, um sistema de medição de tempo, comprimento e velocidade para os dois arames e um sistema de monitoramento e aquisição dos dados instantâneos de corrente e tensão.

a) Central de soldagem multiprocessos

A fonte de soldagem empregada é multiprocessos, Figura 3.1, e optou-se pelo processo MIG/MAG no modo de ajuste da fonte em tensão constante, natureza da corrente e polaridade CC⁺.

Os dados técnicos referentes à fonte de soldagem são listados a seguir:

Tipo: Fonte eletrônica transistorizada

Modelo: DIGITEC 600

Fabricante: IMC/LABSOLDA – UFSC

Corrente Nominal: 600 A

Tensão de alimentação: 200, 380 ou 440 V, trifásico

Tensão em vazio: 64 V

Potência máxima consumida: 12 KW

Fator de Potência: 0,94



Figura 3.1 – Central de soldagem multiprocessos - Detalhes da bancada de soldagem MIG/MAG. Fonte: (LABSOLDA/UFPA).

b) Sistema de alimentação de arame-eletrodo

O sistema de alimentação de arame-eletrodo é composto por um cabeçote de alimentação, Figura 3.2, e cabos guia, modelo STA20D, fabricante IMC/LABSOLDA/UFSC, com rampa de aceleração e desaceleração da velocidade do arame com diâmetros na faixa de 0,60 até 1,60 mm. Este cabeçote foi acoplado a fonte de soldagem e possui roletes tracionadores para permitir, tanto a alimentação contínua do arame-eletrodo bobinado, essencial ao processo MAG, quanto a velocidade de avanço deste arame regulada manualmente em 6 m/min, 7 m/min e 9 m/min. Este sistema tem como finalidade, alimentar o arame-eletrodo até o arco voltaico e possui velocidade de avanço de 1,0 a 20,0 m/min.



Figura 3.2 – Cabeçote de alimentação de arame. Modelo: STA20D. Fonte: (LABSOLDA/UFPA).

c) Sistema de posicionamento e deslocamento automático da tocha de soldagem

Foi utilizado neste trabalho um sistema de posicionamento e deslocamento automático da tocha, Figura 3.3, modelo Tartilope V1, fabricante IMC/LABSOLDA – UFSC, com faixa de velocidade de deslocamento 5 a 160 cm/min e resolução 0,2 cm/min.



Figura 3.3 – Sistema de posicionamento e deslocamento automático da tocha.
Fonte: (LABSOLDA/UFPA).

d) Tocha de Soldagem

A Figura 3.4 apresenta a tocha de soldagem MIG/MAG com um dispositivo de fixação da tocha e guia do arame frio.

Foi empregada em todos os experimentos uma tocha de soldagem comercial marca Binzel, modelo MB 501 D, do tipo “Push”, com capacidade de corrente de 500 A, refrigerada a água e com cabo de 3 m, equipada com conduíte de aço para o processo MIG/MAG e adaptada posteriormente para o processo MAG-CW.



Figura 3.4 – Aspecto da pistola “push” adaptada para soldagem com o arame frio, posição tandem, utilizada neste trabalho.

e) Sistema auxiliar de alimentação de arame frio

Neste projeto, o sistema auxiliar de alimentação de arame frio é composto por um cabeçote auxiliar de alimentação de arame, Figura 3.5, e cabos guia, com a finalidade de auxiliar a alimentação de arame frio até o arco voltaico. As características do cabeçote de alimentação são: modelo MEF 30, fabricante ESAB, alimentação elétrica (VCA - 50/60 Hz), velocidade de avanço 1,50 a 2.14,00 m/min e diâmetros de arame 0,60 a 1,60 mm. Este cabeçote foi acoplado a fonte de soldagem e possui roletes tracionadores para permitir a alimentação contínua do arame-eletrodo bobinado, necessário ao processo MAG-CW, e a velocidade de avanço do arame frio empregado no experimento, regulada em 3 m/min, 4 m/min e 5 m/min.



Figura 3.5 – Detalhes do sistema de alimentação auxiliar do arame frio.
Fonte: (LABSOLDA/UFPa).

f) Suporte guia do arame frio

O suporte guia do arame frio foi desenvolvido e confeccionado em alumínio (corpo principal) e latão (tubo condutor e posicionador do arame frio) para ter mais leveza. Ele tem a finalidade de conduzir o arame até o arco voltaico estabelecido pelo arame energizado do processo MAG. O suporte é conjugado à tocha de soldagem e é constituído por um conjunto de peças, tais como corpo do suporte; tubo condutor e posicionador do arame frio e transferidor de ângulos, conforme Figura 3.6.

O corpo do suporte (1) é fixado através de parafuso (P) diretamente a tocha MAG, Figuras 3.6 e 3.8.

O cilindro guia (2) e o bico guia (3) condutores e posicionadores do arame frio são fixados junto ao transferidor (4), a fim de posicionar o ângulo de entrada do arame frio no arco voltaico.

O transferidor de ângulos (4) é fixado junto à haste angular (5) para medir o ângulo de inclinação do bico guia (3) condutor de arame frio.

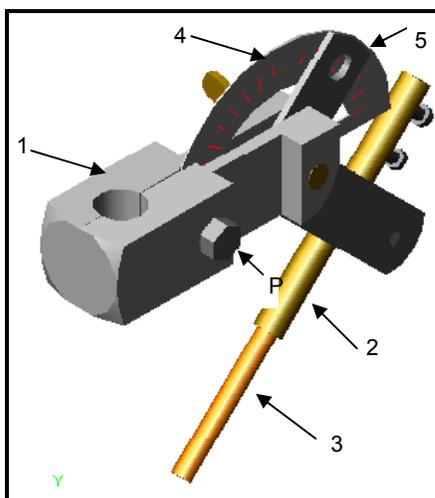


Figura 3.6 – Suporte da tocha de alimentação do arame não energizado,

A Figura 3.7 e a Figura 3.8 apresentam um esquema ilustrativo do “dispositivo de fixação da tocha e suporte guia de deslizamento” para a alimentação de arame frio ao ambiente da soldagem.

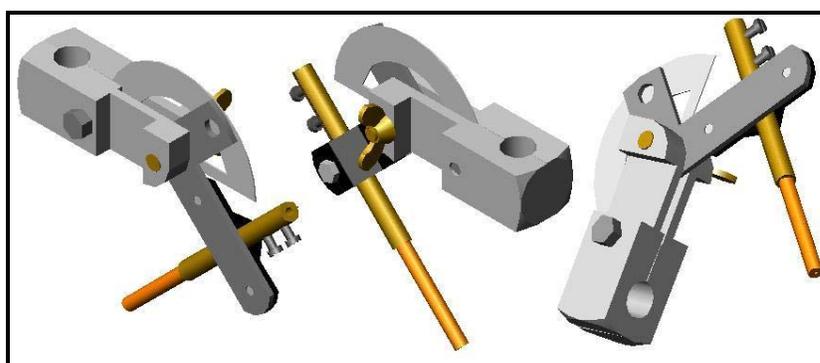


Figura 3.7 – Representação esquemática atual do suporte guia.



Figura 3.8 – Detalhe do suporte guia de alimentação do arame frio.

3.2.2 - Balança digital

A balança digital foi usada para a pesagem dos corpos de prova antes e após a deposição do metal de solda sobre a superfície do metal de base. As características da balança são: modelo: BG4000, fabricante: GEHAKA, valor máximo 4,040 g, valor mínimo: 0,5 g, resolução: 0,01 g e erro de 0,1 g.

3.2.3 - Sistema de medição de tempo, comprimento e velocidade de alimentação do arame eletrodo

Em todos os experimentos foram utilizados dois equipamentos e introduzidos na saída dos arames dos cabeçotes alimentadores. Este sistema de medição, Figura 3.9, fabricante IMC/LABSOLDA – UFSC modelo MVA – 2 foi responsável pela monitoração da produtividade durante as operações de soldagem, ou seja, o sistema respondeu pelas medidas de tempo de soldagem, comprimento do arame-eletrodo consumido na soldagem e velocidade instantânea de alimentação do arame-eletrodo e do arame frio.



Figura 3.9 – Sistema de monitoração da produtividade em operações de soldagem. Fonte: (LABSOLDA/UFGA).

3.2.4 - Máquina de serrar de fita

A máquina automática de serrar, Figura 3.10, modelo FM18 e fabricante FRANHO - Máquinas e Equipamentos S/A foi responsável pelo corte dos corpos de prova.



Figura 3.10 – Máquina automática de serrar (serra em fita).
Fonte: (LABSOLDA/UFGA).

3.2.5 - Lixadeira / Politriz

O processo de lixamento foi manual e consistiu na utilização de uma placa feita de material acrílico acoplada a uma tubulação para circulação de água. O processo de polimento foi efetuado na politriz da Figura 3.11, especificada pelo fabricante Panambra S/A como modelo DPU-10.



Figura 3.11 – Máquina politriz

3.2.6 - Máquina de corte (cut-off) e disco de corte

A máquina de corte denominada “cut-off”, Figura 3.12, fabricante – Arotec, modelo COR 40, Potência 1,5 CV e Voltagem 220 V trifásico foi empregada para o corte da amostras utilizadas no ensaio metalográfico.



Figura 3.12 – Máquina de corte – cut-off. Fonte: (LABSOLDA/UFPA).

3.3 – Dispositivos auxiliares para aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados é composto por um microcomputador modelo Pentium 133 MHz, fabricante Intel, e uma placa de aquisição identificada pelo fabricante IMC/LABSOLDA – UFSC como modelo INTERDATA e frequência de aquisição de 10 kHz por canal. Os sensores responsáveis pela geração de sinais de tensão e corrente estão dispostos internamente nas fontes. A comunicação entre a fonte e a placa foi efetuada via cabo o que possibilitou a ligação direta da placa de aquisição à fonte de energia.

3.3.1 - Programas computacionais

Para levar a efeito a aquisição e o tratamento dos dados foram empregados vários programas computacionais específicos, tais como:

- ☞ Oscilos SAP – Fabricante – IMC/Labsolda-UFSC. Programa para executar tarefas relacionadas à aquisição de dados e na geração dos oscilogramas para análise dos resultados, durante a realização das soldagens;
- ☞ Programa para análise gráfica, empregado na geração de gráficos;
- ☞ AutoCAD 2004 – Fabricante Microsoft. Programa comercial de computação gráfica usado na modelagem de sólidos 3D e na medição da geometria das amostras soldadas;
- ☞ Statistica – Fabricante Statsoft. Utilizado no tratamento estatístico dos dados.

3.4 - Material de ensaio líquido penetrante

A Figura 3.13 apresenta o material utilizado no ensaio por líquidos penetrantes para a detecção de descontinuidades essencialmente superficiais



Figura 3.13 – Material para ensaio líquido penetrante; (a) Penetrante, (b) Revelador.

Dados técnicos:

a) Penetrante: VP-30 lavável a água N° 02

Fabricante: Met-L-Chek

b) Revelador: D-70 N° 03

Fabricante: Met-L-Chek

3.5 - Planejamento e técnica experimental

3.5.1 - Metodologia experimental

Neste tópico é apresentada a metodologia experimental empregada para a execução de cada uma das etapas propostas, ou seja, a determinação dos parâmetros operacionais utilizados nos processos de soldagem MAG e MAG-CW, da geometria do cordão de solda (largura, reforço, penetração e diluição), dos parâmetros econômicos (consumo, produção e rendimento) e da análise do aspecto superficial do metal depositado.

Os experimentos foram obtidos empregando os processos MAG e MAG-CW em uma bancada de soldagem, conforme a Figura 3.1, ajustada para operação automatizada, na posição plana, com as técnicas operacionais puchando e empurrando o arco voltaico. O suporte guia de alimentação do arame frio foi acoplado a tocha de soldagem em disposição geométrica transversal “Twin” e posicionamento longitudinal “Tandem”.

O processo de soldagem MAG-CW (Metal Active Gas-Cold Wire), ou simplesmente soldagem a “Arco Voltaico com proteção de Gás Ativo e adição de Arame Frio”, pode ser caracterizado como um processo duplo arame e uma variante do processo MIG/MAG.

Este trabalho foi realizado com o emprego de dois arames sólidos de aço carbono e de mesmos diâmetros. Segundo Ditley et al (1998) citam a aplicação do duplo arame em soldagens de aço utilizando arames tubulares. Mulligan & Melton (2002) também relatam ser possível o emprego de dois tipos de arames combinados para o processo com duplo arame, sendo normalmente usado o primeiro arame sólido como líder e imediatamente atrás o arame tubular, ambos cooperando com resultados na penetração e no acabamento. Ainda, estes autores ressaltam o uso dos vários modos de combinação de arames, tais como: a combinação de arame sólido/tubular ou dois arames sólidos, com objetivos da soldagem em chapas “não preparadas”.

A soldagem MAG-CW utiliza dois arames nus sólidos consumíveis contínuos e independentes, sendo um arame-eletrodo energizado o principal responsável pela abertura e manutenção do único arco voltaico estabelecido. O

outro arame frio é introduzido e fundido simultaneamente no calor do arco e o metal liquefeito é impelido por um conjunto de forças em direção ao metal de base formando uma única poça de fusão. O arco voltaico, as gotículas em transferência juntamente com a única poça de fusão são inteiramente protegidas pelo gás de proteção.

a) Configuração do processo MAG-CW

Alinhamento dos arames em relação à direção da tocha.

☞ Quanto à disposição dos arames

Com o emprego de dois arames o processo MAG-CW permitiu alterar a disposição geométrica relativo às pontas dos mesmos em relação à peça.

Devido à comprovação de bons resultados, em revestimentos soldados com o processo duplo arame, pelos autores (Gonzáles, 1999; Motta 2002), tomou-se isto como critério e foi estudada neste trabalho a aplicação experimental da soldagem em simples deposição através do processo MAG-CW.

Basicamente, foram utilizadas duas possibilidades de arranjo de alinhamento nas aplicações do processo, cujas características estão descritas a seguir:

A Figura 3.14a e a Figura 3.14b apresentam a tocha de soldagem com a disposição do arame frio em posição transversal “Twin Wire”, onde se trabalhou com os dois arames lado a lado numa posição transversal ao sentido de deslocamento da tocha (Gonzáles, 1999).

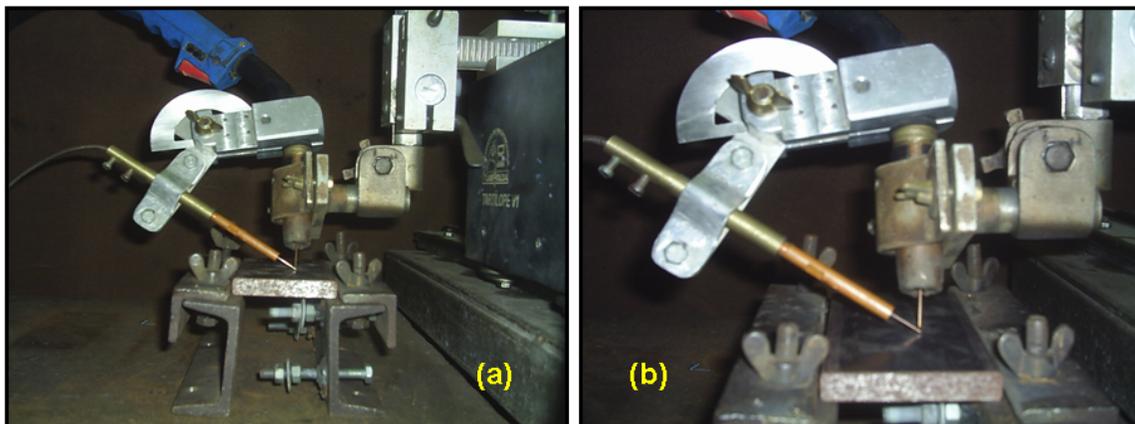


Figura 3.14 – Tocha de soldagem com sentido de alimentação do arame frio Twin.

A Figura 3.15(a) e a Figura 3.15(b) mostram a tocha de soldagem com a disposição do arame frio em posição longitudinal “Tandem Wire”, onde se trabalhou neste arranjo com os arames dispostos na posição longitudinal tandem ao longo do cordão de solda, ou seja, os dois arames estão em cooperação posicionados um em frente ao outro na direção da velocidade de soldagem (Gonzáles, 1999; Motta 2002).

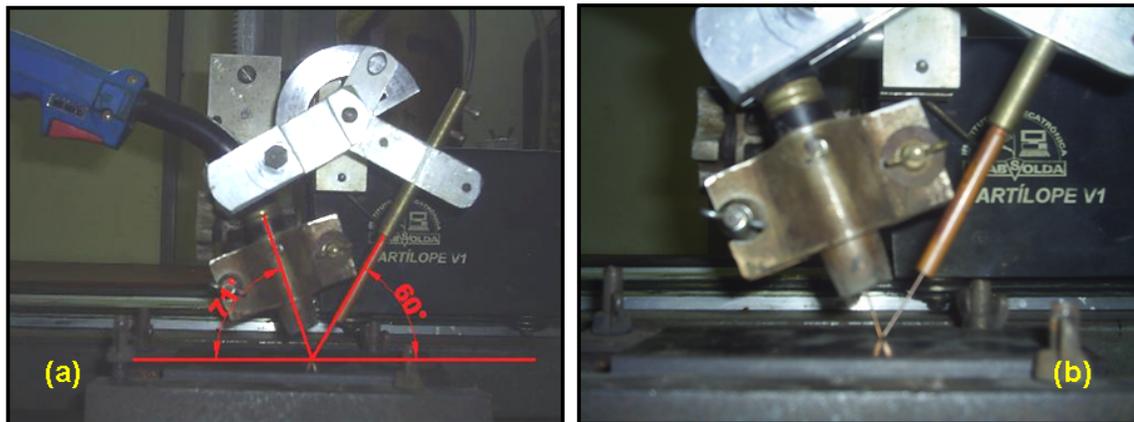


Figura 3.15 – (a) Ângulos de entrada dos arames e (b) tocha de soldagem com sentido de alimentação do arame frio tandem. Fonte: (LABSOLDA/UFPa).

Utilizou-se uma tocha de soldagem comercial para o processo MAG-CW com suporte guia acoplado para a adição do arame frio e foi mantido constante o ângulo de inclinação da tocha em 19° para as duas técnicas de soldagem, conforme a Figura 3.15(a) e a Figura 3.16.

A Figura 3.16 mostra o ângulo de entrada, com disposição do arame frio em posição longitudinal “Tandem Wire”, em 30° e, mais o ângulo de inclinação da tocha no valor de 19° , totalizando o ângulo apresentado de 49° .

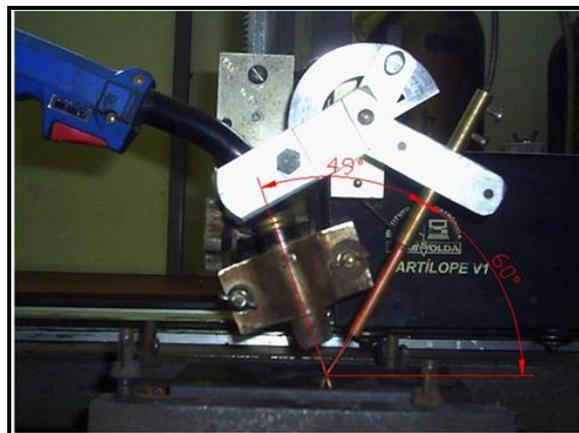


Figura 3.16 – Tocha de soldagem com sentido de alimentação do arame frio tandem com os ângulos de entrada dos arames. Fonte: (LABSOLDA/UFPa).

b) - Sistema de alimentação de arame /suporte de fixação da tocha e guia do arame frio

Neste processo, conforme esquematizado pela Figura 3.1 dois arames são fornecidos por dois alimentadores de arame, sendo um deles independente, de maneira que pode utilizar diferentes composições químicas de arames e obter diferentes ou iguais velocidades de alimentação. Como somente um arame é energizado os parâmetros elétricos são impostos apenas a esse arame.

São funções básicas do par sistema de alimentação / tocha:

- ☞ Controle da velocidade de avanço dos arames, objetivando uniformidade no valor de l_0 , mostrando a igualdade entre a taxa de fusão “TF” e a taxa de alimentação do arame “ T_a ”;
- ☞ Transferência de corrente de soldagem para o arame através do bico de contato;
- ☞ Permitir o controle das variáveis envolvidas, tais como: velocidade de alimentação de arame, vazão de gás, abertura e o fechamento do circuito elétrico de soldagem.

A alimentação do arame energizado foi realizada através da tocha de soldagem e a adição do arame frio foi experimentada como fato real por meio do suporte guia ambos representados através da Figura 3.17. Portanto, este acessório é utilizado conjugado a tocha de soldagem MAG para adição do arame frio ao processo, ou seja, passou-se a ter com esta invenção metodológica um arame energizado e um arame não energizado (frio). Um dos maiores motivos para o uso dessa técnica recai no aumento da produtividade por intermédio de uma maior taxa de deposição de material, uma vez que, são empregados dois arames simultaneamente. O suporte serve de guia para o arame frio e como tal foi desenvolvido para este fim, pelo autor deste trabalho juntamente com José Smith, professor do CEFET-PA.

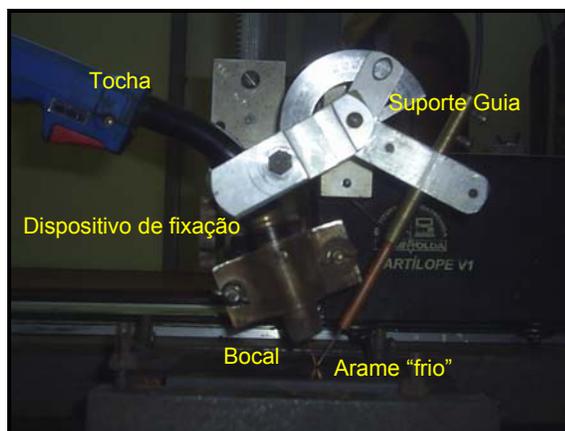


Figura 3.17 – Foto do dispositivo de fixação e suporte guia do arame frio acoplado a tocha de soldagem. Fonte: (LABSOLDA/UFGA)

Nesta nova modalidade de soldagem, o processo MAG-CW trabalha com dois arames e, por conseguinte as velocidades de alimentação podem ser diferentes para cada arame. O arame energizado tem maior velocidade de alimentação para poder conduzir maior corrente, considerando que a corrente é uma variável dependente desta. É de se esperar que o segundo arame frio tenha menor velocidade e há uma disputa pela alimentação com uma diferença de tempo na entrada de dois segundos após o acendimento do arco pelo arame-eletrodo, conforme se descreve na seção correspondente a técnica experimental.

A Tabela 3 apresenta as variáveis independentes para as etapas experimentais de soldagem, bem como, os seus respectivos fatores e níveis.

Tabela 3 - Fatores e Níveis para os Processos MAG e MAG-CW

FATOR	NÍVEL
Velocidade do Arame Eletrodo - VAE (m/min) - Processo MAG	6,0 7,5 9,0
Velocidade do Arame Frio - VAF (m/min) - Processo MAG-CW	3,0 4,0 5,0

VAE – Velocidade de Alimentação do Arame-Eletrodo (m/min);

VAF – Velocidades do Arame Frio (m/min).

O desenvolvimento experimental inicial deste trabalho realizou-se com a operação de soldagem através do processo MAG e posteriormente, a experiência foi concluída pelo processo de soldagem MAG-CW.

As soldagens foram realizadas em ambos os processos com velocidade de soldagem (V_s) constante, em 30 cm/min, enquanto a tensão de soldagem foi ajustada na fonte em 32 V.

Na soldagem MAG-CW as Velocidades do Arame Frio (VAF) foram determinadas em 3 m/min, 4 m/min e 5 m/min e as Velocidade de Alimentação do Arame-Eletrodo (VAE) em 6 m/min, 7,5 m/min e 9 m/min, ou seja, para cada VAE corresponde uma VAF que combinadas são representadas por VAE(6-3) m/min, VAE(7,5-4) m/min e VAE(9-5) m/min. O pacote operacional correspondente a VAE(6-3) m/min permaneceu constante e resultaram no menor nível de corrente média de soldagem.

O valor para o comprimento de arco foi igual à distância bico de contato peça (DBCP) em 15 mm e a vazão de gás em 17 l/min para gás ativo de proteção CO₂ puro.

O gás de proteção é alimentado por um sistema adequado através do bocal da pistola de soldagem, representado pela Figura 3.17 que ilustra a foto do conjunto bocal, tocha e suporte guia, para proteger o ambiente de soldagem, como: as gotas em transferência, agora referentes à fusão das duas extremidades dos dois arames, o arco e a poça de fusão.

Os parâmetros utilizados neste trabalho foram determinados com base na bibliografia estudada e através dos trabalhos realizados no LABSOLDA (Bacelar & Ferraz, 2005; Barrozo, 2006; Mendonça, 2006) e outros.

Barrozo (2006), cujos valores de VAF variavam em 1 m/min, 2 m/min e 3 m/min para VAE 6 m/min, 1 m/min, 3 m/min e 5 m/min para VAE 8 m/min e por fim, VAF de 1 m/min, 3 m/min e 6 m/min para VAE de 10 m/min.

Portanto, nesta pesquisa foram adotados os valores de VAF dentro dos intervalos estabelecidos nos trabalhos citados, sendo um dos valores escolhidos, por exemplo, VAF de 3 m/min valor máximo conseguido na operação de soldagem com VAE de 6 m/min, sem haver nenhum comprometimento na soldagem, ou seja, sem interrupção da alimentação de arame frio. No entanto, admitindo-se que velocidades mais altas podem exceder esse limite tolerável e o arame pode ficar retido e solidificado na poça de fusão, travando o sistema.

Para otimizar os procedimentos e obter boa realização nas investigações, o planejamento experimental deste trabalho foi dividido em quatro etapas:

- ☞ Na primeira etapa demonstrou-se a seqüência de soldagem com passes em simples deposição empregando o processo MAG e MAG-CW com o propósito de levantar as condições preliminares de soldagem registradas na determinação de parâmetros de soldagem, em CC⁺, tomadas como referência para a definição do pacote operacional;
- ☞ Na segunda etapa, com os parâmetros obtidos na fase anterior, empregou-se à metodologia de avaliação dos parâmetros econômicos dos processos;
- ☞ A terceira etapa concerne na avaliação da geometria do cordão de solda;
- ☞ Finalmente, na quarta etapa, a análise da sanidade das soldas depositadas.

A soldagem na condição de simples deposição ocorreu a partir de ajustes sucessivos nos valores da variável velocidade de alimentação de arame pelos processos MAG e MAG-CW.

A **técnica experimental** empregando a soldagem automática com o processo MAG-CW é iniciada através de uma seqüência padronizada de operações. Inicialmente a tocha de soldagem é posicionada a 5 mm após a borda do corpo de prova e no sentido da soldagem. A abertura do arco elétrico é iniciada com alimentação do arame-eletrodo e somente decorridos dois segundos (2s) de soldagem entra em ação a alimentação de arame frio na operação caracterizando o processo MAG-CW. A soldagem será finalizada após a interrupção da alimentação do arame frio, também, dois segundos (2s) antes do ponto final, para que o processo conclua o passe de solda e o fechamento do arco elétrico, nesta ordem.

Entretanto, esta diferença de tempo é benéfica, facilita a rápida fusão da extremidade do arame, pois o local do arco já estava com temperaturas elevadas, caso contrário o arame embola e a soldagem para. Finalmente, a diferença de tempo

na entrada da alimentação dos arames é essencial para a operacionalização do processo. Esta característica é importante por aumentar a produção sem alterar custos e, ainda, pode possibilitar um controle do acabamento pela ação do segundo arame.

Durante as operações de soldagem, a aquisição dos dados instantâneos da corrente e da tensão de soldagem foi obtida através de uma placa de aquisição de dados em alta frequência (10 kHz/canal), instalada no computador Pentium 133 MHz. O programa OSCILOS SAP de aquisição de dados que fornece os oscilogramas de tensão e de corrente de soldagem realiza a aquisição dos pontos a cada vinte e cinco milissegundos (25 ms). O tempo de aquisição utilizado foi de um segundo (1s) e acarretou no fornecimento de um universo de 4000 pontos para cada ensaio, o que foi suficiente para a análise pretendida. Foram realizadas repetições dos ensaios, sendo produzida uma réplica para cada experimento.

3.5.2 - Obtenção das Amostras

Foram serradas 36 amostras em equipamento próprio, preparados, identificados e soldados com cordões de solda depositados sobre chapas de aço ABNT 1020 (simples deposição), medindo 76x155x12,7 mm, Figura 3.18, para a análise das características econômicas e geométricas.

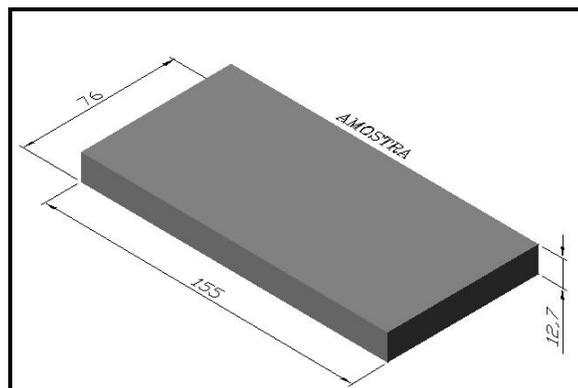


Figura 3.18 – Representação esquemática da amostra medindo 76x155x12,7 mm.

3.5.3 - Obtenção das amostras dos corpos de prova soldados

As amostras dos corpos de prova soldados foram seccionadas, Figura 3.19, para a análise geométrica do cordão de solda e foram obtidas através da máquina de corte cut-off, Figura 3.12. O critério utilizado para a posição do corte da amostra foi a de seccioná-la na região central, que se julgava a região do cordão onde o arco, bem como, a transferência metálica estivesse mais estável. De cada experimento realizado foi retirada 1 (uma) amostra.

A Figura 3.19 mostra o desenho esquemático do seccionamento transversal das soldas experimentais, detalhando o corte para a remoção das amostras.

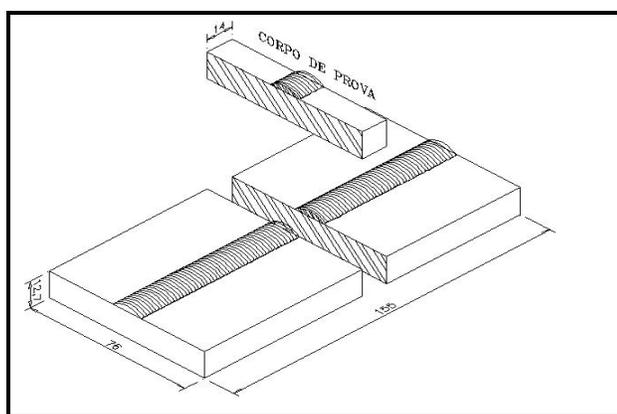


Figura 3.19 – Esquema do corte para obtenção dos corpos de prova.

3.5.4 - Estabilidade do arco voltaico

A avaliação da estabilidade do arco voltaico visa a interpretação dos oscilogramas de tensão para a soldagem, que envolve possivelmente a transferência metálica por curto-circuito, para fins de comparação de resultados entre os processos de soldagem empregados.

Vários critérios e metodologias têm sido apresentados para interpretar a estabilidade do arco, porém, existem outros critérios baseados na avaliação dos oscilogramas de tensão e de corrente, nas curvas ($U \times I$), em nível de ruídos emitido ou na análise visual do arco (Farias, 1993).

Neste trabalho, o estudo da estabilidade do arco voltaico começa com a análise dos oscilogramas de corrente e tensão gerados durante as soldagens e captados por uma placa de aquisição de dados.

Os oscilogramas de corrente e de tensão de soldagem foram tratados por meio de um programa computacional estatístico, que permite a traçagem de todas as curvas tempo x tensão de soldagem (txU) e tempo x corrente de soldagem (txI), através dos dados obtidos pela placa de aquisição durante toda a experiência. Portanto, a avaliação da estabilidade do arco voltaico foi desenvolvida com o auxílio do programa computacional Oscilos, cuja finalidade é realizar a aquisição de dados em tempo real, armazenar e processar os dados instantâneos da corrente e da tensão de soldagem, tempo e quantidade de ocorrências de curtos-circuitos.

Através do oscilograma de tensão podem ser verificados os picos superiores de tensão, denominados neste trabalho de “pico” e os picos inferiores de tensão denominados de “vale”. Cada ocorrência de transferência metálica corresponde a um pico e um vale de tensão. Através de programas computacionais, os quais identificam os picos e os vales de tensão e admitido que a ocorrência de eventos que proporcionaram curtos-circuitos durante a soldagem dos experimentos pode-se obter uma variação de tensão (ΔU) para cada evento durante um determinado intervalo de tempo.

a) Metodologia

A metodologia relativa à experiência adotada neste trabalho para obtenção de valores operacionais dos parâmetros de soldagem, como os dados instantâneos da corrente e da tensão de soldagem, em condições de estabilidade do arco, foi desenvolvida a partir da utilização do programa Oscilos. Este programa computacional é uma ferramenta auxiliar na verificação do intervalo de tempo entre os diversos destacamentos consecutivos da gota metálica.

Ao planejar este trabalho, ensaios preliminares foram executados e se observou que empregando tensões de soldagem de 35 V, 34 V, 33 V, 28 V com a VAE de 6 m/min, 8 m/min e 10 m/min e VAF de 3 m/min, 4 m/min e 5 m/min não se obteve com estas combinações soldas com satisfatória qualidade, devido a instabilidades no processo. Estas experiências foram realizadas com os seguintes gases de proteção: ou mistura 75%Ar-25%CO₂; ou com o gás ativo CO₂ puro. Porém, como outros trabalhos pesquisados no LABSOLDA foram desenvolvidos com mistura de gases, optou-se, por trabalhar com o CO₂ puro.

A execução dos experimentos foi realizada, então, empregando o processo MAG e MAG-CW com proteção do gás ativo dióxido de carbono (CO_2) e definida a partir do valor de tensão de soldagem estabelecido em 32 V, como a tensão que se comportou mais estável, com velocidades de alimentação do arame-eletrodo (VAE) em 6 m/min, 7,5 m/min e 9 m/min e do arame frio (VAF) em 3 m/min, 4 m/min e 5 m/min. Entretanto, como houve aumento progressivo da velocidade de alimentação do arame-eletrodo, combinada com a do arame frio, acarretou na elevação da taxa de fusão do arame.

Para cada valor fixado na velocidade de alimentação do arame-eletrodo obteve-se a corrente e a tensão média, I_m e U_m , correspondentes. Entretanto, foram obtidos os valores médios, adquiridos de uma série de experimentos na mesma velocidade de alimentação, a fim de comparar estes valores e correlacionar graficamente entre os processos de soldagem empregados na experimentação.

Ao planejar este trabalho, ensaios preliminares foram executados e se observou, através dos oscilogramas de tensão e corrente, que empregando o processo MAG com gás de proteção CO_2 os vales de tensão registrados nos oscilogramas de tensão estavam quase que sempre abaixo de 10 V caracterizando, muito provavelmente, o número de curtos-circuitos bastante acentuados.

A avaliação da estabilidade do arco considera a transferência da gota durante o curto-circuito, a partir da medição dos valores da corrente e da tensão de soldagem no oscilograma. Após a aquisição dos dados da corrente e da tensão de soldagem, estes foram adequadamente convertidos e analisados por meio de um programa específico computacional estatístico (Statistica). Sendo assim, os valores médios das grandezas obtidas resultante das duas repetições dos ensaios foram submetidos à análise estatística de variância através do programa computacional estatístico.

Como não se utilizou um programa específico para medição do tempo de curto-circuito e tempo de transferência metálica, foi desenvolvida uma programação matemática envolvendo uma planilha de dados para o levantamento dessas medições, conforme metodologia para o levantamento dos histogramas. Neste sentido, foi avaliado, portanto, a estabilidade do arco através da análise quantitativa do comportamento dinâmico da tensão de soldagem, a frequência e o tempo de curto-circuito e as condições de reignição do arco.

Com base na metodologia empregada pelos pesquisadores Mota (1998), Braga (1997), Wang, Liu e Jones (1995), para este trabalho três parâmetros foram adotados como critérios de avaliação da transferência metálica em função do tempo para o estudo da estabilidade do arco, cujos valores foram criteriosamente definidos. Assim sendo, os parâmetros definidos são a tensão de referência (U_r) para o curto-circuito, o tempo mínimo de curto-circuito com transferência da gota e o tempo máximo de reignição do arco, após o curto-circuito. Por conseguinte, adotou-se:

- ☞ Tensão de referência (U_r) para o curto-circuito e neste critério, somente haverá registro quando a tensão do arco for menor ou igual a 15 V, $U_r \leq 15$ V.
- ☞ Foi adotado $U_r = 15$ V, ou seja, é uma tensão de referência indicando que tensões abaixo de U_r nos oscilogramas de tensão, são, muito provavelmente, pontos relativos à tensão de curto-circuito.

Os pesquisadores Mota (1998) e Braga (1997) adotaram para os seus experimentos, tensão de referência de 15 V e na soldagem com eletrodos revestidos, Farias (1993) recomenda valores de tensão de referência, na faixa de 7 a 13 V.

- ☞ Tempo mínimo de curto-circuito com transferência da gota metálica $t_{min} = 1$ ms. Foi observado que o maior número de ocorrências de curtos-circuitos acontecia a partir deste valor. Através da análise do histograma torna-se possível auferir o tempo que limita a transferência ou não da gota por curto-circuito. Sendo assim, isto permite o processamento dos dados com transferência da gota metálica, para $t_{min} > 1$ ms e sem transferência metálica para $t_{min} < 1$ ms, porque, neste caso, o tempo é muito pequeno para transferir a gota.

Os pesquisadores Mota (1998) e Braga (1997) sugerem em seus trabalhos $t_{min} = 1,5$ ms. Já o pesquisador Farias (1993) propõe para os eletrodos revestidos a faixa de 1,5 ms a 3,0 ms.

- ☞ Tempo máximo (t_{max}) de reabertura do arco. Este critério é definido para a determinação da tensão de reignição do arco elétrico no pico, onde se verifica a condição dada pela equação 2, para a diferença de tensão maior que zero:

$$U_n - U_{n+1} > 0 \quad (2)$$

Sendo,

$U \rightarrow$ Tensão

$n = 1, 2, \dots, 3999;$

U_n – tensão no vale

U_{n+1} – tensão no pico (reabertura do arco)

Os pesquisadores Mota (1998) e Magalhães (1997) sugerem em seus trabalhos $t_{max} = 1,0$ ms.

A tensão máxima que satisfaz a equação 2 no intervalo de tempo (t_{max}) é definida pela tensão de reabertura do arco.

Os pesquisadores Wang, Liu e Jones (1995) adotaram o critério de variação de tensão (ΔU) no qual correlacionavam o modo de transferência metálica com a variação entre o pico e o vale de tensão e propuseram para a transferência metálica com o eletrodo E71T-1 e com Ar-25%CO₂ como gás de proteção para curto-circuito uma diferença de tensão maior que 10V ($\Delta U > 10V$).

b) Metodologia empregada para o levantamento dos histogramas

A seguir, a metodologia empregada visa o levantamento do tempo de curto-circuito em cada ensaio.

Após a aquisição dos dados da corrente, da tensão de soldagem e do tempo, estes são convertidos e analisados por meio de programa computacional do tipo planilha de dados. Deste modo, são aplicados adequadamente aos dados vários filtros, com o objetivo de suavizar as curvas de tensão e de corrente mantendo os pontos concernentes aos picos e vales no oscilograma e encontrar o tempo de curto-circuito.

Neste momento, são aplicados os filtros ao programa computacional seguindo os seguintes passos:

1º filtro – o objetivo deste filtro é eliminar os pontos gêmeos no oscilograma, conforme a equação 3.

A Figura 3.20 apresenta o oscilograma de tempo x tensão sem filtragem

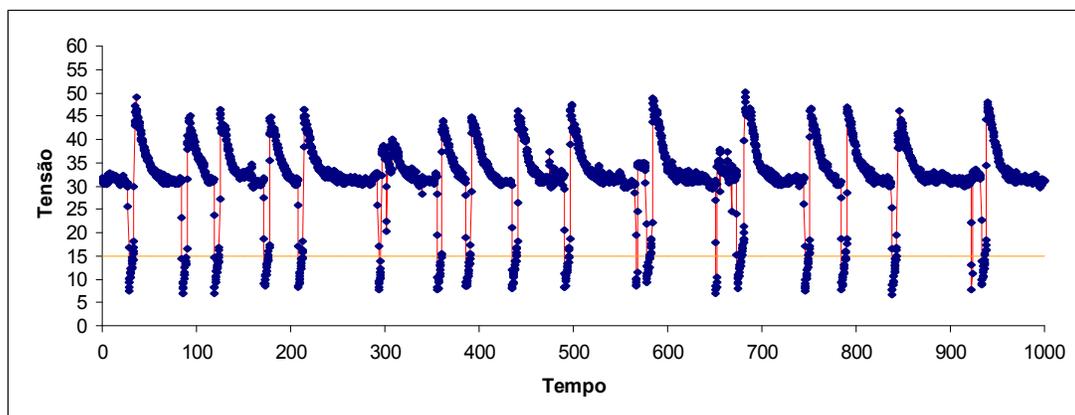


Figura 3.20 – Oscilograma de tempo x tensão sem filtragem

$$\text{OU}[(U_n < U_{n-1} \text{ e } U_n < U_{n+1}) \text{ OU } (U_n > U_{n-1} \text{ e } U_n > U_{n+1})]; \quad (3)$$

Sendo,

$U_{n-1} \rightarrow$ Tensão de início de formação da gota metálica

A equação 3 possui duas condições e para que o ponto seja dado como aceito pelo filtro, uma dessas condições deve ser obedecida. Se a primeira condição for aceita, passe para o próximo ponto, senão, teste a próxima condição e se esta for obedecida, passe para o próximo ponto, senão, o ponto analisado no oscilograma é descartado e passa para o próximo.

Primeira condição: o ponto analisado deve ser menor que ponto anterior e menor que ponto posterior.

Segunda condição: o ponto analisado deve ser maior que ponto anterior e maior que ponto posterior.

A Figura 3.21 apresenta o oscilograma após o primeiro filtro.

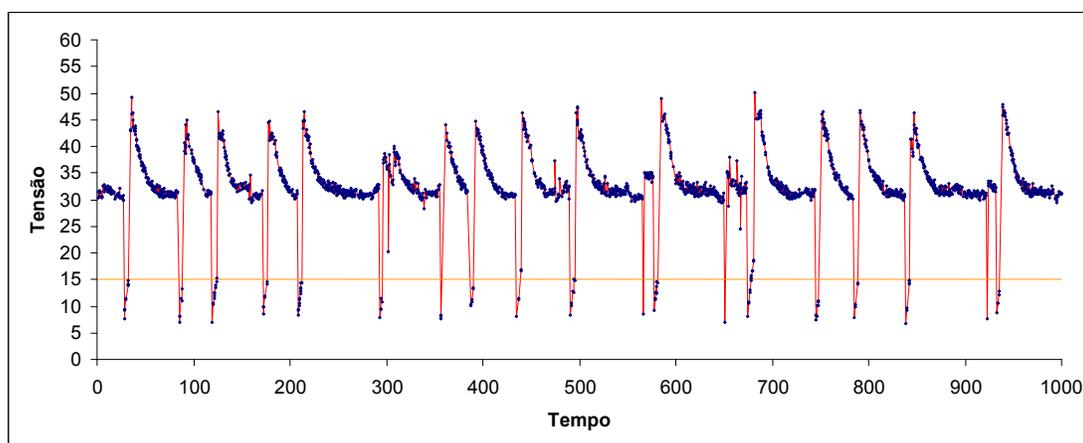


Figura 3.21 – Oscilograma após primeiro filtro

2º filtro – A equação 4 foi baseada no critério de variação de tensão (ΔU) adotado por Wang, Liu e Jones (1995) e a finalidade é revelar quais são os pontos relativos à tensão de curto-circuito (U_n), para diferença de tensão de 10V, conforme a equação 4:

$$|U_n - U_{n-1}| \geq 10 \text{ ou } |U_n - U_{n+1}| \geq 10 ; \quad (4)$$

A Figura 3.22 apresenta o oscilograma após o segundo filtro.

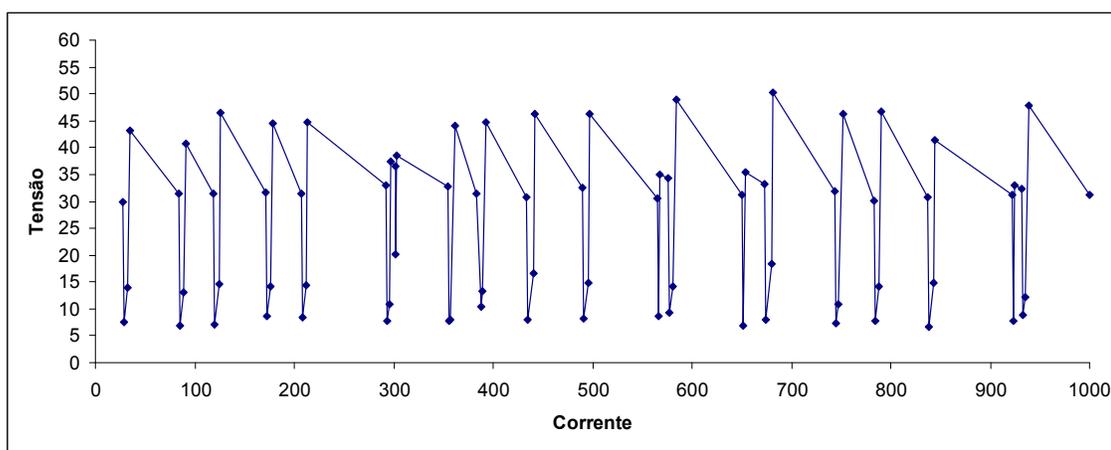


Figura 3.22 – Oscilograma após segundo filtro

3º filtro – o alvo deste filtro é eliminar pontos indesejáveis remanescentes do 2º filtro, que se encontram entre as tensões de reabertura de arco e de curto-circuito, conforme a equação 5:

O valor de 25V foi adotado empiricamente por ser um valor abaixo da tensão média (32V) e acima da tensão de referência (15V).

$$U_n \geq 25 \text{ Ou } U_n < U_{n-1} \text{ e } U_n < U_{n+1}; \quad (5)$$

A equação 5 possui duas condições lógicas e para que o ponto seja aceito pelo filtro, uma dessas condições deve ser obedecida. Se a primeira condição for aceita, passe para o próximo ponto, senão, teste a próxima condição e se esta for obedecida, passe para o próximo ponto, senão, o ponto analisado no oscilograma é descartado e passa para o próximo

Primeira condição: todos os valores de tensão maiores ou iguais à 25V.

Segunda condição: o ponto analisado deve ser, ao mesmo tempo, menor que ponto anterior e menor que ponto posterior.

A Figura 3.23 apresenta o oscilograma após o terceiro filtro.

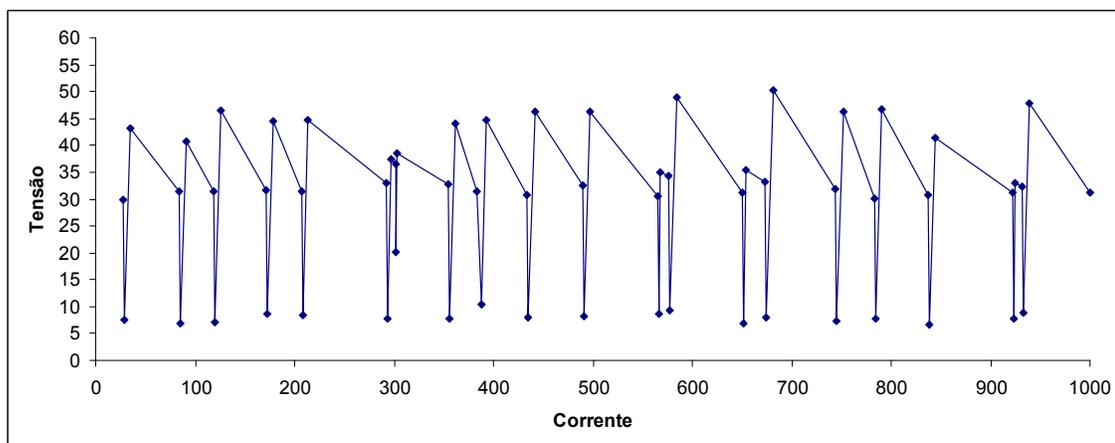


Figura 3.23 – Apresenta o oscilograma após o terceiro filtro

4º filtro – a intenção é eliminar pontos referentes a quedas de tensão que não caracterizam curto-circuito, para tensões maiores que a tensão de referência, $U_r = 15 \text{ V}$, conforme a equação 6:

$$U_n \geq 25 \text{ ou } U_n < U_{n-1} \text{ ou } U_n < U_{n+1} \text{ e } U_n < 15] ; \quad (6)$$

A equação 6 possui duas condições lógicas e para que o ponto seja aceito pelo filtro, uma dessas condições deve ser obedecida

Primeira condição: semelhante à primeira condição mostrada na equação 5.

Segunda condição: o ponto analisado deve ser, ao mesmo tempo, menor que ponto anterior, menor que ponto posterior e menor que 15V.

A Figura 3.24 apresenta o oscilograma após o quarto filtro.

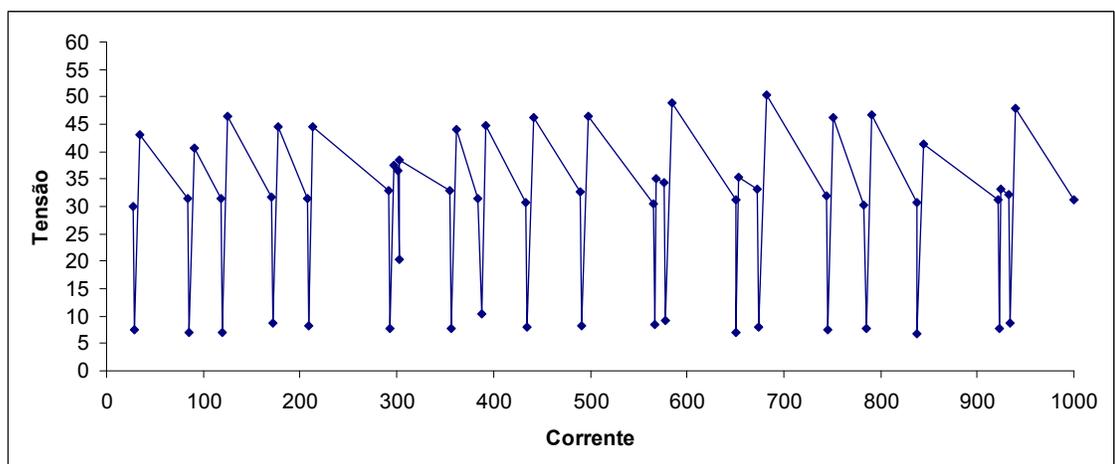


Figura 3.24 – Apresenta o oscilograma após o quarto filtro

5º filtro – o objetivo deste filtro é determinar o tempo de curto-circuito (Δt) para $U_r = 15$ V interpolando na expressão matemática os pontos relacionados à tensão e tempo para tensão no vale ou tensão de curto-circuito (U_n), tensão de início de formação da gota (U_{n-1}), tensão de reignição do arco (U_{n+1}), tempo de soldagem referente ao vale (t_n), tempo de soldagem relativo ao início de formação da gota (t_{n-1}) e tempo de soldagem relativo a reignição do arco (t_{n+1}), conforme mostra a Figura 40.

Através das funções matemáticas:

Quando $U_n \leq 15$ para $n = 1, 2, \dots, 3999$, faça a interpolação dos pontos para achar o tempo relativo (tr_n) no instante “n” e o tempo relativo no instante “n+1” (tr_{n+1}):

$$\frac{U_r - U_{n-1}}{U_n - U_{n-1}} = \frac{tr_n - t_{n-1}}{t_n - t_{n-1}}$$

$$tr_n = \left[\left(\frac{U_r - U_{n-1}}{U_n - U_{n-1}} \right) \times (t_n - t_{n-1}) \right] + t_{n-1}$$

$$\frac{U_r - U_{n+1}}{U_n - U_{n+1}} = \frac{tr_{n+1} - t_{n+1}}{t_n - t_{n+1}}$$

$$tr_{n+1} = \left[\left(\frac{U_r - U_{n+1}}{U_n - U_{n+1}} \right) \times (t_n - t_{n+1}) \right] + t_{n+1}$$

Sendo $\Delta t = |tr_{n+1} - tr_n|$, o tempo de curto-circuito (7)

A partir daí, e de posse dos tempos de curtos-circuitos, esses dados foram transferidos para o programa computacional específico de estatística e gerados os histogramas.

Baseado nos critérios mencionados anteriormente adotou-se o valor para $t_{\min} = 1$ ms, como sendo muito provavelmente curto-circuito com transferência metálica e para valores abaixo, curto-circuito sem transferência.

A Figura 3.25 apresenta um esquema ampliado de parte do oscilograma de tensão de soldagem para identificar os principais pontos do tempo de curto-circuito.

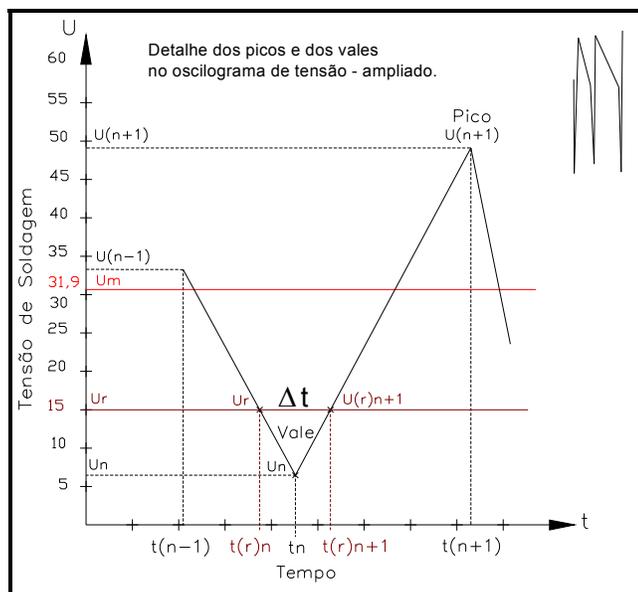


Figura 3.25 – Esquema de parte do oscilograma de tensão ampliado – tempo de curto-circuito, para $\Delta t = |t_{r(n+1)} - t_{r_n}|$.

3.5.5 - Tratamento dos dados experimentais

Quanto ao procedimento para o tratamento dos dados adquiridos experimentalmente foram realizadas análises estatísticas (ANOVA) pelo estudo da interação entre as diversas causas e suas influências nos efeitos obtidos.

Neste trabalho, ao pretender-se avaliar os efeitos das variáveis de entrada, tais como velocidades de alimentação do arame-eletrodo e do arame frio e dos processos de soldagem empregados sobre as variáveis de resposta, como as características geométricas e econômicas da solda, faz-se necessário considerar, também, o perfil do cordão de solda. Logo, verifica-se que o perfil dessas características pode não ser o mesmo, quando se interage os fatores num determinado nível. Segundo Braga (1997) e Mota (1998), um valor ótimo para uma dada combinação, pode não ser para outra. Isto ocorre quando existe interação entre os fatores envolvidos, portanto, pode-se empregar uma experimentação multifatorial para testar e estimar todas as possíveis interações (Costa Neto, 1997; Farias, Quites e Mira, 1991; Peres e Saldiva, 1982). Este método é o mais empregado para a análise de experimentos com planejamento multifatorial e os tratamentos dos dados consistem de dois ou mais fatores, cada um variando em dois ou mais níveis. Neste trabalho variou em três níveis, de forma que as

combinações se processam de modo que cada nível de um fator acontece conjuntamente com cada nível dos outros fatores.

3.5.6 - Características econômicas

a) Equações convencionais

Para avaliar as características econômicas os valores da taxa de fusão (TF), da taxa de deposição (TD) e do rendimento de deposição (R) foram obtidos, para um arame, a partir da utilização das equações 8, 9 e 10, respectivamente.

A taxa de fusão (TF) representa a quantidade de material (massa) do eletrodo ou arame consumível que é fundida por unidade de tempo. Entretanto, esta taxa está diretamente relacionada com a produção, ou seja, com o tempo efetivamente gasto para a realização da soldagem. A taxa de fusão é determinada pela massa de metal (aramé) fundida por unidade de tempo, equação 8. A taxa de deposição (TD) é definida pela quantidade de material (massa) do arame-eletrodo que é efetivamente incorporada ao metal de solda e está relacionada ao custo total da operação de soldagem. A taxa de deposição é definida como a massa fundida do arame-eletrodo depositada e realmente incorporada ao metal de solda, por unidade de tempo, equação 9. O rendimento de deposição real (R) é a razão entre a massa do consumível incorporada ao metal de solda e a massa de arame consumida durante a operação de soldagem, na mesma unidade de tempo (Braga, 1998 e Mota, 1996). O rendimento de deposição será dado pela razão entre TD e TF, equação 10.

➤ Taxa de Fusão

$$\text{➤ Consumo: } TF = 3,6 \frac{\rho \ell}{t_s} \quad (\text{kg/h}) \quad (8)$$

Sendo,

ℓ - Comprimento do arame consumido (m);

ρ - Densidade linear do arame (g/m);

t - Tempo de soldagem (s)

➤ **Taxa de de Deposição**

➤ **Produção:**
$$TD = 3,6 \frac{(m_f - m_i)}{t_s} \quad (\text{kg/h}) \quad (9)$$

Sendo,

m_f - massa final da junta depois da soldagem (g);

m_i - massa inicial da junta antes da soldagem (g)

➤ **Rendimento de Deposição**

➤
$$R = \left(\frac{TD}{TF} \right) \times 100 \quad (\%) \quad (10)$$

Sendo,

TD - taxa de deposição (kg/h);

TF - Taxa de fusão (kg/h)

b) Equações modificadas

A avaliação das características econômicas foi realizada com a finalidade de comparar a produção dos processos de soldagem MAG e MAG-CW estudados.

Para trabalhar com dois arames sólidos na experiência foi indispensável à utilização de dois tempos de soldagem, sendo: t_1 - tempo de soldagem relativo à execução da soldagem com o arame-eletrodo; t_2 - tempo de soldagem relativo à execução da soldagem com o arame frio. Assim sendo, estes tempos foram subtraídos 2 s no instante inicial da soldagem e 2 s no instante final. Entretanto, ao iniciar a soldagem com o processo MAG, somente após 2 s iniciava-se a injeção de arame frio ao arco elétrico e 2 s antes da conclusão do cordão de solda a alimentação do arame frio era interrompida, a fim de evitar que o mesmo ficasse solidificado na cratera do cordão de solda.

Para o cálculo da taxa de fusão se faz necessário o valor da densidade linear do arame maciço, da classe ER70S-6, empregado nas soldagens. Sendo

assim, o valor da densidade foi obtido experimentalmente a partir de três verificações, com amostras retiradas aleatoriamente, cujo valor médio encontrado para a densidade linear do arame citado, foi de 8,423 g/m.

As equações 11 e 12 são referentes a taxa de fusão e a taxa de deposição para dois arames. Logo, estas equações foram modificadas tomando como base as equações 8 e 9 para atender as necessidades implementadas ao processo MAG-CW. No entanto, a equação 8 referente ao rendimento de deposição não foi alterada.

➤ **Taxa de Fusão**

$$\text{TF} = 3,6 \cdot \left(\rho_1 \cdot \frac{l_1}{t_1} + \rho_2 \cdot \frac{l_2}{t_2} \right) \quad (\text{kg/h}) \quad (11)$$

Sendo,

- $t_1 \Rightarrow$ tempo do arame-eletrodo (s);
- $t_2 \Rightarrow$ tempo do arame frio (s);
- $\rho_1 \Rightarrow$ densidade linear do arame-eletrodo (g/m);
- $\rho_2 \Rightarrow$ densidade linear do arame-frio (g/m);
- $l_1 \Rightarrow$ comprimento linear do arame-eletrodo (m);
- $l_2 \Rightarrow$ comprimento linear do arame-frio (m).

➤ **Taxa de de Deposição**

$$\text{TD} = 3,6 \cdot \left(\frac{mf - mi}{t_m} \right) \quad (\text{kg/h}) \quad (12)$$

onde: $t_m = \frac{t_1 + t_2}{2}$

Sendo,

$t_m \Rightarrow$ tempo médio de soldagem dos arames (s)

$mf \Rightarrow$ massa final da junta depois da soldagem (g)

$mi \Rightarrow$ massa inicial da junta antes da soldagem (g)

O rendimento de deposição calculado para dois arames é dado pela razão entre a taxa de deposição, equação 12, e a taxa de fusão, equação 11, como mostra a equação 10.

3.5.7 - Características geométricas

A avaliação da geometria do cordão de solda foi realizada pela análise dimensional de sua seção transversal em todas as amostras dos experimentos.

Em cada uma dos corpos de prova soldados (em simples deposição) foi efetuado cortes transversais ao cordão de solda a uma distância mediana, conforme a Figura 3.19, a fim de obter as amostras para caracterização geométrica.

As superfícies das seções transversais das amostras foram lixadas por via úmida e atacadas com um reagente químico para posteriormente experimentar o ensaio macrográfico.

A preparação da superfície foi executada através do lixamento iniciado com a lixa número 180, em direção normal aos riscos já existentes, passando-se sucessivamente para lixas de granulação mais fina. Em todo o caso, para cada seqüência de lixamento foi mudada a direção de lixamento em 90°. Entretanto, após cada série de lixamento a superfície foi cuidadosamente limpa a fim de que o novo lixamento não fosse contaminado com resíduos da operação anterior. Finalmente, a preparação da superfície é concluída com a lixa de granulometria 600 mesh.

De posse da superfície da amostra limpa, lixada e seca efetuou-se o ataque químico, sendo a composição química do reagente: ácido nítrico comercial com concentração de 2% em etanol (NITAL) e ácido pícrico com concentração de 4% em etanol (PICRAL). No entanto, depois de diluídos separadamente em etanol, os reagentes (nítrico e pícrico) foram misturados. Assim sendo, o ácido nítrico comercialmente concentrado (65%) foi diluído a 2%, ou seja, 2 ml de ácido nítrico concentrado foram adicionados a 98 ml de álcool etílico. Já para o ácido pícrico, foram diluídos 4g em 96g de álcool etílico. Logo, depois de diluídos separadamente, esses reagentes foram misturados em partes iguais, na proporção de 1:1. No entanto, para utilizar 200 ml de nital deve ser também utilizado 200 ml de picral. Portanto, o ataque químico foi realizado com reagente embebido em tufo de algodão, em seguida a superfície é atacada pelo método de fricção durante 10

segundos, posteriormente lavada em mistura de álcool hidratado e água, e finalmente seca.

A superfície polida da amostra foi imediatamente escaneada e a imagem gerada transferida ao computador. Em seguida, os parâmetros largura (b), reforço (r) e a penetração da solda (pe) e a diluição (d), ilustrados na Figura 2.18, foram medidos na seção transversal ao cordão de solda com o auxílio do programa comercial de computação gráfica AutoCAD 2004 licenciado para o CEFET-PA, definindo as características geométricas do material depositado.

3.5.8 - Ensaio por Líquidos Penetrantes.

O ensaio por líquidos penetrantes foi efetuado em treze (13) amostras retiradas aleatoriamente dos experimentos, sendo, 3 (três) amostras do processo MAG e 10 (dez) amostras do processo MAG-CW.

A superfície de cada amostra soldada inicialmente foi limpa e seca para que não houvesse a presença de contaminantes, pois, a ocorrência destes torna o ensaio não confiável. Sendo assim, em temperatura ambiente, o ensaio foi iniciado através da aplicação do líquido penetrante até formar um filme sobre a superfície da chapa de aço. Entretanto, para dar continuidade no ensaio foi determinado um tempo de 10 min, conforme a norma Petrobrás N-1596, para ocorrer o fenômeno da capilaridade e a completa penetração do líquido. Passado o tempo especificado, foi removido da superfície o excesso de líquido penetrante a fim de ser aplicado o filme uniforme de revelador, que consiste de um pó fino e branco. Logo em seguida, novamente foi dado um tempo de 10 min para que o líquido penetrante fosse absorvido pelas discontinuidades, revelando-as. Após a avaliação das indicações os resultados foram registrados em relatório. Em seguida, as amostras foram limpas para depois ser efetuado o corte individual em máquina específica. Assim sendo, a avaliação das indicações foi efetuada com a inspeção dos corpos de prova soldados através da técnica visual sobre as superfícies atacadas.

3.5.9 - Aspecto superficial do metal depositado

A análise do aspecto superficial do metal depositado tem por objetivo verificar a qualidade da superfície do cordão de solda, a qual depende das condições operacionais de soldagem estabelecidas. O aspecto superficial do metal depositado foi avaliado através da inspeção visual com base na regularidade geométrica do depósito, largura e altura do reforço ao longo do seu comprimento, além da presença de não-conformidades tais como, trincas, porosidade, respingos, mordeduras, deposição insuficiente, abertura de arco etc.

3.5.10 - Pacote operacional

O pacote operacional já estabelecido foi testado e avaliado quanto à estabilidade de arco em três níveis de velocidade de alimentação do arame-eletrodo do arame, conforme a Tabela 4.

A Tabela 4 apresenta o pacote operacional com os respectivos fatores e níveis contendo as condições de soldagem estudadas. Foi utilizado o projeto e análise de experimentos, em especial o planejamento fatorial com replicagem e os resultados foram processados estatisticamente pelo método de análise de variância (ANOVA) com o auxílio de um programa computacional comercial.

Tabela 4 – Apresentação do pacote operacional fatores/níveis para tensão na fonte de 32 V, DBCP= 17 mm, gás de proteção CO₂ puro e velocidade de soldagem V_s= 30cm/min.

FATOR \ NÍVEL	1			2			3			1			2			3		
PROCESSO DE SOLDAGEM	MAG						MAG-CW											
VAE	6		7,5		9		6			7,5			9					
VAF	--		--		--		3			4			5					
POSIÇÃO DE ALIMENTAÇÃO	--		--		--		TADDEM		TWIN		TADDEM		TWIN		TADDEM		TWIN	
SENTIDO DE SOLDAGEM	EMP	PUX	EMP	PUX	EMP	PUX	EMP	PUX	EMP	PUX	EMP	PUX	EMP	PUX	EMP	PUX	EMP	PUX

- ☞ VAE - Velocidade de Alimentação do Arame-eletrodo – (m/min);
- ☞ VAF – Velocidade de alimentação do arame frio – (m/min);
- ☞ Tandem / Twin – Posição de Alimentação do arame frio;
- ☞ Emp – Empurrando;
- ☞ Pux – Puxando.

A Tabela 5 apresenta o resumo do planejamento experimental referente aos ensaios executados.

Tabela 5 – Planejamento experimental dos ensaios

PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS	
Número de ensaios com o processo MAG	06
Número de réplicas	02
Sub-Total	12
Total de ensaios com o processo MAG-CW	12
Número de réplicas	2
Sub-Total	24
Total de ensaios a executar	36

4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 - Análise e resultados da estabilidade do arco

Neste capítulo apresentam-se os resultados referentes ao estudo da estabilidade do arco voltaico com base na metodologia descrita.

No processo MAG a transferência metálica é caracterizada por curtos-circuitos, onde a gota se forma na extremidade do eletrodo, se desenvolve em crescimento volumétrico e toca a poça de fusão em curtos intervalos de tempo e posteriormente se destaca.

Como o experimento inicial foi desenvolvido em condições normais de soldagem através do processo de soldagem MAG, verifica-se que utilizando corrente contínua, durante os curtos-circuitos ocorre a extinção do arco voltaico com tensão tendendo a zero e elevada intensidade de corrente. O acontecimento proporciona um aumento de temperatura na extremidade do arame-eletrodo, bem como, na poça de fusão e adjacências, garantindo a ionização do gás de proteção, tornando mais fácil a reabertura do arco voltaico, após a transferência da gota metálica.

A Tabela 6 apresenta os parâmetros de soldagem empregados nos experimentos, em todos os níveis estudados e os parâmetros obtidos, tais como:

I_m – Intensidade média de corrente de soldagem;

U_m – Tensão média de soldagem.

Tabela 6 – Apresentação dos parâmetros obtidos de Im e Vm

Processo de Soldagem	Posição de Alimentação	Sentido de Soldagem	VAE (m/min)	VAF (m/min)	DBCP (mm)	Parâmetros Obtidos	
						Im (A)	Um (V)
MAG	--	EMP	6	-	17	179,9	31,9
			7,5	-	17	209,9	31,9
			9	-	17	233,7	31,6
		PUX	6	-	17	180,2	31,9
			7,5	-	17	214,8	31,9
			9	-	17	236,1	31,8
MAG-CW	TANDEM	EMP	6	3	17	180,9	31,9
			7,5	4	17	219,3	31,8
			9	5	17	231,8	31,8
		PUX	6	3	17	183,8	31,8
			7,5	4	17	216,6	31,9
			9	5	17	243,8	31,9
MAG-CW	TWIN	EMP	6	3	17	191,4	31,9
			7,5	4	17	214,8	32,1
			9	5	17	258,1	31,9
		PUX	6	3	17	182,2	31,9
			7,5	4	17	227,3	31,9
			9	5	17	258,1	31,9

A análise de estabilidade do arco voltaico nos processos envolvidos na experiência foi realizada através dos oscilogramas de corrente e, principalmente, de tensão. Estes oscilogramas foram obtidos durante a execução das soldas experimentais iniciais para o processo MAG, com os resultados apresentados através da Figura 4.1 até a Figura 4.8, que mostram os gráficos de tempo x tensão de soldagem e tempo x corrente de soldagem para as velocidades de alimentação de arame-eletrodo VAE de 6 m/min, VAE de 7,5 m/min e VAE de 9 m/min e o processo MAG-CW para as velocidades de alimentação dos arames-eletrodos e do arame frio (VAF): VAE de 6 m/min para VAF de 3 m/min, VAE de 7,5 m/min para VAF de 4 m/min e VAE de 9 m/min para VAF de 5 m/min, respectivamente. Portanto, os referidos oscilogramas são característicos da transferência da gota por curto-circuito e indicam que não ocorreram perturbações significativas na transferência metálica havendo satisfatória estabilidade de arco, justificada pela regularidade no comportamento das curvas. Assim sendo, a transferência metálica, muito provavelmente, se caracterizou por curto-circuito e se manteve em todos os experimentos.

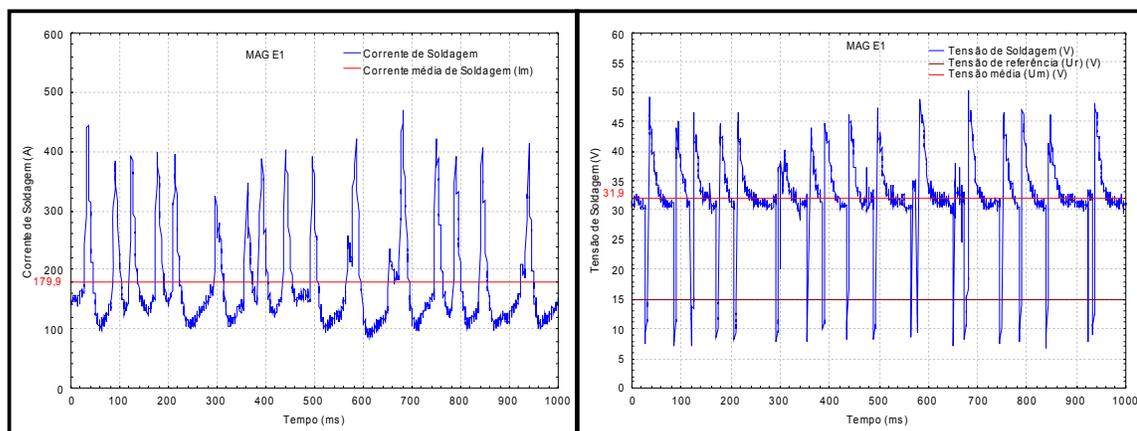


Figura 4.1 – Oscilogramas de corrente e tensão, Processo MAG para VAE= 6m/min e sentido de soldagem empurrando.

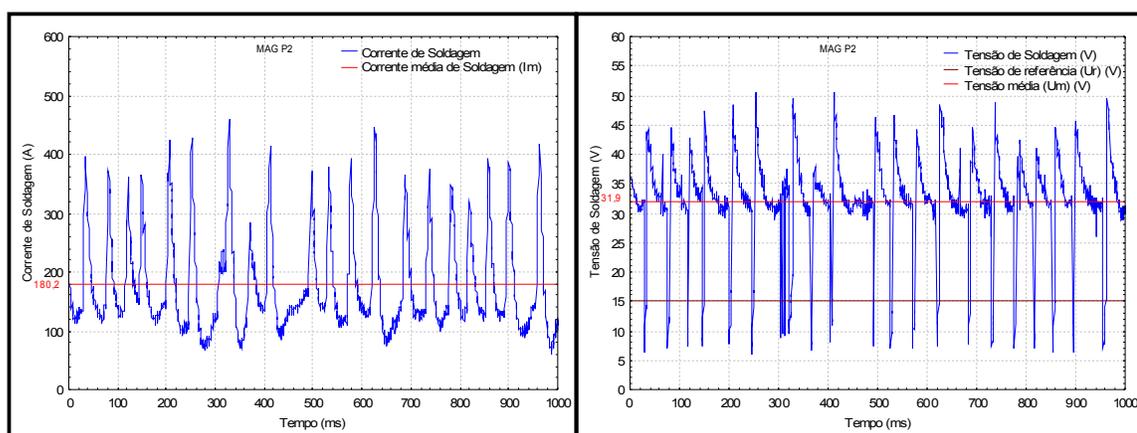


Figura 4.2 – Oscilogramas de corrente e tensão, Processo MAG para VAE= 6m/min e sentido de soldagem puxando.

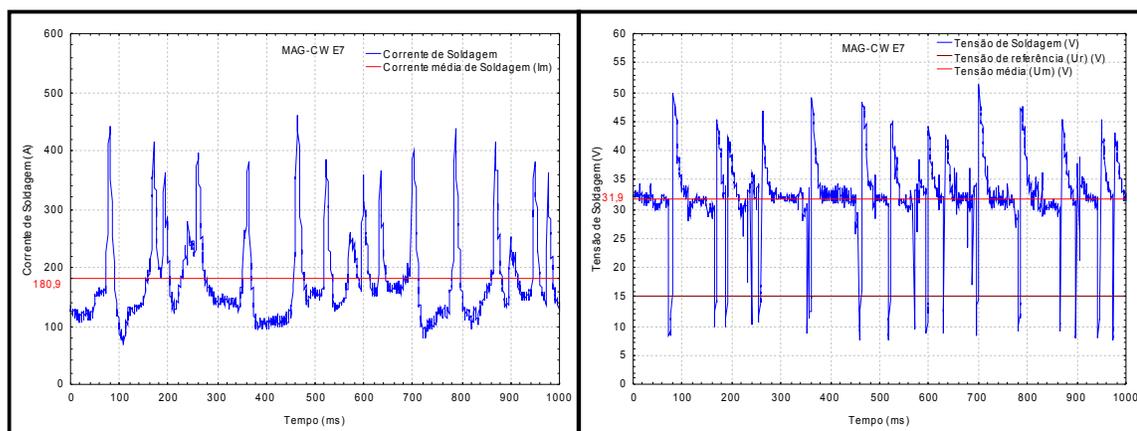


Figura 4.3 – Oscilogramas de corrente e tensão, Processo MAG-CW para VAE= 6 m/min e VAF= 3 m/min, sentido de soldagem empurrando e posição de alimentação do arame não energizado Tandem.

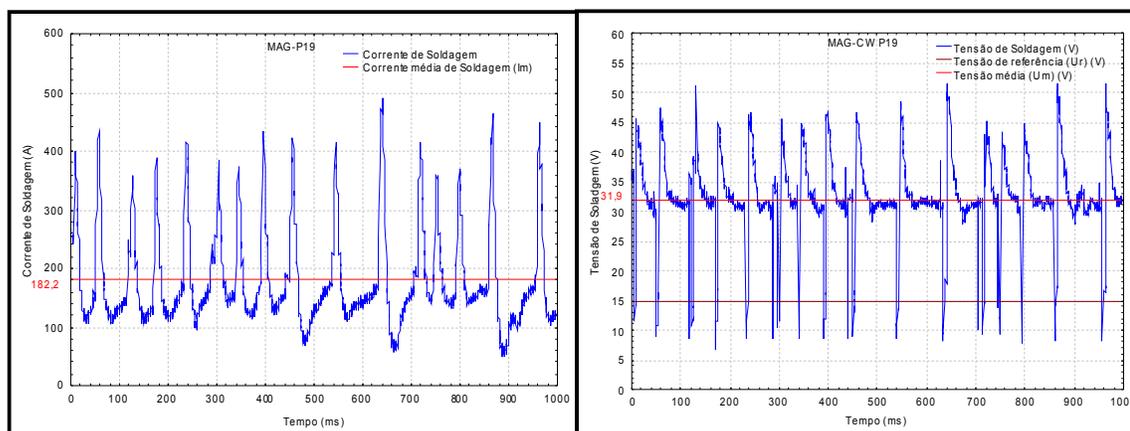


Figura 4.4 – Oscilogramas de corrente e tensão, Processo MAG-CW para VAE= 6 m/min, VAF= 3 m/min, sentido de soldagem puxando e posição do arame não energizado Twin.

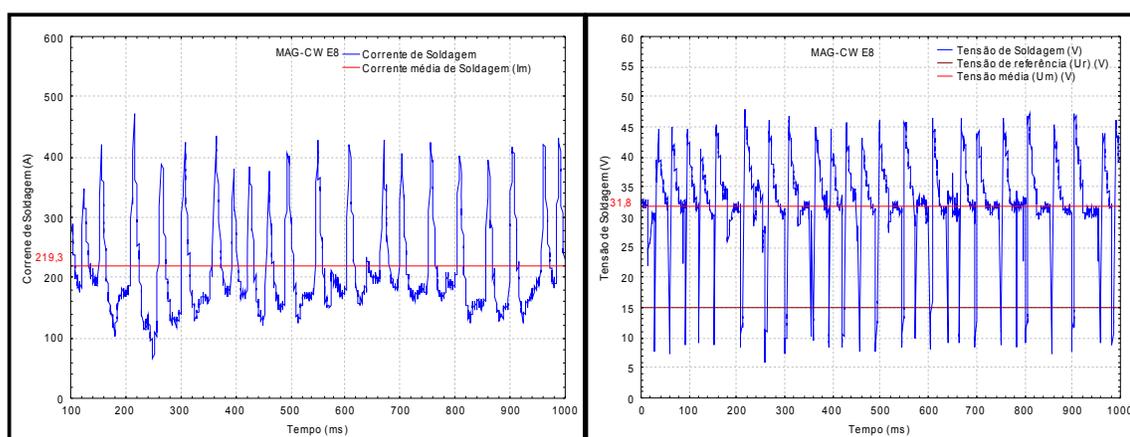


Figura 4.5 – Oscilogramas de corrente e tensão, Processo MAG-CW para VAE = 7,5 m/min e VAF= 4 m/min, sentido de soldagem empurrando e posição de alimentação do arame não energizado Tandem.

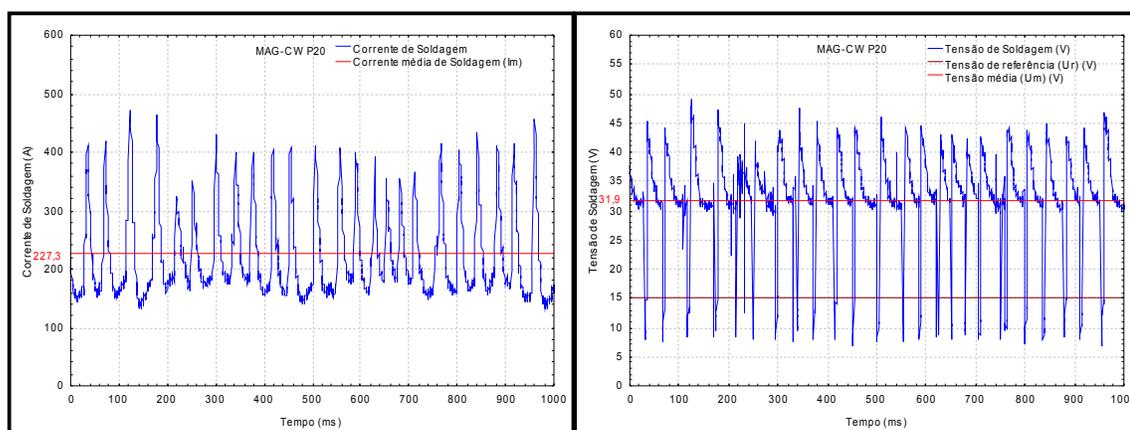


Figura 4.6 – Oscilogramas de corrente e tensão, Processo MAG-CW para VAE= 7,5 m/min, VAF= 4 m/min, sentido de soldagem puxando e posição do arame não energizado Twin.

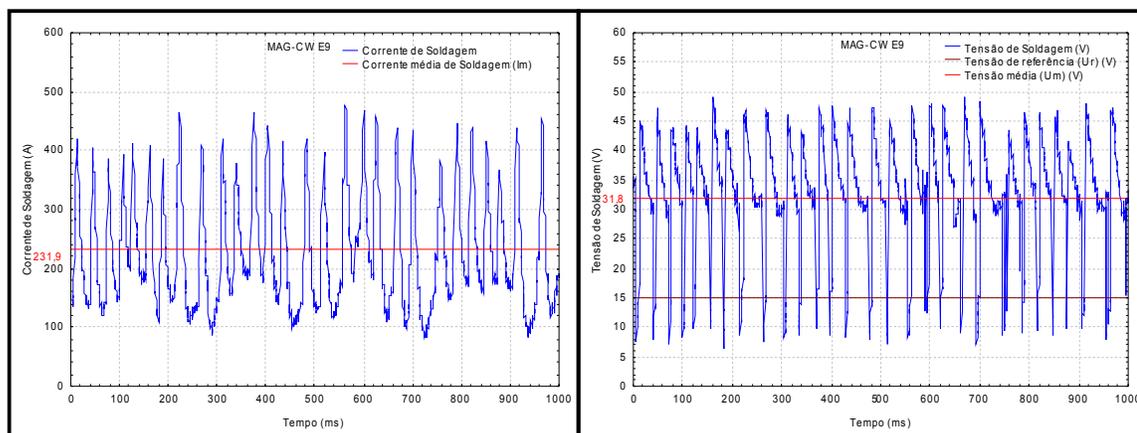


Figura 4.7 – Oscilogramas de corrente e tensão, Processo MAG-CW para VAE = 9 m/min e VAF= 5 m/min, sentido de soldagem empurrando e posição de alimentação do arame não energizado Tandem.

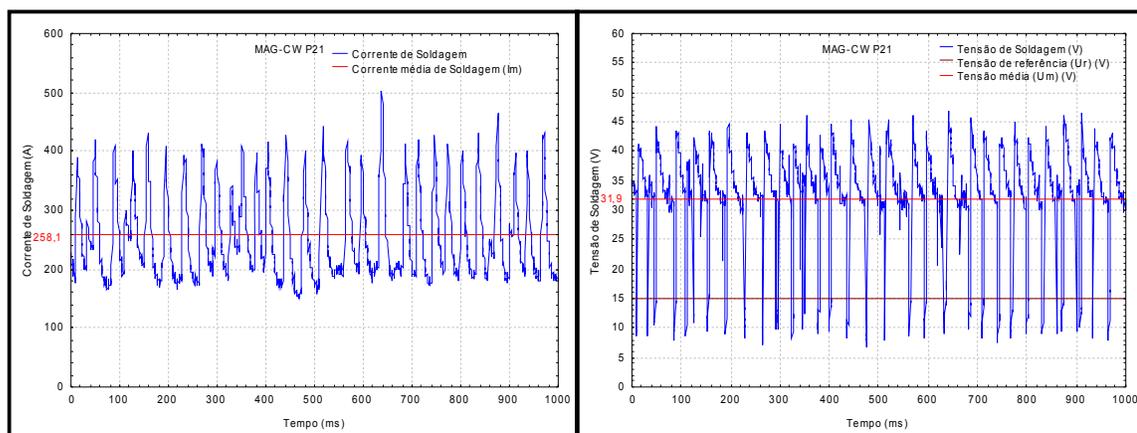


Figura 4.8 – Oscilogramas de corrente e tensão, Processo MAG-CW para VAE = 9 m/min, VAF= 5 m/min, sentido de soldagem puxando e posição do arame não energizado Twin.

Observa-se através dos oscilogramas de tensão das Figuras 4.2 a 4.8, registrados para os processos MAG e MAG-CW, que com a introdução do arame frio e o aumento das velocidades dos arames, ocorreu aumento da intensidade de corrente média (I_m). Verifica-se ainda, que o comportamento do arco elétrico na soldagem MAG-CW não foi alterado de forma significativa pela adição do arame frio ao processo MAG. Neste sentido, nota-se que os valores médios da corrente variaram e da tensão de soldagem foram mantidos praticamente constantes para as mesmas velocidades de arames em ambos os processos de soldagem apresentando regularidade na transferência metálica, não havendo perturbações significativas para todas as velocidades de arames capazes de alterar a estabilidade do arco pela injeção de arame frio ao processo.

4.1.1 - Tempo de curto-circuito através dos histogramas

As Figuras 4.9 a 4.14 mostram os histogramas de tempo médio de curto-circuito x frequência de curto-circuito com transferência da gota metálica ou não para o processo MAG e as Figuras 4.15 a 4.20 para o processo MAG-CW. A análise e comparação dos histogramas mostra que o maior número de ocorrências se deu no intervalo de tempo entre 1 ms e 3 ms. Deste modo, justificam-se os critérios adotados segundo a metodologia, onde se verificou que muito provavelmente a característica do processo foi por curto-circuito com ocorrência em todos os eventos e transferência metálica somente para o tempo $t \geq 1$ ms, considerando-se quanto maior a duração do curto-circuito, maior é a probabilidade de haver transferência metálica, pois para valores de tempo inferiores a 1 ms presume-se que não ocorre a transferência de metal, por serem curtos-circuitos com tão pouca duração.

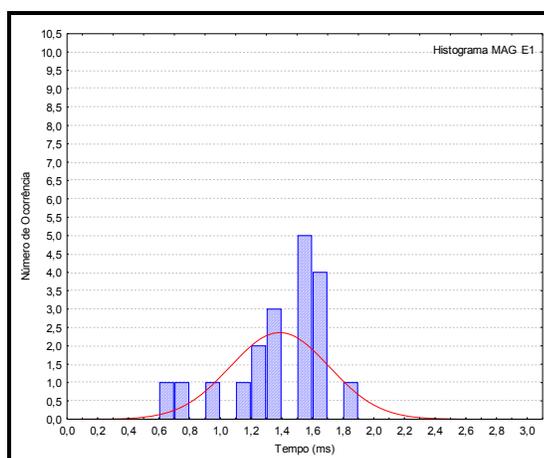


Figura 4.9 – Histograma: Tempo x frequência de curto-circuito com transferência da gota metálica. VAE 6 m/min; Soldagem empurrando.

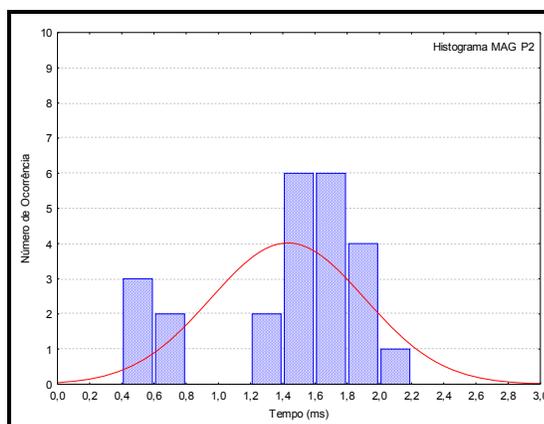


Figura 4.10 – Histograma: Tempo x frequência de curto-circuito com transferência da gota metálica. VAE 6 m/min; Soldagem puxando.

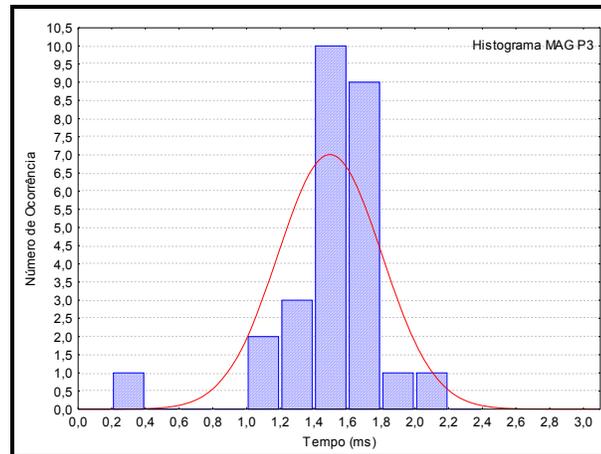


Figura 4.11 – Histograma: Tempo x freqüência de curto-circuito com transferência da gota metálica. VAE 7,5 m/min; Soldagem puxando.

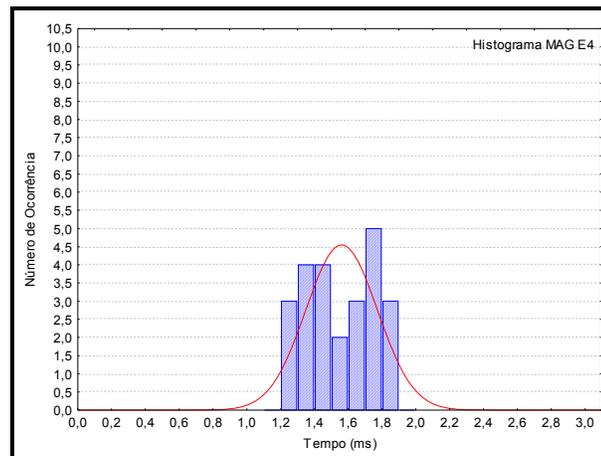


Figura 4.12 – Histograma: Tempo x freqüência de curto-circuito com transferência da gota metálica. VAE 7,5 m/min; Soldagem empurrando.

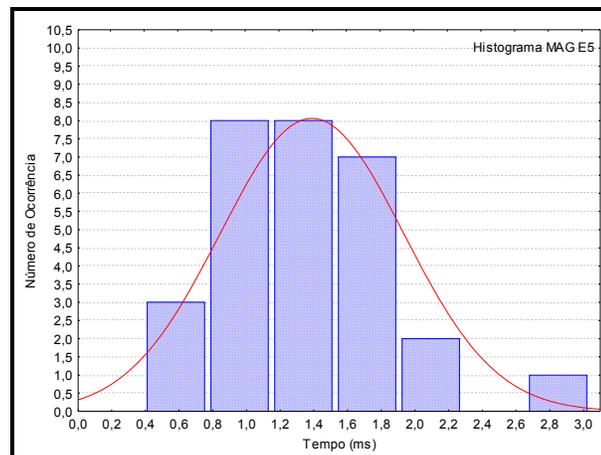


Figura 4.13 – Histograma: Tempo x freqüência de curto-circuito com transferência da gota metálica. VAE 9 m/min; Soldagem empurrando.

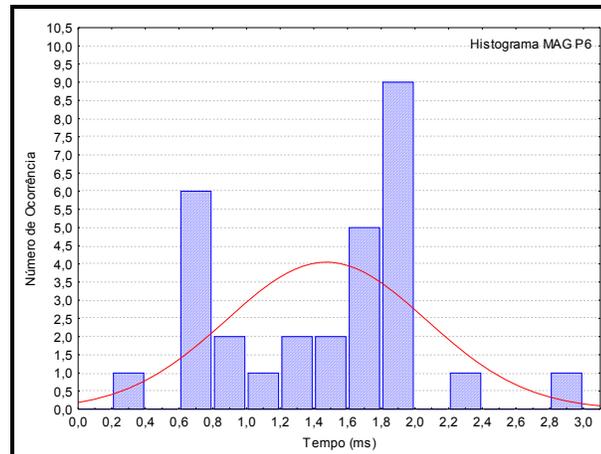


Figura 4.14 – Histograma: Tempo x frequência de curto-circuito com transferência da gota metálica. VAE 9 m/min; Soldagem puxando.

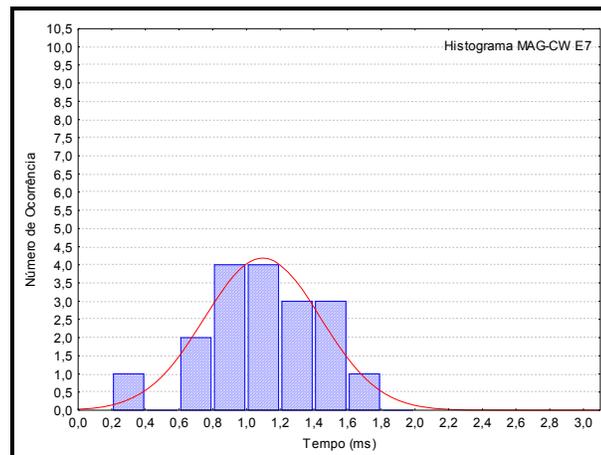


Figura 4.15 – Histograma: Tempo x frequência de curto-circuito com transferência da gota metálica. VAE-VAF (6-3) m/min; Soldagem empurrando; Tandem.

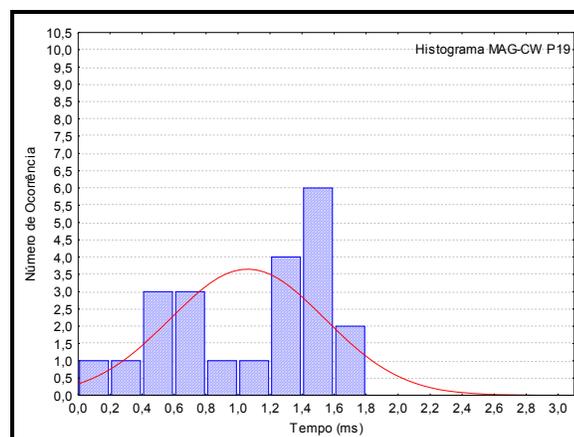


Figura 4.16 – Histograma: Tempo x frequência de curto-circuito com transferência da gota metálica. VAE-VAF (6-3) m/min; Soldagem puxando; Twin.

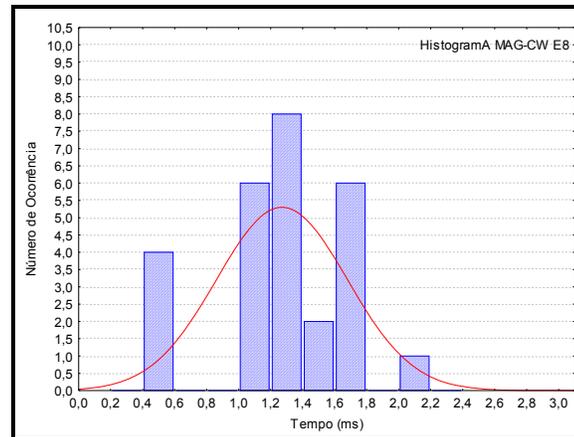


Figura 4.17 – Histograma: Tempo x frequência de curto-circuito com transferência da gota metálica. VAE-VAF (7,5-4) m/min; Soldagem empurrando; Tandem.

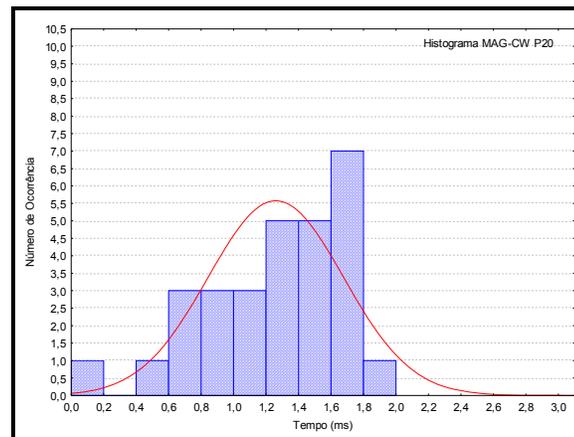


Figura 4.18 – Histograma: Tempo x frequência de curto-circuito com transferência da gota metálica. VAE-VAF (7,5-4) m/min; Soldagem puxando; Twin.

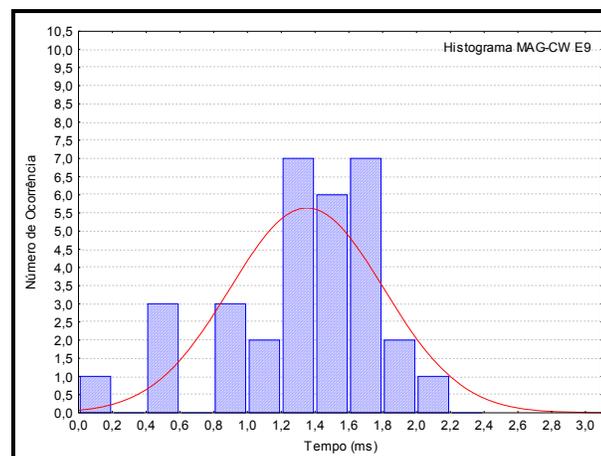


Figura 4.19 – Histograma: Tempo x frequência de curto-circuito com transferência da gota metálica. VAE-VAF (9-5) m/min; Soldagem empurrando; Tandem.

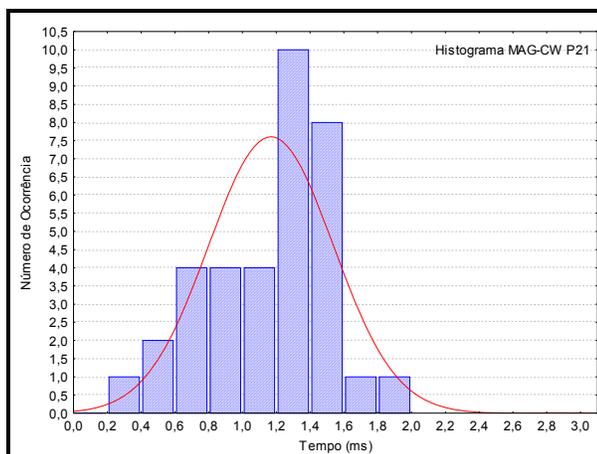


Figura 4.20 – Histograma: Tempo x frequência de curto-circuito com transferência da gota metálica. VAE-VAF (9-5) m/min; Soldagem puxando; Twin.

A Tabela 7 apresenta os valores das médias dos tempos de curtos-circuitos, bem como, as médias da frequência do número total de ocorrências de curtos-circuitos com transferências metálicas obtidas a partir dos histogramas mostrados anteriormente para todos os experimentos. Observa-se por esta tabela, que o menor número de ocorrência de curtos-circuitos, com 5 eventos, ocorreu para o tempo médio de 1,6 ms, no processo MAG soldagem empurrando para VAE 6 m/min. Entretanto, o maior número de ocorrência de curtos-circuitos, com 10 eventos, ocorreu para o tempo médio de 1,6 ms, no processo MAG soldagem puxando para VAE 7,5 m/min. Em seguida, o menor número de observações de curtos-circuitos, com 4 eventos para $t = 1$ ms no processo MAG-CW, soldagem empurrando, tandem com VAE-VAF (6-3) m/min e o maior com 10 eventos para tempo médio de 1,4 ms no processo MAG-CW, soldagem puxando, twin e VAE-VAF (9-5) m/min.

Tabela 7 – Dados da estabilidade do arco referentes à transferência metálica.

Processo de Soldagem	Posição de Alimentação	Sentido de Soldagem	VAE (m/min)	VAF (m/min)	Tempo (ms)	Ocorrência (nº.)
MAG	---	EMP	6	-	1,6	5
			7,5	-	1,8	5
			9	-	1,1	8
		PUX	6	-	1,6	6
			7,5	-	1,6	10
			9	-	2,0	9
MAG-CW	TANDEM	EMP	6	3	1,0	4
			7,5	4	1,4	8
			9	5	1,4	7
		PUX	6	3	1,2	8
			7,5	4	1,2	8
			9	5	1,2	6
	TWIN	EMP	6	3	1,2	5
			7,5	4	1,4	9
			9	5	1,3	8
		PUX	6	3	1,6	8
			7,5	4	1,8	7
			9	5	1,4	10

Finalmente, comparando os valores da Tabelas 7 entre o processo de soldagem MAG empurrando ou puxando com os do processo MAG-CW tandem ou twin e empurrando ou puxando, observa-se que foram praticamente constantes, ou seja, constatou-se que houve uma diminuição no tempo de curto-circuito e crescimento na frequência de ocorrência de curto-circuito com transferência metálica, porém, sem variações significativas.

4.2 - Análise e Resultados das características econômicas

A análise das características econômicas dos processos de soldagem e os respectivos resultados obtidos para as condições estabelecidas são apresentados nesta seção.

O desempenho das características econômicas foi calculado utilizando as equações 8, 9 e 10 para o processo MAG, e as equações 10, 11 e 12 com o uso do processo MAG-CW.

A Tabela 8 mostra os resultados do estudo das características econômicas referentes aos valores médios da taxa de fusão (TF), taxa de deposição (TD) e do rendimento (R) para os experimentos efetuados através dos processos de

soldagem aqui estudados. Entretanto, para uma melhor visualização, os resultados da Tabela 8 são apresentados de maneira gráfica nas Figuras 4.21 a 4.23 facilitando a percepção da aplicação como resultado prático dos parâmetros operacionais.

Tabela 8 – Resultados das características econômicas para os ensaios experimentais realizados com a soldagem MAG e MAG-CW.

Processo de Soldagem	Posição de Alimentação	Sentido de Soldagem	VAE (m/min)	VAF (m/min)	Características Econômicas				
					TF kg/h	TD kg/h	R %		
MAG	---	EMP	6	-	3,07	2,96	96,43		
			7,5	-	3,77	3,63	96,09		
			9	-	4,75	4,56	96,07		
		PUX	6	-	3,05	2,91	95,20		
			7,5	-	3,89	3,77	96,67		
			9	-	4,67	4,40	94,21		
		MAG-CW	TANDEM	EMP	6	3	4,79	4,69	97,95
					7,5	4	5,98	5,91	98,83
					9	5	6,68	6,43	96,15
PUX	6			3	4,79	4,78	99,87		
	7,5			4	6,13	6,11	99,67		
	9			5	7,39	7,28	98,50		
TWIN	EMP		6	3	4,75	4,70	98,94		
			7,5	4	5,95	5,80	97,52		
			9	5	7,56	7,55	99,85		
PUX	6	3	4,92	4,91	99,88				
	7,5	4	6,23	6,17	98,94				
	9	5	7,11	6,89	96,76				

Observa-se que os dados da Tabela 8 mostram o aumento das taxas de fusão e de deposição com o aumento da VAE e da VAF e isto pode ser confirmado através da análise da Tabela 9 onde se comprova o efeito expressivo dos parâmetros variáveis sobre estas taxas. Entretanto, justificam-se os valores obtidos para as taxas de fusão e de deposição e o rendimento no processo MAG-CW, quando os resultados experimentais são comparados entre os processos de soldagem MAG e MAG-CW.

Para o estudo de confiabilidade dos resultados obtidos na Tabela 8 foi realizado a análise de variância – ANOVA, para verificar a influência e as interações do comportamento da VAE, bem como, dos processos de soldagem MAG e MAG-CW sobre as respostas.

Na Tabela 9 são apresentados os resultados da análise de variância – ANOVA. Considerando que o nível de significância foi de 5%, observa-se por esta

tabela, a influência dos processos MAG e MAG-CW sobre a VAE (6–7,5–9) m/min, obtendo-se como resposta as variáveis TF, TD e R.

Tabela 9 – Dados da ANOVA. Características Econômicas para três níveis de velocidade. Relação entre os Processos de Soldagem/VAE e VAE/Processos de Soldagem. Fator $\alpha= 5\%$.

Níveis VAE	Fator	TF		TD		R	
		F	p (%)	F	p (%)	F	p (%)
6	Processos	1035,5000	0,00	560,2600	0,00	18,1240	1,31
7,5	Processos	444,4600	0,00	289,9800	0,01	11,5260	2,74
9	Processos	73,0020	0,10	48,3260	0,23	3,7153	12,62

Níveis Processo	Fator	TF		TD		R	
		F	p (%)	F	p (%)	F	p (%)
MAG	VAE	389,4200	0,02	149,3300	0,10	0,8678	50,42
MAG - CW	VAE	98,7790	0,00	55,9340	0,00	1,2672	32,74

Obs.: p – Índice de Significância para um α de 5%

Verifica-se na Tabela 9 que a taxa de fusão (TF) e taxa de deposição (TD) foram afetadas significativamente pela variação do processo, para todos os níveis de VAE estudados, obtendo-se valores, muito próximos de zero (0,0%), para o nível de significância (α).

É observado também na Tabela 9, que os processos afetaram os rendimentos em dois níveis de velocidades: VAE de 6 m/min para $\alpha= 1,31\%$ e VAE de 7,5 m/min para $\alpha= 2,74\%$. Para VAE de 9 m/min não houve efeito significativo do processo sobre o rendimento.

Continuando a análise dos dados da Tabela 9 e passando-se a estudar a Influência das VAE (sobre os processos de soldagem), constatou-se que a velocidade VAE afetou as taxas de fusão e de deposição para todos os processos empregados, tais como: TF no processo MAG ($\alpha= 0,02\%$), TD no processo MAG ($\alpha= 0,10\%$) e do mesmo modo para TF no processo MAG-CW ($\alpha= 0,00\%$) e TD no processo MAG-CW ($\alpha= 0,00\%$), enquanto para o desempenho econômico do rendimento de deposição não se observa nenhum efeito da VAE sobre os processos utilizados.

Para uma melhor visualização dos resultados apresentados na Tabela 9 foram construídos gráficos, os quais são mostrados através das Figuras 4.21 e 4.22 que apresentam a influência da variação de VAE e do tipo de processo de soldagem sobre as taxas de fusão e de deposição do arame, respectivamente.

A Figura 4.21 ilustra o comportamento do resultado do estudo da variação da velocidade de alimentação do arame-eletrodo (VAE) sobre a taxa de fusão (TF).

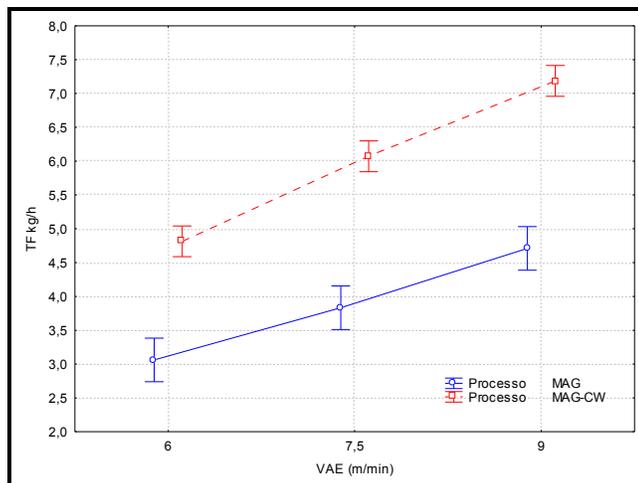


Figura 4.21 – Efeito da VAE sobre a taxa de fusão (TF) para os processos de soldagem MAG e MAG-CW ensaiados.

Da análise da Figura 4.21 e da Tabela 8 observa-se que mantendo constante a VAE entre os processos MAG e MAG-CW a taxa de fusão aumentou. Para a VAE de 6 m/min ocorreu um aumento médio da taxa de fusão de 57,3% no MAG-CW, para a VAE de 7,5 m/min ocorreu um aumento médio da taxa de fusão de 58,6% e para a VAE de 9 m/min a taxa de fusão aumentou em 52,5% no processo MAG-CW.

Considerando-se a variação entre as VAE, na Figura 4.21, para um mesmo processo, observa-se, para o processo MAG, aumento médio na taxa de fusão de 25,2% para a variação de VAE na condição igual a 6 m/min para VAE na condição de 7,5 m/min e de 23,1% quando da variação de VAE igual a 7,5 m/min para a VAE igual a 9 m/min, ou seja, totalizando um aumento médio, nesta taxa, para a variação de VAE igual a 6 m/min até VAE igual a 9 m/min de 53,9%. Entretanto, para o processo MAG-CW o aumento médio da taxa de fusão foi de 26,2% quando da variação da condição VAE igual a 6 m/min para a condição VAE igual a 7,5 m/min e de 18,3% quando da variação de VAE igual a 7,5 m/min para VAE igual a 9 m/min, tendo aumento médio total de 49,3%.

A seguir, apresenta-se a Figura 4.22 e considerando a influência entre os processos de soldagem, para uma mesma VAE, observa-se aumento médio da taxa

de deposição, quando da utilização da VAE de 6 m/min de 62,5%, da VAE de 7,5 m/min de 62,4% e da VAE de 9 m/min de 57,1% no processo MAG-CW.

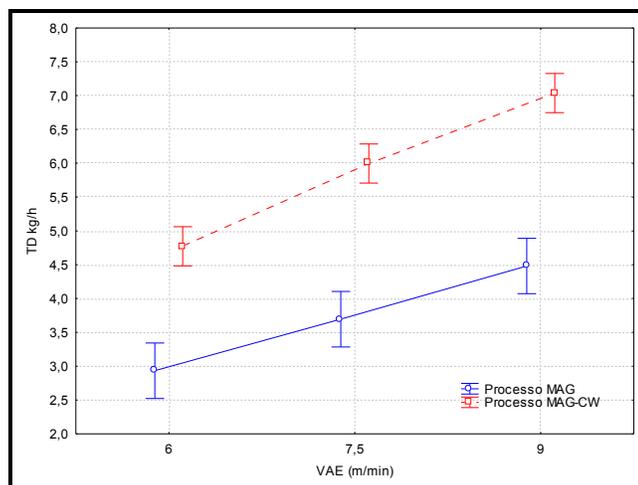


Figura 4.22 – Efeito da VAE sobre a taxa de deposição (TD) para os processos de soldagem MAG e MAG-CW ensaiados.

Considerando-se a variação entre a VAE, na Figura 4.22, para um mesmo processo, verifica-se, para o processo MAG, aumento médio na taxa de deposição de 26,1% quando da variação da condição VAE 6 m/min para VAE na condição de 7,5 m/min e de 21,1% na condição VAE 7,5 m/min para a condição VAE 9 m/min, ou seja, totalizando um ganho nesta taxa de 52,6%. Entretanto, para o processo MAG-CW o aumento da taxa de deposição foi de 25,7% quando da variação da condição VAE 6 m/min para a condição VAE 7,5 m/min e de 17,3% quando da variação de VAE 7,5 m/min para VAE 9 m/min, tendo aumento total de 47,5%.

Percebe-se ainda, pela análise da Figura 4.22 e da Tabela 8, que o processo MAG mesmo na condição mais extrema, para VAE de 9 m/min com a média dos valores da taxa de deposição (TD) em 4,48 kg/h não superou nenhuma produção do processo MAG-CW, mesmo na menor condição para VAE-VAF (6-3) m/min, onde a média de todos os valores, para a VAE citada, da taxa de deposição foi de 4,77 kg/h, demonstrando aumento médio em torno de 6,5%.

A boa performance na elevação das taxas obtidas pelo processo MAG-CW demonstra a superioridade e observa-se que a maior evidência no desempenho destas características econômicas ocorreu em função da adição de arame frio ao arco voltaico contribuindo na evolução da quantidade de massa fundida dos arames que foi efetivamente incorporada ao metal de solda por unidade de tempo.

A seguir, a Figura 4.23 apresenta de maneira gráfica a influência do tipo de processo de soldagem empregado e a variação da VAE sobre o rendimento de deposição real. e observa-se que mudando o processo de soldagem MAG para o MAG-CW e mantendo-se constante a VAE houve uma elevação nos valores médios de rendimento em torno de 3,5% para VAE 6 m/min; 2,4%, para a VAE 7,5 m/min, conforme a análise dos dados da ANOVA.

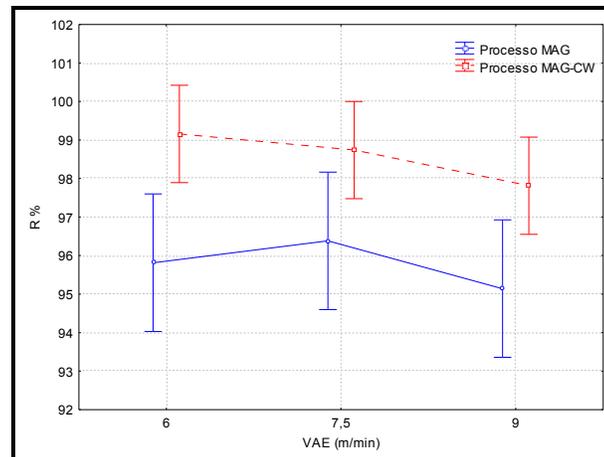


Figura 4.23 – Efeito da VAE sobre o Rendimento de deposição (R) para os processos de soldagem ensaiados.

A interpretação gráfica realizada acima demonstra a superioridade do processo de soldagem MAG-CW sobre o processo MAG indicando que a produção alcançada está associada à estabilidade do arco, conforme dados dos oscilogramas de corrente e de tensão, dos histogramas de ocorrências e da boa condição operacional.

4.3 - Análise e Resultados das características geométricas

A análise das características geométricas do metal depositado pelos processos de soldagem para as condições estabelecidas é apresentada nesta seção.

A Tabela 10 mostra os resultados do desempenho das características geométricas e são referentes aos efeitos da VAE e da VAF sobre a penetração (p_e), o reforço (r), a largura (b) e a diluição (d) no metal de solda. Na Tabela 11 indicam-se os dados da análise de variância – ANOVA, relativos aos resultados alcançados nos ensaios. Entretanto, para uma melhor visualização, os resultados da Tabela 10

são apresentados de maneira gráfica nas Figuras 66 a 68 facilitando a percepção da aplicação como resultado prático dos parâmetros operacionais.

Tabela 10 – Resultados das características geométricas para os ensaios experimentais realizados com a soldagem MAG e MAG-CW.

Processo de Soldagem	Posição de Alimentação	Sentido de Soldagem	VAE (m/min)	VAF (m/min)	CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS			
					Penetração (pe) mm	Reforço (r) mm	Largura (b) mm	Diluição (d) %
MAG	---	EMP	6	--	2,10	2,75	11,60	36,83
			7,5	--	2,86	3,42	12,16	40,75
			9	--	2,93	4,10	11,89	33,58
		PUX	6	--	2,59	3,61	9,78	40,54
			7,5	--	2,92	4,28	9,65	36,62
			9	--	3,22	4,45	9,78	35,38
MAG-CW	TANDEM	EMP	6	3	1,11	3,89	11,23	31,57
			7,5	4	1,38	4,43	13,49	24,16
			9	5	1,37	4,85	13,49	13,01
		PUX	6	3	1,44	4,27	10,84	18,94
			7,5	4	1,79	4,72	11,00	18,72
			9	5	2,46	5,78	11,06	19,83
MAG-CW	TWIN	EMP	6	3	1,23	4,23	11,36	18,86
			7,5	4	1,43	4,64	11,42	16,22
			9	5	1,98	5,18	11,00	19,88
		PUX	6	3	1,54	4,35	11,15	19,25
			7,5	4	1,71	4,52	11,09	19,56
			9	5	2,25	5,09	11,00	21,01

Os dados da Tabela 10 mostram que com o aumento da VAE houve crescimento para a penetração em ambos os processos, isto pode ser confirmado pela análise da Tabela 11 onde se comprova o efeito expressivo dos parâmetros de entrada com suas respectivas respostas. Entretanto, quando são comparados os resultados experimentais da variável de resposta penetração entre os processos de soldagem MAG e MAG-CW, observa-se que a penetração foi inferior em todos os níveis.

Para o estudo de confiabilidade dos resultados obtidos na Tabela 10 foi realizado a análise de variância – ANOVA, para verificar a influência e interações da VAE, bem como, dos processos de soldagem MAG e MAG-CW sobre o desempenho geométrico do metal depositado.

Na Tabela 11 são apresentados os resultados da análise de variância – ANOVA, para os três níveis de VAE e para os dois níveis dos processos de soldagem aplicados.

Tabela 11 – Dados da ANOVA. Características geométricas.
Relação entre o processo de soldagem e VAE. Fator $\alpha = 5\%$.

Níveis		pe		r		b		d	
VAE	Fator	F	p (%)	F	p (%)	F	p (%)	F	p (%)
6	Processos	23,6470	0,83	10,8280	3,02	0,6055	48,00	11,6320	2,70
7,5	Processos	74,2530	0,10	6,6897	6,09	0,5228	50,97	46,4970	0,24
9	Processos	8,4983	4,35	9,0715	3,95	0,5008	51,82	32,9200	0,46

Níveis		pe		r		b		d	
Processo	Fator	F	p (%)	F	p (%)	F	p (%)	F	p (%)
MAG	VAE	5,2724	10,42	2,2833	24,97	0,0103	98,98	2,0763	27,16
MAG - CW	VAE	4,8235	3,77	15,5480	0,12	0,4226	66,77	0,6763	53,25

Obs.: p – Índice de Significância para um α em %

Conforme dados da ANOVA Tabela 11, observa-se que a penetração foi afetada significativamente pelos processos, para todos os níveis de velocidades estudadas: VAE de 6 m/min para $\alpha = 0,83\%$, VAE de 7,5 m/min para $\alpha = 0,10\%$ e para VAE de 9 m/min $\alpha = 4,35\%$. No entanto, a penetração foi afetada significativamente pela VAE, apenas para o processo MAG-CW para $\alpha = 3,77\%$.

Conforme visto na Tabela 11, o reforço foi significativamente afetado pelo processo para dois níveis de velocidades: VAE de 6 m/min para $\alpha = 3,02\%$ e VAE de 9 m/min para $\alpha = 3,95\%$. Entretanto, para VAE de 7,5 m/min não houve efeito significativo do processo sobre o reforço. Porém, o reforço foi afetado pela VAE, apenas para o processo MAG-CW para $\alpha = 0,12\%$, conforme dados da ANOVA.

Observa-se, também, através da Tabela 11, que a largura não foi afetada significativamente em nenhum dos níveis, tanto para VAE como para processos.

A diluição foi significativamente afetada pelos processos de soldagem para todos os níveis de velocidade: VAE de 6 m/min para $\alpha = 2,70\%$, VAE de 7,5 m/min para $\alpha = 0,24\%$ e VAE de 9 m/min para $\alpha = 0,46\%$. No entanto, para a diluição não se observa nenhum efeito da VAE para os processos de soldagem empregados.

A seguir é realizada a interpretação gráfica da Figura 4.24. Para os processos de soldagem MAG e MAG-CW, com o aumento da velocidade (VAE), constatou-se que houve um crescimento na penetração, porém estatisticamente não foi significativo para o processo MAG. Já para o processo MAG-CW, constatou-se que houve um crescimento significativo na penetração, ou seja, da VAE 6 m/min para a VAE 9 m/min o aumento médio na penetração foi de 51,5%, conforme análise da Tabela 11.

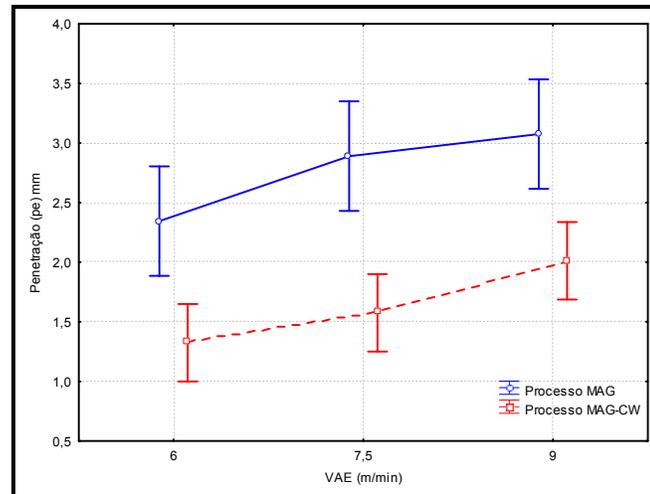


Figura 4.24 – Efeito das VAE e dos Processos de Soldagem sobre a Penetração.

Do mesmo modo e considerando, ainda, a Figura 4.24, observou-se que mudando o processo de soldagem MAG para o processo MAG-CW e mantendo constante a VAE verificou-se uma diminuição na penetração para a VAE 6 m/min de 43,3%, para a VAE 7,5 m/min de 45,4% e para VAE de 9 m/min um decréscimo médio na penetração de 34,5%. Entretanto, este fato deve-se, muito provavelmente, pela adição de arame não energizado ao sistema provocando abaixamento de temperatura na poça de fusão.

A análise a seguir foi realizada para a Figura 4.25 considerando a influência do processo de soldagem sobre o reforço do cordão de solda. Para uma mesma VAE, observou-se aumento médio do reforço quando da utilização da VAE igual a 6 m/min de 31,6%, VAE 7,5 m/min houve um crescimento, porém, estatisticamente não foi significativo e de VAE 9 m/min de 22,2%.

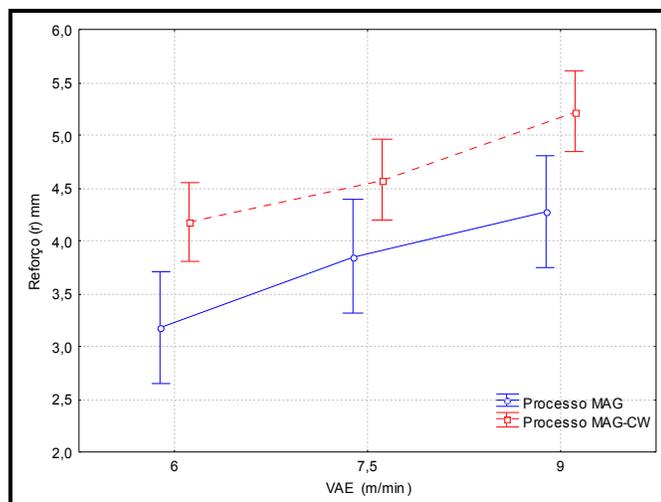


Figura 4.25 – Efeito da VAE e dos Processos de Soldagem sobre o Reforço do cordão de solda.

Considerando-se a variação entre as velocidades estudadas (VAE), na Figura 4.25, observou-se a influência da VAE sobre o reforço do cordão de solda. Para o mesmo processo e com variação da VAE, constatou-se que houve um crescimento no reforço, porém estatisticamente não foi significativo para o processo MAG, conforme dados da ANOVA. Entretanto, para o processo MAG-CW o aumento médio do reforço do cordão de solda foi de 9,4% quando da variação da VAE de 6 m/min para 7,5 m/min e de 14,1% quando da variação da VAE de 7,5 m/min para 9 m/min, tendo aumento médio total de 24,9% quando da variação VAE de 6 m/min para VAE de 9 m/min.

A Figura 4.26 apresenta os efeitos dos processos de soldagem e da VAE sobre a largura do cordão de solda, para os três níveis de VAE e para os dois níveis de processo. Assim sendo, percebe-se propensão de crescimento da largura do cordão com a mudança do processo de soldagem e de VAE, porém a análise de variância da Tabela 11 mostra que a largura não foi afetada pelos processos ou pela VAE, em nenhum dos níveis.

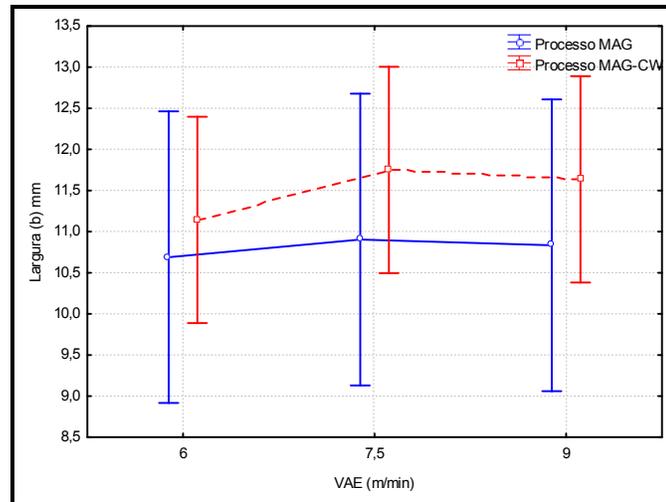


Figura 4.26 – Efeito da VAE sobre a largura do cordão de solda.

A Figura 4.27 indica os efeitos dos processos de soldagem e da VAE sobre a variável de resposta diluição na poça de fusão, para os três níveis de VAE e os dois níveis de processo. Entretanto, distingue-se que a mudança do processo de soldagem exerceu influência significativa sobre a diluição, tendendo para um decréscimo médio quando se mudou o processo de soldagem MAG para o MAG-CW, nos três níveis de VAE, conforme dados da ANOVA.

A análise a seguir foi realizada para a Figura 4.27 considerando a influência do processo de soldagem sobre a diluição, para uma mesma VAE. Observa-se a diminuição média de -42,7% quando da utilização da VAE igual a 6 m/min, de -49,2% para VAE igual a 7,5 m/min e de -46,5% para a VAE igual a 9 m/min.

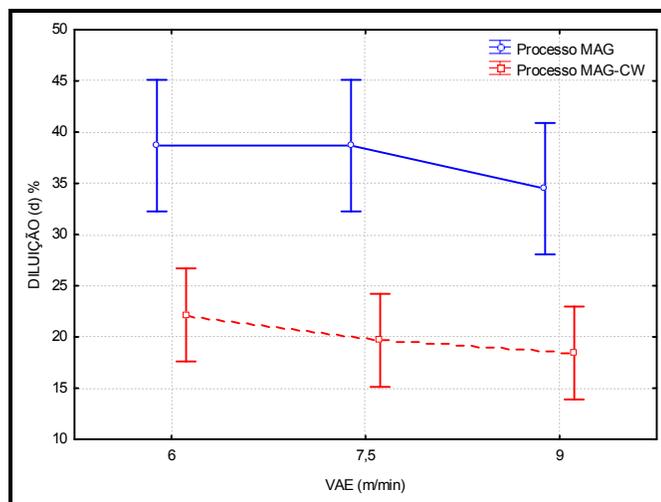


Figura 4.27 – Efeito das VAE e dos Processos de Soldagem sobre a diluição

A análise de variância da Tabela 9 indica que a diluição foi afetada estatisticamente pelo fator processo de soldagem, enquanto não se observa nenhuma variação significativa quando a VAE foi fator.

A Figura 4.28 apresenta o cordão de solda depositado pelo processo MAG-CW, posição de alimentação do arame frio tandem, sentido empurrando para VAE-VAF (7,5-4) m/min destacando as áreas do reforço e da penetração.

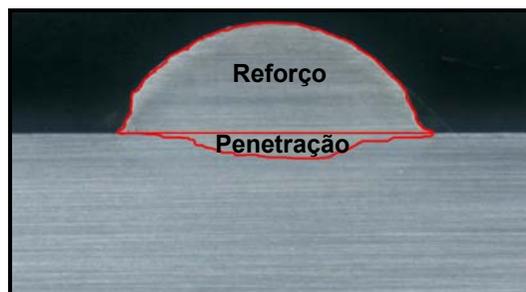


Figura 4.28 – Cordão de solda destacando áreas do reforço e penetração.

4.4 - Análise do aspecto superficial do cordão de solda

Esta seção é responsável pela análise do aspecto superficial do cordão de solda e as amostras soldadas foram obtidas após o desenvolvimento experimental, ensaiadas com os processos de soldagem MAG e MAG-CW.

O aspecto superficial do cordão de solda foi inspecionado pelo exame visual *in loco*, envolvendo aspectos da salpicagem, de trincas, de mordeduras, da incidência de porosidade etc.

É pertinente citar alguns aspectos dos cordões de solda:

- ☞ Na soldagem pelo processo MAG-CW houve salpicagem grosseira em pequenas quantidades em número reduzido de amostras;
- ☞ A energia gerada foi suficiente para produzir cordões de solda sem a presença de mordeduras, trincas e porosidades em todos os ensaios executados;
- ☞ Todos os cordões apresentaram regularidade geométrica e se mantiveram uniformes ao longo de todo o comprimento.

O aspecto superficial do metal depositado para revestimentos deve ser dado especial atenção, pois um processo posterior de acabamento e retificação eleva o tempo de manutenção e gera custos (Barra, 1998).

As Figuras 4.29 a 4.34 apresentam o aspecto superficial dos cordões de solda depositados pelo processo MAG, nos três níveis de velocidades estudados.



Figura 4.29 – Cordão de solda executado por processo de soldagem MAG, VAE= 6 m/min; sentido de soldagem empurrando.



Figura 4.30 – Cordão de solda executado por processo de soldagem MAG, VAE= 6 m/min; sentido de soldagem puxando.



Figura 4.31 – Cordão de solda executado por processo de soldagem MAG, VAE= 7,5 m/min; sentido de soldagem empurrando.



Figura 4.32 – Cordão de solda executado por processo de soldagem MAG, VAE= 7,5 m/min; sentido de soldagem puxando.



Figura 4.33 – Cordão de solda executado por processo de soldagem MAG, VAE= 9 m/min; sentido de soldagem empurrando.



Figura 4.34 – Cordão de solda executado por processo de soldagem MAG, VAE= 9 m/min; sentido de soldagem puxando.

As Figuras 4.35 a 4.40 apresentam o aspecto superficial dos cordões de solda depositados quando da soldagem utilizando o processo MAG-CW para os pacotes de velocidades estudados.



Figura 4.35 – Cordão de solda executado por processo de soldagem MAG-CW, VAE= 6 m/min, VAF= 3 m/min, sentido de soldagem puxando, posição do arame não energizado Twin.



Figura 4.36 – Cordão de solda executado por processo de soldagem MAG-CW, VAE= 6 m/min, VAF= 3 m/min, sentido de soldagem empurrando, posição do arame não energizado Twin.



Figura 4.37 – Cordão de solda executado por processo de soldagem MAG-CW, VAE= 7,5 m/min, VAF= 4 m/min, sentido de soldagem puxando, posição do arame não energizado Twin.



Figura 4.38 – Cordão de solda executado por processo de soldagem MAG-CW, VAE= 7,5 m/min, VAF= 4 m/min, sentido de soldagem empurrando, posição do arame não energizado Tandem.



Figura 4.39 – Cordão de solda executado por processo de soldagem MAG-CW, VAE= 9 m/min, VAF= 5 m/min, sentido de soldagem puxando e posição do arame não energizado Twin.



Figura 4.40 – Cordão de solda executado por processo de soldagem MAG-CW, VAE= 9 m/min, VAF= 5 m/min, sentido de soldagem empurrando e posição do arame não energizado Tandem.

As Figuras 4.29 a 4.40 mostram que as soldas depositadas pelos processos de soldagem MAG e MAG-CW têm bom aspecto superficial nas três condições de velocidades de alimentação de arames, VAE e VANE. Os cordões têm forma regular, no entanto, vale ressaltar que houve pequena salpicagem dispersa na superfície da chapa para todos os níveis de VAE e VANE estudados.

Por conseguinte, verifica-se através das análises e observações realizadas visualmente sobre os depósitos de solda, que a introdução do arame frio ao processo de soldagem MAG não causou perturbações significativas capazes de alterar a estabilidade do arco e promoveu cordões de solda com aspecto satisfatório.

4.4.1 - Análise e resultado do ensaio por Líquido Penetrante (LP)

Este tópico representa a análise e resultados do ensaio por Líquidos Penetrantes.

As Figuras 4.41 a 4.53 apresentam os resultados da qualidade superficial das soldas depositadas pelo processo MAG e MAG-CW, nas VAE 6 m/min, 7,5 m/min e 9 m/min, selecionadas aleatoriamente.

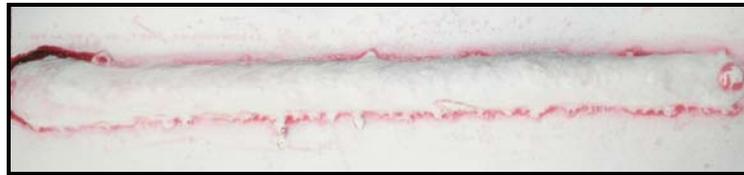


Figura 4.41 – Qualidade superficial dos cordões depositados pelo processo MAG-CW com VAE= 6 m/min e VAF= 3 m/min - E13R-Tandem.



Figura 4.42 – Qualidade superficial dos cordões depositados pelo Processo MAG-CW com VAE= 7,5 m/min e VAF= 4 m/min - P17-R-Tandem.

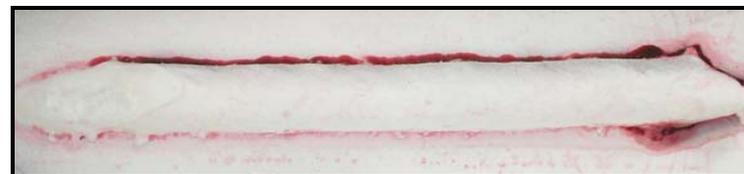


Figura 4.43 – Qualidade superficial dos cordões depositados pelo processo MAG-CW com VAE= 7,5 m/min e VAF= 4 m/min - P20-Twin.

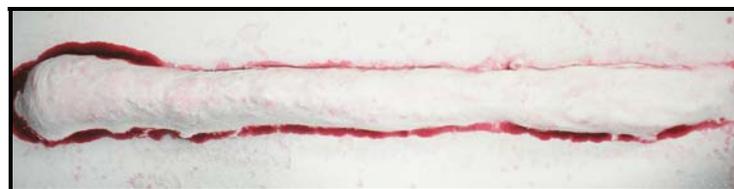


Figura 4.44 – Qualidade superficial dos cordões depositados pelo processo MAG-CW com VAE= 9 m/min e VAF= 5 m/min - E24-Twin.



Figura 4.45 – Qualidade superficial dos cordões depositados pelo processo MAG-CW com VAE= 6 m/min e VAF= 3 m/min - E25R-Twin.

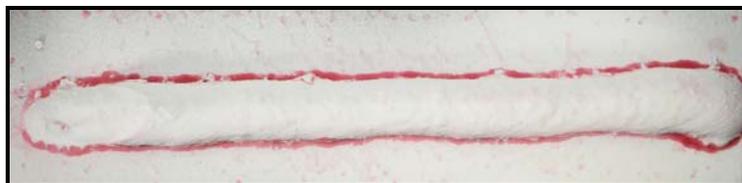


Figura 4.46 – Qualidade superficial dos cordões depositados pelo processo MAG-CW com VAE= 7,5 m/min e VAF= 4 m/min - P29R-Twin.



Figura 4.47 – Qualidade superficial dos cordões depositados pelo processo MAG com VAE 6= m/min - E1.



Figura 4.48 – Qualidade superficial dos cordões depositados pelo processo MAG com VAE= 9 m/min - E5.



Figura 4.49 – Qualidade superficial dos cordões depositados pelo processo MAG com VAE= 9 m/min - P6.



Figura 4.50 – Qualidade superficial dos cordões depositados pelo processo MAG-CW com VAE= 9 m/min e VAF= 5 m/min - E9-Tandem.



Figura 4.51 – Qualidade superficial dos cordões depositados pelo processo MAG-CW com VAE= 9 m/min e VAF= 5 m/min - P12-Tandem.



Figura 4.52 – Qualidade superficial dos cordões depositados pelo processo MAG-CW com VAE= 6 m/min e VAF= 3 m/min - E7-Tandem.



Figura 4.53 – Qualidade superficial dos cordões depositados pelo processo MAG-CW com VAE= 6 m/min e VAF= 3 m/min - P19-Twin.

Como pode ser observado através das Figuras 4.41 a 4.53 não houve nenhum caso de descontinuidade, mas se verifica que os cordões depositados por ambos os processos de soldagem apresentam salpicagem lateral e paralela a linha longitudinal do depósito, no entanto, esse defeito de sobreposição de material, tido como respingos grosseiros, não influencia na regularidade dos cordões.

5 - CONCLUSÃO

As análises e os resultados obtidos a partir das consultas bibliográficas e das condições experimentais utilizadas neste trabalho tornaram possível chegar às seguintes conclusões:

☞ O arco foi estável em todos os níveis de VAE e a energia gerada foi suficiente para fundir os dois arames consumíveis, demonstrando boa estabilidade do processo de soldagem MAG-CW;

☞ O processo de soldagem MAG-CW demonstrou melhor produção alcançada, em relação ao processo MAG, indicado boa performance no aumento das taxas de fusão e de deposição, observando que a maior evidência no desempenho destas características econômicas ocorreu em função da adição de arame frio, contribuindo na evolução da quantidade de massa fundida dos arames que foi efetivamente incorporada ao metal de solda por unidade de tempo;

☞ A transferência metálica no processo de soldagem MAG-CW foi por curto-circuito, se comportou de forma estável em todas as condições, conforme mostrado nos oscilogramas;

☞ Comprovou-se que a penetração (pe) foi afetada significativamente em todos os níveis de velocidade de alimentação de arames, devido a injeção de arame frio ao arco elétrico resfriando a poça de fusão, causando menores penetrações;

☞ Comprovou-se que os efeitos dos processos de soldagem e da VAE sobre o reforço do cordão de solda, para todas as VAE, logo, a mudança de processo de soldagem e o aumento da VAE proporcionaram a tendência de crescimento no reforço do cordão de solda;

☞ A mudança do processo de soldagem exerceu influência significativa sobre a diluição, tendendo a decrescer quando variou do processo de soldagem MAG ao MAG-CW, para os três níveis de VAE e do mesmo modo, variando a velocidade de alimentação de VAE, entretanto, não se observa nenhuma variação significativa pela VAE;

☞ O aspecto superficial dos depósitos pelo processo MAG-CW foi satisfatório e manteve-se uniforme longitudinalmente em cada condição de soldagem, proporcionando cordões com forma regular e contínua;

☞ Não houve nenhum caso de descontinuidade, porém os cordões depositados por ambos os processos de soldagem apresentam salpicagem lateral e paralela à linha longitudinal do depósito, no entanto, este defeito de respingos grosseiros não influencia na regularidade dos depósitos;

6 – RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para o aprimoramento e o desenvolvimento do processo de soldagem MAG-CW serão necessárias mais pesquisas na busca de maiores conhecimentos. Este trabalho mostrou o estudo da viabilidade do processo MAG-CW com adição de um arame frio através do comportamento da transferência metálica, das características econômicas e geométricas e da qualidade do cordão depositado para uma variação de parâmetros de soldagem observados e estudados. Acredita-se que algumas variações com as VAE e VAF, bem como, uma maior quantidade de experimentos poderiam ser realizadas e estudadas com a finalidade de aumentar e melhorar os resultados.

Apresenta-se a seguir algumas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros com o processo MAG-CW.

- Experimentar misturas de gases de proteção;
- Investigar ângulos e posição de chegada do arame frio no arco;
- Explorar e avaliar outras faixas de corrente e de tensão;
- Explorar e avaliar outras faixas de VAE e VAF;
- Realizar ensaios em corrente constante;
- Analisar a microestrutura dos cordões de solda depositados.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, C. B. F. “Uma Contribuição ao Estudo da Soldagem MIG Duplamente Pulsada da Liga Al-Mg 5083”. **Dissertação de Mestrado**, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, 2003.

ALCAN, **Manual de Soldagem**, 1ª edição, São Paulo, ALCAN S/A, 1993.

ALTSHULLER, B. A., “A Guide to GMA Welding of Aluminum. In: **Welding Journal**. USA, junho 1998.

ASME – SFA-5.18 (AWS 5.18-79) – IBP – Especificação de Materiais, seção II, parte C.

AWS – AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991, Welding Handbook Processes, Vol. 1, 8ª edição, USA, 1991.

APOSTILA - Curso de Especialização em Engenharia de Soldagem, (APENGSOLD), SENAI-RJ, FBTS, SLV – Mannheim, 1997.

ANDREUCCI, R.; **Líquidos Penetrantes**, apoio ABENDE. Disponível em: <http://www.infosolda.com.br/andreucci> ou <http://www.abende.org.br>, jan/2007.

BACELAR A. R. C. e FERRAZ A. C., “Estudo da Viabilidade Operacional do Processo de Soldagem MAG com Alimentação Adicional de um Arame Frio”: **Trabalho de Conclusão de Curso - TCC**, UFPA, Belém-Pará, 2005.

BASTOS JOSÉ, “Estatística Industrial - Estatística”. Disponível em: http://www.dem.isep.ipp.pt/jab/files/ESIN_2000_Estatistica_a.pdf, 2007

BOHME, D., NENTWIG R. & KNOCH R. “A high efficiency welding process – The Double Wire Welding”, proc conf IIW Asian welding congress (Productivity beyond 1996). Auckland, New Zealand, February, 1996.

BARRA, S. R., “Influência do Processo MIG/MAG Térmico sobre a Microestrutura e a Geometria da Zona Fundida”. **Tese de Doutorado** - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

BARROZO T. S., “Estudo da Soldagem FCAW com Arame Frio”: **Trabalho de Conclusão de Curso - TCC**, UFPA, Belém-Pará, 2006

BERGE, J., 2001, "The Welding Wire – Using the tandem welding process to your advantage". Disponível em: <<http://www.thefabricator.com/articles/weldingExclusive.cfm?id=162>>. Acesso em agosto/2005.

BENNETT, B., "Effects of Shielding Gas in Pulsed MIG Welding", joining & materials, junho, 1989.

BRAGA, E. M., Soldagem a Arame Tubular Autoprottegido em Corrente Pulsada. **Dissertação de Mestrado** - Universidade Federal do Pará, dezembro, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Belém, 1997.

CORRÊA, A. C.; BRAGA, E. M.; TREVISAN, R. E., "Influência dos Parâmetros da Soldagem MIG Pulsado e Convencional nas Características Econômicas de Revestimento", **Soldagem e Inspeção**, Rio de Janeiro, abril, 2000.

COSTA NETO, P. L. O. Estatística. ed. Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 1977.

DILLEMBECK, V. R. & CASTAGNO, L., "The Effects of Various Shielding Gases and Associated Mixtures in GMA Welding of Mild Steel", **Welding Journal**, setembro/1987.

DILTHEY U., REISGEN U. & BACHEN H., "Increased Productivity as a Result of Higher Welding Speed by Using Two-Wire-GMAW Process", Third European Conference on Joining Technology-Eurojoin 3, abril, 1998.

DUTRA, J. C. et al, "O Processo MIG Pulsado com Pulsação Térmica", **XXI ENTS**, Caxias do Sul, 1995.

ESAB OK ECOMIG S6 Arame Sólido. Publicação 1900010 rev 2. Disponível em <http://www.esabe.com.br>. Acesso em: setembro/2005.

FARIAS, J. P.; "Magnésio Metálico com Componente do Revestimento na Soldagem com Eletrodo ao C-Mn-Ni", **Tese de Doutorado** - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 1993.

FARIAS, J. P.; QUITES, A. M. e MIRA, F. M.: Método computadorizado para avaliação da estabilidade do arco de eletrodos revestidos. XVII Encontro Nacional de Tecnologia de Soldagem - ABS, 1991.

GOHR, R. J., “Novos Métodos de Controle da Soldagem MIG/MAG”. **Tese de Doutorado** - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - UFSC, 2002.

GONZÁLES, A. M. R., “Análise e Desenvolvimento do Processo MIG/MAG Duplo Arame com Potencial Único”. **Dissertação de Mestrado** em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 1999.

GROETELAARS, P. J., “Influência da Variação de Parâmetros de Soldagem sobre a Transferência Metálica e Perfil do Cordão no Processo MIG/MAG Duplo-Arame”. **Dissertação de Mestrado** - Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2005.

HILTON D., “Shielding Gases for Gas Metal Arc Welding”, **Welding & Metal Fabrication**, julho, 1990.

LABSOLDA. Desenvolvimento de Processos, Procedimentos Equipamentos e Instrumentação de Soldagem. Disponível em: <http://www.labsolda.ufsc.br>. Acesso em setembro/2005.

LIU, S. & SIEWERT, T. A., “Metal Transfer in GMAW: Droplet Rate”, **Welding Research Supplement** – **Welding Journal**, fevereiro de 1989, pp 52 – 58.

LUCAS, W., “Choosing a Shielding Gas – part 2”, **Welding & Metal Fabrication**, julho/1992.

LUCAS, W., “FCAW, Multiwire and Gas Selection – Techniques to Enhance MIG Productivity”, **Welding and Metal Fabrication**, vol. 65, n.5, 1997.

LYTTLE, K. A. & STAPON, F. G., “Select the Best Shielding Gas Blend for the Application”, **Welding Journal**, nov. de 1990.

KEN MICHIE, STEPHEN BLACKMAN AND T.E.B., Twin Wire GMAW – Process Characteristics and Applications - **Welding Journal**, 1999.

KETRON, D. L., LONGENECKER R. E. & BROWN S. B., “Evaluation of Two-Wire GMAW Technology for Problematic Steel Welding Applications”, EWI, Project n. 4263lrp, report n. MR0213, USA, 28p, junho / 2002.

KIM, Y. S. et al. "Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding". **Welding Journal**, USA, Junho / 1993.

KIM, Y. S. et al., "Metal Transfer in Pulsed Current Gas Metal Arc Welding". **Welding Journal**, USA, Miami, v. 72, Julho / 1993.

MACHADO, I. G., "Soldagem e Técnicas Conexas – Processos": **Livro**, Porto Alegre, 1996.

MENDONÇA, N. B., "Uma Contribuição ao Estudo do Desenvolvimento da Soldagem FCAW com Arame Frio" : **Trabalho de Conclusão de Curso - TCC**, UFPA, Belém-Pará, março, 2007

MICHIE, K., BLACKMAN S. & OGUNBIYI T. E. B. "Twin-Wire GMAW: Process Characteristics and Applications", **Welding journal**, AWS Vol. 78, nº5, 1999.

MIRANDA, H. C. Reconhecimento e Controle da Transferência Metálica no Processo MIG/MAG Pulsado. **Tese de Doutorado** - Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2002.

MOTA, C. A. M. Níquel e Manganês como Controladores da Tenacidade na Soldagem com Arames Tubulares Autoprotégidos. **Tese de Doutorado** - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

MODENESI, P. J., & NIXON, J. H., "Arc Instability Phenomena in GMA Welding", Welding Research Supplement – **Welding Journal**, setembro / 1994.

MODENESI, P. J.; "Técnica Operatória da Soldagem GMAW", Disponível em <http://www.infosolda.com.br>. Acesso em: setembro/2006.

MOTTA, M. F., "Aplicação do Processo MIG/MAG Pulsado com Duplo Arame e Potenciais Isolados em Soldagem de Revestimento". **Tese de Doutorado**, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, UFSC, Florianópolis, 2002.

MOTTA, M. F., DUTRA, J. C., GOHR Jr., R. & SCOTTI, A., "A Study on out-of-phase current pulses of the double-wire MIG-MAG process with insulated potentials on coating applications". Welding & Cutting, Vol 4, n.1, DVS Germany, Janeiro, 2005.

MULLIGAN S. J. & MELTON G. B., "An Assessment of the Tandem MIG/MAG Welding Process", TWI – The welding Institute, United Kingdom, 21p, maio, 2002.

NASCIMENTO, A. S. Aspectos Operacionais e Metalúrgicos da Soldagem a Arame Tubular. **Dissertação de Mestrado** – Universidade Federal do Pará, UFPA, Pará, 2004.

NORRISH, J. "Advanced Welding Process", IOP - Institute of Physics Publishing. Bristol, Philadelphia and New York, 1992.

NORRISH J. et al. "Metal Transfer Mechanisms", **Welding & Metal Fabrication**, janeiro/fevereiro/1988.

PERES, C. A. e SALDIVA, C. D. Planejamento de experimentos. In: V Simpósio Nacional de Probabilidade e Estatística. São Paulo, 1997.

PIERRE, E. R., 1987, "Shielding Gases for Welding", **Welding Design & Fabrication**, março / 1987.

QUITES, A. M.; Dutra, J. C., Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico: **Livro**, EDEME, Florianópolis, 1979.

RAMALHO, J. P. Introdução à Tecnologia de Soldagem. 1993. Disponível em: <http://www.esabe.com.br>. Acesso em junho/2005.

RIBEIRO, L. G.; COSTA, S. C. Influência dos Parâmetros de Pulso no Processo MIG sobre a Geometria do Cordão de Solda. 1º COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Abril, 2001.

SADLER, H., "A Look at the Fundamentals of GMAW", **Welding Journal**, maio / 1999.

SCOTTI, A., "Process Modeling to Establish Control Algorithms for Automated GMAW", PHD Thesis, Cranfield Institute of Technology, UK, setembro de 1991.

SCOTTI, A., "A Review on Special Metal Transfer Modes in GMAW". Rev. Bras. de Ciências Mecânicas – RBCM, ABCM, Vol. XX, n. 3, setembro de 1988.

STANBACKA, N.; PERSSON, K. A., Shielding Gases for Gas Metal Arc Welding, **Welding Journal**, Miami, novembro / 1989.

STREET, J. A., "Pulsed Arc Welding". In: Abington Publishing Special Report, Cambridge, 1990.

SUBAN, M.; TUSEK, J., "Dependence of Melting Rate MIG/MAG Welding on the Type of Shielding Gas Used". **Journal of Materials Processing Technology**, 2001.

TING, A. et al, "How to Select the Right Welding Power Source", in: Welding Canada, www. Weldingcanadamag.com, acesso fev / 2006.

VILARINHO, L. O., "Desenvolvimento e Avaliação de um Algoritmo Alternativo para Soldagem MIG Sinérgica do Alumínio", **Dissertação de Mestrado**, UFU, Uberlândia, MG, 2000.

WAINER, E. / BRANDI S. D. e MELLO F. D. H. – "Soldagem" – Processos e Metalurgia: **Livro**, São Paulo, 1992.

WAINER, E., "Soldagem" – ABM. **Livro**, São Paulo, 1978.

WANG, W.; LIU, S.; JONES, J. E., "Flux Cored Arc Welding: Arc Signals, Processing and Metal Transfer Characterization. **Welding Journal**, November, 1995.

AGRADECIMENTOS



Rede Multitarefa de Materiais
Especiais do Norte / Nordeste



- Ao professor: Dr. Eduardo de Magalhães Braga;
- Ao professor: Dr. Carlos Alberto Mendes da Mota;
- Ao Professores José do Carmo Smith Mesquita – Empresa TORNAMA;
- Ao Professor: Msc. Arildomá Lobato Peixoto;
- Aos Engenheiros Nelson Mendonça, Thiago Barrozo e Fábio Marinho;
- Aos alunos de iniciação científica do GETSOLDA – UFPA;
- Ao nosso Louvado Deus!