

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

**ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO MIG/MAG DUPLO
ARAME COM POTENCIAL ÚNICO**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

ALDO MANUEL RAMÍREZ GONZÁLEZ

FLORIANÓPOLIS, JUNHO DE 1999

**ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO MIG/MAG DUPLO
ARAME COM POTENCIAL ÚNICO**

ALDO MANUEL RAMÍREZ GONZÁLEZ

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL
PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



Prof. Dr. Eng. Jair Carlos Dutra - Orientador



Prof. Dr. Júlio César Passos - Coord. do Curso

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Eng. Augusto J. de Almeida Buschinelli



Prof. Dr. Eng. Almir Monteiro Quites



Prof. PhD Américo Scotti

**Ao meu pai
(in memorian)**

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela saúde e força de vontade que me deu ao longo desses dois anos, para poder concluir este trabalho.

Ao Consorcio de Ingeniería Electromecánica (CIE), empresa paraguaia que acredita na capacidade e no potencial humano, pelo apoio técnico e financeiro durante a realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CAPES) pela bolsa de estudos concedida.

Ao meu orientador, Prof. Jair Carlos Dutra, pela orientação e oportunidade de poder realizar este trabalho.

À toda turma do LABSOLDA e especialmente aos colegas da pós-graduação, pelos momentos compartilhados e pela grande amizade que surgiu entre todos nós, que com certeza transcenderá as fronteiras.

Aos Eng^{os} Erwin Teichman e Carlos Baixo, principalmente, pelas orientações relacionadas ao processo MIG/MAG e por toda a assistência brindada durante o decorrer do trabalho.

Ao bolsista Daniel Amorim que colaborou na montagem da bancada de ensaios auxiliando também na preparação dos corpos de prova e na realização de ensaios metalográficos.

À minha esposa, Silvia, que entre trocas de fraldas e mamadeiras noturnas, sempre me apoiou e foi uma incansável companheira nesta aventura. Pela sua paciência e compreensão.

Aos meus filhos, Marcelo e Leonardo, pelo sorriso de cada dia, que me serviram de constante motivação para continuar trabalhando.

À toda minha família, principalmente à minha mãe, que além de cuidar de toda minha vida lá em Assunção, tenho certeza, ficou orando por nós para tudo dar certo.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xii
SIMBOLOGIA.....	xvii
RESUMO.....	xx
ABSTRACT.....	xxi
I - INTRODUÇÃO.....	1
II - JUSTIFICATIVAS.....	3
III - OBJETIVOS.....	5
IV - A SOLDAGEM COM DUPLO ARAME.....	6
4.1 Introdução	6
4.2 Evolução Tecnológica dos Processos com Duplo Arame.....	7
4.2.1 Disposição dos Eletrodos	8
a) Eletrodos em Posição Transversal	8
b) Eletrodos em Posição Longitudinal ou Tandem.....	9
4.3 Deflexão Magnética.....	10
4.4 Esquemas de Conexão de Sistemas com Duplo Eletrodo.....	10
4.4.1 Eletrodos Paralelos, com Fonte de Potência Única e Alimentador Único.....	11
4.4.2 Eletrodos em Série, com Fonte de Potência Única	12
4.4.3 Eletrodos Isolados, com Fontes Independentes.....	13
4.5 O Processo MIG/MAG com Duplo Arame.....	17
4.5.1 Características Gerais.....	17
4.5.2 Classificação do Processo MIG/MAG com Duplo Arame.....	17
a) Processo MIG/MAG Duplo Arame com Potencial Unico.....	18
b) Processo MIG/MAG Duplo Arame com Potenciais Isolados	20

4.5.3 Tochas de Soldagem.....	23
4.5.4 Consumíveis e Gases.....	24
4.5.5 Aplicações.....	24
V - ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA.....	26
5.1 A Transferência Metálica.....	26
5.2 Modos de Transferência.....	26
5.3 Transferência por Curto-Circuito.....	26
5.3.1 Transferência por Curto-Circuito de Alta Densidade de Corrente.....	27
5.3.2 Estabilidade do Arco.....	28
5.3.3 Efeito Indutivo.....	28
5.4 Correntes de Transição.....	29
5.5 Transferência por Fluxo Goticular ("Spray").....	30
5.6 Transferência por projétil.....	30
5.7 Técnicas de Observação da Transferência Metálica.....	36
5.7.1 Sistemas de Aquisição de Imagens.....	37
VI - MATERIAIS E METODOS.....	39
6.1 Equipamentos.....	39
6.1.1 Bancada de Soldagem.....	39
a. Fonte de Soldagem - MTE DIGITEC 600.....	39
b. Cabeçote Alimentador de Arame STA-20.....	40
c. Tocha de Soldagem MIG/MAG Duplo Arame.....	40
d. Endireitador de Arame.....	41
6.1.2 Sistema de Aquisição de Dados de Soldagem.....	41
a. Placa de Aquisição - INTERDATA 3.....	41
b. Medidor de Velocidade do Arame - MVA-1.....	42
c. Condicionador de Sinais.....	42
d. "Softwares".....	42
6.1.3 Bancada de Filmagem.....	44
a. Video-câmera.....	44

b. Fonte de Soldagem e Tocha – TIG.....	45
c. Filtro de Soldagem.....	46
d. Placa de Aquisição de Imagens.....	47
e. "Software" de Edição de Imagens.....	47
6.2 Materiais.....	48
6.2.1 Material de Base.....	48
6.2.2 Material de Adição.....	48
6.2.3 Gás de Proteção.....	48
6.3 Procedimento Experimental.....	48
6.3.1 Introdução.....	48
6.3.2 Procedimento Geral de Soldagem.....	49
6.3.3 Transferência Metálica por Curto-Circuito - Met. de Análise.....	51
a. Procedimento Geral.....	51
b. Procedimento para Determinação da Estabilidade do Arco no Modo Curto - Circuito.....	53
c. Metodologia para a Determinação da Característica de Fusão dos Eletrodos.....	55
6.3.4 Transferência Metálica por Fluxo Goticular. Metodologia de Análise.....	58
6.3.5 Transferência Metálica Pulsada. Metodologia para a Análise.....	61
6.3.6 Disposição Transversal dos Eletrodos.....	64
a. Disposição Transversal dos Eletrodos - Transferência por Curto-Circuito.....	64
b. Disposição Transversal dos Eletrodos - Transferência Pulsada.....	64
6.3.7 Soldagem de Juntas.....	65
a. Soldagem da Junta com Transferência por Fluxo Goticular.....	66
b. Soldagem da Junta com Transferência Pulsada.....	68
6.3.8 Análises e Ensaios.....	69
 VII - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	 70
7.1 Análise do Processo com Transferência por Curto-Circuito.....	70

7.1.1 Características de Fusão dos Eletrodos na Transferência por Curto-Circuito.....	70
7.1.2 Transferência em Curto-Circuito e Curto-Circuito de Alta Densidade de Corrente.....	70
7.1.3 Característica Estática do Arco na Transferência por Curto-Circuito.....	75
7.1.4 Potência Média na Transferência por Curto-Circuito.....	76
7.1.5 Geometria e Aspecto Visual da Solda na Transferência por Curto-Circuito.....	77
7.1.6 Eletrodos na Posição Transversal na Transferência por Curto-Circuito.....	79
7.1.7 Comentários Gerais e Observações na Transferência por Curto-Circuito.....	82
7.2 Análise do Arco com Transferência por Fluxo Goticular.....	86
7.2.1 Características de Fusão dos Eletrodos na Transferência por Fluxo Goticular.....	86
7.2.2 Característica Estática do Arco na Transferência por Fluxo Goticular.....	91
7.2.3 Potência Média na Transferência por Fluxo Goticular.....	92
7.2.4 Geometria e Aspecto Visual da Solda na Transferência por Fluxo Goticular.....	93
7.2.5 Comentários Gerais e Observações na Transferência por Fluxo Goticular.....	96
7.3 Análise do Processo com Transferência Pulsada.....	98
7.3.1 Características de Fusão dos Eletrodos na Transferência Pulsada.....	98
7.3.2 Potência na Transferência Pulsada.....	98
7.3.3 Geometria e Aspecto Visual da Solda na Transferência Pulsada.....	100
7.3.4 Eletrodos na Posição Transversal na Transferência Pulsada.....	103
7.3.5 Comentários Gerais e Observações na Transferência Pulsada.....	105
7.4 Soldagem de Juntas.....	108

7.4.1 Soldagem de junta de filete com transferência por fluxo goticular.....	108
7.4.2 Soldagem de junta de filete com transferência pulsada.....	109
VIII - CONCLUSÕES.....	111
8.1 Introdução.....	111
8.2 Conclusões Finais.....	111
8.2.1 Transferência por Curto-Circuito.....	111
8.2.2 Transferência por Fluxo Goticular.....	112
8.2.3 Transferência Pulsada.....	113
8.2.4 Conclusões Gerais.....	115
8.2.5 Considerações Finais.....	116
IX - PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	118
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Alternativas de alimentação dos eletrodos na configuração com potenciais isolados.....	20
Tabela 2 -	Classificação dos modos de transferência aplicáveis ao processo de soldagem MIG/MAG.....	27
Tabela. 3 -	Parâmetros de soldagem estabelecidos na análise da transferência por curto-circuito para o processo convencional e duplo arame.....	52
Tabela. 4 -	Velocidades de arame adotadas na determinação das tensões de referência.....	56
Tabela 5 -	Tensão de referência U_c , em função da velocidade do arame V_a , obtida na análise da transferência por curto-circuito.....	56
Tabela 6 -	Parâmetros de soldagem estabelecidos na análise da transferência por fluxo goticular.....	60
Tabela 7 -	Condições de soldagem estabelecidos na análise da transferência pulsada para o processo duplo arame.....	62
Tabela 8a -	Parâmetros da corrente pulsada para níveis de corrente média I_m , testados no processo convencional pulsado - $\varnothing = 1.0$ mm.....	62
Tabela 8b -	Parâmetros da corrente pulsada para níveis de corrente média I_m , testados no processo convencional pulsado - $\varnothing = 1.2$ mm.....	63
Tabela 9a -	Parâmetros da corrente pulsada para níveis de corrente média I_m , testados no processo duplo arame pulsado - $\varnothing = 1.0$ mm.....	63
Tabela. 9b -	Parâmetros da corrente pulsada para níveis de corrente média I_m , testados no processo duplo arame pulsado - $\varnothing = 1.2$ mm.....	63
Tabela 10 -	Parâmetros de soldagem para juntas de filete na posição plana para o processo convencional e duplo arame.....	67
Tabela 11 -	Parâmetros de soldagem para juntas de filete na posição horizontal com o processo duplo arame. Transferência por fluxo goticular.....	68
Tabela 12 -	Parâmetros de soldagem para juntas de filete na posição horizontal com o processo convencional e duplo arame na transferência pulsada.....	69

Tabela 13a -	Corrente média e desvio padrão obtidos no processo convencional e duplo arame na transferência por curto-circuito para arame de 1.0 mm.....	71
Tabela 13b	Corrente média e desvio padrão obtidos no processo convencional e duplo arame na transferência por curto-circuito para arame de 1.2 mm.....	71
Tabela. 14 -	Desvio padrão dos picos de corrente (DI _{pm}) de ensaios realizados no processo duplo arame com velocidades de alimentação relativas diferentes - $\varnothing = 1.2$ mm.....	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Utilização de processos com duplo arame. a) Soldagem de juntas a topo b) Revestimentos soldados.....	9
Figura 2 -	Efeito do posicionamento dos eletrodos. a) Eletrodos em posição transversal ao cordão de solda b) Eletrodos em tandem.....	9
Figura 3 -	Configuração de eletrodos paralelos com fonte de potência única.....	11
Figura 4 -	Configuração de eletrodos em série, alimentados independentemente, com fonte de potência única.....	13
Figura 5 -	Configuração de eletrodos alimentados independentemente onde o eletrodo principal é alimentado com CC e o auxiliar com CA.....	15
Figura 6 -	Representação esquemática da configuração do processo MIG/MAG duplo aramé com potencial único.....	19
Figura 7 -	Representação esquemática da configuração do processo MIG/MAG duplo aramé com potenciais isolados.....	21
Figura 8 -	Representação esquemática de uma estação robotizada do processo MIG/MAG duplo arame com potenciais isolados.....	22
Figura 9 -	Defasagem entre os pulsos da fonte "mestre" e "escrava".....	22
Figura 10 -	Tipos de tochas MIG/MAG duplo arame disponíveis no mercado. Tocha de potencial isolado b) Tochas MIG/MAG convencionais adaptadas c) Tocha de potencial único.....	25
Figura 11 -	Região (3). Tempo de pulso e corrente de pulso adequados para a transferência de uma gota por cada pulso.....	32
Figura 12 -	a) Partes do bico de contato b) Detalhe do bocal refrigerado da tocha.....	41
Figura 13 -	Representação esquemática da bancada de soldagem e do sistema de aquisição de dados de soldagem.....	43
Figura 14 -	Distribuição física dos equipamentos da bancada de soldagem e do sistema de aquisição.....	44
Figura 15 -	Câmera CANON L1 - Hi8 - de 8 mm, com a lente objetiva VL 15X, utilizada na aquisição de imagens.....	45
Figura 16 -	Representação esquemática da bancada de filmagem.....	46
Figura 17 -	Distribuição física dos equipamentos na bancada de filmagem.....	47

Figura 18 -	Representação esquemática do extremo da tocha no processo com duplo arame na transferência por curto-circuito.....	52
Figura 19 -	Relação entre o desvio padrão dos picos de corrente (DI _{pm}) e tensão de referência (U _c).....	54
Figura 20a -	Desvio padrão dos picos de corrente DI _{pm} em função da tensão de referência U _c , para processo convencional - Ø = 1.0 mm.....	57
Figura 20b -	Desvio padrão dos picos de corrente DI _{pm} em função da tensão de referência U _c , para o processo duplo arame - Ø = 1.0 mm.....	57
Figura 21 -	Representação esquemática do extremo da tocha no processo com duplo arame e transferência por fluxo goticular.....	59
Figura 22 -	Representação esquemática do extremo da tocha no processo com duplo arame e transferência por fluxo goticular.....	59
Figura 23 -	Dimensões do corpo de prova. junta de filete.....	65
Figura 24 -	Detalhe da configuração adotada na soldagem de juntas de filete na posição plana.....	67
Figura 25 -	Taxas de fusão dos eletrodos no processo convencional e duplo arame na transferência por curto-circuito para arames de 1.0 e 1.2 mm.....	72
Figura 26a -	Oscilograma de tensão e corrente para o processo convencional V _a = 5.0 m/min - Ø= 1.0 mm.....	72
Figura 26b -	Oscilograma de tensão e corrente para o processo com duplo arame. V _a = 5.0 m/min (2.5 m/min por arame) - Ø= 1.0 mm.....	73
Figura 27a -	Oscilograma de tensão e corrente para o processo convencional. V _a = 12.0 m/min - Ø= 1.0 mm.....	73
Figura 27b -	Oscilograma de tensão e corrente para o processo com duplo arame. V _a = 14.0 m/min (7.0 m/min por arame) - Ø= 1.0 mm.....	74
Figura 28 -	Taxas de fusão dos eletrodos no processo duplo arame comparadas com o consumo do eletrodo de 1.6 mm no processo convencional.....	74
Figura 29a -	Característica estática do arco do processo convencional e duplo arame no modo de transferência por curto-circuito para arame de 1.0 mm.....	75
Figura 29b -	Característica estática do arco do processo convencional e duplo arame no modo de transferência por curto-circuito para arame de 1.2 mm.....	76
Figura 30 -	Gráfico da potência média em função da taxa de fusão dos eletrodos no processo convencional e no duplo arame.....	77

Figura 31a - Gráfico da largura média do cordão em função da velocidade do arame no processo convencional e no duplo arame - $\varnothing = 1.0$ mm.....	78
Figura 31b - Gráfico do reforço médio do cordão em função da velocidade do arame no processo convencional e no duplo arame - $\varnothing = 1.0$ mm.....	78
Figura 32 - Macrografia de cordões de solda na transferência por curto-circuito a) Processo convencional b) Processo duplo arame ($V_a = 7.0$ m/min. Ataque com nital a 5%).....	79
Figura 33 - Aspecto visual dos cordões de solda no processo duplo arame para na transferência por curto-circuito para eletrodos de 1.0 mm.....	80
Figura 34a - Gráfico da largura média do cordão em função da velocidade do arame no processo convencional e no duplo arame na posição transversal para eletrodos de 1.0 mm.....	80
Figura 34b - Gráfico do reforço médio do cordão em função da velocidade do arame no processo convencional e no duplo arame na posição transversal para eletrodos de 1.0 mm.....	80
Figura 35 - Aspecto visual dos cordões de solda no processo duplo arame com posicionamento transversal dos eletrodos no modo de transferência curto-circuito - $\varnothing = 1.0$ mm.....	81
Figura 36 - Média do desvio padrão dos picos de corrente em função da corrente média I_m , no processo convencional e duplo arame.....	81
Figura 37 - Detalhe da transferência metálica no processo com duplo arame no modo curto-circuito capturada pelo sistema de aquisição de imagens.....	85
Figura 38a - Taxas de fusão dos eletrodos no processo convencional e duplo arame na transferência por fluxo goticular para arames de 1.0 mm.....	87
Figura 38b - Taxas de fusão dos eletrodos no processo convencional e duplo arame na transferência por fluxo goticular para arames de 1.2 mm.....	87
Figura 39 - Diagrama esquemático do mecanismo de funcionamento do "endireitador de arame"	90
Figura 40 - Protótipo do "endireitador de arame" fabricado e utilizado no trabalho.....	90
Figura 41a - Característica estática do arco do processo convencional e duplo arame no modo de transferência por fluxo goticular para arame de 1.0 mm.....	91
Figura 41b - Característica estática do arco do processo convencional e duplo arame no modo de transferência por fluxo goticular para arame de 1.2 mm.....	91

Figura 42 -	Gráfico da potência média em função da taxa de fusão dos eletrodos no processo convencional e no duplo arame na transferência fluxo goticular.....	92
Figura 43a -	Gráfico da largura média do cordão em função da velocidade do arame no processo convencional e no duplo arame para eletrodos de 1.0 mm.....	93
Figura 43b -	Gráfico do reforço médio do cordão em função da velocidade do arame no processo convencional e no duplo arame para eletrodos 1.0 mm.....	94
Figura 44 -	Macrografia de solda realizada no processo duplo arame na transferência por fluxo goticular. ($V_a = 21$ m/min - 10.5 m/min p/ arame - Ataque com nital a 5%).....	95
Figura 45 -	Aspecto visual dos cordões de solda no processo duplo arame com transferência por fluxo goticular para eletrodos de 1.0 mm	95
Figura 46a -	Taxa de fusão dos eletrodos no processo convencional e duplo arame na transferência pulsada para arames de 1.0 mm.....	95
Figura 46b -	Taxa de fusão dos eletrodos no processo convencional e duplo arame na transferência pulsada para arames de 1.2 mm.....	98
Figura 47 -	Oscilograma de tensão e corrente para o processo duplo arame com transferência pulsada. $I_m = 350$ A / $\varnothing = 1.0$ mm.....	99
Figura 48 -	Gráfico da potência em função da taxa de fusão dos eletrodos no processo convencional e no duplo arame com transferência pulsada.....	100
Figura 49a -	Gráfico da largura média do cordão em função da corrente média no processo convencional e no duplo arame com transferência pulsada.....	101
Figura 49b -	Gráfico do reforço médio do cordão em função da corrente média no processo convencional e no duplo arame com transferência pulsada.....	101
Figura 50 -	Macrografia do cordão de solda. Processo duplo arame. Transferência pulsada - $\varnothing = 1.0$ mm. $I_m = 140$ A. Ataque com nital a 5%. Ampliação 10X.....	102
Figura 51 -	Aspecto visual dos cordões de solda no processo duplo arame modo pulsado para eletrodos de 1.0 mm.....	102
Figura 52a -	Gráfico da largura média do cordão em função da corrente média no processo convencional e no duplo arame (posição transversal).....	104
Figura 52b -	Gráfico do reforço médio do cordão em função da corrente média no processo convencional e no duplo arame (posição transversal).....	105

Figura 53 -	Macrografia de soldas realizadas (a) processo convencional (b) duplo arame (posição transversal) com transferência pulsada. Ataque com nital a 5%.....	105
Figura 54 -	Macrografia de solda realizada em junta de filete com transferência por fluxo goticular na posição plana a) processo convencional b) duplo arame. Ataque com nital a 5%.....	108
Figura 55 -	Macrografia de solda realizada em junta de filete na posição horizontal com transferência pulsada a) processo convencional b) duplo arame. Ataque com nital a 5%.....	110

SIMBOLOGIA

A	⇒	Ampère
ABNT	⇒	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A/D	⇒	Analógico Digital
Ar	⇒	Argônio
Al	⇒	Alumínio
AWS	⇒	"American Welding Society"
C	⇒	Constante limite de corrente de base
Ca	⇒	Comprimento do arco
CA	⇒	Corrente alternada
CC	⇒	Corrente contínua
CC+	⇒	Corrente contínua com polaridade reversa
CC-	⇒	Corrente contínua com polaridade direta
CO ₂	⇒	Dióxido de Carbono
C5	⇒	Mistura gasosa de 5% de CO ₂ e 95 % de Argônio
CCD	⇒	"Charge Coupled Device" - Sensor de imagen
D	⇒	função critério de destacamento da gota
DATSOLTE	⇒	"Software" de tratamento estatístico de dados
DBCP	⇒	Distância bico de contato - peça
DI _{pm}	⇒	Desvio padrão dos picos de corrente
dg	⇒	Diâmetro da gota
ed.	⇒	Edição
et. al.	⇒	Et alli (entre outros)
G	⇒	Abertura de raiz
GMAW	⇒	"Gas Metal Arc Welding"
H	⇒	Energia liberada pela fonte de calor por unidade de comprimento da solda
H _L	⇒	Energia líquida de soldagem
I	⇒	Corrente elétrica

I _{ef}	⇒	Corrente eficaz
I _m	⇒	Corrente média
I _p	⇒	Corrente de pulso
I _b	⇒	Corrente de base
IMC	⇒	Empresa Comercial ligada ao LASOLDA/UFSC
IGBT	⇒	"Insulated Gate Bipolar Transistor"
INTERDATA 3	⇒	Placa de aquisição de dados
J/cm	⇒	Joule por centímetro
kg/h	⇒	Quilograma por hora
kg/h.A	⇒	Quilograma por hora por ampére
ks	⇒	Efeito indutivo de subida
kd	⇒	Efeito indutivo de descida
kW	⇒	Quilo watts
L	⇒	Largura média do cordão de solda
L1	⇒	Modelo da filmadora utilizada no trabalho
LABSOLDA	⇒	Laboratório de Soldagem e Mecatrônica
mm	⇒	Milímetro (10 ⁻³ m)
min	⇒	Minuto (60s)
ms	⇒	Milisegundo (10 ⁻³ s)
Mn	⇒	Manganês
Mg	⇒	Magnésio
MTE DIGITEC 600	⇒	Fonte de soldagem
MAG	⇒	"Metal Active Gas"
MIG	⇒	"Metal Inert Gas"
MVA-1	⇒	Modelo do medidor de velocidade do arame
MWT-2DW	⇒	Modelo da tocha de soldagem utilizada nos ensaios
OSCILOS	⇒	"Software" de aquisição de dados
P	⇒	Potência
P _m	⇒	Potência média
Q	⇒	Vazão de gás
R ²	⇒	Coefficiente de regressão linear

R	⇒	Reforço médio do cordão de solda
RT 300	⇒	Placa de Aquisição de Imagens
s	⇒	Segundo
STA-20	⇒	Modelo do sistema Tracionador de Arame
t	⇒	Comprimento livre do eletrodo
tp	⇒	Tempo de pulso
tb	⇒	Tempo de base
td	⇒	"Time Delay" - Tempo de defasagem entre sinais
T	⇒	Período
Tf	⇒	Taxa de fusão
TIG	⇒	"Tungsten Inert Gas"
Ua	⇒	Tensão do arco voltaico
Uc	⇒	Tensão de Referência
UFSC	⇒	Universidade Federal de Santa Catarina
V	⇒	Volt
Va	⇒	Velocidade de alimentação do arame-eletrodo
Va _T	⇒	Velocidade total do arame (soma das duas)
Vs	⇒	Velocidade de soldagem
ZAC	⇒	Zona afetada pelo calor
∅	⇒	Diâmetro do eletrodo
∅ _g	⇒	Diâmetro da gota
%	⇒	Porcentagem
α, β	⇒	Constantes da equação da velocidade do arame

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados de uma análise sobre o processo MIG/ MAG Duplo Arame com Potencial Único, conduzida com o objetivo de identificar vantagens e limitações deste processo em relação ao processo MIG/ MAG convencional. A partir de ensaios realizados na forma de deposição sobre chapas, foram determinadas as características de fusão de eletrodos, de 1,0 e 1,2 mm de diâmetro, envolvendo os modos de transferência curto-circuito, fluxo goticular e pulsada. Ensaios adicionais foram realizados, incluindo a soldagem de juntas nas posições plana e horizontal, para permitir a análise da geometria dos cordões, bem a identificação de defeitos nos depósitos. Os resultados encontrados indicaram que, na faixa de operação de corrente do processo MIG/ MAG convencional, o processo MIG/ MAG Duplo Arame apresenta uma taxa de fusão específica [kg/h.A] levemente inferior. Entretanto, este processo apresenta como vantagem a possibilidade de permitir a soldagem em níveis mais altos de corrente, conseguindo-se desta forma, taxas de fusão absolutas superiores às do processo MIG/ MAG convencional. Como vantagem adicional observou-se que, na soldagem de juntas de ângulo em T (filete), nas posições plana e horizontal, o processo Duplo Arame possibilitou ajustes de velocidade de soldagem superiores a aqueles encontrados no MIG/ MAG convencional, apresentando também melhor perfil de penetração.

ABSTRACT

In this work an analysis of One Potential Double Wire GMAW process is shown, being the work carried out in order to identify advantages and limitations of this welding process when compared to the conventional GMAW process. By the use of the bead on plate technique, the melting rate curves (1,0 and 1,2 mm diameter) in short-circuiting, spray and pulsed transfer modes were constructed. In order to provide information to an analysis of weld bead geometry and the occurrence of weld defects. Additional experiments, including joint welds in plane and horizontal position, were made. Considering the conventional GMAW process current working range, it was concluded that the Double Wire GMAW has a slightly lower specific melting rate [kg/h.A]. However, the process showed to be advantageous at higher adjustments in welding current range, where shows a superior melting rate than the conventional one wire GMAW. As an additional advantage of the Double Wire process, it was observed that welding would be conducted in higher speeds than that allowed by GMAW process.

I - INTRODUÇÃO

A alta competitividade que caracteriza o perfil da indústria mundial, vem exigindo dos processos de fabricação uma maior produtividade. Através do desenvolvimento e adoção de novas tecnologias, é possível inovar processos convencionais, de tal forma a reduzir tempos de produção, obtendo melhores desempenhos, sem detrimento da qualidade. É neste contexto que está inserida a proposta de Desenvolvimento e Aplicação do Processo MIG/MAG Duplo Arame com Potencial Único.

(Processos de soldagem utilizando mais de um eletrodo) foram desenvolvidos há muitos anos [1,2,3,4] e os mesmos (possuem várias vantagens operacionais, podendo-se destacar principalmente a capacidade de obter altas taxas de deposição e velocidades de soldagem, que por sua vez, derivam em vantagens adicionais, (como) por exemplo, a diminuição das distorções) Esta técnica porém, foi implementada principalmente em aplicações do processo arco submerso, no qual a mesma possui um grau de desenvolvimento considerável. A idéia de conceber um processo que reúna as características de versatilidade do processo MIG/MAG com a alta produtividade do processo arco submerso multi-eletrodo é desta forma conjugada neste novo processo. Mesmo sendo relativamente novo, a tecnologia que envolve este sistema já foi desenvolvida por vários fabricantes de equipamentos e hoje é possível encontrar no mercado uma variedade de produtos que permitem sua aplicação.

O desenvolvimento de um sistema que otimize a produtividade do processo MIG/MAG através da adição de outro eletrodo resulta bastante interessante, não só desde o ponto de vista de sua utilização com arames sólidos, senão que também abre as possibilidades de estender esta tecnologia aos eletrodos tubulares. Nesse sentido, é necessário destacar que o LABSOLDA, iniciou este ano uma linha de pesquisa que pretende desenvolver a aplicação de duplo arame com eletrodos tubulares. A mesma estará voltada para o problema específico da reparação de turbinas hidráulicas erodidas por cavitação, onde a produtividade das operações cumpre um papel fundamental.

O processo MIG/MAG convencional é um processo de alta produtividade, porém, as taxas de fusão absolutas são limitadas, não só pelas condições operacionais do processo, senão principalmente pelas condições físicas do arco em correntes elevadas. Nesse sentido, existem pesquisas para determinar os fatores que influenciam na corrente de transição da transferência por fluxo goticular para a rotacional. No processo duplo arame, basicamente esta corrente de transição é duplicada, conseqüentemente, estas questões devem ser levadas em conta na hora de avaliar o processo desde o ponto de vista de sua produtividade. Da mesma forma, deve-se tomar cuidado na avaliação da utilização da corrente pulsada no processo duplo arame, pois a mesma se encontra caracterizada dentro de uma determinada faixa de corrente, acima da qual, o modo de transferência muda, perdendo-se todas as vantagens a ela atribuídas. É preciso conseqüentemente, levar em consideração estes limites processuais para se chegar a conclusões que realmente contribuam na caracterização plena e realista do processo.

II - JUSTIFICATIVAS

Nos últimos três anos destacou-se no mercado o aparecimento do processo MIG/MAG com Duplo Arame. Porém, feita a pesquisa bibliográfica, pouca informação foi achada em relação ao desenvolvimento do mesmo, detectando-se assim, uma lacuna tecnológica nesta aplicação. Esta situação, a exemplo de outras, nos leva a uma dependência exclusiva dos fornecedores externos. Através deste trabalho pretende-se dar subsídios para a uma compreensão básica do processo e de suas principais características de influência, de tal forma a poder acompanhar a evolução que o mesmo vem demonstrando. Da mesma forma, o trabalho se constitui numa excelente oportunidade de verificar as vantagens do processo que os próprios fabricantes lhe referenciam.

A aparente duplicação da produtividade deste processo desperta inusitado interesse em empresas de manufatura ligadas à área de soldagem, porém, dependendo da aplicação, este processo poderia se apresentar mais ou menos produtivo do que outros já consagrados e conhecidos na soldagem. Além disso, cada fabricante de equipamento desenvolve um mesmo produto com tecnologias diferentes, adjudicando a estas, vantagens e benefícios que ficam difíceis de se comprovar na realidade, pois como foi dito, elas dependem acima de tudo das condições específicas de cada aplicação. Isto cria uma grande dificuldade na hora de definir a implementação ou adoção do processo. Conseqüentemente, torna-se necessário um mínimo entendimento das suas principais variáveis.

Este trabalho definitivamente não se constitui simplesmente num estudo isolado e sem perspectivas, mas sim está integrado num contexto mais geral de desenvolvimento de

tecnologia que inclui a construção de equipamentos e a determinação de procedimentos de soldagem. Neste sentido, este trabalho terá uma continuidade imediata na aplicação da tecnologia duplo arame em arames tubulares. Esta linha de pesquisa, como foi mencionado anteriormente, pretende melhorar a produtividade dos processos de soldagem, visando sua aplicação no reparo de turbinas hidráulicas erodidas por cavitação. Conseqüentemente, os dados gerados neste trabalho irão certamente contribuir, a curto prazo, com o desenvolvimento desta nova pesquisa.

A determinação de centrar o estudo em sistemas com potencial único restringe a análise geral do processo como um todo, porém, esta configuração foi definida em função da disponibilidade de somente uma tocha de soldagem com estas características, a qual foi cedida pela BINZEL do Brasil. O trabalho inicialmente foi concebido com o objetivo de desenvolver o processo com potenciais isolados, porém, a BINZEL só começou a produzir comercialmente este tipo de tochas a partir de novembro do ano 98.

Finalmente, pode-se dizer que este trabalho será mais uma contribuição no sentido de orientar de forma geral a engenheiros e técnicos ligados à área de soldagem sobre as vantagens e limitações de implementar sistemas com duplo arame em processos produtivos.

III- OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho consiste em caracterizar de forma geral o processo MIG/MAG com duplo arame de potencial único, verificando suas características tecnológicas e operacionais bem como a sua produtividade. A determinação deste objetivo levou a definir outros, ainda mais específicos, os quais estão detalhados a seguir:

- Avaliação do comportamento da transferência metálica nos regimes por curto-circuito, fluxo goticular e pulsado.
- Estabelecimento de um adequado conjunto de parâmetros e variáveis em cada regime de transferência que permita realização de soldas de boa qualidade.
- Verificação da produtividade do processo duplo arame em relação ao processo convencional, levando em consideração a taxa de fusão absoluta e específica, velocidade de soldagem e a energia de soldagem.
- Montagem de uma bancada de ensaios composta de equipamentos de soldagem e sistemas de aquisição adequados, que possibilitem o estudo e a análise do processo.
- Montagem e implementação de uma bancada de filmagem para o estudo da transferência metálica do processo MIG/MAG.

IV - A SOLDAGEM COM DUPLO ARAME

4.1 Introdução

Na determinação da produtividade de um processo de soldagem, muitas vezes, é utilizada uma nomenclatura que acaba não sendo adequada para definir suas características produtivas. Isto, pode levar à adoção de critérios errados ao avaliar seu desempenho. Neste trabalho, é de fundamental importância que a terminologia utilizada seja clara e precisa. Conseqüentemente, definem-se a seguir, as principais variáveis operacionais e econômicas do processo MIG/MAG que serão utilizadas ao longo do trabalho.

☞ Taxa de Fusão Absoluta

A Taxa de Fusão Absoluta, também chamada de Consumo do Eletrodo, é dada pela massa do consumível fundido por unidade de tempo (kg/h). A mesma, pode ser calculada através da velocidade de alimentação do arame.

☞ Taxa de Fusão Específica

A taxa de Fusão específica ou Consumo Específico, é dada pela massa do consumível fundido por unidade de tempo e por unidade de corrente (kg/h.A)

☞ Taxa de Deposição Absoluta

A Taxa de Deposição Absoluta ou Produção do Eletrodo é a quantidade de material efetivamente depositado pelo eletrodo por unidade de tempo, dada em kg/h.

☞ Rendimento de Deposição

É a relação entre a massa do metal de solda depositado e a massa consumida do consumível (fundida ou vaporizada), expressa em percentagem.

☞ Energia de Soldagem

A energia de soldagem (H) é definida neste trabalho como sendo a energia liberada pela fonte de calor por unidade de comprimento de solda, dada em J/cm.

4.2 Evolução Tecnológica dos Processos com Duplo Arame

Processos de soldagem que utilizam dois eletrodos foram desenvolvidos há muito tempo e tem sido analisados e aplicados principalmente através dos processos a arco submerso [1,2,3] e TIG [4,5]. A bibliografia menciona que estes sistemas, combinam várias vantagens operacionais, entre as quais, as principais são mencionadas a seguir:

☞ **Elevadas taxas de fusão absoluta:** esta característica permite atingir velocidades de soldagem superiores em relação a sistemas convencionais.

☞ **Baixo aporte térmico:** em função das vantagens acima mencionadas, é possível reduzir o aporte de calor na peça, minimizando as tensões residuais e, conseqüentemente, a distorção.

☞ **Controle da geometria do cordão:** numa aplicação típica do arco submerso, o primeiro eletrodo (normalmente CC), garante uma boa penetração, enquanto que o segundo (CA) adiciona material à junta, evitando-se uma excessiva fluidez da poça de fusão.

Ao longo dos anos, estes sistemas foram se aperfeiçoando, surgindo assim vários modelos e configurações. São analisados neste capítulo os tipos mais utilizados em produção, bem como, as características e vantagens de cada um deles.

4.2.1 Disposição dos Eletrodos

A primeira diferença que aparece em relação aos processos convencionais é que a utilização de dois eletrodos permite alterar a disposição geométrica dos mesmos em relação ao cordão de solda. Basicamente, existem duas possibilidades de alinhamento, cujas principais características estão detalhadas a seguir.

a) Eletrodos em Posição Transversal

É aquela configuração onde os eletrodos estão colocados lado a lado numa posição transversal ao sentido de deslocamento da tocha. Esta disposição é referenciada como vantajosa na soldagem de juntas de topo e em aplicações de revestimentos soldados [6]. No primeiro caso, a concentração de calor é maior nas bordas da junta do que no centro do cordão, o que é considerado como uma vantagem [1], pois permite a soldagem de juntas mal ajustadas ou com

grande abertura de raiz, garantindo uma fusão satisfatória da face da solda e diminuindo a possibilidade de aparecimento de defeitos por falta de fusão. A disposição dos eletrodos nesta aplicação está indicada na figura 1(a).

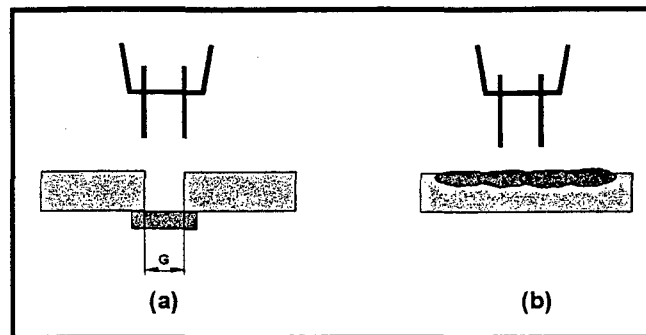


Figura 1 - Utilização de processos com duplo arame. a) Soldagem de juntas a topo b) Revestimentos soldados

No caso de revestimentos soldados, o processo configurado desta forma também encontra grande vantagem, pois obtém-se depósitos com pequena penetração e baixa diluição [7], características desejáveis nesta aplicação. A figura 1(b) exemplifica a utilização do processo em revestimentos.

b) Eletrodos em Posição Longitudinal ou Tandem

Quando dois eletrodos estão posicionados um atrás do outro ao longo do cordão de solda, diz-se que os mesmos estão em "tandem". Esta disposição é utilizada com o objetivo de aumentar a velocidade de soldagem. Com esta configuração consegue-se maior penetração e aumento da diluição em relação à configuração anterior, conforme está mostrado na figura 2.

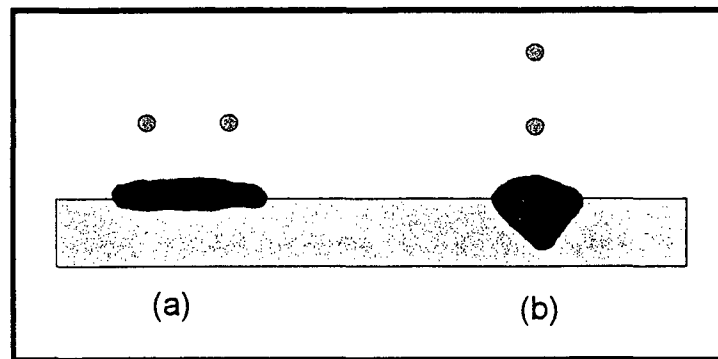


Figura 2 -Efeito do posicionamento dos eletrodos. a) Eletrodos em posição transversal ao cordão de solda b) Eletrodos em "tandem".

Além das configurações mencionadas acima é interessante destacar que num processo com duplo arame nem sempre os eletrodos fundem numa mesma poça de fusão e que o ângulo de incidência dos eletrodos, assim como, a distância entre eles desempenham um papel importante na caracterização do processo.

4.3 Deflexão Magnética

Um dos problemas que afeta a estabilidade do arco em sistemas com duplo arame é a deflexão magnética, também chamada de "sopro magnético". Esta instabilidade é originada pelos campos magnéticos gerados quando dois arcos operam um próximo do outro. Dependendo da intensidade, a deflexão magnética pode ocasionar sérios defeitos na solda. Este inconveniente é contornado de várias formas, dependendo da configuração do sistema e o tipo de corrente utilizada.

4.4 Esquemas de Conexão de Sistemas com Duplo Eletrodo

Existem vários esquemas de conexão elétrica nos quais os eletrodos podem ser combinados para atingir um aumento na produtividade. Através dos anos, sistemas multi-

eletrodos foram desenvolvidos e foram utilizados com sucesso em produção. Nesta seção pretende-se mostrar sistemas já utilizados, correspondentes a instalações para arco submerso, mas que guardam extrema analogia com os sistemas utilizados no processo MIG/MAG.

4.4.1 Eletrodos Paralelos, com Fonte de Potência Única e Alimentador Único

Neste sistema, os dois arames são conectados na mesma fonte de potência, utilizando um único sistema de alimentação e, portanto, a mesma tensão, como está mostrado na figura 3. O nome "paralelo" deriva precisamente da conexão elétrica existente entre os eletrodos. Para muitos equipamentos esta configuração só requer a adição de outra bobina de metal de adição e uma tocha especial. A fonte de soldagem deverá ser capaz de fornecer o aumento de corrente necessário para atingir as altas taxas absolutas de deposição desejadas, pois ambos eletrodos compartilham a corrente de soldagem utilizada.

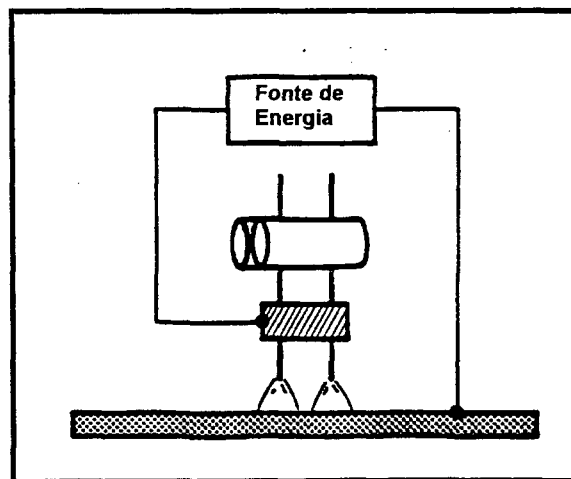


Figura 3 – Configuração de eletrodos paralelos com fonte de potência única

Os eletrodos podem ser arranjados na posição transversal ou "tandem". Quando arranjados em "tandem", esta variante permite, no processo arco submerso, aumentos da taxa de

deposição absoluta em até 50 % [6]. Na soldagem de juntas é normalmente utilizada corrente contínua e polaridade reversa (CC+). O sistema com eletrodos paralelos, configurado em "tandem", produz uma fonte de calor alongada e uma deflexão do arco detrás no sentido da soldagem. Quanto mais próximos os eletrodos, maior é este efeito. Como o segundo arco é quem controla a forma final do cordão de solda, esta deflexão "para frente" do arco detrás permite a utilização de altas velocidades de soldagem sem o aparecimento de mordeduras [1]. Para aplicações em revestimentos soldados a bibliografia cita a conveniência da utilização de eletrodos orientados em forma transversal ao cordão de solda e combinado com uma oscilação na mesma direção para minimizar a diluição e reduzir o aporte térmico [7]. Nesta aplicação aconselha-se a polaridade direta (CC-) para o arco submerso.

4.4.2 Eletrodos em Série, com Fonte de Potência Única

Este sistema utiliza arames alimentados individualmente e conectados aos pólos opostos de uma mesma fonte de potência, como mostrado na figura 4. Dessa forma, a corrente circula de um eletrodo para o outro através da poça de fusão e do metal base adjacente, com arcos em cada eletrodo e a peça. Em CC os arcos possuem polaridades opostas, portanto tendem a se repelir. O eletrodo conectado ao polo positivo provoca maior penetração que o negativo. Esta polaridade é preferida na soldagem de ligas de alumínio e magnésio [8]. Utilizando CA, com arco submerso, é possível obter um cordão de perfil constante, sendo aplicado desta forma na soldagem de aço ao carbono. Os eletrodos normalmente são posicionados a 45° em relação à superfície do metal base. Esta configuração, de forma geral, não teria uma aplicação prática no processo MIG/MAG pois, acabaria gerando extrema instabilidade na transferência

O processo está dirigido principalmente para aplicações onde é necessária uma alta taxa de deposição com um mínimo de penetração. Com os eletrodos na posição transversal em relação à direção de soldagem consegue-se um cordão largo com uma diluição mínima do metal base. Esta técnica é particularmente usada para revestimentos soldados resistentes à corrosão [6]. Com os eletrodos em "tandem" obtém-se a menor penetração e esta disposição é utilizada para soldar chapas finas em alta velocidade [7].

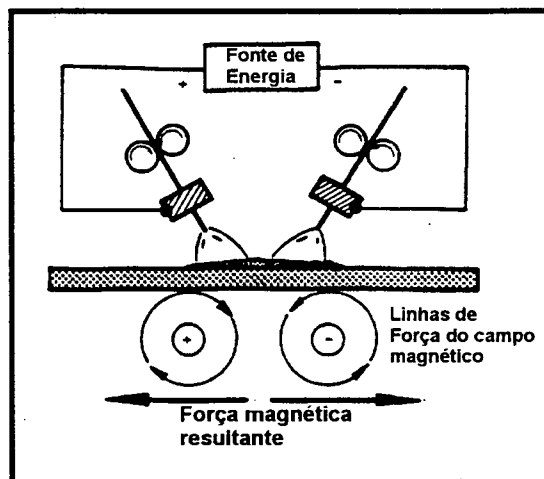


Figura 4 -Configuração de eletrodos em série, alimentados independentemente, com fonte de potência única

4.4.3 Eletrodos Isolados, com Fontes Independentes

Este tipo de conexão opera com duas fontes de potência e dois alimentadores independentes, operando simultaneamente [1,2,3], onde a única conexão entre os eletrodos é a peça. Em geral, os sistemas com fontes independentes, são muito mais flexíveis que os sistemas paralelos e série detalhados acima, pois permitem o controle da corrente e da tensão de soldagem de cada eletrodo. Eletrodos em "tandem" em aplicações para arco submerso aumentam a velocidade de soldagem e a taxa de deposição absoluta no mínimo em 100 % em relação ao processo convencional. [6,8].

Um sistema com duplo arame, com fontes de potência independentes tem por sua vez, várias opções na alimentação dos eletrodos, por exemplo, ambos podem ser CC ou CA, ou ainda, um CC e o outro CA. Estas configurações também podem ser combinadas com corrente pulsada. A seguir são caracterizadas configurações que utilizam fontes CA e CC para posteriormente fazer uma abordagem em sistemas alimentados com corrente alternada retangular e corrente pulsada retangular.

☞ CC/CC

Em forma análoga à configuração com eletrodos em paralelo, cria-se uma forte atração magnética entre os arcos, devido a que as correntes tem o mesmo sentido. Porém, nesta configuração, cada arco pode ser controlado em forma independente. Como o sistema só utiliza CC, além do problema da deflexão magnética entre arcos, há possibilidade de ocorrer interferências magnéticas pelo estabelecimento de um caminho preferencial entre os eletrodos e a conexão do cabo terra, a partir de certo nível de corrente. Os efeitos do sopro magnético, neste caso, podem produzir irregularidades na geometria do cordão, porosidade, mordeduras e/ou falta de penetração.

☞ CC/CA

Nesta configuração, o primeiro eletrodo é conectado inversamente (eletrodo positivo) e o segundo em CA, combinando desta forma a excelente característica de acendimento do arco da tensão contínua e reduzindo os efeitos da sopro magnético com a corrente alternada. Da mesma forma que na configuração CC/CC, não existe conexão elétrica entre as fontes ou entre os

eletrodos, sendo os dois sistemas independentes atuando numa mesma poça de fusão. A figura 5 mostra uma representação esquemática desta disposição.

O primeiro eletrodo opera em alta corrente fornecendo a penetração desejada com mínima diluição, enquanto o segundo, com menor corrente, ajusta a geometria do cordão. Normalmente a fonte para o primeiro eletrodo é de tensão constante e o alimentador de arame de velocidade constante (controle interno), já a fonte para o segundo eletrodo é de corrente constante com alta tensão em vazio para facilitar a re-ignição do arco, utilizando controle externo no alimentador de arame. Desta forma, a taxa de alimentação do arame é variada automaticamente para manter um comprimento do arco preestabelecido.

O arco CC abre facilmente no primeiro eletrodo, já que a corrente está livre e o segundo só é acionado logo depois do início da soldagem. Desta forma, o arco CA também consegue uma boa ignição porque a atmosfera que circunda os eletrodos é propícia para a abertura do arco.

A utilização da fonte CA, além de minimizar o efeito do sopro magnético entre os dois eletrodos aumenta a faixa de corrente admissível para este processo comparado com o CC/CC, pois também reduz a interferência magnética ocasionada pelo estabelecimento do caminho preferencial da corrente entre os eletrodos e o cabo terra.

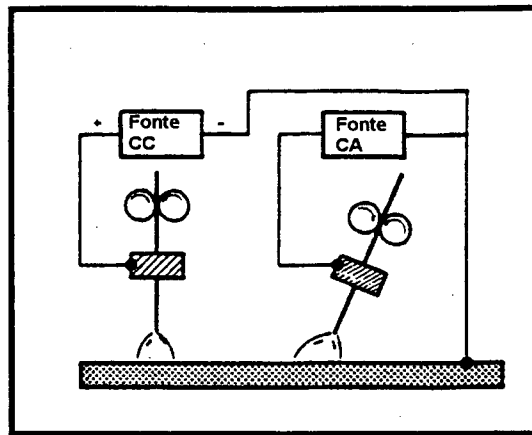


Figura 5– Configuração de eletrodos alimentados independentemente onde o eletrodo principal é alimentado com CC e o auxiliar com CA

☞ CA/CA

Menos susceptível ao efeito da deflexão magnética entre arcos, esta configuração utiliza dois eletrodos independentes conectados a fontes de potência CA. Através da aplicação de uma defasagem entre as correntes [3], é possível obter estabilidade do arco e altas velocidades de soldagem. Nem todas as combinações de conexão entre as fontes proporcionam condições estáveis de arco. De fato, a maioria delas provoca instabilidade. Constatou-se que através de uma defasagem de aproximadamente 90° entre as correntes dos dois eletrodos consegue-se uma boa estabilidade dos arcos. Existem várias maneiras de conectar os transformadores para conseguir tal defasagem. Dentre delas a Conexão Scott e a Delta Fechado são as mais conhecidas [6,7,8]. Como estas configurações distam bastante da aplicação prática neste trabalho, as mesmas não serão analisadas em detalhe.

☞ Utilização da Corrente Alternada Retangular

A utilização da corrente alternada retangular apresenta várias vantagens em relação aos processos mencionados acima. Entre elas, podem ser citadas a consistente re-ignição do arco a

cada meio ciclo e o fato de que no início da soldagem o processo dispensa a utilização de algum controle especial. Devido ao fato de utilização de corrente alternada, os problemas de deflexão magnética, são minimizados. Conseqüentemente, pode ser dito que o sistema reúne as principais vantagens das fontes CC e CA.

BUNKER [2] utilizou conexões em Paralelo, Delta Fechado e Scott, com fontes CA retangular para avaliar o desempenho de sistemas com múltiplos arames no processo arco submerso, concluindo que benefícios significativos podem ser obtidos, em relação a velocidade de soldagem e taxas de deposição absolutas.

4.5 O Processo MIG/MAG com Duplo Arame

4.5.1 Características Gerais

Em forma análoga ao processo convencional, no processo duplo arame, a poça de fusão, é protegida por um fluxo de gás inerte, ativo ou uma mistura de ambos. O metal de base determina a composição dos eletrodos e o tipo de gás de proteção a ser utilizado. O tipo de gás e as características dos eletrodos tem muita influência no tipo de transferência metálica durante a soldagem. O processo atualmente não conta com uma versão semi-automática, portanto, ele está classificado como um processo automatizado.

4.5.2 Classificação do Processo MIG/MAG com Duplo Arame

No Brasil, assim como na maioria dos países latino-americanos, a nomenclatura utilizada na área de soldagem nem sempre foi a mais adequada para definir um determinado processo ou uma característica do mesmo. Isto decorre do fato de que normalmente a tecnologia provém de

fora e as definições adotadas são simplesmente traduções dos termos utilizados no país de origem. Adicionalmente, cada fabricante de equipamentos registra um nome para seu produto para que o mesmo cause o maior impacto possível no mercado induzindo o consumidor a utilizá-lo também para definir um determinado processo ou produto. Tudo isto normalmente gera confusões nos usuários finais e, de fato, é um problema generalizado na maioria das áreas tecnológicas.

É intenção deste trabalho adotar uma terminologia adequada que permita esclarecer os conceitos e assim definir o processo da melhor forma possível. Conseqüentemente, a seguir apresenta-se a classificação básica do processo para posteriormente descrever suas características e principais aplicações.

a) Processo MIG/MAG Duplo Arame com Potencial Único

Nesta configuração os dois eletrodos estão em contato elétrico no bico de contato e os terminais dos mesmos estão conectados a uma mesma fonte de tensão, como mostra a figura 6. São necessários dois alimentadores de arame e uma fonte de soldagem que deve ser capaz de fornecer a corrente necessária para atingir as taxas de deposição absolutas desejadas. BROWN [9,10], apresenta uma configuração na versão MIG/MAG com corrente pulsada gerada a partir de uma fonte de energia única. Pela variação do afastamento entre os eletrodos foi possível operar com os arcos incidindo sobre uma poça de fusão única ou independente, produzindo variações na geometria dos depósitos.

Uma vantagem desta configuração é que só é necessária uma fonte de energia para sua aplicação, o que em certa forma minimiza o custo de sua aplicação. Porém, a mesma deve ter a

capacidade suficiente para fornecer as altas densidades de corrente que justifiquem a implementação do processo.

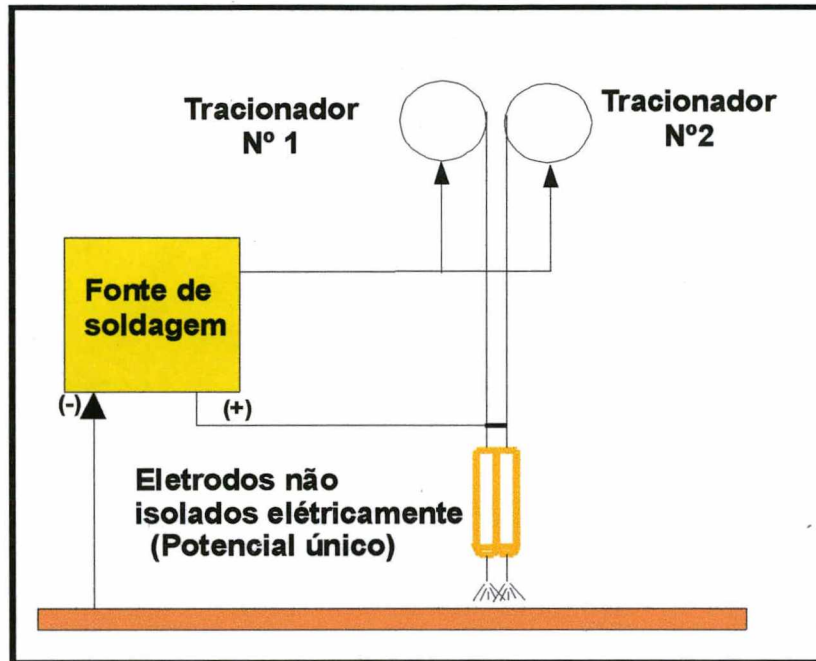


Figura 6– Representação esquemática da configuração do processo MIG/MAG duplo arame com potencial único

Nesta configuração, sopro magnético não pode ser evitado nem minimizado devido a que ambos eletrodos estão submetidos ao mesmo potencial. O processo admite ainda estabelecer velocidades de alimentação de arame diferentes em cada tracionador. Consequentemente, o comprimento livre do eletrodo pode ser ajustado de forma independente.

Na soldagem de alumínio, HACKL [11] argumentou não ter conseguido as velocidades de soldagem esperadas devido à formação de curto-circuitos entre um e outro eletrodo e a poça de fusão, o que causava muitas salpicagens e instabilidade nos dois arcos, provocando flutuações no comprimento dos mesmos. Na tentativa de minimizar esta instabilidade, foi aumentado o comprimento do arco. Porém, foi necessário também diminuir a velocidade de soldagem.

Uma variante do processo com potencial único é a denominada "MIG-Twisted-Wires" [12] que utiliza dois eletrodos trançados, alimentados por uma única fonte de energia. Neste processo os arcos se superpõem e criam uma única poça de fusão.

b) Processo MIG/MAG Duplo Arame com Potenciais Isolados

O processo MIG/MAG Duplo Arame com Potenciais Isolados pode ser considerado como uma evolução do processo com potencial único. O mesmo está constituído basicamente por duas fontes de potência independentes e dois alimentadores de arame com eletrodos atuando na mesma poça de fusão. Na figura 7 está representado um esquema da configuração do processo e a figura 8, mostra uma estação de soldagem robotizada.

Um sistema com potenciais isolados tem, como grande vantagem, a capacidade de controlar as variáveis de cada arco. Consequentemente, surgem várias possibilidades de alimentação para cada eletrodo, como está mostrado na tabela 1.

1º Eletrodo	2º Eletrodo
CC	CC
Pulsado	CC
CC	Pulsado
Pulsado	Pulsado

Tabela 1 - Alternativas de alimentação dos eletrodos na configuração com potenciais isolados

Devido ao fato de ser um processo relativamente novo, não há muita informação na literatura sobre as características de cada sistema de alimentação. Porém, a tendência na configuração destes sistemas apontam ao modo pulsado/pulsado como sendo um dos mais apropriados para se obter soldas de boa qualidade.

LASSALINE et. al. [13] desenvolveu um protótipo baseado em fontes de corrente pulsada com características similares ao mostrado na figura 7. Nesta configuração, a fonte que comanda o primeiro eletrodo, denominada “mestra”, estabelece a frequência necessária para satisfazer os requisitos de taxa de fusão e de estabilidade do arco. Uma frequência idêntica é aplicada no outro eletrodo através de uma fonte denominada de “escrava”. A tensão em cada arco é monitorada, sendo corrigida, quando a mesma muda de valor, através da variação da frequência no caso da fonte “mestra” ou através da variação da corrente de base (I_b) e tempo de pulso (t_p) no caso da fonte “escrava”. Desta forma, perturbações na velocidade de alimentação do eletrodo ou variações na distância eletrodo-peça podem ser compensadas.

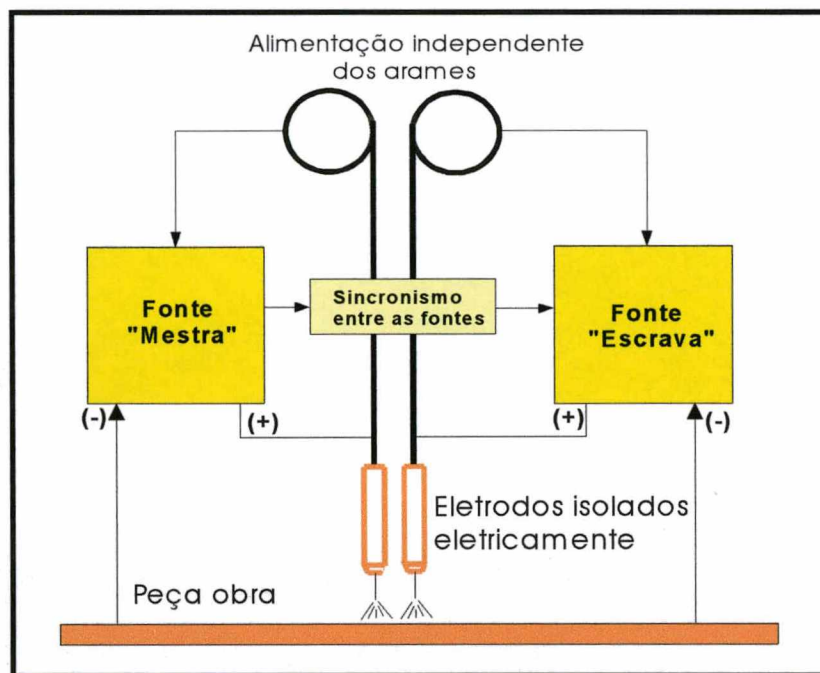


Figura 7– Representação esquemática da configuração do processo MIG/MAG duplo arame com potenciais isolados

O sopro magnético, problema mais crítico dos sistemas com duplo arame, foi contornado nesta aplicação através de uma defasagem da corrente que circula por cada eletrodo. Este

procedimento permitiu uma excelente estabilidade do arco. A defasagem proposta está mostrada esquematicamente na figura 9.

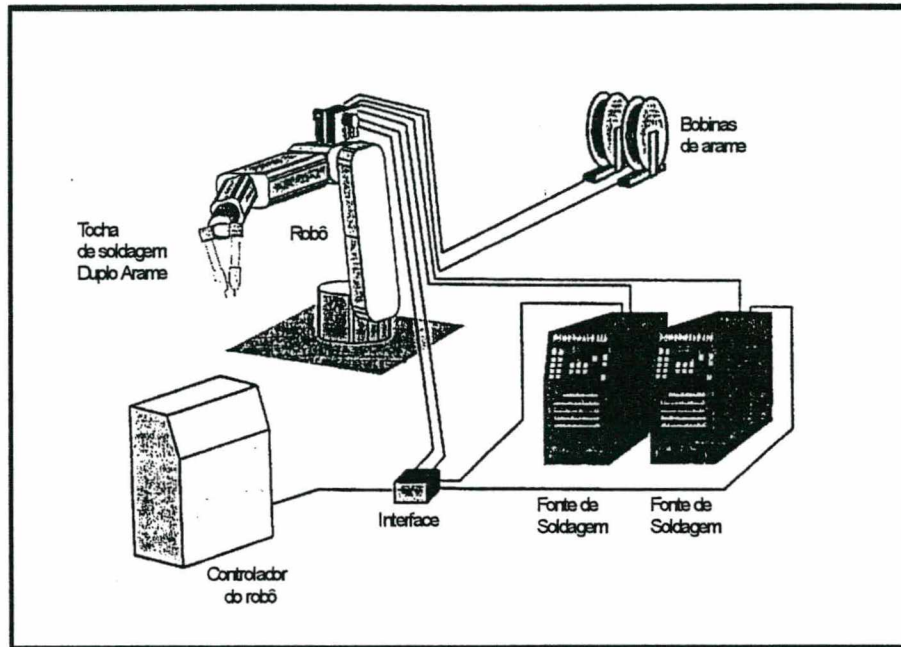


Figura 8— Representação esquemática de uma estação robotizada do processo MIG/MAG duplo arame com potenciais isolados

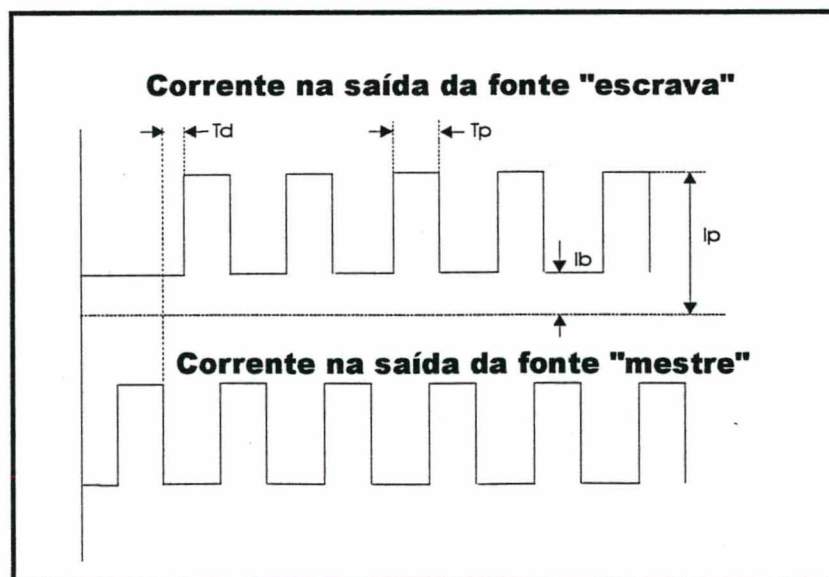


Figura 9— Defasagem entre os pulsos da fonte "mestre" e "escrava"

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

WATANABE et. al. [14], apresentou uma variante do processo, empregando dois eletrodos em "tandem", suficientemente afastados para produzirem duas poças de fusão. Com isto, foi possível controlar as taxas de resfriamento, melhorando as propriedades mecânicas da junta soldada. Este sistema, embora possa ser implementado no processo TIG e arco submerso, no processo MIG/MAG apresenta maiores vantagens, pois além das elevadas taxas de deposição, o afastamento entre os eletrodos pode ser relativamente grande o que se torna inviável no arco submerso devido ao fluxo.

Outra configuração é aquela onde o primeiro eletrodo é alimentado com CC e o segundo com corrente pulsada. Este modo de operação permite ao primeiro eletrodo determinar a penetração necessária, enquanto o segundo define a geometria do cordão e proporciona a quantidade extra de material necessária para atingir altas velocidades de soldagem.

4.5.3 Tochas de Soldagem

As tochas de soldagem aplicáveis ao processo estão disponíveis no mercado em modelos de bocal único com potenciais isolados ou não, como assim também, em configurações adaptadas com tochas de soldagem MIG/MAG convencionais montadas num suporte especial. A

utilização de tochas de bocal único pressupõe uma maior economia no consumo de gás de proteção, já que os bicos de contato para ambos eletrodos se encontram alojados no mesmo bocal. O sistema de tochas adaptadas oferece maior versatilidade ao processo, pois permite a utilização de tochas convencionais com a consequente vantagem na facilidade de obtenção de peças de reposição. As tochas em geral são refrigeradas a água, devido a que as faixas de corrente utilizadas normalmente são muito elevadas. Na figura 10 estão apresentados alguns dos modelos disponíveis no mercado.

4.5.4 Consumíveis e Gases

Os consumíveis e gases utilizados no processo, são os mesmos do processo convencional, o que possibilita sua aplicação na soldagem dos principais materiais como aço carbono, aços inoxidáveis e alumínio.

4.5.5 Aplicações

O processo é utilizado tanto em chapas finas quanto em componentes de grandes dimensões. Operando com corrente pulsada sincronizada, STOL [15] obteve bons resultados na soldagem de tubos pela técnica "Narrow Gap". Da mesma forma, LASSALINE [13], utilizando a mesma técnica, desenvolveu procedimentos para a soldagem de chapas de aço HSLA-100 e HY-100 de 38 mm de espessura. HACKL [11] comenta que o processo é utilizado na fabricação de automóveis e seus componentes, citando como exemplo a soldagem de rodas de AlMg4.5Mn com velocidades de soldagem de até 130 cm/min.

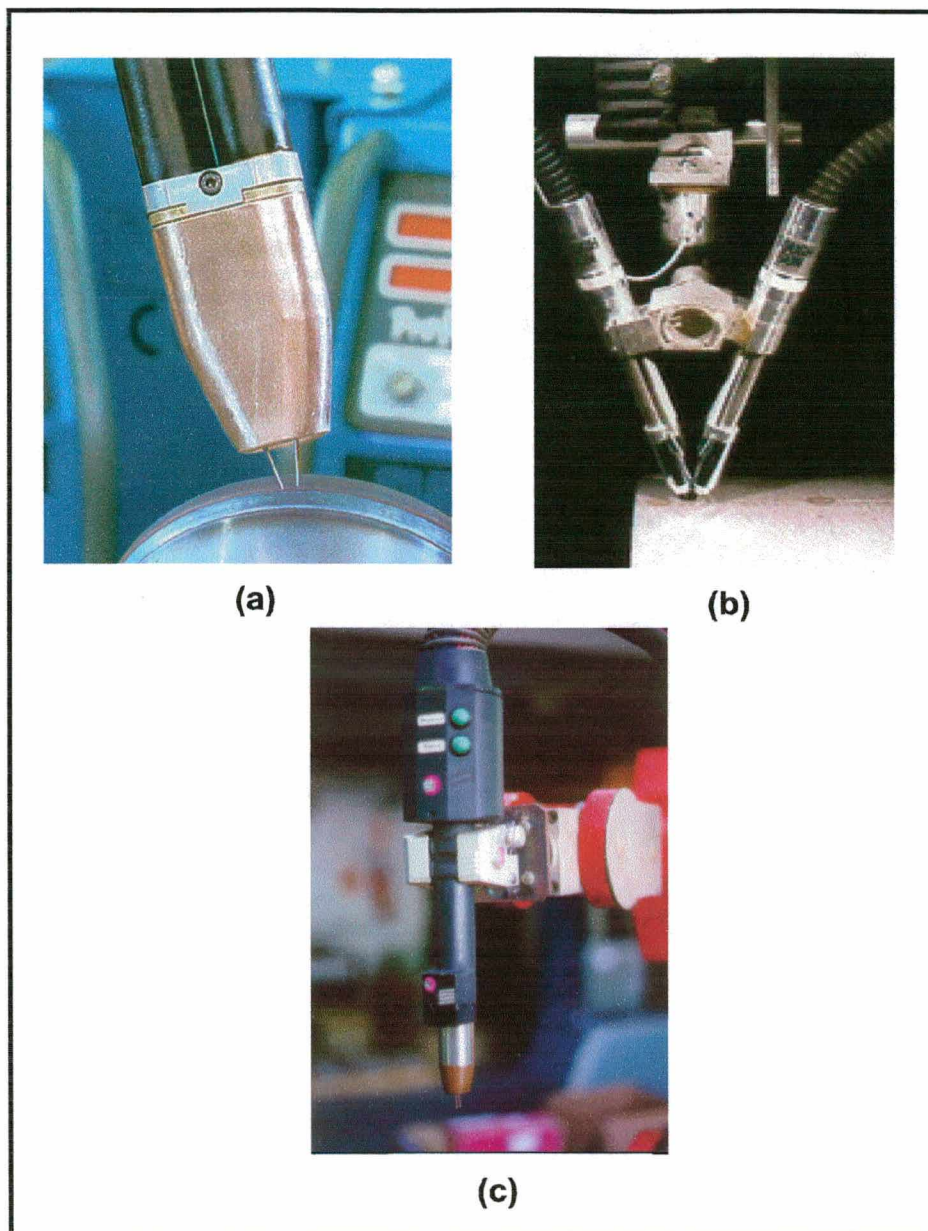


Figura 10 – Tipos de tochas MIG/MAG Duplo Arame disponíveis no mercado a) Tocha de potencial isolado [16] b) Tochas MIG/MAG convencionais adaptadas [17] c) Tocha de potencial único [18]

V - ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA

5.1 A Transferência Metálica

No processo MIG/MAG com Duplo Arame, assim como na maioria dos processos de soldagem ao arco, a forma em que o metal é transferido do eletrodo para a poça de fusão é de fundamental importância na qualidade dos depósitos. A transferência metálica influencia diretamente na estabilidade do arco, produção de salpicos, perfil de penetração, taxa de deposição e posição de soldagem [19,20]. Apresenta-se, neste capítulo, uma breve introdução sobre os principais modos de transferência metálica e os fatores de influência de cada um deles, assim como, toda a nomenclatura relacionada e utilizada durante o trabalho. Pretende-se, com isto, fornecer o embasamento teórico, necessários à compreensão das considerações feitas na realização dos experimentos e na análise dos resultados obtidos nos ensaios.

5.2 Modos de Transferência

Neste trabalho, são feitas considerações especiais na classificação dos modos de transferência que serão oportunamente comentadas. A tabela 2, mostra a classificação dos modos de transferência do processo MIG/MAG, com a nomenclatura adotada pelo LABSOLDA.

5.3 Transferência por Curto-Circuito

A transferência metálica no modo curto-circuito se processa pelo contato físico do eletrodo com a poça de fusão. A velocidade de alimentação do arame tem um papel fundamental na definição da corrente de soldagem. Quanto maior a velocidade de alimentação, maior a

corrente média de soldagem, sempre que a tensão disponível nos terminais da máquina seja compatível com este incremento. De fato, para obter depósitos com geometria adequada e mínima produção de salpicos é necessário combinar parâmetros e variáveis de soldagem de tal forma a obter uma transferência estável.

1.0	Transferência em Vôo Livre	2.0	Transferência c/ contato entre eletrodos
1.1	Globular	2.1	Curto-circuito
	por gota		curto-circuito
	repulsiva		curto-circuito de alta densidade corrente
1.2	Projeção		
	projétil ("drop transfer" / "pulsed transfer")		
	escoamento com fluxo goticular axial ("spray")		
	escoamento com fluxo goticular rotativo		

Tabela 2 - Classificação dos modos de transferência aplicáveis ao processo de soldagem MIG/MAG

O regime em curto-circuito propriamente dito, é definido neste trabalho como aquele modo de transferência que se encontra numa faixa de operação do processo cujo limite superior de corrente é aquela a partir da qual se consegue uma transferência por fluxo goticular estável.

5.3.1 Transferência por Curto-Circuito de Alta Densidade de Corrente

O regime de transferência denominado neste trabalho de Curto-Circuito de Alta Densidade de Corrente é definido, como aquele modo de transferência que se encontra numa faixa de operação cujo limite inferior de corrente admite uma transferência por fluxo goticular axial estável, porém ainda conserva características de transferência por curto-circuito. Este tipo de transferência é conseguido, através da utilização de baixas tensões e é mencionado na bibliografia como curto-circuito "forçado" [21], porém, esta terminologia não parece ser muito

adequada, pois desde um ponto de vista mais geral, toda condição de curto-circuito é imposta e conseqüentemente "forçada" através da aplicação de baixas tensões.

5.3.2 Estabilidade do arco

Em relação à produção de salpicos, a estabilidade do arco tem grande influência. O termo estabilidade pode ser utilizado na soldagem MIG/MAG para descrever um nível de regularidade na transferência metálica, caracterizando uma situação de equilíbrio médio entre a velocidade do arame e a velocidade de fusão do mesmo. Uma forma de avaliar a estabilidade é através da repetibilidade temporal de valores instantâneos de tensão e corrente [22,23,24]. Através de análise estatística de oscilogramas de tensão e corrente é possível extrair indicativos da regularidade da transferência e com isto comparar, quantitativamente soldagens realizadas sob diferentes combinações de parâmetros e variáveis de processo.

5.3.3 Efeito Indutivo

Uma variável que influencia na estabilidade do arco e de, forma mais discreta, na taxa de fusão do eletrodo é o efeito indutivo. Esta denominação deriva do termo indutância, que se aplica com propriedade à forma de ajuste da taxa de variação da corrente em fontes de soldagem de concepção mais antiga [25]. Nestas, o ajuste é feito através de um indutor conectado em série ao arco com o objetivo de amortecer a subida da corrente na fase de curto-circuito, fazendo com que ela não cresça de forma instantânea mas sim, de forma exponencial. Nas fontes de soldagem mais sofisticadas, o ajuste da taxa de crescimento da corrente deixou de ser feito com base no valor da indutância elétrica do circuito e passou a ser realizada através de circuitos eletrônicos de controle. Neste trabalho adota-se o termo "efeito indutivo" para caracterizar o fator de ganho do

sistema de controle que define a taxa de crescimento da corrente na transferência por curto-circuito.

5.4 Correntes de Transição

No processo MIG/MAG existem basicamente duas correntes de transição. A primeira, onde a transferência pode mudar de globular ou curto-circuito para a transferência por fluxo goticular axial e a segunda, onde a transferência por fluxo goticular axial muda para a transferência por fluxo goticular rotativo e ambas são principalmente influenciadas pela composição e geometria do eletrodo e pela polaridade. Para arames de aço carbono de 1.0 mm, a transferência atinge a condição de fluxo goticular axial estável com uma velocidade de arame aproximada de 8.0 m/min, correspondente a 200 A e para arames de 1.2 mm, esta condição é atingida com 7.0 m/min e 300 A. A condição de transferência por curto-circuito pode ainda ser mantida acima destas correntes de transição através da utilização de baixos níveis de tensão, tendo como vantagem associar uma transferência por curto-circuito convencional com altas velocidades de soldagem. Neste caso o arco elétrico é muito curto, trabalhando mergulhado na poça de fusão. A otimização deste tipo de transferência depende em grande parte do gás de proteção e da qualidade do arame que requer um bobinamento adequado devido às altas velocidades de alimentação [21]. Neste trabalho, como foi mencionado anteriormente, esta condição de transferência recebe a denominação de Transferência por Curto-Circuito de Alta Densidade de Corrente.

5.5 Escoamento com Fluxo Goticular Axial ("Spray")

A denominação escoamento com fluxo goticular axial, em lugar da conhecida expressão de origem inglesa, decorre, em primeiro lugar, do fato da expressão "spray", não refletir o fenômeno real da transferência, que se caracteriza pela passagem de finíssimas gotas axialmente direcionadas com diâmetros iguais ou inferiores ao diâmetro do eletrodo e, em segundo lugar, pela carência de uma terminologia adequada na língua portuguesa que defina esta condição de transferência. Ao longo do trabalho este modo de transferência será denominada simplesmente de transferência por fluxo goticular.

Este tipo de transferência se produz a partir de uma determinada corrente e em presença de atmosferas ricas em Argônio ou Hélio (acima de 80 % em geral). Os valores de tensão devem ser ajustados de tal forma que a ponta do eletrodo não entre em contato com a poça de fusão. Neste regime de transferência, a coluna de arco tem um comportamento estável que aliado a um comprimento do arco adequado apresenta baixo nível de respingos. Devido à alta produtividade deste modo de transferência ha uma tendência no processo MIG/MAG convencional de ampliar o máximo possível a faixa de correntes aplicáveis [26]. Nesse sentido, é bom destacar que, no processo duplo arame com potencial único, o valor da corrente de transição da passagem do modo fluxo goticular para o modo rotativo é duplicado, constituindo-se em vantagem adicional do processo.

5.6 Transferência por Projétil

Na passagem do modo de transferência por curto-circuito ou globular para o modo fluxo goticular axial, existe uma faixa de corrente na qual a transferência é caracterizada pelo aumento

da frequência de passagem das gotas. Neste regime, o diâmetro das gotas é similar ao diâmetro do eletrodo [27]. Este tipo de transferência é denominada transferência por projétil e dependendo do tipo de gás de proteção a faixa de corrente em que ela ocorre pode ser mais larga ou mais estreita. Através da utilização da corrente pulsada é possível obter a transferência por projétil com níveis de corrente média inferiores aos utilizados com corrente constante. A utilização desta técnica também permite controlar o tamanho da gota destacada durante cada pulso e a frequência de destacamento desde que o tempo de pulso, amplitude e frequência sejam convenientemente estabelecidos. Se a combinação correta de corrente de pulso e duração do pulso for escolhida, uma gota única com virtualmente mesmo tamanho pode ser destacada por cada pulso, independentemente da corrente média. A faixa de parâmetros em que se obtém este comportamento pode ser determinada experimentalmente para cada combinação de arame e gás de proteção. Para se estabelecer uma condição estável, a taxa de fusão precisa ser balanceada pela taxa de alimentação do arame e o comprimento do eletrodo requerido para produzir uma gota fundida de diâmetro constante. A transferência por projétil obtida através da corrente pulsada é frequentemente denominada de transferência pulsada.

As principais vantagens da transferência pulsada são mencionadas a seguir:

- possibilidade de soldar chapas finas, juntas verticais e sobre-cabeça em função das baixas correntes médias utilizáveis;
- geometria do cordão constante e uniforme
- um mesmo diâmetro de arame pode ser utilizado num amplo intervalo de corrente.

Existem três princípios básicos que garantem, em conjunto, a estabilidade do arco e a condição de que uma gota seja associada com cada pulso de corrente [28]. O primeiro princípio

utilizado é a condição de destacamento de uma única gota, que depende fundamentalmente da corrente de pulso e do seu respectivo tempo de duração. A relação entre as duas variáveis, para um volume constante de gota, é expressa pela seguinte equação:

$$D = I_p^2 * t_p \quad (1)$$

Onde a constante D, denominada Parâmetro de Destacamento, depende do tipo de eletrodo (composição química e diâmetro), do diâmetro da gota requerida, e em menor escala, da composição do gás de proteção. Esta expressão representa a condição para a transferência que associa cada gota a um pulso de corrente. A mesma define o conjunto de parâmetros de pulso mais adequados para que isto aconteça, porém estas variáveis podem ser ajustadas dentro de um certo intervalo, como mostra a figura 11, que relaciona a corrente de pulso com o tempo de pulso.

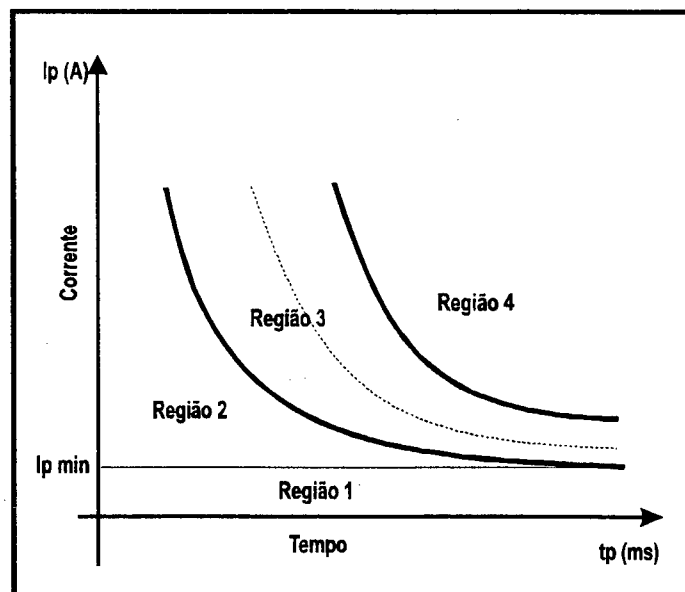


Figura 11 - Região (3). Tempo de pulso e corrente de pulso adequados para a transferência de uma gota por cada pulso

Neste gráfico, o intervalo mencionado corresponde à região 3. Da mesma forma, podem ser identificadas as seguintes regiões:

A região 1, onde I_p é menor que I_p mínimo ou corrente de transição. Nesta região forma-se uma larga gota independente da duração do pulso, o arco se torna instável, acompanhado de muito salpico.

A região 2, onde I_p é maior do que I_p mínimo, mas a duração do pulso é menor do que a mínima exigida, sendo a energia muito pequena para provocar a transferência em um pulso. É gerada assim uma grande gota que se mantém por vários pulsos, até se separar sem controle algum.

A região 3, como foi mencionado acima, constitui-se na região mais apropriada para a transferência pulsada, com I_p maior do que I_p mínimo e o tempo de pulso entre os limites máximos (t_{max}) e mínimos (t_{min}). Uma gota com diâmetro próximo ao do eletrodo é transferida regularmente e em cada pulso, com arco extremamente estável.

Na região 4, I_p é maior do que I_p mínimo e o tempo de pulso maior do que o máximo. O modo de transferência é, aparentemente por fluxo goticular. Entretanto, a ponta fundida do eletrodo se prolonga e toca a poça de fusão, causando excessivo salpico. Além do mais, com o aumento de t_p nesta região, a frequência do pulso decresce (com velocidade constante do eletrodo) resultando numa flutuação incessante do comprimento do arco.

O segundo princípio, é a relação da velocidade do arame em função da corrente média e pode ser expressa pela seguinte equação

$$V_a = \alpha * I + \beta * l * I^2 \quad (2)$$

Esta expressão, foi derivada de princípios básicos de física [29] e, se a corrente for constante no tempo, como ocorre aproximadamente na soldagem MIG/MAG convencional, os resultados práticos divergem muito pouco dos obtidos pela equação. Porém para aplicações em corrente pulsada, a expressão acima, deve ser modificada [22], conforme a seguinte expressão:

$$V_a = \alpha * I_m + \beta * l * I_{ef}^2 \quad (3)$$

Desta forma, o valor médio da corrente deve ser considerado na primeira parcela, enquanto que o valor eficaz deve ser considerado na segunda. Outra consideração que deve ser

feita refere-se ao cálculo da corrente média da corrente pulsada a qual é definida pela seguinte expressão:

$$I_m = \frac{I_p * t_p + I_b * t_b}{t_p + t_b} \quad (4)$$

A expressão para o período T, é obtida por um relacionamento geométrico que considera o volume de arame que avança durante este período e que vai formar uma gota com formato esférico.

$$T = \frac{40 * \phi_g^3}{\phi^2 * V_a} \quad (5)$$

Onde ϕ_g é o diâmetro da gota, ϕ o diâmetro do eletrodo, V_a a velocidade do arame e T o período de transferência.

Por último, as condições do pulso são também limitadas pelo requisito de uma corrente de base que exceda um valor mínimo, porque o arco, com uma baixa corrente de base, tornar-se-á instável. Este limite pode ser expresso pela seguinte expressão:

$$I_b > C \quad (6)$$

onde C é o limite da corrente de base para obter um arco estável

A determinação dos parâmetros da corrente pulsada no processo duplo arame com potenciais isolados estaria basicamente definida através das relações acima apresentadas pois, nesse caso, os arames são comandados por fontes de energia independentes. No processo duplo arame com potencial único as condições são diferentes e conseqüentemente, devem ser levadas em consideração outros aspectos.

A metodologia de determinação das variáveis da corrente pulsada no processo com potencial único está baseada na necessidade da duplicação da corrente média para conseguir dobrar a taxa de fusão absoluta. Por outro lado, a frequência da transferência pode ser mantida, ou seja, uma condição de uma gota por pulso, por arame, estaria sendo estabelecida e com isto, o valor dos tempos de pulso e de base determinados para o caso particular de um arame, continuam

sendo válidos nesta aplicação. Para duplicar a corrente média é necessário portanto, estabelecer valores de corrente de pulso e de base adequados. Em relação à corrente de pulso, esta deve ser suficiente para conseguir destacar uma gota por pulso por arame, portanto, torna-se necessário duplicar seu valor. Por outro lado, o cálculo da corrente de base deve levar em consideração a necessidade de manter cada arco numa condição estável, conseqüentemente, ela deve ser calculada em função de cada arame, considerando que a corrente total passando no bico de contato é igualmente distribuída para cada eletrodo. Desta forma, a expressão (4), pode ser utilizada para sua determinação.

5.7 Técnicas de Observação da Transferência Metálica

Será apresentado a seguir uma breve descrição das principais técnicas utilizadas no estudo da transferência metálica para posteriormente realizar uma análise introdutória aos sistemas de aquisição de imagens.

A transferência metálica pode ser caracterizada através de métodos diretos e indiretos [20]. As principais técnicas para o estudo através de métodos diretos são:

- fotografia,
- filmagem convencional
- filmagem a alta velocidade,
- deposição em chapas.

Os primeiros três métodos, analisam as condições instantâneas do processo, registrando a própria passagem das gotículas de metal para a peça e o último analisa a evidência física da

transferência metálica. Entre os métodos indiretos destacam-se aqueles que relacionam principalmente as variações da corrente e da tensão no arco com a transferência metálica. Desta forma, os sinais provenientes do arco são registrados em forma de oscilogramas, para posteriormente serem analisados e assim, determinar o comportamento da transferência. Neste caso, a observação é indireta e os eventos de transferência são mais difíceis de caracterizar.

Apesar dos bons resultados que podem ser obtidos através dos sistemas de aquisição de imagens, pois os mesmos são caracterizados pela boa resolução ótica, permitindo a observação direta da gota transferida, o período de aquisição dos dados (período de observação ativa do arco) é geralmente limitado a segundos ou menos, requerendo desta forma um grande número de amostras para se fazer uma análise estatística adequada. A aquisição de dados com métodos indiretos permite maior flexibilidade nesse sentido. Portanto, uma combinação das duas técnicas é recomendável na caracterização dos modos de transferência nos processos de soldagem. Dentro da análise a ser feita neste trabalho pretende-se utilizar ambas técnicas, através da aquisição de imagens e das variáveis de soldagem,

5.7.1 Sistemas de Aquisição de Imagens

Nos estudos de transferência metálica para o processos MIG/MAG ou eletrodo revestido, é utilizada freqüentemente a técnica da cinematografia a alta velocidade. Esta técnica permite a aquisição de dados fotográficos de fenômenos que ocorrem a velocidades superiores á da percepção humana. A necessidade de obter estas imagens é muitas vezes crucial pois os filmes obtidos destes trabalhos permitem uma detalhada análise dos eventos, fornecendo dados de muita utilidade para pesquisa e desenvolvimento de projetos. RHEE [30], utilizou uma vídeo-câmera de alta velocidade para a aquisição de imagens da transferência no processo MIG/MAG

com uma velocidade de aquisição utilizada foi de 1000 quadros/s. Esta velocidade foi considerada adequada para monitorar a transferência nos modos globular e fluxo goticular.

Além do próprio equipamento que realiza a captura das imagens há necessidade da geração de uma luz de fundo que, em conjunto com filtros para a redução da luminosidade do arco, cria as condições necessárias para a realização das observações visuais. Nesse sentido, vários trabalhos [31,32,33] descrevem as vantagens da utilização de uma fonte LASER, no processo de registro das imagens da transferência metálica no processo MIG/MAG, destacando-se entre elas o baixo custo e o tamanho compacto da mesma. Além deste tipo de fonte, cuja característica é a emissão de luz de um comprimento de onda definido, também pode-se utilizar lâmpadas de xenônio, que emitem uma luz mono-cromática de elevada potência. Desta forma a realização de registros fotográficos se viabiliza pela incorporação ao sistema, de filtros de elevada densidade ótica. Porém, há uma tendência na utilização das fontes LASER em detrimento das lâmpadas de xenônio, justificada pelo elevado custo de aquisição e períodos de acendimento relativamente curtos impostos por estas lâmpadas. Uma terceira opção, é a utilização da luz produzida por um arco TIG como luz de fundo a qual apresenta excelente estabilidade espacial e regularidade na emissão de luz. É esta a técnica cujo potencial pretende-se verificar neste trabalho em função da praticidade da sua utilização.

VI - MATERIAIS E METODOS

6.1 Equipamentos

6.1.1 Bancada de Soldagem

a. Fonte de Soldagem - MTE DIGITEC 600 (IMC/LABSOLDA)

Todos os experimentos foram realizados utilizando uma fonte de soldagem MTE DIGITEC 600. Este equipamento é uma fonte de energia para soldagem multiprocesso e microprocessada que permite soldar com uma corrente máxima de 600 A. O nome MTE indica os processos em que pode atuar (MIG, TIG e Eletrodo Revestido). Esta fonte utiliza transistores de 3ª geração, denominados IGBT's (Insulated Gate Bipolar Transistor). As fontes MTE DIGITEC 600, constituem a segunda geração da família das fontes de energia produzidas pela parceria IMC-LABSOLDA. Ao se optar por soldar pelo processo MIG/MAG, a fonte DIGITEC pode ser comandada das seguintes maneiras:

- por ajuste de corrente
- por ajuste de tensão

No modo pulsado, a fonte opera com comando de corrente. O ajuste das variáveis da corrente pulsada pode ser realizada diretamente pelo próprio operador ou através da utilização do modo sinérgico, onde as variáveis de soldagem encontram-se preestabelecidas na memória da fonte. Características inerentes ao processo MIG/MAG com duplo arame determinaram a realização de certas adaptações na fonte. A primeira, é com relação à necessidade de alimentar

dois arames numa mesma tocha de soldagem. Para cumprir com esta condição foi necessário adicionar à fonte uma tomada de força auxiliar para conectar outro tracionador de arame, desta forma, foi possível conectar dois tracionadores de arame a uma mesma fonte de soldagem.

b. Cabeçote Alimentador de Arame STA-20 (IMC/LABSOLDA)

Dois cabeçotes alimentadores de arame STA-20, foram adaptados ao sistema. Ambos equipados com quatro roletes tracionadores, eles permitem o ajuste individual da velocidade de alimentação de arame de forma independente. Este recurso foi de grande utilidade no estabelecimento dos parâmetros de soldagem.

c. Tocha de Soldagem MIG/MAG Duplo Arame. MWT-2DW (BINZEL)

A tocha de soldagem MIG/MAG utilizada no trabalho foi cedida pela empresa BINZEL do Brasil e a mesma foi projetada para operar com dois arames, com um único potencial. Ela é indicada pelo fabricante para soldar com transferência pulsada. A tocha é refrigerada a água e admite uma corrente máxima de operação igual a 1000 A (100%). Isto na verdade, gera um contrasentido, pois, para níveis tão elevados de corrente a transferência pulsada perde totalmente suas características. Os eletrodos têm uma trajetória paralela na saída da tocha com uma distância fixa entre eles. O equipamento pode operar com três diâmetros de eletrodo 0.8, 1.0 e 1.2 mm, através da troca de insertos metálicos que fazem parte do bico de contato. A figura 12 mostra as peças que integram o conjunto do bico de contato e o bocal refrigerado da tocha respectivamente.

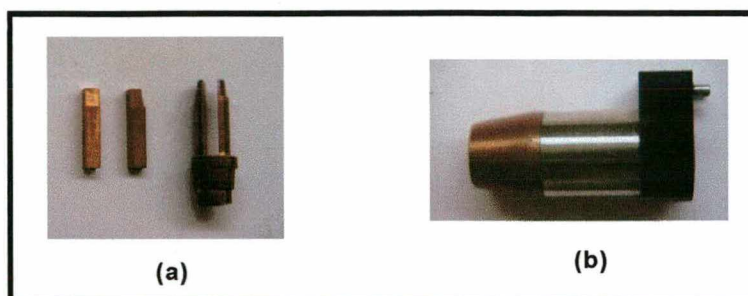


Figura 12 - a) Partes do bico de contato b) Detalhe do bocal refrigerado da tocha

d. Endireitador de Arame

O arame bobinado detém uma deformação plástica residual originada no processo de enrolamento na fase de fabricação. O dispositivo endireitador de arame é utilizado para alinhar novamente o arame, permitindo um melhor deslizamento do arame no interior do bico de contato, evitando problemas de aquecimento e principalmente de trancamentos do arame. Uma análise mais detalhada da importância deste componente pode ser encontrada no item 7.2.1.

6.1.2 Sistema de Aquisição de Dados de Soldagem

a. Placa de Aquisição - INTERDATA 3 (IMC/LABSOLDA)

Dotada de um conversor A/D rápido de 12 bit, esta placa instalada no barramento do computador, faz aquisições em alta frequência e conta com 16 canais de entradas analógicas. As leituras podem ser feitas em 12 bit ou 8 bit dependendo da frequência de aquisição desejada, as quais também variam de acordo ao equipamento utilizado, ou seja, dependem da velocidade (clock) do processador do microcomputador, onde a placa esta instalada. Para a configuração utilizada no trabalho a frequência máxima de aquisição para cada canal fica em torno de 35 kHz.

b. Medidor de Velocidade do Arame - MVA-1 (IMC/LABSOLDA)

No monitoramento da velocidade do arame foram utilizados duas unidades do instrumento MVA-1 (IMC-LABSOLDA), ambos equipados com um sensor de velocidade do arame independente para cada cabeçote.

c. Condicionador de Sinais (IMC/LABSOLDA)

O sistema condicionador de sinais é a interface entre as grandezas de soldagem e a placa de aquisição. A função básica deste dispositivo consiste em atenuar os sinais adquiridos de tal forma a transformá-los em sinais com níveis de potência compatíveis aos da placa. Consequentemente para cada variável a ser analisada é levantada uma função de transferência adequada.

d. "Softwares"

Os principais "softwares" utilizados no trabalho são:

- **OSCILOS** - este "software" emula um osciloscópio de memória digital e foi utilizado na aquisição da corrente e da tensão de soldagem. De forma análoga a um osciloscópio, o OSCILOS, possibilita a leitura de sinais analógicos de tensão, através de uma placa de aquisição, permitindo registrar o comportamento de qualquer grandeza física que possa ser convertida em tensão.

- **DATSOLTE** – este programa faz um tratamento estatístico dos dados de tensão e corrente obtidos na aquisição. Constitui-se numa poderosa ferramenta na análise de dados de soldagem, permitindo o cálculo de mais de 50 variáveis a partir de oscilogramas de tensão e corrente.

Na figura 13, está representada um esquema da bancada de soldagem e os componentes do sistema de aquisição e a figura 14, mostra a disposição física dos equipamentos na própria bancada de soldagem.

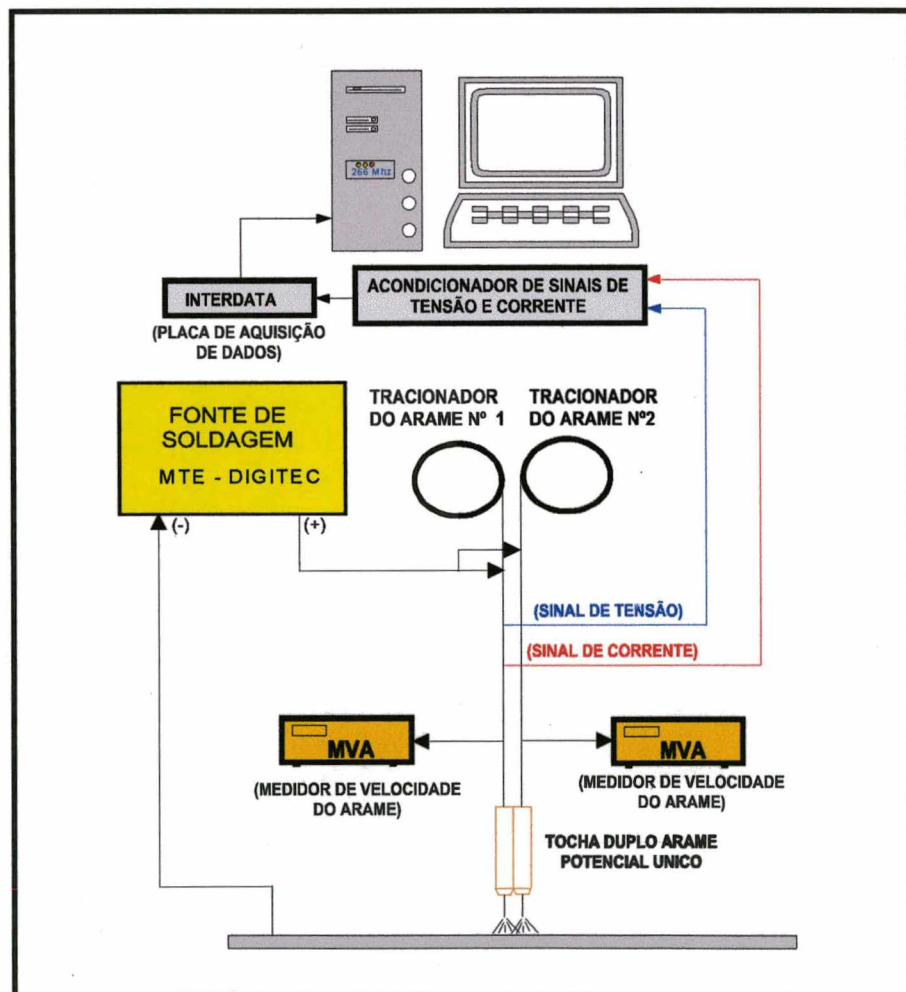


Figura 13 - Representação esquemática da Bancada de Soldagem e do Sistema de Aquisição de Dados de Soldagem

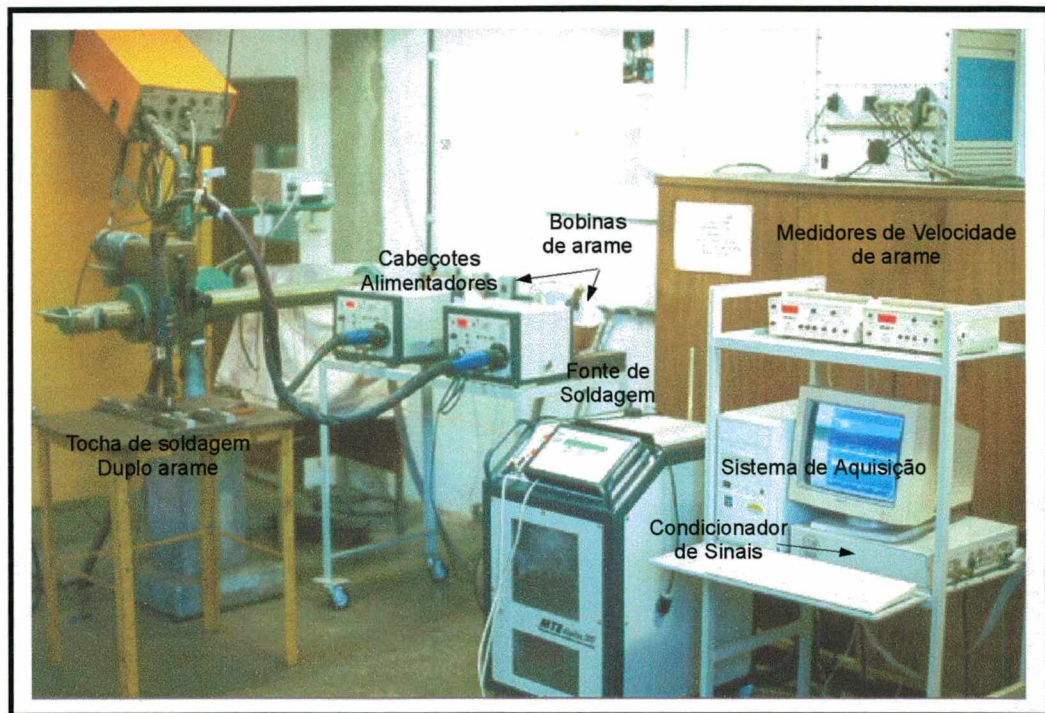


Figura 14 - Distribuição física dos equipamentos da Bancada de Soldagem e do Sistema de Aquisição

6.1.3 Bancada de Filmagem

A bancada de filmagem consta basicamente de três componentes, os quais são detalhados a seguir:

a. Video-câmera – CANON L1

A câmera CANON L1 é uma filmadora que conta com um sensor de imagem do tipo CCD (Charge Coupled Device) de alta resolução (410.000 elementos de imagem por quadro). Esta câmera, além da alta qualidade das imagens, permite gravar eventos que ocorrem em alta velocidade, graças ao desempenho do obturador, que tem capacidade de atuar com uma velocidade de até 1/10000 s, permitindo capturar detalhes que normalmente iriam-se perder se

fossem filmados com uma câmera dotada com um obturador de velocidade convencional. A figura 15 mostra uma fotografia da própria câmera utilizada no trabalho.

A intensa radiação emitida pelo arco durante a soldagem, limita a distância entre a câmera e a fonte de calor. Consequentemente, torna-se necessário a utilização de uma lente objetiva que permita estabelecer uma boa relação distância/foco entre a câmera e a extremidade da tocha. Neste caso, a lente que acompanha a câmera, com capacidade de ampliação 15 X, mostrou-se adequada para a realização deste trabalho.



Figura 15 - Câmera CANON L1 - Hi8 - de 8 mm, com a lente objetiva VL 15X, utilizada na aquisição de imagens

b. Fonte de Soldagem e Tocha – TIG.

A luz de fundo que dá o contraste entre o arco voltaico MIG/MAG e as gotas metálicas passando através dele, é gerada através de outro arco, desta vez, um arco TIG protegido com uma atmosfera de argônio, cuja radiação é suficiente para obter as imagens da transferência metálica com uma qualidade razoável. O arco TIG, permanece aceso durante todo o tempo da

filmagem sobre uma chapa de cobre refrigerada a água. Para atender a necessidade de resfriamento da tocha TIG e da chapa de base, foi montado um circuito de refrigeração constituído por uma bomba e um trocador de calor.

c. Filtro de Soldagem

Para obter as imagens da passagem das gotas do eletrodo para a peça é necessário atenuar o máximo possível a luminosidade do arco MIG/MAG, sem eliminar totalmente a radiação emitida pela luz de fundo (arco TIG). Este efeito é conseguido utilizando filtros de soldagem. Para cada modo de transferência foi utilizado um tipo de filtro determinado, conforme a intensidade da radiação. Na figura 16, está representada um esquema da bancada de filmagem e mais embaixo, a figura 17 mostra a distribuição física dos equipamentos.

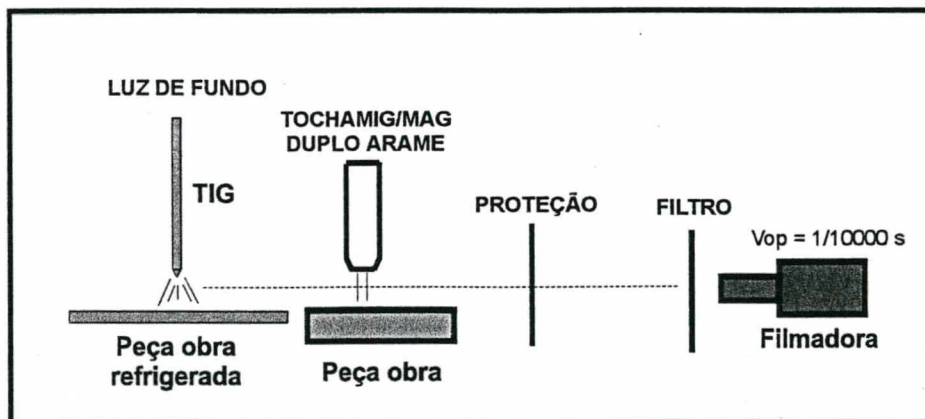


Figura 16 - Representação esquemática da Bancada de Filmagem

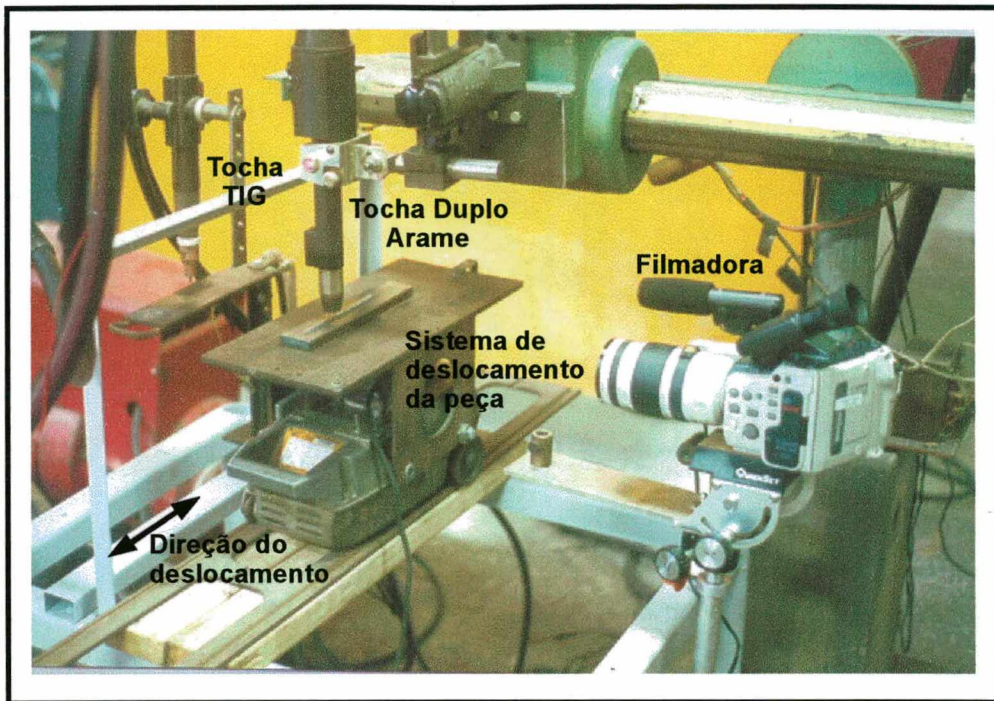


Figura 17 - Distribuição física dos equipamentos na Bancada de Filmagem

d. Placa de Aquisição de Imagens - VIDEO BLASTER™ - RT300 - V 2.3

Através desta placa de captura de imagens da CREATIVE LABS, é possível transformar sinais de áudio e vídeo em sinais digitais, permitindo assim, capturar imagens de vídeo e armazená-las no computador para reproduzi-las ou editá-las posteriormente.

e. "Software" de Edição de Imagens - ADOBE PREMIERE™ LE

Este "software" de editoração de imagens da ADOBE, permite gravar, reproduzir e editar imagens digitais de vídeo. Através dele foi possível realizar uma análise quadro a quadro das imagens filmadas, permitindo um estudo mais detalhado da transferência.

6.2 Materiais

6.2.1 Material de Base

O material utilizado em todos os ensaios e no desenvolvimento deste estudo foi o aço ao carbono ABNT 1020 de 6.35 mm (1/4"), 12.7 mm (1/2") e em alguns casos 25.4 mm (1") de espessura.

6.2.2 Material de Adição

Os eletrodos utilizados no trabalho são do tipo AWS A5.A8.93 - ER 70S-6, da marca BELGO MINEIRA. Portanto, são arames sólidos com composição básica de aço ao carbono. Os diâmetros analisados foram 1.0 mm e 1.2 mm.

6.2.3 Gás de Proteção

Todos os ensaios no processo convencional e no duplo arame foram realizados utilizando como gás de proteção a mistura C5 (95% Argônio e 5% CO₂)

6.3 Procedimento Experimental

6.3.1 Introdução

Inicialmente, devido à carência total de informações com relação a parâmetros e faixas de operação do processo, foram realizados testes preliminares para determinar as condições básicas

de funcionamento. Paralelamente, esta fase do trabalho, permitiu avaliar e verificar o desempenho das adaptações feitas nos equipamentos da bancada de ensaios.

Os testes preliminares permitiram verificar que o processo com duplo arame consegue soldar nos seguintes modos de transferência:

- curto-circuito;
- globular;
- fluxo goticular;
- pulsado.

A comprovação deste fato abriu um campo de possibilidades muito amplo para a análise do processo. Decidiu-se portanto, realizar os experimentos em todos os modos de transferência utilizados no MIG/MAG convencional, de tal forma a poder comparar posteriormente ambos processos e determinar as vantagens e limitações de um em relação a outro.

6.3.2 Procedimento Geral de Soldagem

Os modos de transferência analisados neste trabalho foram:

- curto-circuito;
- fluxo goticular e
- pulsado.

Os experimentos foram conduzidos como:

- Soldagem de simples deposição (na posição plana)
- Juntas de ângulo em T (filete)

O levantamento da maioria das características do processo foi realizado através de soldagens de deposição na posição plana. Em forma preliminar à soldagem, os corpos de prova foram submetidos a um esmerilhamento superficial para eliminar a carepa de laminação formada sobre o material. A dimensão média dos corpos de prova foi de 100 x 170 mm. A espessura das chapas utilizadas foram de 6.3 mm e 12.7 mm. O número de cordões depositados em cada corpo de prova, foi determinado em função da largura dos mesmos.

Todos os testes foram realizados com arames de diâmetro 1.0 mm e 1.2 mm, tanto no processo com duplo arame, como no convencional com um arame. A soldagem dos corpos de prova foi automatizada através de um sistema apropriado de deslocamento de tocha implementado para o trabalho.

A observação do comprimento do arco foi visual e a análise da tensão e da corrente foi realizada através de oscilogramas obtidos com o sistema de aquisição de dados descrito no item 6.1 2. O tempo de aquisição foi estabelecido em 5,0 s para cada ensaio. Todos os valores de tensão e corrente apresentados neste trabalho correspondem a valores totais, pois no caso do duplo arame, devido ao fato do potencial ser único, é impossível determinar o valor destas variáveis em forma independente para cada eletrodo. Dois sensores de velocidade de arame foram instalados entre as bobinas de arame e cada tracionador, permitindo o monitoramento da velocidade de cada arame de forma independente. Através deste monitoramento foi possível determinar o instante em que a velocidade de cada arame entrava num regime constante,

garantindo desta forma, que todas as aquisições realizadas tenham sido feitas numa mesma condição.

Os testes foram realizados com tochas da marca BINZEL. Para o caso do processo com duplo arame o modelo utilizado foi o MWT-2DW, enquanto que para os ensaios com um arame foi empregada a tocha MB 501 D (tocha convencional para um arame). Todos os ensaios foram realizados com polaridade reversa (CC+), utilizando-se como gás de proteção a mistura C5 (95 % Ar + 5% CO₂).

6.3.3 Transferência Metálica por Curto-Circuito - Metodologia de Análise

a. Procedimento Geral

A metodologia adotada na realização dos ensaios no modo de transferência por curto-circuito consistiu em fixar velocidades de alimentação do arame e atuar sobre a tensão de maneira a obter a melhor condição de estabilidade. No caso do processo duplo arame toda a análise sempre foi realizada em relação a valores totais de velocidade do arame ou taxas de fusão. A faixa de operações analisadas incluem o regime em curto-circuito propriamente dito e o regime em curto-circuito de alta densidade de corrente.

Na tabela 3 estão indicadas as condições comuns de soldagem estabelecidas e adotadas nos ensaios para o processo convencional e duplo arame.

O efeito indutivo de subida (ks) e o de descida (kd) são parâmetros que controlam as taxas de crescimento e de decrescimento da corrente durante e após o curto-circuito,

respectivamente. A fonte de soldagem utilizada possibilita ajustes independentes do efeito indutivo na fase de curto-circuito e na fase de arco.

Condições de soldagem	
Gás de proteção	95 % Ar / 5 % CO ₂
Vazão de gás (l/min)	15
Dist. bico de contato-peça (mm)	15
Ø eletrodo (mm)	1.0 / 1.2
ks = kd (efeito indutivo - um arame)	20
ks = kd (efeito indutivo - duplo arame)	5
Veloc. de soldagem, Vs (m/min)	0.3
Espessura da chapa (mm)	6.3

Tabela 3 - Parâmetros de soldagem estabelecidos na análise da transferência por curto-circuito para o processo convencional e duplo arame

A figura 18, mostra a configuração no extremo da tocha utilizada nos ensaios no processo com duplo arame. Os valores indicados nesta figura também foram utilizados no processo convencional com um arame.

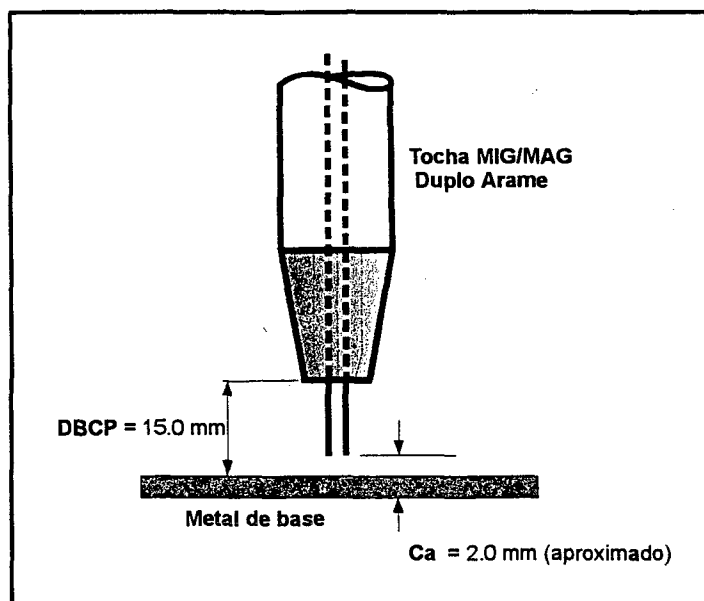


Figura 18 -Representação esquemática do extremo da tocha no processo com duplo arame na transferência por curto-circuito

b. Procedimento para Determinação da Estabilidade do Arco no Modo Curto-Circuito

Este procedimento tem como principal objetivo a determinação de tensões de referência para determinadas velocidades de arame, que forneçam condições adequadas de estabilidade do arco para a configuração de soldagem adotada.

Na determinação das tensões foi adotado um critério para avaliar a regularidade da transferência. Este critério leva em consideração o desvio padrão dos picos de corrente (D_{Ipm}) [22,23]. A seleção deste parâmetro como indicativo de regularidade se dá em função de que a variação dos picos de corrente durante a transferência metálica apresenta uma distribuição normal de probabilidade, conseqüentemente o conceito de desvio padrão pode ser utilizado para caracterizar sua dispersão. Portanto, quanto maior o desvio padrão, mais irregular o processo de transferência.

Cabe destacar que a variação de outros indicativos de estabilidade como por exemplo, período de transferência e tempo de curto-circuito, nem sempre apresentam distribuições normais. Logo, nesses casos, a regularidade não pode ser avaliada pelo desvio padrão. Este fato determinou a não utilização destes parâmetros na avaliação da estabilidade do arco.

A análise dos oscilogramas de tensão e de corrente foi feita através do aplicativo DATSOLTE, que além de calcular o desvio padrão dos picos de corrente com base nas aquisições realizadas, auxiliou no cálculo de outras variáveis de soldagem.

A determinação de uma tensão de referência adequada para a realização dos ensaios seguiu basicamente o seguinte procedimento:

1. Estabelecimento de uma velocidade de arame predeterminada e das tensões compatíveis.

Exemplo: MIG/MAG duplo arame

$$V_{aT} = 4.0 \text{ m/min} \quad (V_{a1} = V_{a2} = 2.0 \text{ m/min})$$

onde:

V_{aT} é a soma das velocidades de arame

$V_{a1} = V_{a2}$ são as velocidades individuais de cada arame

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{c1} = 16 \text{ V} \\ U_{c2} = 17 \text{ V} \\ U_{c3} = 18 \text{ V} \\ U_{c4} = 19 \text{ V} \\ U_{c5} = 20 \text{ V} \end{array} \right.$$

2. Soldagem e aquisição de dados (tensão e corrente) de cada condição.
3. Análise dos oscilogramas e determinação do desvio padrão dos picos de corrente (DI_{pm}).
4. Determinação da função entre DI_{pm} e tensão de referência (U_c) obtida através de um ajuste polinomial dos dados. (Figura 19). No caso do exemplo proposto:

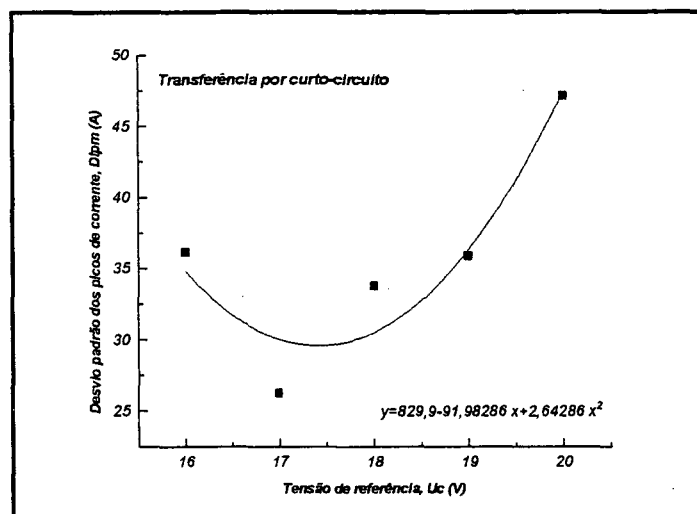


Figura 19 - Relação entre o desvio padrão dos picos de corrente (DI_{pm}) e tensão de referência (U_c)

Onde:

$$DI_{pm} = 2.6 * U_c^2 - 92 * U_c + 830$$

é a função achada através do ajuste dos pontos experimentais.

5. Determinação do ponto mínimo da curva ($U_c = 17.4$ V). Este valor é então considerado como tensão de referência para a realização do ensaio.

c. Metodologia para a Determinação da Característica de Fusão dos Eletrodos

Uma das formas de avaliar a produtividade de um processo que utiliza eletrodos consumíveis é através da análise da característica de fusão dos eletrodos denominada neste trabalho de taxa de fusão absoluta. Esta propriedade foi determinada experimentalmente, tanto para o processo convencional, com um arame, como para o processo com duplo arame e, posteriormente, comparada.

Através dos testes preliminares, determinou-se a faixa de corrente onde cada processo pode soldar com transferência por curto-circuito. Em posse destas informações foram escolhidas determinadas velocidades de arame, nas quais foi aplicado o procedimento para determinação de estabilidade do arco, descrito no item b, desta seção.

Na tabela 4 estão relacionadas para cada diâmetro do eletrodo e para cada processo, os valores das velocidades de alimentação de arame estabelecidos na análise.

Velocidade de alimentação do arame (V_a) [m/min]		
\varnothing Eletrodo [mm]	Convencional (um arame)	Duplo Arame ($V_{a1} + V_{a2}$)
1.0	3, 5, 7, 9, 11, 13	4, 6, 8, 10, 12, 14, 15
1.2	3, 5	3, 5, 7

Tabela 4 - Velocidades de arame adotadas na determinação das tensões de referência

Posteriormente, foram obtidos valores de tensão de referência adequados para cada velocidade de alimentação testada. Na figura 20a está mostrado o comportamento do parâmetro de regularidade (DI_{pm}) em função da tensão de referência (U_c) aplicada para o processo convencional com um arame e na figura 20b, para o processo com duplo arame.

A partir dos valores de tensão obtidos nestas experiências foi possível determinar uma função entre a tensão de referência e a velocidade de arame para cada diâmetro do eletrodo e para cada processo, conforme a tabela 5, onde também está indicado o correspondente coeficiente de regressão linear, R^2

Em posse das equações foram interpolados valores de velocidade de arame para obter tensões de referência adequadas em toda a faixa de operação de cada processo.

\varnothing (mm)	Processo Convencional	
	$U_c = f(V_a)$	R^2
1.0	$U_c = 0.018 V_a^2 + 0.3 V_a + 17.8$	0.98
1.2	$U_c = 0.048 V_a^2 - 0.014 V_a + 18.8$	0.89
Processo Duplo Arame		
1.0	$U_c = 0.085 V_a^2 + 2 V_a + 10.6$	0.99
1.2	$U_c = -0.23 V_a^2 + 3.8 V_a + 7.9$	1.0

Tabela 5 - Tensão de referência U_c , em função da velocidade do arame V_a , obtida na análise da transferência por curto-circuito

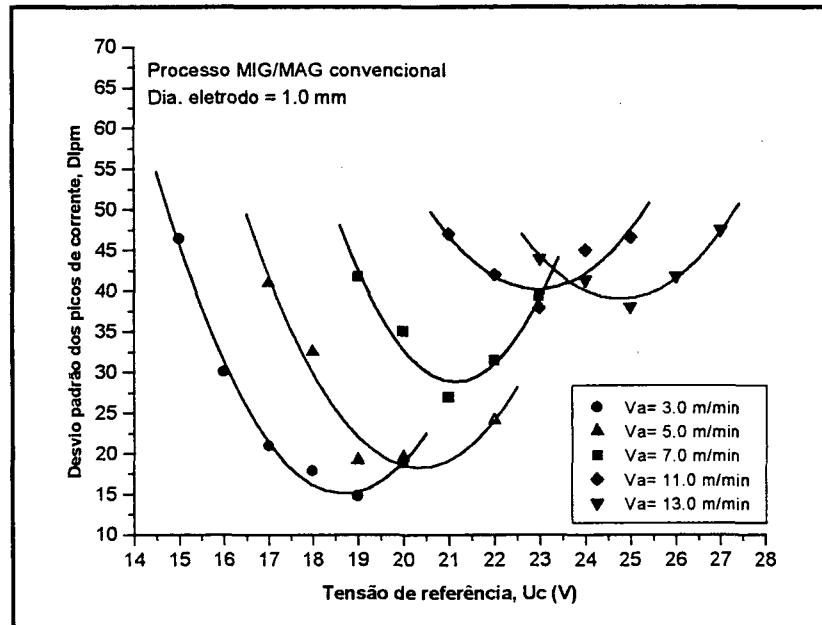


Figura 20a - Desvio Padrão dos Picos de Corrente Dlpm em função da Tensão de Referência Uc, para processo convencional - $\varnothing = 1.0$ mm

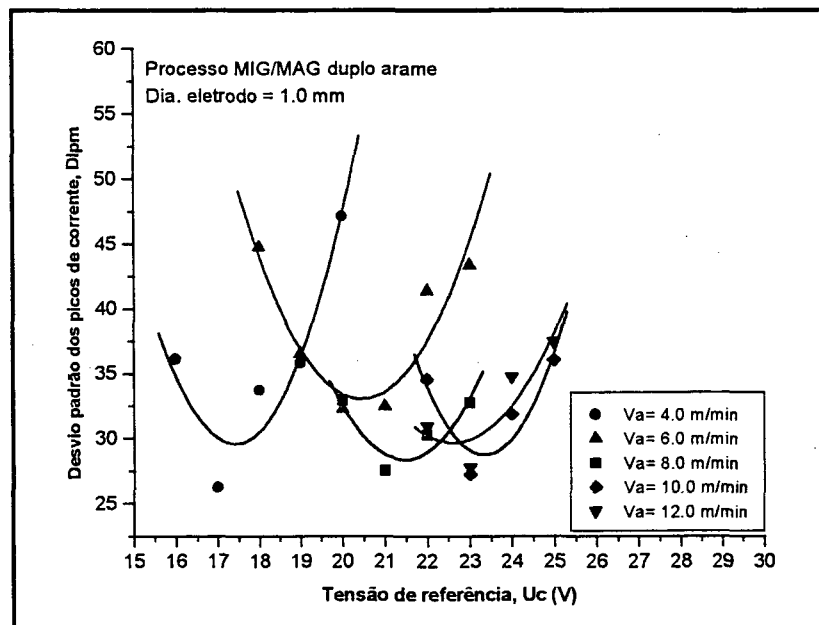


Figura 20b - Desvio Padrão dos Picos de Corrente Dlpm em função da Tensão de Referência Uc, para o processo duplo arame - $\varnothing = 1.0$ mm

6.3.4 Transferência Metálica por Fluxo Goticular. Metodologia de Análise

Na análise da transferência por fluxo goticular, a determinação da estabilidade do arco não é tão crítica quando comparada com o modo por curto-circuito, devido à própria característica da transferência, que de forma geral, é mais suave e controlável.

Neste caso, o critério adotado na análise das taxas de fusão foi o de tentar manter o comprimento livre do eletrodo (t) utilizado na análise da transferência por curto-circuito. Este critério foi escolhido devido ao fato de que ele permite estabelecer uma continuidade nas curvas de características de fusão na passagem do modo por curto-circuito para fluxo goticular [22]. Cabe destacar, que o valor do comprimento do eletrodo adotado na realidade é aproximado, pois, como foi mencionado anteriormente, a observação do comprimento do arco (Ca) é visual.

Para o caso do processo convencional com um arame foi utilizada uma distância entre o bico de contato e peça, $DBCP = 18.0$ mm e um comprimento de arco, $Ca = 5.0$ mm, mantendo-se desta forma o comprimento livre do eletrodo em 13.0 mm, ou seja, o mesmo valor utilizado no estudo da transferência por curto-circuito. A figura 21 mostra um diagrama da configuração adotada na extremidade da tocha no processo convencional.

Na análise com duplo arame esta disposição mostrou-se inapropriada devido aos constantes curtos entre gotas de metal fundido e a peça, traduzindo-se numa transferência instável. Este problema foi contornado adotando-se um comprimento do arco maior. Assim, para o estudo com duplo arame, a configuração mostrada na figura 22, mostrou-se mais apropriada para a realização dos ensaios.

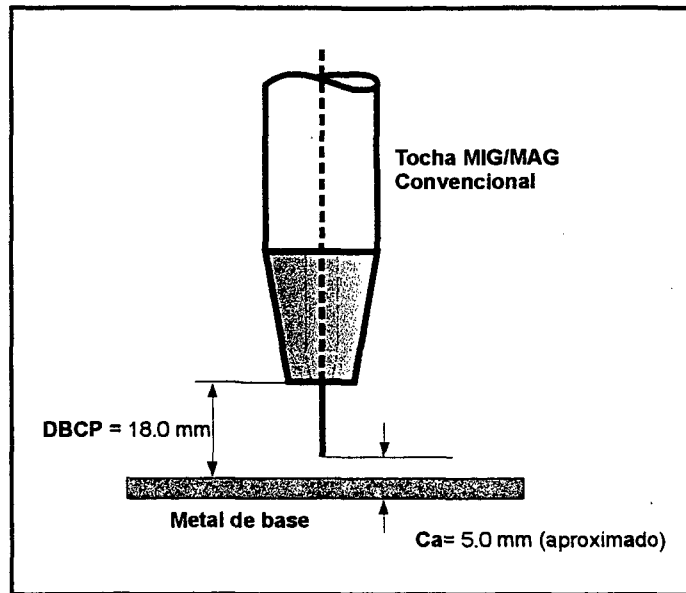


Figura 21 - Representação esquemática do extremo da tocha no processo convencional na transferência por fluxo goticular

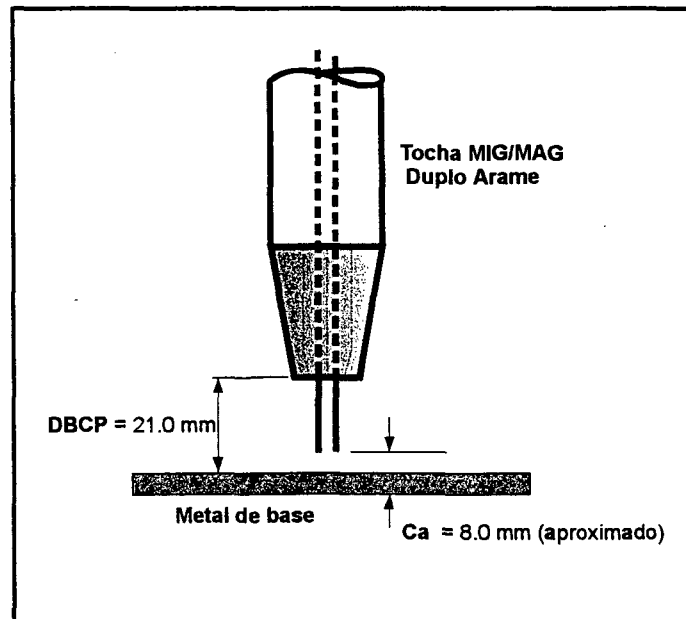


Figura 22 - Representação esquemática do extremo da tocha no processo com duplo arame na transferência por fluxo goticular

O afastamento da extremidade do bocal da peça determinou o aumento da vazão de gás de proteção que se tornou insuficiente nesta situação acusando a presença de poros no cordão de solda. Para obter cordões de solda isentos de defeitos de porosidade foi necessário aumentar a vazão de gás para 20 l/min.

Os parâmetros de soldagem utilizados nos ensaios com duplo arame e convencional estão resumidos na tabela 6.

Parâmetros de Soldagem	Um arame	Duplo Arame
Gás de proteção	95 % Ar / 5 % CO ₂	95 % Ar / 5 % CO ₂
Vazão de gás (l/min)	15	20
Dist. bico de contato-peça (mm)	18	21
Ø eletrodo (mm)	1.0 / 1.2	1.0 / 1.2
Espessura da chapa (mm)	12.3	12.3
Veloc. soldagem, Vs (m/min)	0.3	0.3 (280-300) A 0.4 (300-380) A 0.6 (380-500) A

Tabela 6 - Parâmetros de soldagem estabelecidos na análise da transferência por fluxo goticular

A corrente máxima utilizada nos ensaios ficou limitada pela capacidade de fornecimento da fonte de soldagem. Para o processo convencional este limite de corrente não significou um truncamento na análise do processo, porém para o processo com duplo arame, que permite maiores taxas de alimentação de arame e conseqüentemente, maiores intensidades de corrente, este fato delimitou a avaliação de grande parte da potencialidade do processo.

Como pode ser observado na tabela 6, no processo duplo arame, a velocidade de soldagem Vs, foi gradualmente aumentada, conforme a faixa de corrente utilizada. Com isto, evitou-se que os eletrodos entrassem em contato com a poça de fusão durante a soldagem, criando instabilidade na transferência.

6.3.5 Transferência Pulsada. Metodologia de Análise

Toda a análise feita neste trabalho no regime de transferência pulsada foi através de comando em corrente. A utilização do comando misto, uma tecnologia conhecida e já desenvolvida no LABSOLDA, apresentou-se, em princípio, como sendo a mais indicada para a realização dos ensaios com duplo arame, porém, esta alternativa não estava disponível no equipamento utilizado quando da realização do trabalho.

A aplicação deste modo de operação na fonte de soldagem utilizada, implicaria no desenvolvimento de programas e equipamentos com recursos não disponíveis no momento.

A primeira fase do trabalho foi a dos testes preliminares e teve como objetivo a determinação de um critério para o estabelecimento das variáveis da corrente pulsada para o processo com dois arames. Este período, caracterizou-se por inúmeras dificuldades na realização das soldas, pois nenhuma informação estava disponível sobre a relação das variáveis necessárias para criar condições estáveis de soldagem.

Baseados em parâmetros já conhecidos do processo pulsado convencional, determinaram-se relações paramétricas do processo com dois arames para certos níveis de corrente média. Obteve-se, desta forma, uma formulação que permitiu o cálculo das variáveis de soldagem para toda a faixa de correntes médias.

Na segunda fase da análise, verificou-se experimentalmente as condições de estabilidade dos parâmetros calculados e caracterizou-se a geometria e qualidade dos depósitos para posteriormente compará-los com ensaios realizados no processo convencional.

Todos os ensaios com corrente pulsada no processo convencional e no duplo arame, foram realizados com uma configuração na extremidade da tocha análoga à utilizada na análise da transferência por curto-circuito, portanto a figura 18 indica as considerações adotadas na extremidade da tocha. O comprimento do arco porém, foi estabelecido em 5.0 mm.

A tabela 7, mostra as condições de soldagem adotadas no processo convencional e duplo arame, modo pulsado. As tabelas 8a e 8b, indicam os parâmetros da corrente pulsada para os níveis de corrente média ensaiados para ambos diâmetros de eletrodo no processo convencional. As tabelas 9a e 9b correspondem aos valores relativos ao processo duplo arame.

Condições de Soldagem p/ Processo Convencional e Duplo Arame	
Ø eletrodo (mm)	1.0 / 1.2
Ø gota (mm)	1.2
Gás de proteção	95 % Ar / 5 % CO ₂
Dist. bico de contato-peça (mm)	15
Vazão de gás (l/min)	15

Tabela 7 - Condições de soldagem estabelecidos na análise da transferência pulsada para o processo duplo arame

Parâmetros da Corrente Pulsada - Processo Convencional - Ø = 1.0 mm							
Im (A)	Ip (A)	tp (ms)	lb (A)	tb (ms)	Va (m/mln)	Vs (m/min)	Esp. CP. (mm)
40	240	4.1	22	45.1	1.8	0.3	6.3
60	240	4.1	34	28.8	2.7	0.3	6.3
80	240	4.1	48	20.5	3.4	0.3	6.3
100	240	4.1	63	15.6	4.5	0.3	6.3
120	240	4.1	80	12.3	4.7	0.3	6.3
140	240	4.1	99	10.0	6.5	0.3	6.3
160	240	4.1	120	8.2	7.7	0.3	6.3

Tabela 8a - Parâmetros da corrente pulsada para níveis de corrente média Im, testados no processo convencional pulsado - Ø = 1.0 mm

Parâmetros da Corrente Pulsada - Processo Convencional - $\varnothing = 1.2$ mm							
Im (A)	Ip (A)	tp (ms)	lb (A)	tb (ms)	Va (m/min)	Vs (m/min)	Esp. CP. (mm)
50	300	4	18	31.6	1.3	0.3	6.3
80	300	4	32	18.2	2.0	0.3	6.3
100	300	4	42	13.8	2.8	0.3	6.3
120	300	4	53	10.8	3.2	0.3	6.3
140	300	4	66	8.7	3.7	0.3	6.3
180	300	4	98	6.5	4.9	0.3	6.3
220	300	4	142	4.1	5.9	0.3	6.3

Tabela 8b - Parâmetros da corrente pulsada para níveis de corrente média Im, testados no processo convencional pulsado - $\varnothing = 1.2$ mm

Parâmetros da Corrente Pulsada - Processo Duplo Arame $\varnothing = 1.0$ mm							
Im (A)	Ip (A)	tp (ms)	lb (A)	tb (ms)	Va _r (m/min)	Vs (m/min)	Esp. CP. (mm)
100	480	4.1	56	35.3	2.0	0.3	6.3
140	480	4.1	82	24.1	5.0	0.3	6.3
160	480	4.1	96	20.5	5.6	0.3	6.3
200	480	4.1	126	15.6	7.6	0.3	6.3
250	480	4.1	169.4	11.7	9.6	0.3	6.3
300	480	4.1	218	9.0	11.8	0.3	6.3
350	480	4.1	275.8	7.2	13.6	40	6.3

Tabela 9a - Parâmetros da corrente pulsada para níveis de corrente média Im, testados no processo duplo arame pulsado - $\varnothing = 1.0$ mm

Parâmetros da Corrente Pulsada - Processo Duplo Arame - $\varnothing = 1.2$ mm							
Im (A)	Ip (A)	tp (ms)	lb (A)	tb (ms)	Va _r (m/min)	Vs (m/min)	Esp. CP. (mm)
180	600	4	73	73	4.9	0.3	6.3
220	600	4	95	95	6.0	0.3	6.3
250	600	4	113	113	6.8	0.3	6.3
280	600	4	133	133	7.6	0.3	6.3
350	600	4	188	188	9.5	0.4	12.7
400	600	4	236	236	11.0	0.4	12.7
440	600	4	283	283	11.7	0.4	12.7

Tabela 9b - Parâmetros da corrente pulsada para níveis de corrente média Im, testados no processo duplo arame pulsado - $\varnothing = 1.2$ mm

6.3.6 Disposição Transversal dos Eletrodos

Como foi mencionado no capítulo 4, depósitos realizados com eletrodos alinhados transversalmente à direção de deslocamento apresentam uma geometria favorável para aplicações em revestimentos soldados, pois os cordões ficam mais largos e com baixa diluição.

Na tentativa de verificar a possibilidade de utilizar o processo MIG/MAG com duplo arame em operações de revestimento, determinou-se a realização de testes de deposição plana com eletrodos posicionados transversalmente à direção de deslocamento. Estes ensaios foram realizados nos regimes de transferência por curto-circuito e pulsado. Características tais como geometria do cordão, perfil de penetração e qualidade dos depósitos, foram observadas e comparadas com aquelas obtidas no processo convencional.

a. Disposição Transversal dos Eletrodos - Transferência por Curto-Circuito.

Os parâmetros utilizados nos ensaios no modo curto-circuito com disposição transversal dos eletrodos são análogos aos utilizados nos ensaios com eletrodos na posição longitudinal. Conseqüentemente, a tabela 3 mostra as condições de soldagem utilizadas na realização dos ensaios. O diâmetro do arame utilizado nos ensaios foi de 1.0 mm e as velocidades de alimentação do arame estabelecidas foram 4 (2/2), 5 (2.5/2.5), 6 (3/3) e 7 (3.5/3.5) m/min.

b. Disposição Transversal dos Eletrodos - Transferência Pulsada

Os parâmetros de corrente pulsada utilizados nos ensaios realizados com eletrodos na posição transversal são idênticos aos utilizados nos ensaios com eletrodos posicionados

longitudinalmente. Os testes foram realizados com arame de 1.0 mm e correntes médias de 100, 140, 160, 200, 250, 300 e 350 A. As condições de soldagem estão indicadas na tabela 7 e os parâmetros da corrente pulsada para os níveis de corrente testados estão mostrados na tabela 9a.

6.3.7 Soldagem de Juntas

De posse das informações básicas de funcionamento do processo MIG/MAG com duplo arame, o seguinte passo foi verificar o desempenho do processo na soldagem numa determinada aplicação, dando assim, um enfoque prático ao trabalho. Para tal propósito, foi escolhida a junta de ângulo T, cujas dimensões estão indicadas na figura 23. O material utilizado nos corpos de prova foi aço ao carbono. Os ensaios foram realizados na posição plana e horizontal e os modos de transferência utilizados foram fluxo goticular e pulsado.

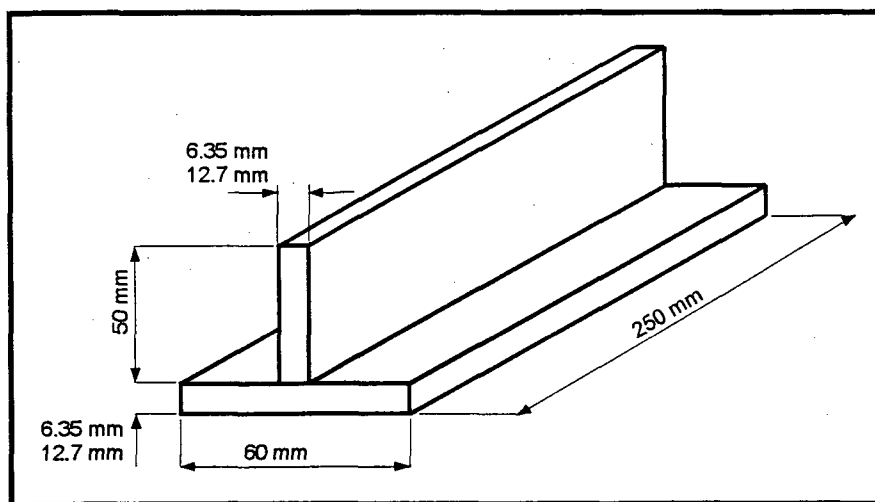


Figura 23 - Dimensões do corpo de prova. Junta de ângulo T.

a. Soldagem da Junta com Transferência por Fluxo Goticular

Na soldagem da junta utilizando a transferência por fluxo goticular o estabelecimento dos parâmetros visou atender a condição de máxima produtividade de cada processo. Cabe destacar que a determinação desta condição está sujeita a vários fatores como o tipo de junta, a espessura da chapa e a capacidade dos equipamentos.

☞ Posição Plana

Processo Convencional - Transferência por Fluxo Goticular

Na soldagem com o processo convencional na posição plana utilizou-se a máxima velocidade de alimentação de arame que permitisse garantir um cordão de solda contínuo e isento de defeitos. A corrente fornecida pela fonte e a velocidade de soldagem conseguida através do sistema de deslocamento utilizado mostraram-se suficientes para atingir uma condição de máxima produtividade do processo.

Processo Duplo Arame Transferência por Fluxo Goticular

Na soldagem com o processo duplo arame, a corrente máxima fornecida pela fonte e a velocidade máxima de soldagem atingida pelo sistema de deslocamento da tocha, foram fatores limitantes na determinação da condição de máxima produtividade.

Na tabela 10, estão indicados os parâmetros de soldagem estabelecidos na soldagem para ambos processos, utilizando o modo de transferência por fluxo goticular na posição plana. A figura 24 mostra a disposição dos elementos utilizando a tocha com duplo arame.

Parâmetros de soldagem	Um arame	Duplo arame
Modo de Transferência	Fluxo Goticular	Fluxo Goticular
Posição	Plana	Plana
Espessura da chapa (mm)	6.35	6.35
Nº de passes	1	1
Vazão de gás (l/min)	15	15
Dist. bico de contato-peça (mm)	15	15
Ø eletrodo (mm)	1.0	1.0
Veloc. de soldagem, V_s (m/min)	0.27	0.63
Ângulo da tocha c/ eixo vertical (°)	50°	50
Veloc. do arame, V_a (m/min)	12	$V_{a1} = 10 / V_{a2} = 9.8$
Polaridade	CC+	CC+
Corrente média, I_m (A)	245	480
Tensão de Referência, U_c (V)	30	31
Aporte Térmico (kJ/cm)	16.3	14.2

Tabela 10 - Parâmetros de soldagem para juntas de filete na posição plana para o processo convencional e duplo arame.

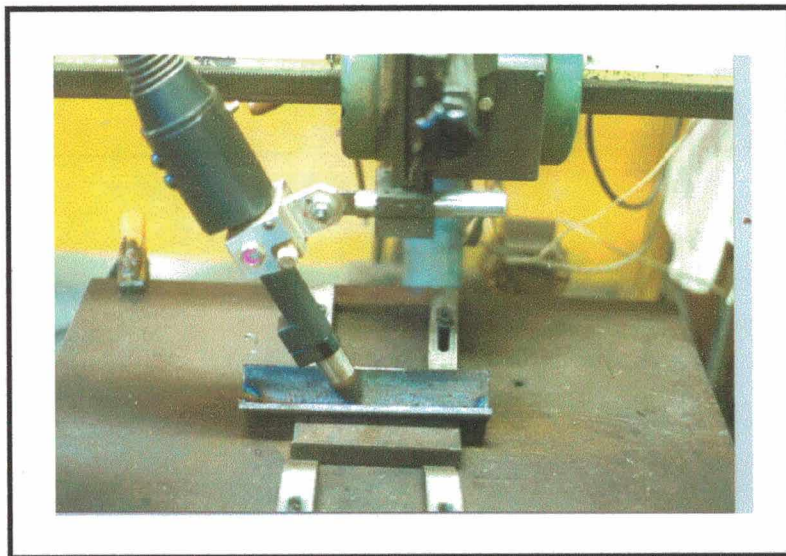


Figura 24 - Detalhe da configuração adotada na soldagem de juntas de filete na posição plana

☞ Posição Horizontal

Processo Duplo Arame Transferência Goticular

Na tentativa de verificar a possibilidade de realizar soldas em juntas de filete na posição horizontal, foi realizada uma série de testes para determinar as condições de soldagem no

processo duplo arame. A tabela 11, mostra os parâmetros que apresentaram os melhores resultados nos corpos de prova ensaiados.

Parâmetros de soldagem	Duplo arame
Modo de transferência	Fluxo Goticular
Posição	Horizontal
Espessura da chapa (mm)	12.7
Nº de passes	1
Vazão de gás (l/min)	17
Dist. bico de contato-peça (mm)	23
Ø eletrodo (mm)	1.0
Veloc. de soldagem, V_s (m/min)	0.3
Ângulo da tocha c/ eixo vertical (°)	50
Veloc. do arame, V_a (m/min)	$V_{a1} = 10 / V_{a2} = 9.8$
Polaridade	CC+
Corrente média, I_m (A)	433
Tensão de referência, U_c (V)	32

Tabela 11 - Parâmetros de soldagem para juntas de filete na posição horizontal com o processo duplo arame. Transferência por fluxo goticular.

b. Soldagem da Junta com Transferência Pulsada

☞ Posição Horizontal

Através da utilização da transferência pulsada na soldagem da junta na posição horizontal pretende-se minimizar ou eliminar o problema de escorrimento do material de adição, através de uma poça de fusão mais controlada, e a tendência de aparecimento de mordeduras nas bordas do cordão, através da utilização de níveis de corrente inferiores aos utilizados no regime de transferência por fluxo goticular. A tabela 12 mostra os parâmetros utilizados na soldagem da junta no processo convencional e no duplo arame, utilizando a transferência pulsada.

Parâmetros de soldagem	Proc. Convencional	Proc. Duplo Arame
Ø eletrodo (mm)	1.0	1.0
Modo de transferência	Pulsada	Pulsada
Posição	Horizontal	Horizontal
Espessura da chapa (mm)	12.7	12.7
Nº de passes	1	1
Vazão de gás (l/min)	15	15
Dist. bico de contato-peça (mm)	22	22
Veloc. de soldagem, V_s (m/min)	0.3	0.4
Ângulo da tocha c/ o eixo horizontal (°)	30	30
Veloc. do arame, V_a (m/min)	7.6	Va1= 5.9 Va2=6.1
Polaridade	CC+	CC+
Corrente média, I_m (A)	180	280
Corrente de pulso, I_p (A)	240	480
Tempo de pulso, t_p (ms)	4.1	4.1
Corrente de base, I_b (A)	144	198
Tempo de base, t_b (ms)	6.9	10
Aporte térmico (kJ/cm)	8.4	10.6

Tabela 12 - Parâmetros de soldagem para juntas de filete na posição horizontal com o processo convencional e duplo arame na transferência pulsada

6.3.8 Análises e Ensaios

A avaliação da qualidade dos cordões de solda foi feita através de análise visual, dimensional, metalográfica e radiográfica. Nos ensaios de deposição plana a caracterização da geometria dos cordões foi feita através da medição da largura, do reforço e da penetração do cordão de solda. Para cada velocidade de arame foi determinado um cordão característico no qual foram realizadas cinco medições utilizando um paquímetro. A avaliação da penetração teve um enfoque mais qualitativo e foi realizada só em determinados cordões através de análise macrográfica. Para a realização da análise metalográfica, os corpos de prova foram lixados até lixa 600 mesh, polidos e atacados com nital a 5 %.

Na análise de juntas soldadas, além do controle visual e dimensional do cordão, foram realizadas análises macrográficas em seções transversais e ensaios radiográficos longitudinalmente à junta.

VII - RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 Análise do Processo com Transferência por Curto-Circuito

7.1.1 Características de Fusão dos Eletrodos na Transferência por Curto-Circuito

Nas tabelas 13a e 13b, estão indicados os valores da corrente média I_m , obtidos para cada velocidade do arame com eletrodos de 1.0 e 1.2 mm para ambos processos, respectivamente. Para cada velocidade de arame indicada foram realizados 5 ensaios e a dispersão da corrente média obtida nas medições está indicada pelo desvio padrão DpI_m . Através dos dados das tabelas 13a e 13b, foram gerados os gráficos das características de fusão para cada processo e tipo de eletrodo. Estes gráficos estão mostrados na figura 25.

7.1.2 Transferência em Curto-Circuito e Curto-Circuito de Alta Densidade de Corrente

Para o caso dos eletrodos de 1.0 mm, no regime em curto-circuito, e mais precisamente, na faixa de velocidades de arame entre 3 e 7 m/min, existe pouca diferença nos valores da taxa de fusão em função da corrente média entre o processo duplo arame e o convencional. Porém, através da análise oscilográfica é possível notar substanciais diferenças na transferência metálica, como está mostrado nos oscilogramas das figuras 26a e 26b.

A análise do regime em curto-circuito com alta densidade de corrente (V_a acima de 8.0 m/min para o arame de 1.0 mm), mostra que o processo com duplo arame apresenta uma taxa de fusão específica inferior quando comparado com o processo convencional. Um comportamento análogo ocorre na soldagem com arame de 1.2 mm.

Processo⇒ Va(m/min)	Convencional Ø=1.0 mm		Duplo arame Ø=1.0 mm	
	Im (A)	Dplm (A)	Im (A)	Dplm (A)
3.0	96	2.6	101	4.2
4.0	111	2.8	122	1.5
5.0	142	9.5	148	2.1
6.0	160	6.2	171	2.7
7.0	190	3.7	195	4.1
8.0	205	5.3	219	2.9
9.0	216	4.8	240	5.3
10	222	4.9	259	4.5
11	232	10.5	*	*
12	240	10.9	295	7.3
13	260	6.4	*	*
14	270	15.8	314	2.5
15	272	23.5	340	10.1

*Ensaio não realizado

Tabela 13a -Corrente média e desvio padrão obtidos no processo convencional e duplo arame na transferência por curto-circuito para arame de 1.0 mm.

Processo ⇒ Va (m/min)	Convencional (Ø=1.2 mm)		Duplo arame (Ø=1.2 mm)	
	Im (A)	Dplm (A)	Im (A)	Dpim (A)
3.0	125	0.5	136	1.2
4.0	162	2.4	178	0.8
5.0	185	1.8	222	2.2
6.0	241	6.4	254	3.0
7.0	263	3.3	282	1.5
8.0	288	4.5	313	9.0
9.0	308	2.9	*	*
10.0	340	3.3	398	17.8
11.0	363	13	*	*
12.0	378	8.9	449	12.0
13.0	402	11.43	*	*
14.0	*	*	503	33.2

*Ensaio não realizado

Tabela 13b -Corrente média e desvio padrão obtidos no processo convencional e duplo arame na transferência por curto-circuito para arame de 1.2 mm.

Este fenômeno pode ser explicado basicamente através da diferença na área de passagem da corrente, pois o sistema com duplo arame, quando comparado com o sistema convencional, apresenta o dobro da área de passagem de corrente quando são utilizados eletrodos do mesmo diâmetro. Desta forma, para uma determinada velocidade do arame ou taxa de fusão, o sistema com duplo arame, exige maior intensidade de corrente para manter o mesmo regime de fusão. Um comportamento similar ocorre quando são comparadas taxas de fusão de eletrodos com diâmetros diferentes. O eletrodo de maior diâmetro apresenta uma menor taxa de fusão.

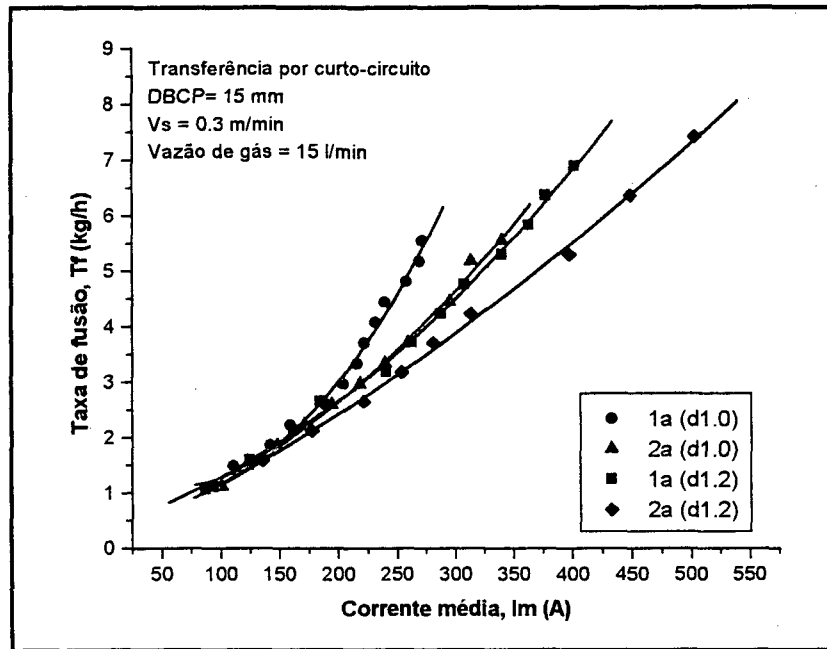


Figura 25 -Taxas de fusão dos eletrodos no processo convencional e duplo arame na transferência por curto-circuito para arames de 1.0 e 1.2 mm.

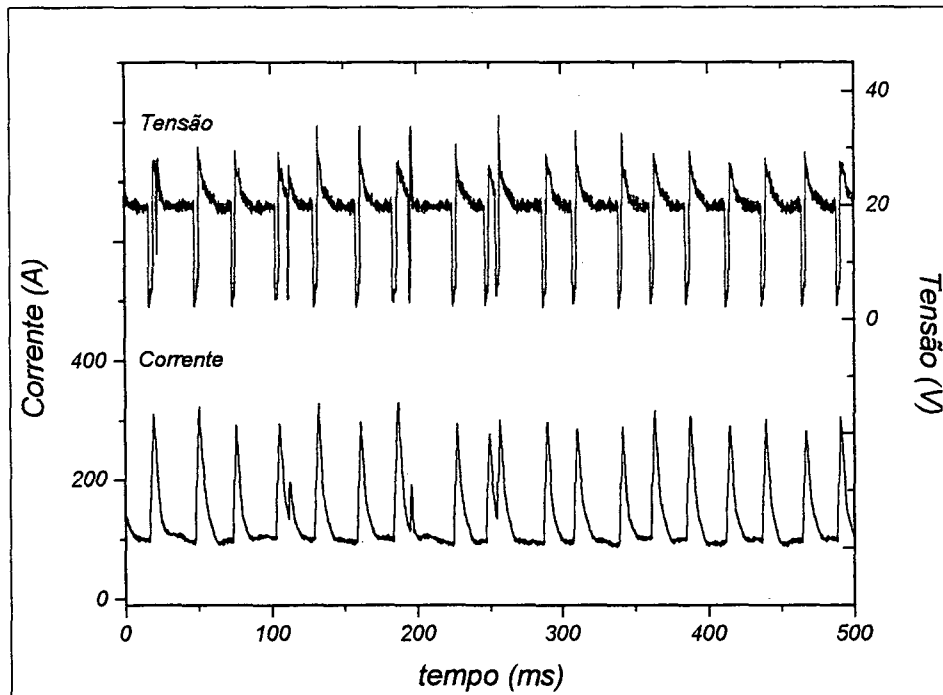


Figura 26a - Oscilograma de tensão e corrente para o processo convencional $V_a = 5.0$ m/min - $\varnothing = 1.0$ mm.

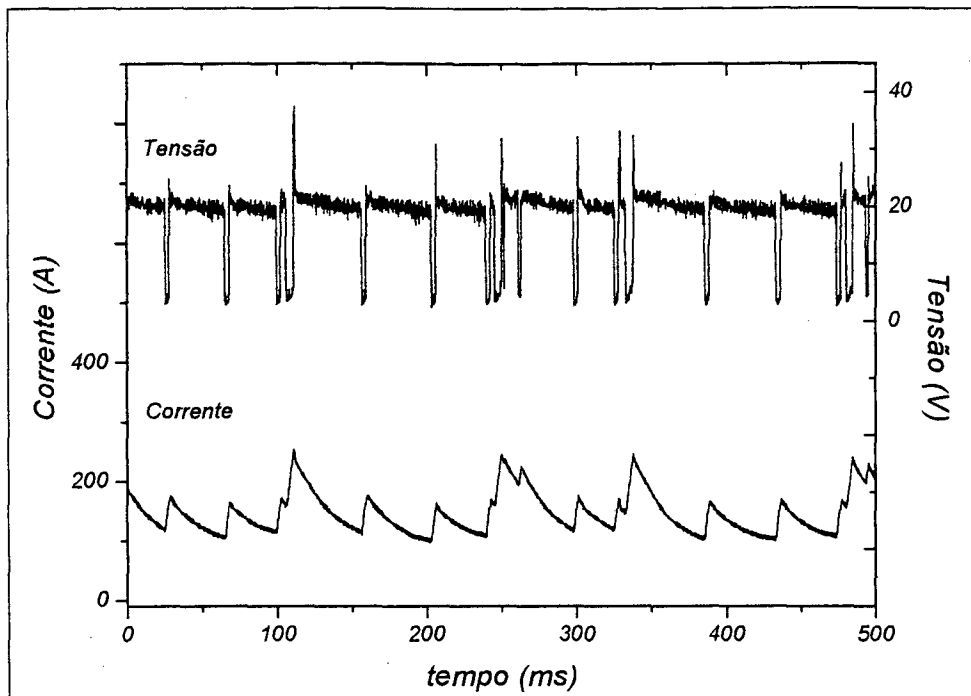


Figura 26b - Oscilograma de tensão e corrente para o processo com duplo arame. $V_{aT} = 5.0$ m/min (2.5 m/min por arame) - $\varnothing = 1.0$ mm.

Os oscilogramas mostrados nas figuras 27a e 27b permitem verificar como ocorre a transferência nas condições de curto-circuito de alta densidade de corrente.

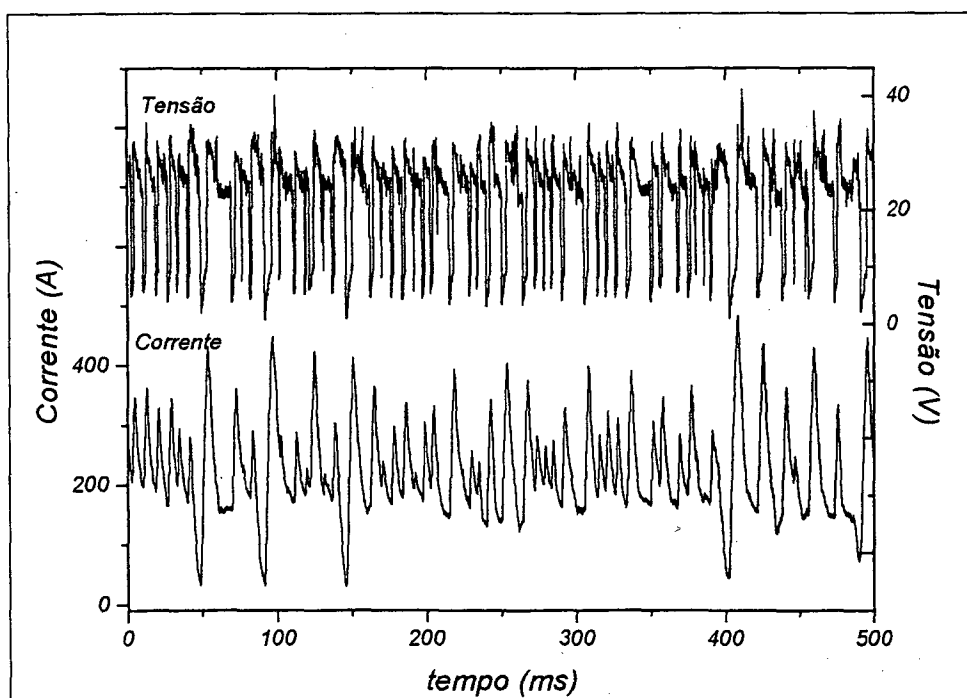


Figura 27a - Oscilograma de tensão e corrente para o processo convencional. $V_a = 12.0$ m/min - $\varnothing = 1.0$ mm.

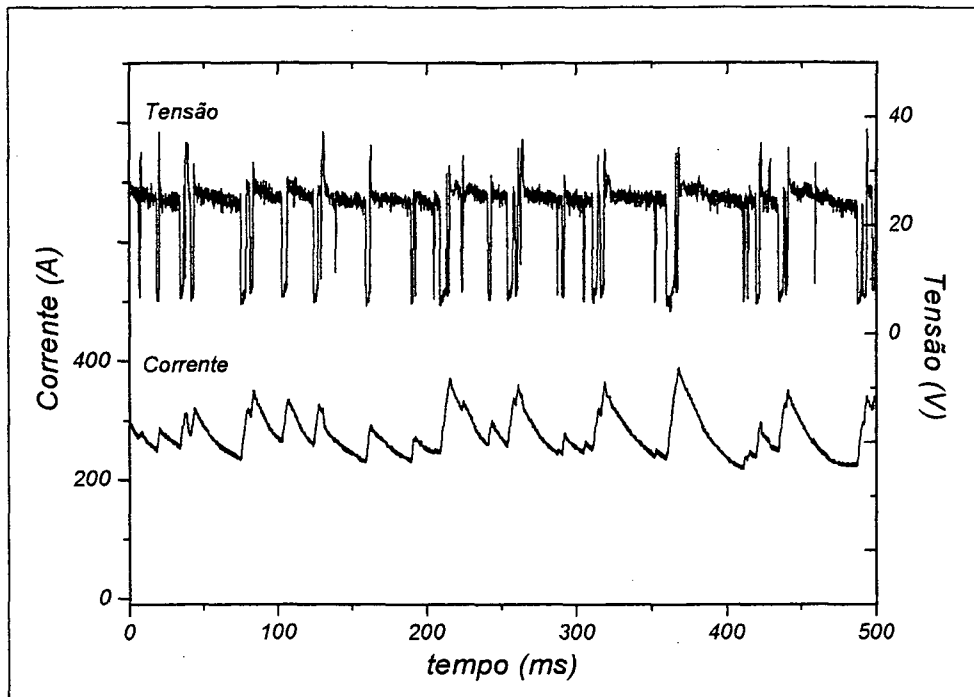


Figura 27b - Oscilograma de tensão e corrente para o processo com duplo arame. $V_{aT} = 14.0$ m/min (7.0 m/min por arame) - $\varnothing = 1.0$ mm.

Uma comparação que merece ser apresentada é o comparativo das taxas de fusão obtidas no trabalho, com o consumo do eletrodo de diâmetro 1.6 mm (figura 28).

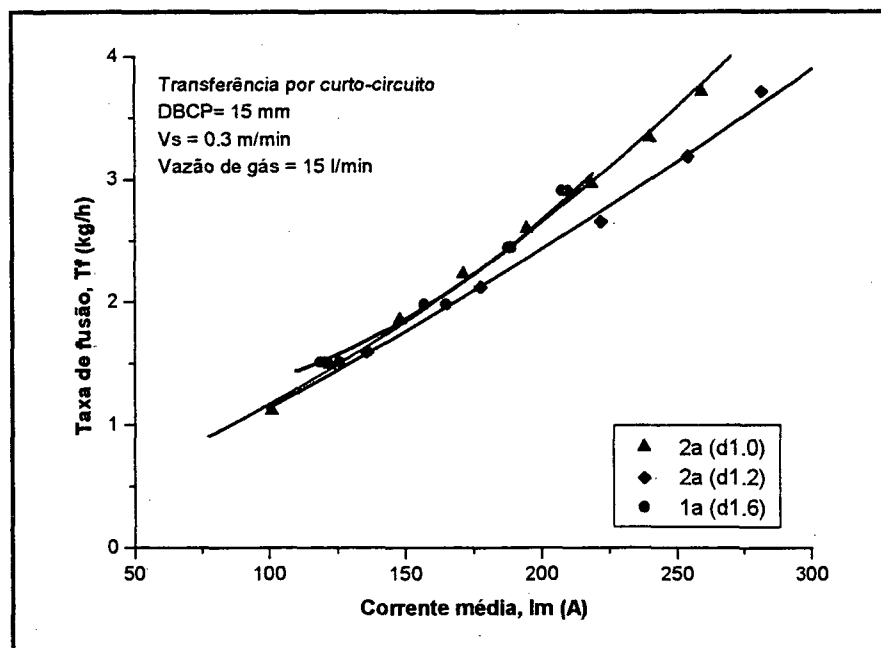


Figura 28 - Taxas de fusão dos eletrodos no processo duplo arame comparadas com o consumo do eletrodo de 1.6 mm no processo convencional.

Como pode ser observado, este eletrodo no processo convencional apresenta uma taxa de fusão específica similar à obtida com o processo duplo arame com eletrodos de 1.0 mm

7.1.3 Característica Estática do Arco na Transferência por Curto-Circuito

As figuras 29a e 29b mostram a relação entre a tensão medida na tocha de soldagem e a corrente média, em ambos processos, para os dois diâmetros de eletrodos ensaiados.

Pode ser verificado através das figuras que a característica estática do arco no processo duplo arame, na transferência por curto-circuito, apresenta níveis de tensão inferiores para mesmos valores de corrente quando comparados com o processo convencional para o critério de estabilidade.

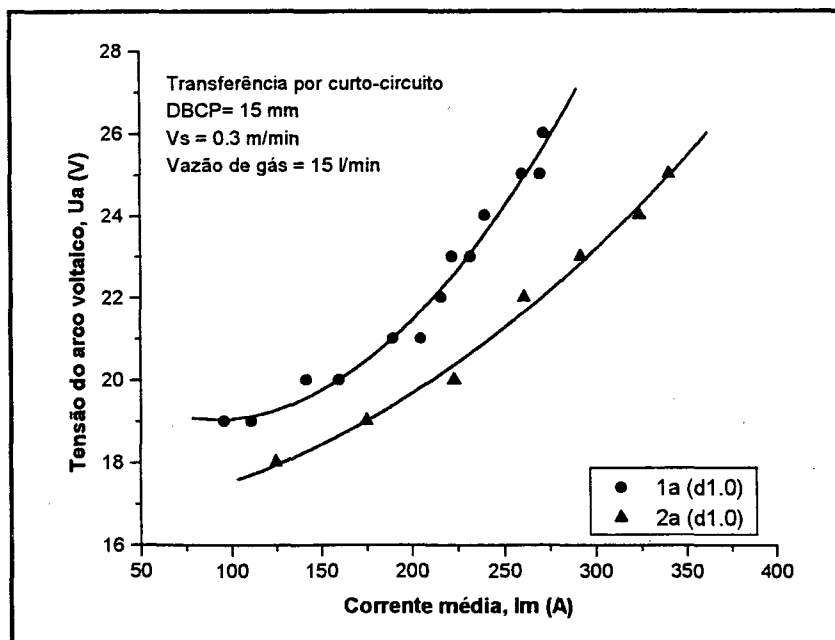


Figura 29a - Característica estática do arco do processo convencional e duplo arame no modo de transferência por curto-circuito para arame de 1.0 mm.

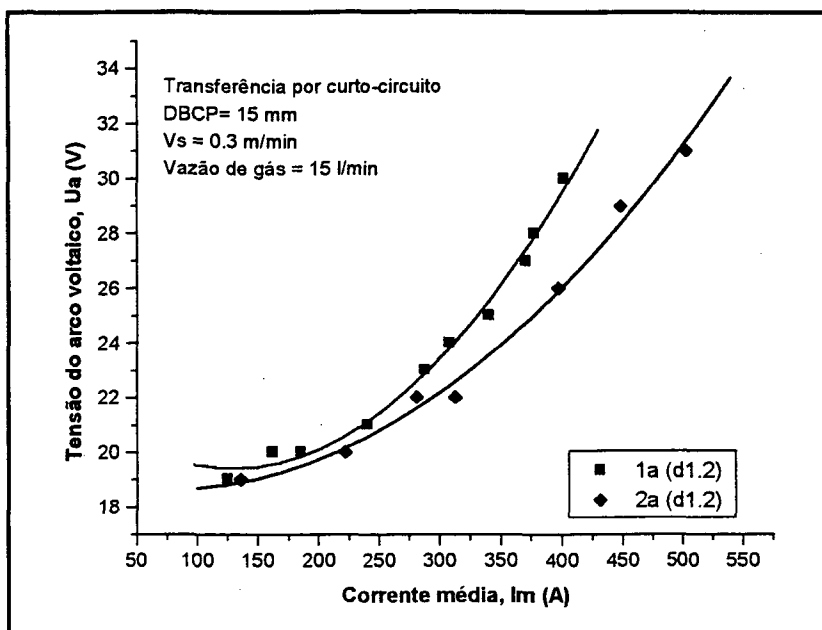


Figura 29b - Característica estática do arco do processo convencional e duplo arame no modo de transferência por curto-circuito para arame de 1.2 mm.

7.1.4 Potência Média na Transferência por Curto-Circuito

O consumo de potência de um determinado processo é um parâmetro que incide diretamente no custo da soldagem, porém, geralmente não é levado em consideração na hora de avaliar a produtividade de um processo. Na tentativa de verificar o comportamento deste parâmetro na soldagem com duplo arame, é apresentada a seguir, uma análise da potência consumida durante a soldagem na transferência por curto-circuito. A mesma análise é estendida para o processo convencional.

A figura 30 mostra o gráfico da potência média de soldagem em função da velocidade de alimentação do arame.

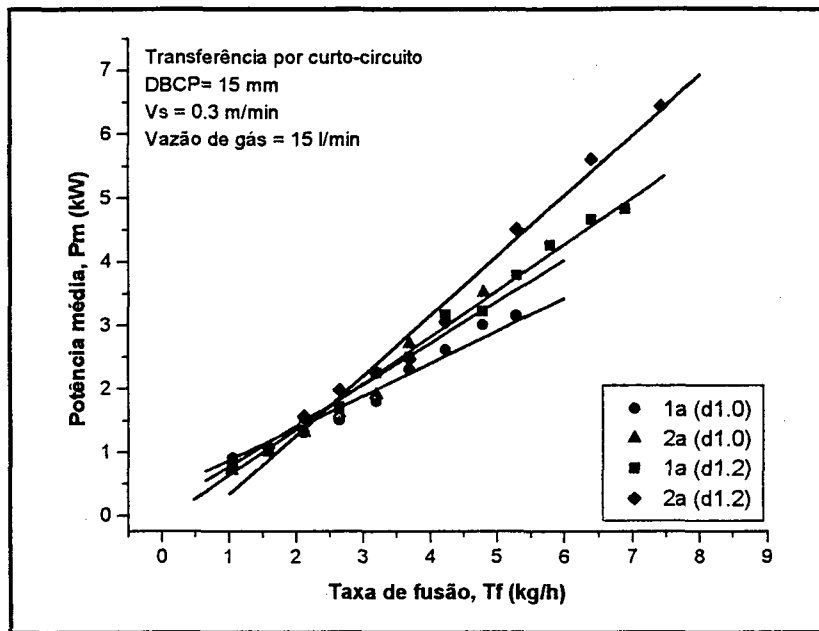


Figura 30 - Gráfico da potência média em função da taxa de fusão dos eletrodos no processo convencional e no duplo arame.

Como pode ser observado, a potência média de soldagem com o processo duplo arame na transferência por curto-circuito, é aproximada daquela consumida no processo convencional, para uma mesma taxa de fusão, porém, há uma leve tendência do processo com duplo arame de consumir mais energia, principalmente nas faixas mais elevadas de velocidade do arame.

7.1.5 Geometria e Aspecto Visual da Solda na Transferência por Curto-Circuito

Nas figuras 31a e 31b, estão ilustradas, respectivamente, a relação entre a largura e o reforço do cordão com a velocidade de alimentação do arame, nas condições de soldagem adotadas, para o caso de deposição plana no processo convencional e duplo arame.

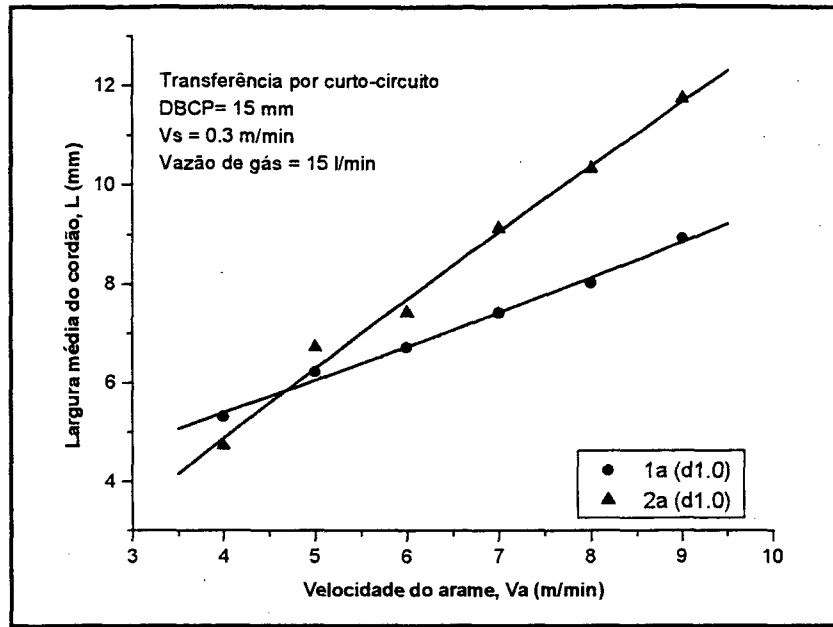


Figura 31a - Gráfico da largura média do cordão em função da velocidade do arame no processo convencional e no duplo arame para eletrodos de diâmetro $\varnothing = 1.0$ mm

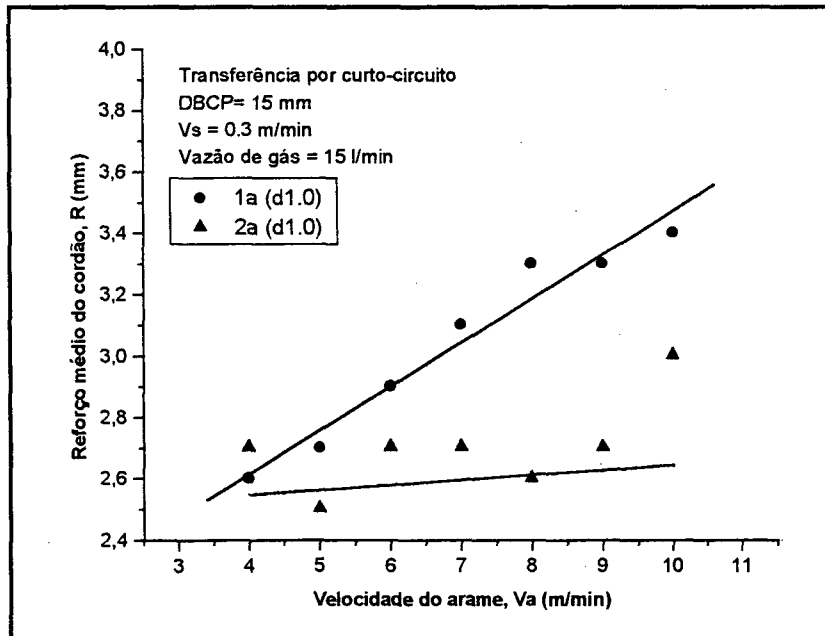


Figura 31b - Gráfico do reforço médio do cordão em função da velocidade do arame no processo convencional e no duplo arame para eletrodos de diâmetro $\varnothing = 1.0$ mm

Como pode ser observado nas figuras 31a e 31b, os cordões de solda depositados com o processo duplo arame apresentam-se mais largos e baixos em relação aos cordões depositados com o processo convencional.

Em relação à penetração, a figura 38 (a e b), mostra o perfil de penetração dos cordões obtido através de ataque metalográfico em cordões realizados com eletrodo de 1.0 mm de diâmetro. Como pode ser notado, o processo com duplo arame apresentou menor penetração em relação ao processo convencional.

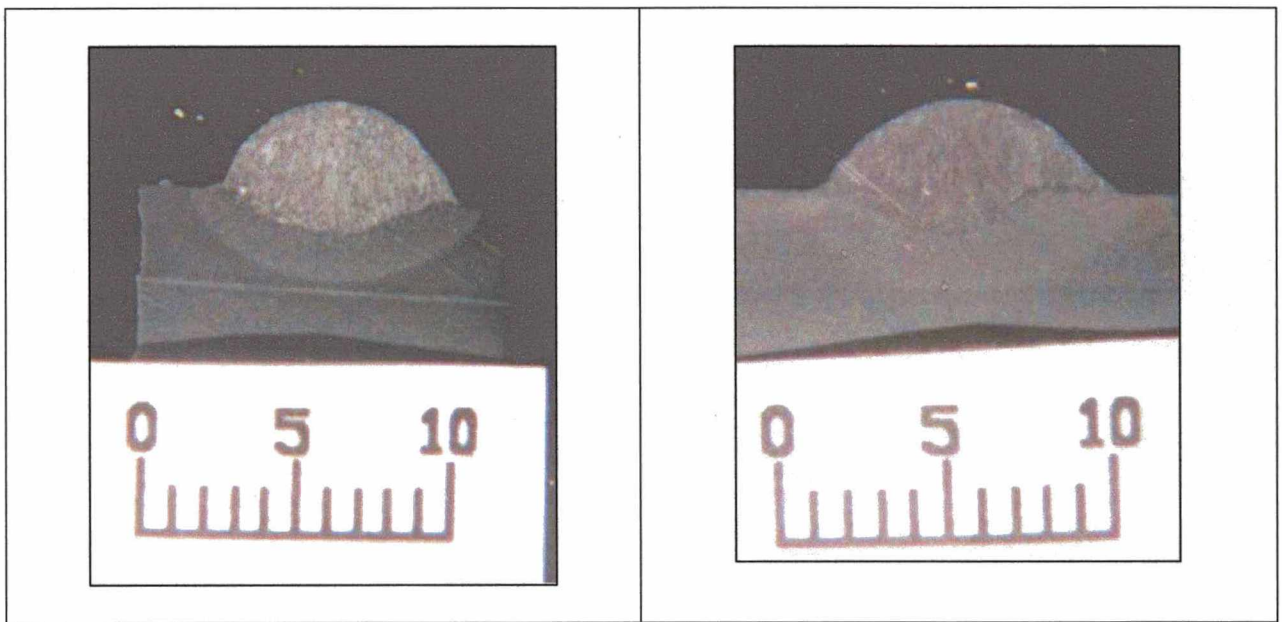


Figura 32 - Macrografia de cordões de solda na transferência por curto-circuito a) Processo convencional b) Processo duplo arame. ($V_a = 7.0$ m/min. Ataque com nital a 5%)

A figura 33 mostra o aspecto visual de cordões de solda para varias correntes de soldagem realizados no duplo arame para eletrodos de 1.0 mm.

7.1.6 Eletrodos na Posição Transversal na Transferência por Curto-Circuito

As figuras 34a e 34b mostram a relação entre a largura e o reforço do cordão com a velocidade de alimentação do arame, nas condições de soldagem adotadas, para o caso de deposição plana no processo convencional e duplo arame com disposição transversal do eletrodos.

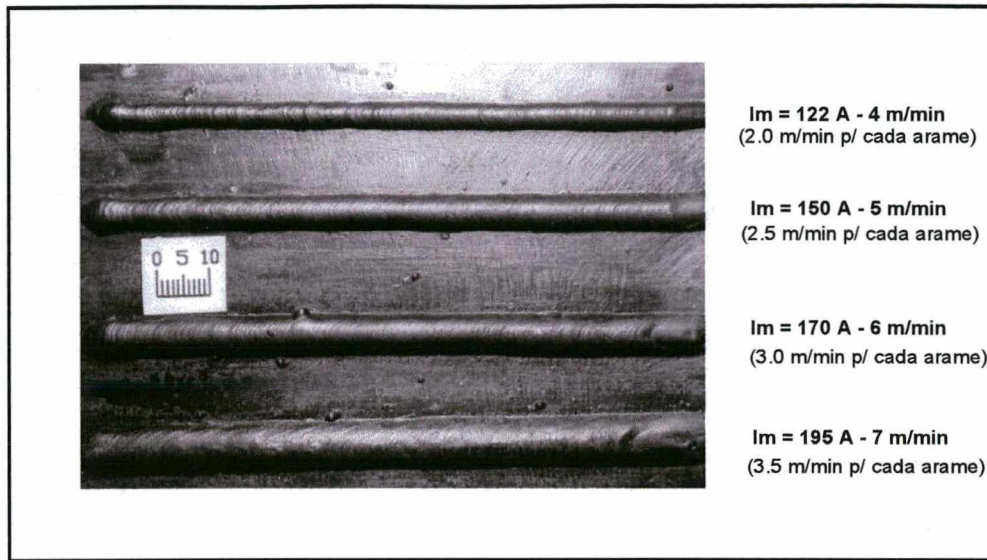


Figura 33 - Aspecto visual dos cordões de solda no processo duplo arame na transferência por curto-circuito para eletrodos de 1.0 mm.

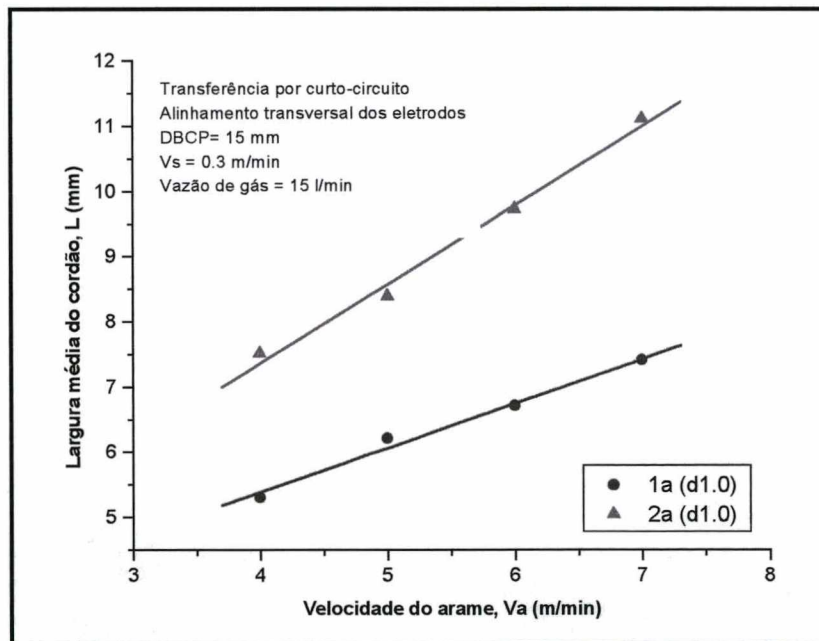


Figura 34a - Gráfico da largura média do cordão em função da velocidade do arame no processo convencional e no duplo arame na posição transversal para eletrodos de 1.0 mm

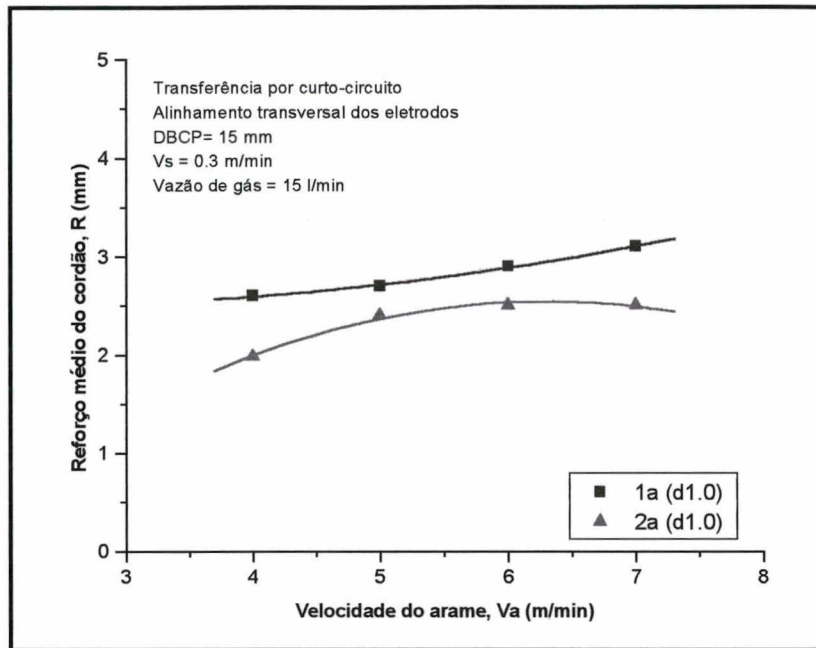


Figura 34b - Gráfico do reforço médio do cordão em função da velocidade do arame no processo convencional e no duplo arame na posição transversal para eletrodos de 1.0 mm

A figura 35 mostra o aspecto visual de cordões de solda para varias correntes médias no processo duplo arame com posição transversal dos eletrodos.

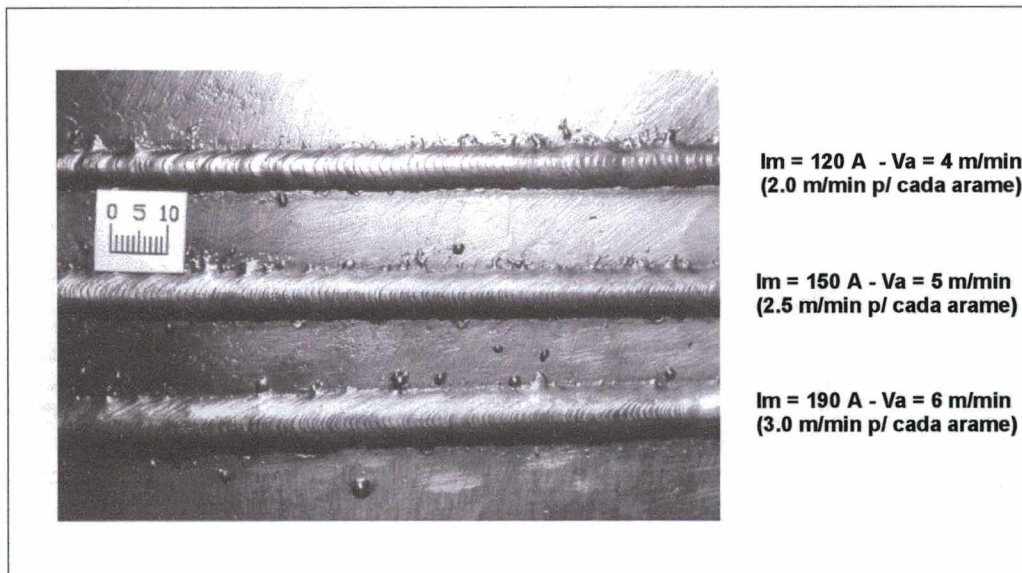


Figura 35 - Aspecto visual dos cordões de solda no processo duplo arame com posicionamento transversal dos eletrodos no modo de transferência curto-circuito - $\varnothing = 1.0$ mm

Pelas figuras 34a e 34b acima, o perfil dos cordões depositados com duplo arame e posição transversal de eletrodos no modo curto-circuito apresenta características interessantes para sua utilização em revestimentos soldados, pois eles são mais largos e baixos quando comparados com depósitos de solda realizados no processo convencional. Porém, através da figura 35, pode-se observar a existência de respingos importantes e uma formação bastante irregular das bordas do cordão, colocando em dúvida sua aplicabilidade.

7.1.7 Comentários Gerais e Observações na Transferência por Curto-Circuito

☞ Estabilidade do Arco

O critério de estabilidade, aplicado e determinado só nos ensaios com os eletrodos posicionados longitudinalmente ao cordão de solda no caso do processo com duplo arame, mostrou-se adequado para o estabelecimento dos pontos de operação, para ambos processos, pois na condição de regularidade determinada, os cordões apresentaram em geral boa geometria e qualidade superficial.

Uma consideração que deve ser feita em relação à estabilidade do arco é que através da observação visual e da percepção acústica da soldagem durante a realização dos ensaios, constatou-se que as soldas realizadas com o processo duplo arame apresentam maiores níveis de instabilidade quando comparadas com aquelas realizadas no processo convencional. Este fato, se bem não foi quantificado, pode ser reafirmado pela maior quantidade de respingos produzida em determinadas faixas de operação do processo.

Uma análise do parâmetro de regularidade (DI_{pm}) em função da corrente média (figura 36) constatou que, no processo convencional, o mesmo aumenta com o aumento da corrente média. Porém, no processo com duplo arame apresenta um comportamento mais estável em toda a faixa de operação. Esta observação evidencia o fato de que o critério adotado na avaliação da estabilidade do arco, no caso do processo com duplo arame, não permite uma determinação adequada desta característica e que o mesmo deve ser complementado, pois como foi mencionado anteriormente, este processo é em essência mais instável que o convencional. Mesmo assim, o critério do desvio padrão dos picos de corrente foi de grande valia no trabalho, pois serviu como referência na determinação das tensões compatíveis com as taxas de alimentação de arame utilizadas.

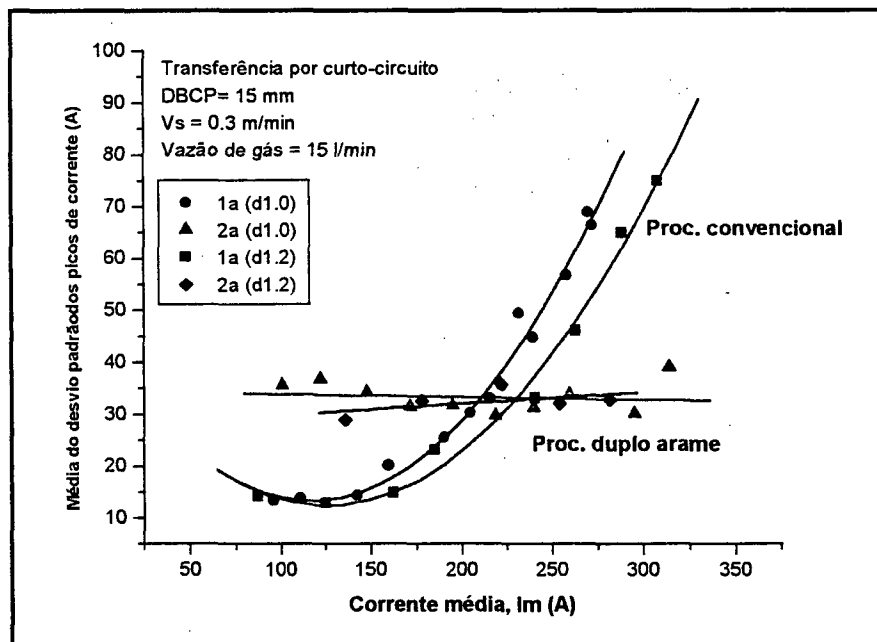


Figura 36 - Média do desvio padrão dos picos de corrente em função da corrente média Im, no processo convencional e duplo arame.

☞ Taxas Diferenciadas de Alimentação do Arame

Uma característica observada através das filmagens na soldagem por curto-circuito é que no processo duplo arame quando os dois eletrodos, posicionados um atrás do outro, são alimentados com uma mesma velocidade, o eletrodo da frente transfere gotas de metal fundido com uma frequência mais baixa em relação ao detrás e com características de transferência globular. No segundo eletrodo, os curtos se dão com maior frequência e a transferência é efetivamente por curto-circuito. Este fenômeno pode ser explicado pelos diferentes comprimentos de arco para cada eletrodo, durante a transferência, como está mostrado na figura 37. Na tentativa de melhorar as condições de transferência, foi estabelecida uma diferença relativa entre as velocidades de alimentação de cada arame.

Na tabela 14, está mostrado o desvio padrão dos picos de corrente (DI_{pm}) de ensaios onde a velocidade de alimentação relativa entre os dois arames foi variada gradualmente. Nota-se uma melhoria na estabilidade do arco quando a diferença entre as velocidades (ΔV_a) atinge o valor de 0.4 m/min. Também percebe-se o aumento esperado da corrente média para estes acréscimos na velocidade de arame de um dos eletrodos.

Va1 (m/min)	Va2 (m/min)	ΔV_a (m/min)	U _c (v)	I _m (A)	DI _{pm} (A)
2.5	2.5	0.0	20	215	35.4
2.8	2.5	0.3	20	214	33.2
2.9	2.5	0.4	20	232	30.4
3.0	2.5	0.5	20	230	30.7
3.1	2.5	0.6	20	236	34.6

Tabela. 14 - Desvio padrão dos picos de corrente (DI_{pm}) de ensaios realizados no processo duplo arame com velocidades de alimentação relativas diferentes - $\varnothing = 1.2$ mm

Através da observação visual do arco foi possível verificar que com o aumento da velocidade do arame do primeiro eletrodo, a transferência das gotas neste eletrodo passou a se realizar com maior frequência e com características típicas da transferência por curto-circuito.

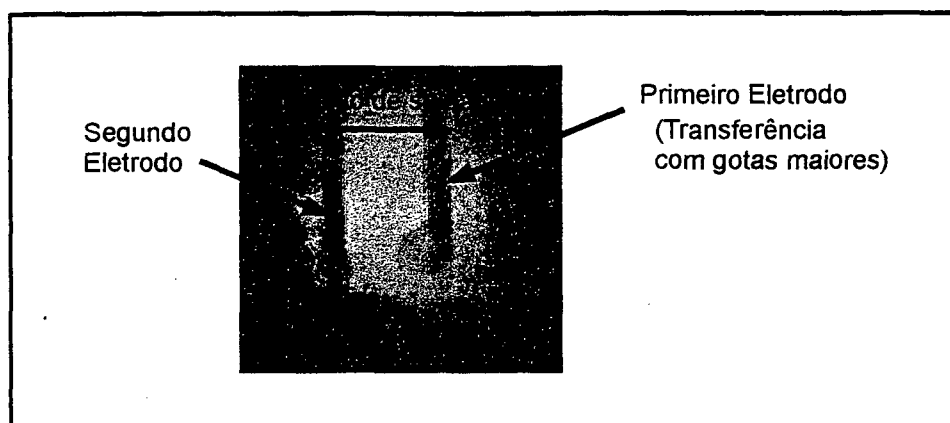


Figura 37 - Detalhe da transferência metálica no processo com duplo arame no modo curto-circuito capturada pelo sistema de aquisição de imagens.

☞ Produtividade

Através dos ensaios realizados foi possível verificar que o consumo específico do eletrodo no processo duplo arame no modo curto-circuito é inferior ao processo convencional quando utilizado o mesmo diâmetro do eletrodo. Cabe destacar que se pode chegar a conclusões erradas quando ambos processos são comparados com diferentes diâmetros de arame.

Apesar do processo duplo arame ter maiores condições de atingir maiores taxas de fusão absolutas, elas não vão além daquelas obtidas com o processo convencional devido à extrema instabilidade do arco nessas condições. Portanto, quando se afirma que o processo duplo arame é mais produtivo que outro é necessário especificar o tipo de transferência no qual ele foi avaliado.

☞ **Vantagem Operacional**

Uma característica do processo duplo arame na transferência por curto-circuito é que o mesmo não apresenta problemas operacionais quando ocorre interrupção involuntária de uma unidade alimentadora de arame. Portanto, quando acontece algum problema no fornecimento de um dos arames, a própria configuração elétrica do processo faz com que a corrente de soldagem se adapte ao valor de resistência imposta ao circuito, evitando a destruição e inutilização de bicos de contato.

7.2 Análise do Processo com Transferência por Fluxo Goticular

7.2.1 Características de Fusão dos Eletrodos na Transferência por Fluxo Goticular

A figura 38 mostra as características de fusão dos eletrodos determinadas para ambos processos. A seqüência de pontos apresentada neste gráfico vem precedida dos valores obtidos na transferência por curto-circuito analisados no item 7.1. Estes dados assim apresentados permitem verificar a continuidade das características de fusão na passagem de um tipo de transferência para outro, quando se mantém o mesmo valor de comprimento livre do eletrodo.

Uma das questões ressaltantes observadas nesta análise é a grande semelhança nas características de consumo achadas para ambos processos dentro de determinadas faixas de operação, a pesar das diferenças na seção transversal. Esta característica resulta bastante interessante desde o ponto de vista da produtividade, pois a tendência esperada era de que o processo com duplo arame apresente menor consumo específico em relação ao processo

convencional utilizando o mesmo diâmetro de eletrodo, como foi observado na análise da transferência por curto-circuito de alta densidade de corrente (item 7.1.1)

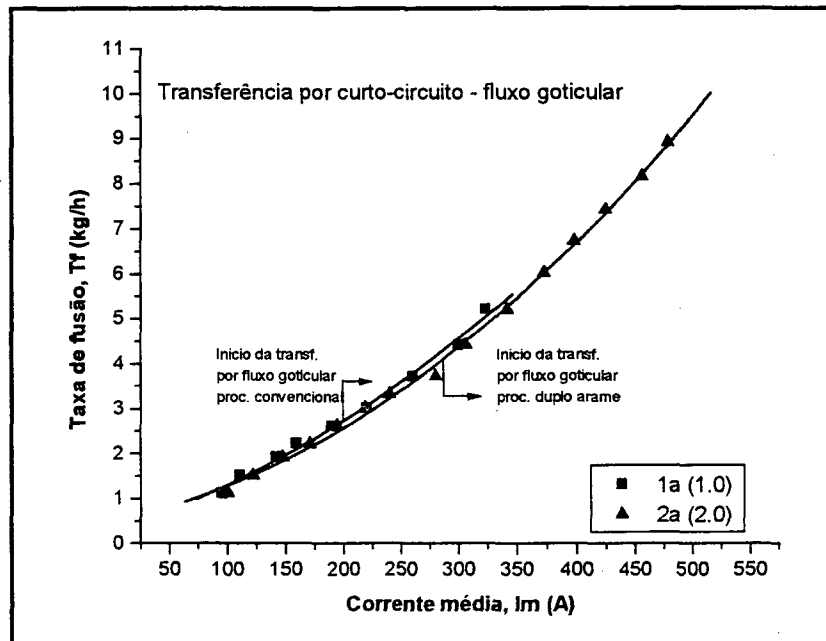


Figura 38a - Taxas de fusão dos eletrodos no processo convencional e duplo arame na transferência por fluxo goticular para arames de 1.0 mm

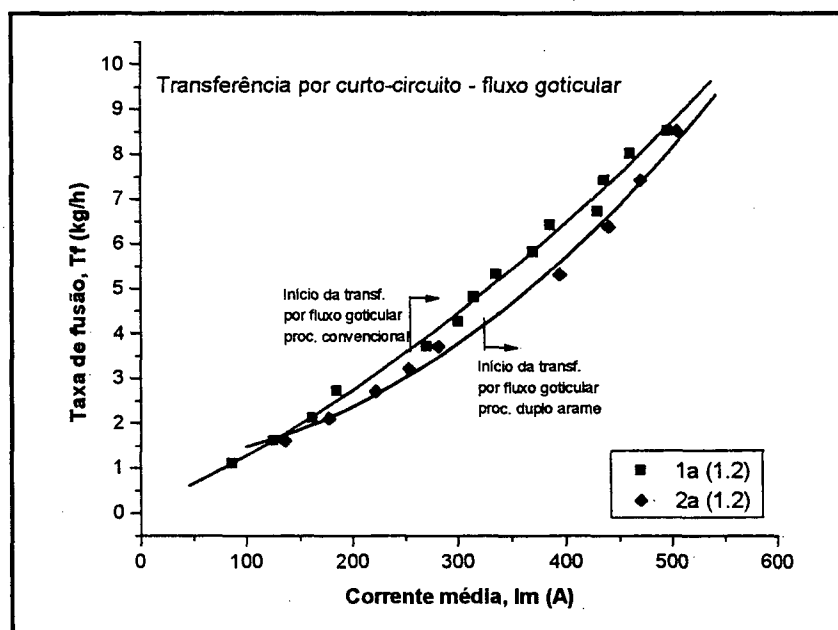


Figura 38b - Taxas de fusão dos eletrodos no processo convencional e duplo arame na transferência por fluxo goticular para arames de 1.2 mm

No processo convencional, a máxima velocidade do arame atingida com eletrodo de 1.0 mm, foi de 14 m/min com aproximadamente 320 A de corrente média. Esta condição de soldagem é bastante crítica, e na prática, não seria recomendável sua utilização. Nesta situação há uma grande dificuldade na manutenção de um comprimento constante do arco, principalmente, devido a problemas de natureza mecânica na alimentação do arame. Portanto, além da variação no comprimento do arco modificar a corrente de soldagem e conseqüentemente mudar o perfil de penetração do cordão, corre-se um alto risco de que o arame funda no bico de contato ("burn back") destruindo e inutilizando o mesmo. A obtenção deste ponto da curva teve como objetivo determinar justamente a condição extrema de funcionamento do processo convencional e verificar as principais dificuldades nesta situação.

No processo duplo arame esta condição é facilmente atingida, pois a velocidade do arame para cada eletrodo corresponde à metade do valor total, ou seja, 7.0 m/min para cada sistema de alimentação. Conseqüentemente, problemas no fornecimento do arame dificilmente podem surgir nesta faixa de velocidades. Da mesma forma, a corrente média total necessária para a fusão dos eletrodos é distribuída em ambos eletrodos. Cabe destacar que, para a condição particular analisada ($V_{a1} = V_{a2} = 7.0$ m/min no processo duplo arame), a transferência em cada eletrodo encontra-se ainda numa fase de transição de transferência globular para fluxo goticular. De fato, uma transferência por fluxo goticular estável no processo duplo arame para eletrodos de 1.0 mm de diâmetro é atingida com uma corrente média aproximada de 370 A, correspondente a 16 m/min de velocidade de arame.

Neste trabalho não foi possível explorar todo o potencial do processo MIG/MAG duplo arame em relação taxas elevadas de deposição absoluta já que a análise ficou truncada devido ao fator limitante da corrente máxima fornecida pela fonte de soldagem. Conseqüentemente, ensaios

que demandassem correntes superiores a este limite não foram realizados. A análise da taxa de fusão do arame de 1.2 mm ficou ainda mais prejudicada nesse sentido, pois, tanto no processo convencional, quanto no duplo arame, este limite de corrente foi atingido, impedindo determinar a partir de que ponto o processo duplo arame consegue depositar maior quantidade de material em relação ao processo convencional.

Ao se trabalhar com elevadas taxas de deposição e conseqüentemente com altas velocidades de arame é fundamental que o sistema de alimentação de arame forneça o metal de adição de forma contínua e sem nenhum tipo de interrupções. Os níveis de energia envolvidos no processo são geralmente importantes e qualquer tipo de falha no fornecimento do arame acabam derivando em sérios problemas que afetam não só o cordão de solda, senão também, a integridade do próprio bico de contato.

Durante a realização de ensaios com altas taxas de alimentação de arame, um dos principais problemas, como mencionado anteriormente, foi a oscilação do comprimento do arco. Este problema que foi crítico no processo convencional, no duplo arame, acabou sendo ainda mais, pois as chances de acontecer se duplicaram. Como neste processo o arco é formado entre os dois eletrodos e a peça, qualquer variação de um acaba indefectivelmente afetando o outro. Este problema deveu-se em grande parte ao excessivo atrito existente entre arames e bicos de contato. Apesar de que um bom contato elétrico entre arame e bico é necessário para uma adequada transferência de energia, um atrito excessivo acaba trancando o arame e superaquecendo os bicos, podendo levá-los inclusive até a fusão.

Grande parte deste problema é decorrente da curvatura do arame originada no próprio processo de enrolamento da bobina no carretel. Apesar de que o arame sofre deformações antes

de entrar na tocha de soldagem, pois antes de chegar nos bicos de contato ele passa pelo tracionador e pelos cabos até chegar à tocha, estas deformações são do tipo elástico. Conseqüentemente, o arame mantém sua curvatura original de natureza plástica. Para minimizar este problema foi construído um dispositivo denominado "endireitador de arame", que consiste num trem de rolos, por onde o arame é conduzido e através do qual é aplicada uma pressão no sentido contrário à curvatura, forçando uma deformação plástica adequada que permite o endireitamento do arame na saída do dispositivo. A figura 39 ilustra o mecanismo de funcionamento do endireitador e a figura 40 mostra o protótipo fabricado e que foi utilizado no trabalho.

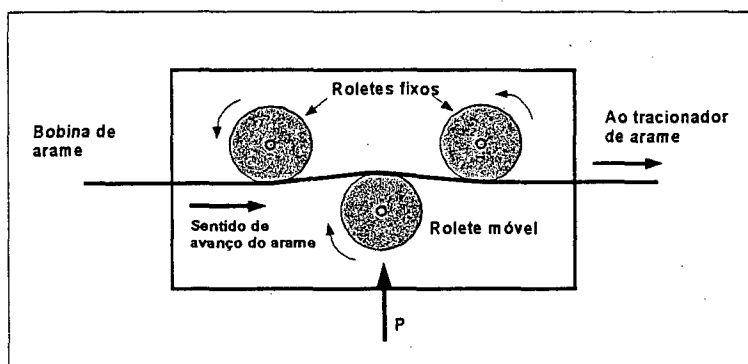


Figura 39 - Diagrama esquemático do mecanismo de funcionamento do "endireitador de arame".

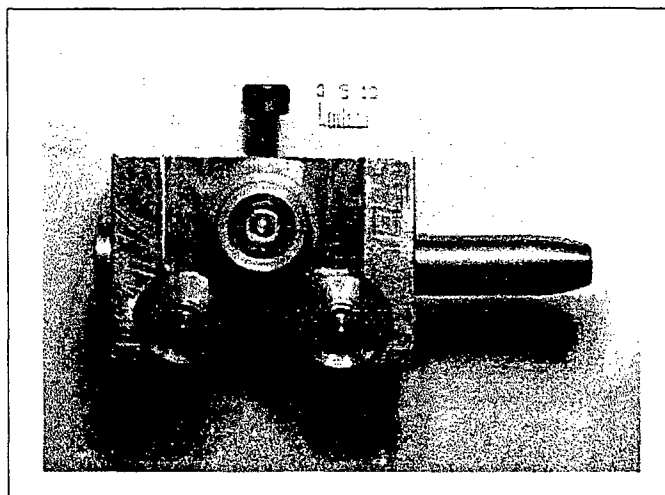


Figura 40 - Protótipo do "endireitador de arame" fabricado e utilizado no trabalho.

7.2.2 Característica Estática do Arco na Transferência por Fluxo Goticular

As figuras 41a e 41b mostram a relação entre a tensão medida na tocha de soldagem e a corrente média para ambos processos e para os dois diâmetros de eletrodos, respectivamente.

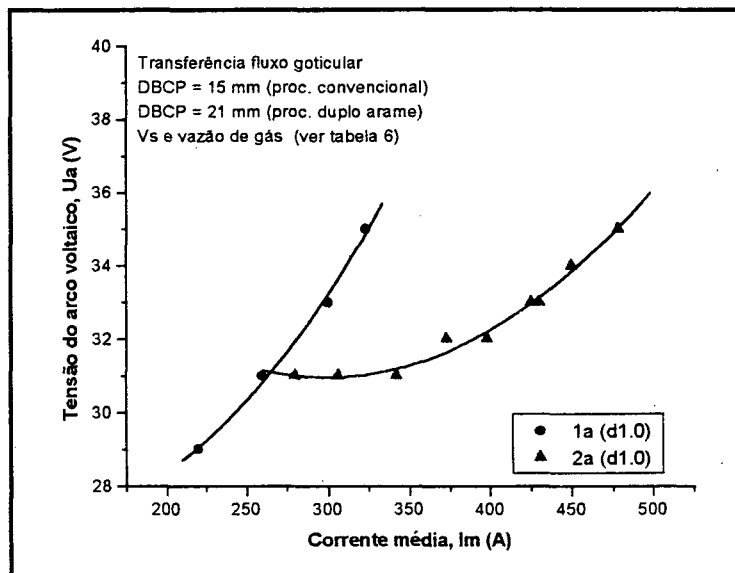


Figura 41a - Característica estática do arco do processo convencional e duplo arame no modo de transferência por fluxo goticular para arame de 1.0 mm.

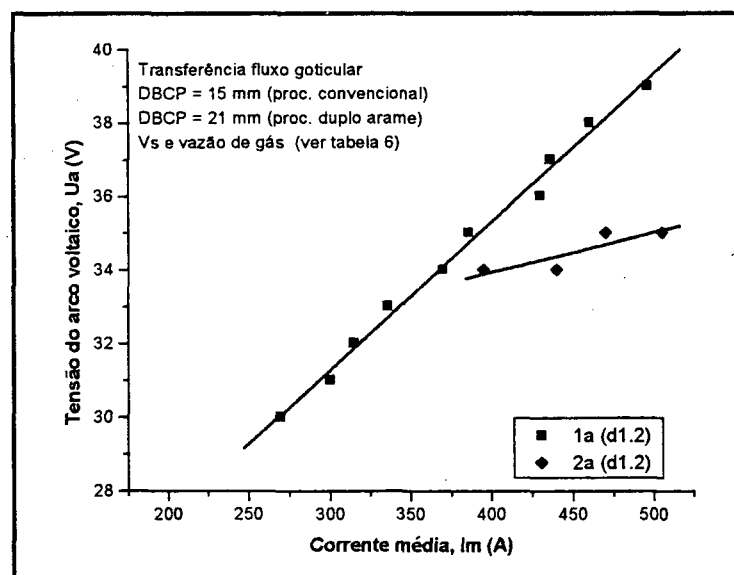


Figura 41b - Característica estática do arco do processo convencional e duplo arame no modo de transferência por fluxo goticular para arame de 1.2 mm.

Como pode ser observado através das figuras 41a e 41b, na transferência por fluxo goticular também existe diferença na tendência das curvas de característica estática do processo duplo arame quando comparadas com o processo convencional e da mesma forma que na transferência por curto-circuito, o nível das tensões no processo duplo arame é ligeiramente inferior ao convencional para mesmos valores de corrente.

7.2.3 Potência Média na Transferência por Fluxo Goticular

A figura 42, mostra o gráfico da potência média de soldagem em função da velocidade de alimentação do arame para a faixa de operação correspondente ao modo de transferência por fluxo goticular.

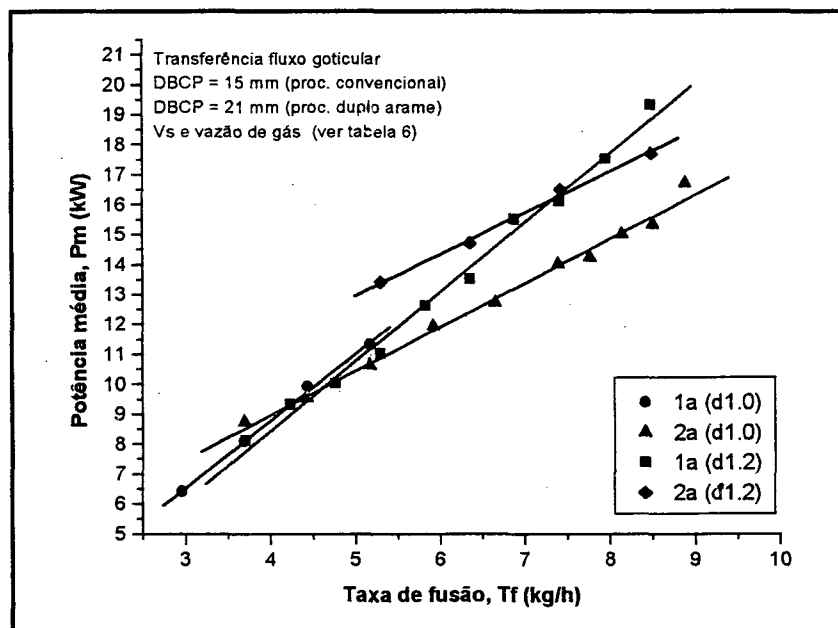


Figura 42 - Gráfico da potência média em função da taxa de fusão dos eletrodos no processo convencional e no duplo arame na transferência por fluxo goticular.

Como pode ser apreciado no gráfico acima, a potência média do arco no processo duplo arame não difere significativamente da potência do processo convencional, porém, pode ser

observado através dos dados correspondentes a eletrodos de 1.0 mm a maior faixa de operação de um em relação a outro.

7.2.4 Geometria e Aspecto Visual da Solda na Transferência por Fluxo Goticular

Nas figuras 43a e 43b estão ilustradas a relação entre a largura e o reforço do cordão com a velocidade de alimentação do arame, nas condições de soldagem adotadas, para o caso de deposição plana com a disposição dos eletrodos em "tandem" para a transferência por fluxo goticular.

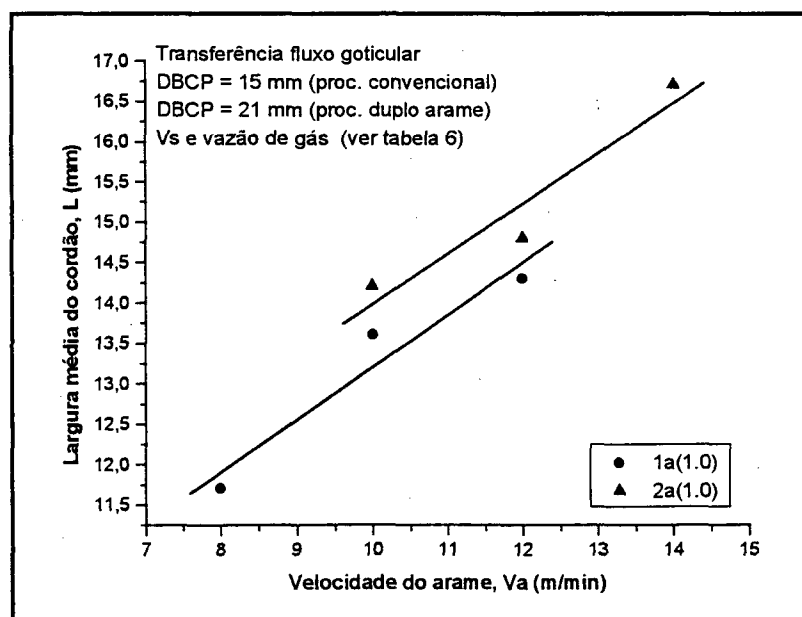


Figura 43a - Gráfico da largura média do cordão em função da velocidade do arame no processo convencional e no duplo arame para eletrodos de 1.0 mm

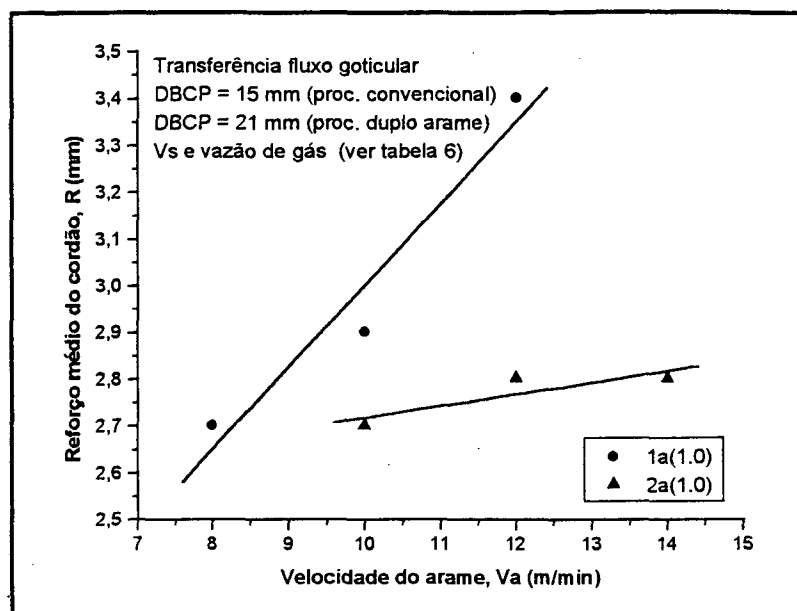
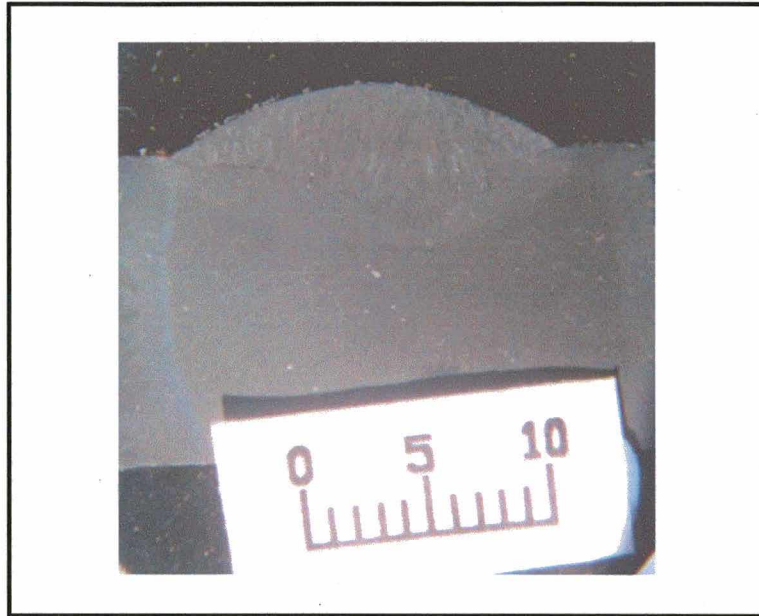


Figura 43b - Gráfico do reforço médio do cordão em função da velocidade do arame no processo convencional e no duplo arame para eletrodos 1.0 mm

Em forma análoga ao verificado na transferência por curto-circuito, no processo com duplo arame os cordões se apresentaram, ligeiramente mais largos e mais baixos em relação ao processo convencional, porém estas diferenças não representam valores significativos.

A figura 44, mostra o perfil de penetração de um depósito realizado com o processo duplo arame na transferência por fluxo goticular com arame de 1.0 mm e a figura 45, o aspecto visual de cordões de solda no processo duplo arame realizados com eletrodos de diâmetro 1.0 mm.

Como pode ser notado através destas figuras, os cordões apresentam boa aparência visual e dimensional.



**Figura 44 - Macrografia de solda realizada no processo duplo arame na transferência por fluxo goticular.
($V_a = 21$ m/min - 10.5 m/min p/ arame - Ataque com nital a 5%)**

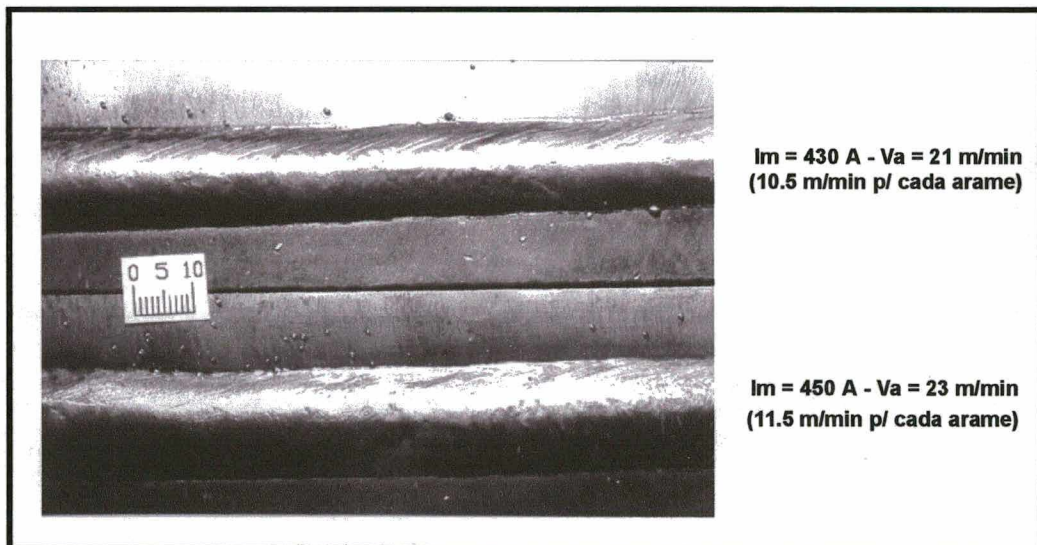


Figura 45 - Aspecto visual dos cordões de solda no processo duplo arame com transferência por fluxo goticular para eletrodos de 1.0 mm

7.2.5 Comentários Gerais e Observações na Transferência por Fluxo Goticular

☞ Produtividade

O processo MIG/MAG duplo arame no modo de transferência fluxo goticular, mesmo não sendo explorado em toda sua faixa operativa devido à limitação da fonte, apresentou de uma forma geral bom desempenho. Como foi observado na figura 45, os cordões apresentaram adequada geometria, combinando baixos níveis de respingos com boa produtividade. Cabe destacar que as velocidades de arame atingidas nestes ensaios estão fora da faixa de operação do processo convencional, conseguindo-se ganhos de até 64 % em termos de velocidade total de arame em relação ao processo convencional, para eletrodos de 1.0 mm.

Observado deste ponto de vista, o processo utilizado neste modo de transferência poderia apresentar-se bastante vantajoso em certas aplicações, já que pelas características inerentes ao próprio tipo de transferência, elimina-se a necessidade de utilizar uma fonte de soldagem sofisticada e de alta tecnologia. Este fato é mencionado principalmente porque nas aplicações do processo disponíveis na literatura e em catálogos de fabricantes, são utilizadas indefectivamente fontes de alta tecnologia com recursos de transferência pulsada, o que através deste trabalho comprova-se ser absolutamente desnecessário. Por outro lado, também deve ser lembrado que da mesma forma que no processo MIG/MAG convencional, o modo de transferência por fluxo goticular é aplicável só em procedimentos de soldagens na posição plana, limitando o campo de aplicações.

☞ Taxas Diferenciadas de Alimentação do Arame

Uma alternativa em termos de variação de parâmetros que o processo duplo arame com único potencial admite, consiste na possibilidade de estabelecer taxas diferenciadas de alimentação de arame. No entanto, pela própria característica de potencial comum, esta diferença não pode alcançar um valor elevado, pois ambos eletrodos estão comandados pela mesma fonte, ou seja, as mesmas variáveis são estabelecidas para ambos eletrodos. Mas além disso, qual a vantagem de se alimentar a poça de fusão com velocidades de alimentação de arame diferentes? A princípio nenhuma, a não ser melhorar as condições de transferência. No modo curto-circuito, notou-se uma pequena melhoria na estabilidade quando se estabelecia uma diferença de aproximadamente 0.4 m/min.

Na transferência por fluxo goticular para arames de 1.0 mm e comprimento de arco adequado, uma diferença na taxa de alimentação, não produz nenhuma melhoria significativa na estabilidade do arco ou na qualidade do cordão. Porém, com arames de 1.2 mm de diâmetro foi necessário estabelecer uma diferença de aproximadamente 2.0 m/min nas velocidades relativas de alimentação do arame, numa ampla faixa de corrente (280 A - 490 A), para conseguir condições aceitáveis de transferência.

O principal problema ao se trabalhar com um arame de maior diâmetro é que devido ao fato do arame ser mais grosso, gotas de maior diâmetro acabam sendo geradas na ponta de cada eletrodo. A reduzida distância entre os mesmos e a atração magnética entre os arcos, fazem com que as gotas entrem em contato ainda antes de serem destacadas, formando gotas ainda maiores. Finalmente, quando estas gotas de maior volume conseguem destacar entram em contato com a poça de fusão provocando grande instabilidade. O mesmo efeito também foi acusado por

HACKL [11] na soldagem de alumínio. O estabelecimento de uma diferença nas taxas de alimentação de arame evita que as gotas entrem em contato antes de serem destacadas melhorando a estabilidade da transferência. Por outro lado, acima de 490 A (aproximadamente 8.0 m/min para cada arame) constatou-se que a transferência passou a ser mais suave e regular, pois o diâmetro das gotas diminuiu significativamente.

7.3 Análise do Processo com Transferência Pulsada

7.3.1 Características de Fusão dos Eletrodos na Transferência Pulsada

As figuras 46a e 46b mostram os gráficos da taxa de fusão dos eletrodos em função da corrente média na transferência pulsada para eletrodos de 1.0 e 1.2 mm, respectivamente. A figura 47 mostra, a modo ilustrativo, oscilogramas da tensão e da corrente para um ensaio realizado com corrente média de 350 A e arames de 1.2 mm com o processo duplo arame.

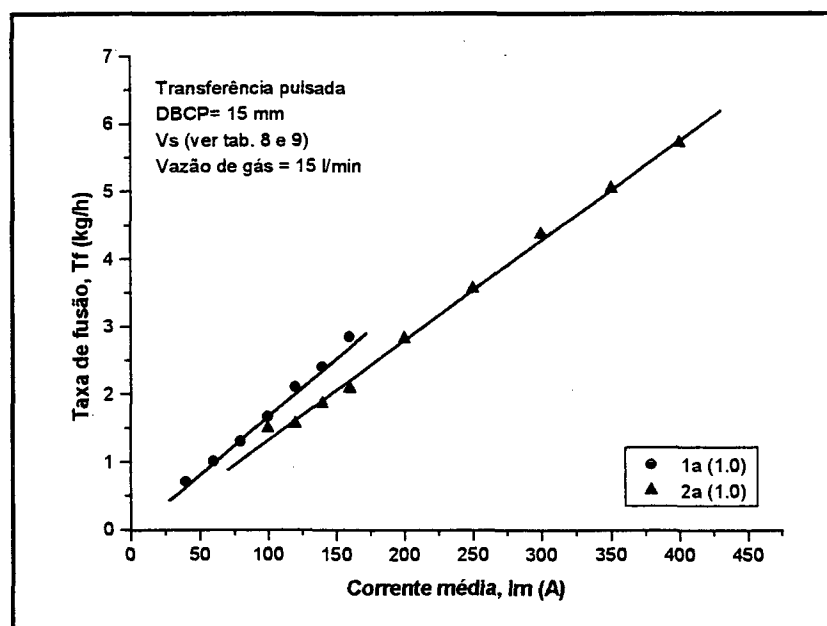


Figura 46a - Taxa de fusão dos eletrodos no processo convencional e duplo arame na transferência pulsada para arame de 1.0 mm.

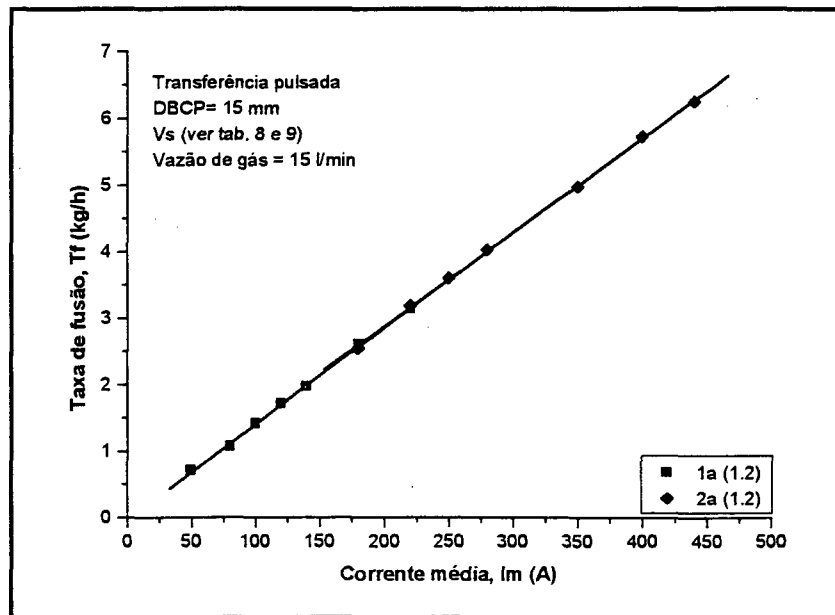


Figura 46b - Taxa de fusão dos eletrodos no processo convencional e duplo arame na transferência pulsada para arame de 1.2 mm.

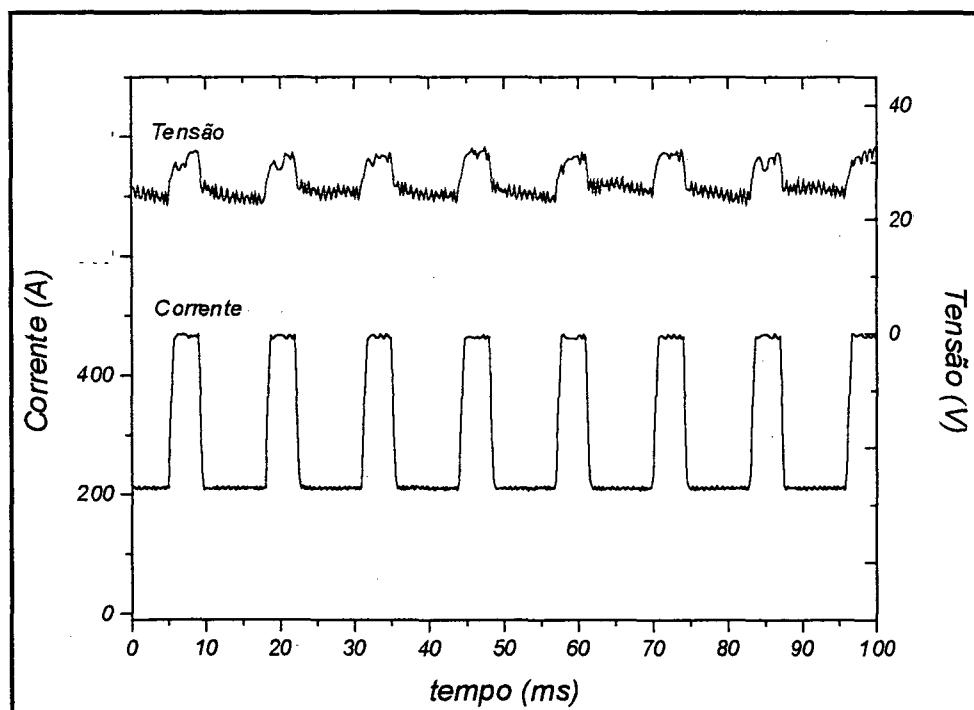


Figura 47 - Oscilograma de tensão e corrente para o processo duplo arame com transferência pulsada. $I_m = 350 \text{ A} / \varnothing = 1.0 \text{ mm}$

7.3.2 Potência na Transferência Pulsada

A figura 48 mostra a relação entre a potência média de soldagem e a taxa de fusão dos eletrodos nos processos convencional e duplo arame.

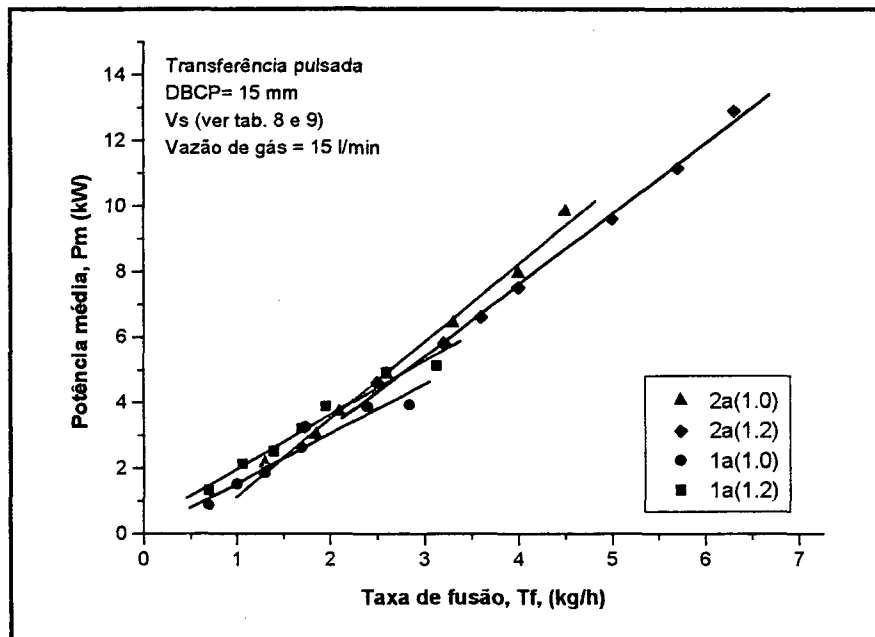


Figura 48 - Gráfico da potência em função taxa de fusão dos eletrodos no processo convencional e duplo arame com transferência pulsada

O comportamento da potência na transferência pulsada não foi diferente dos outros modos, já que a mesma apresentou valores muito próximos aos valores obtidos no processo convencional, tanto, para eletrodos de 1.0 mm, quanto para os de 1.2 mm.

7.3.3 Geometria e Aspecto Visual da Solda na Transferência Pulsada

A figura 49a mostra a relação entre a largura média dos cordões de solda com a corrente média para o processo convencional e duplo arame na transferência pulsada, enquanto que a 49b apresenta as dimensões do reforço médio dos depósitos em função da corrente média.

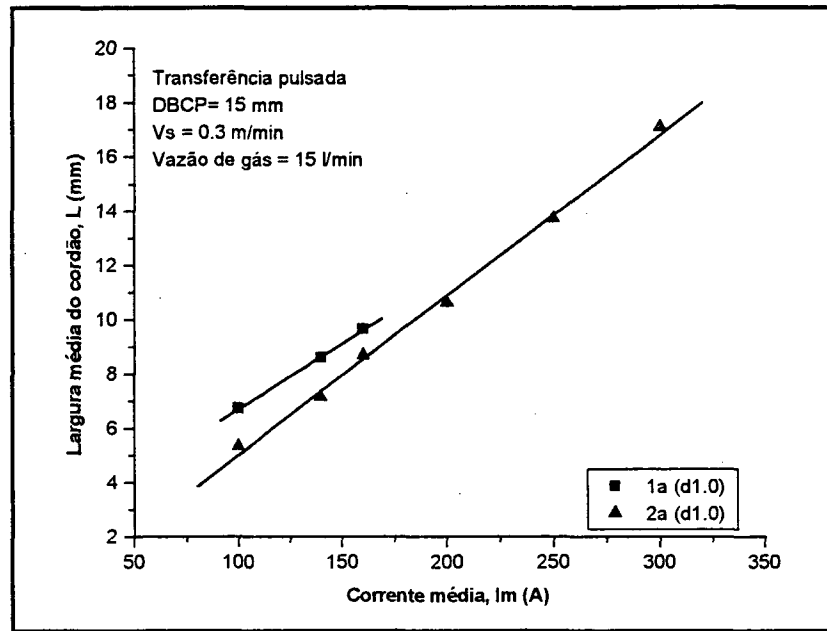


Figura 49a - Gráfico da largura média do cordão em função da corrente média no processo convencional e no duplo arame com transferência pulsada

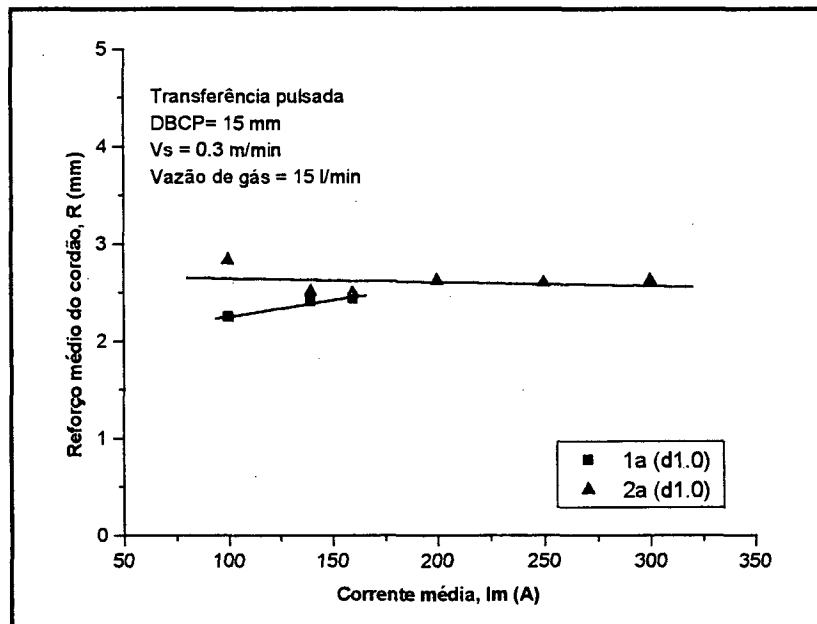


Figura 49b - Gráfico do reforço médio do cordão em função da corrente média no processo convencional e no duplo arame com transferência pulsada

Como pode ser observado através das figuras 49a e 49b, os depósitos no processo duplo arame com transferência pulsada apresentam uma largura de cordão inferior ao processo convencional para uma mesma corrente média. Já o reforço, é ligeiramente superior quando

comparado sob esta condição. Estas características do cordão se contrapõem com as apresentadas nos modos de transferência por curto-circuito e fluxo goticular.

A figura 50 mostra o perfil de penetração obtido no processo convencional e duplo arame, respectivamente, com transferência pulsada e a figura 51 mostra o aspecto visual dos cordões para várias correntes médias.

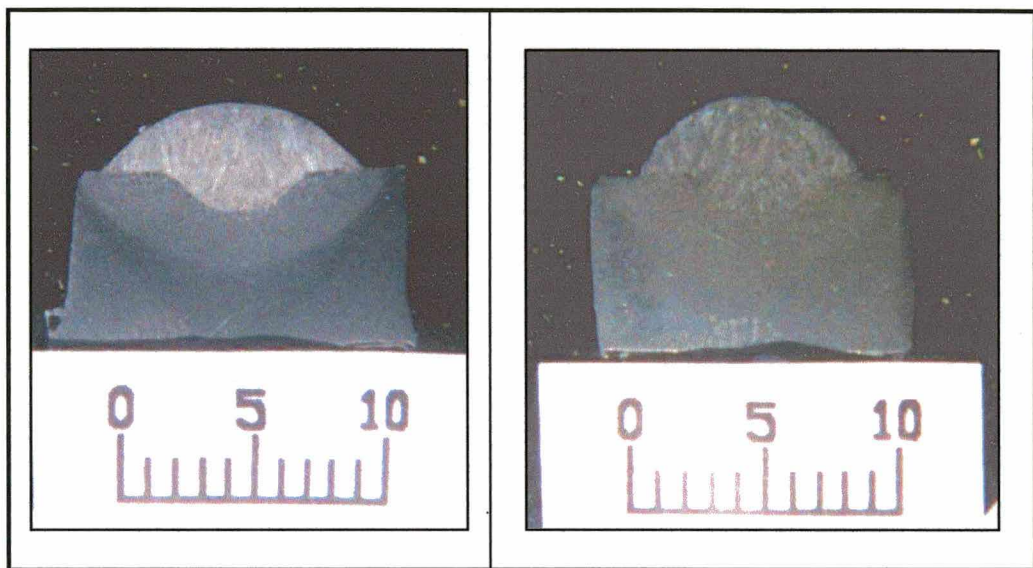


Figura 50 - Macrografia do cordão de solda. a) Processo convencional b) Processo duplo arame. Transferência pulsada $\varnothing = 1.0$ mm. ($I_m = 140$ A - Ataque com nital a 5%)

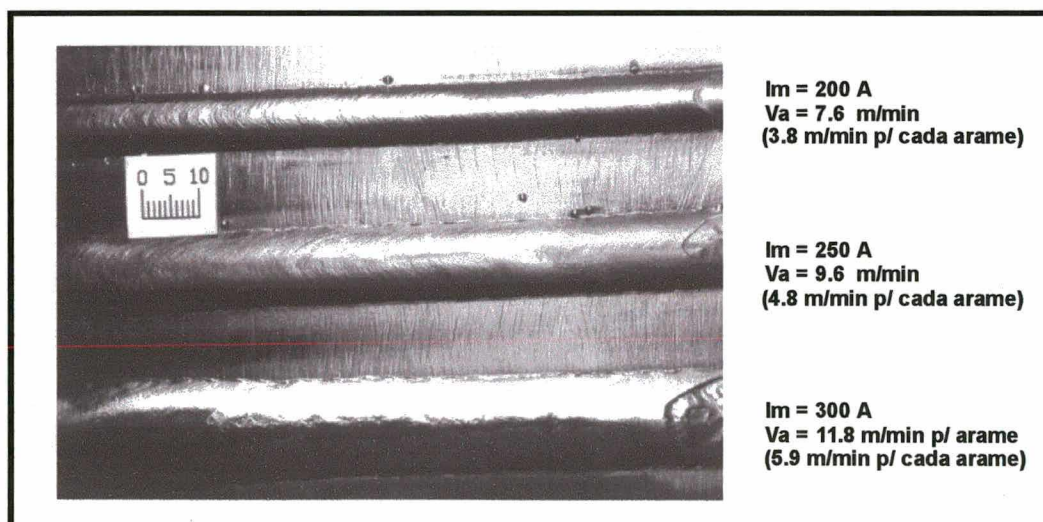


Figura 51 - Aspecto visual dos cordões de solda no processo duplo arame modo pulsado para eletrodos de 1.0 mm

Os cordões mostrados na figura 51, apresentam boa qualidade com baixa quantidade de respingos. O objetivo de apresentar estes cordões é demonstrar a potencialidade do processo em soldagens com níveis de correntes médias superiores às aplicáveis na soldagem por transferência pulsada com o processo convencional.

7.3.4 Eletrodos na Posição Transversal na Transferência Pulsada

Nas figuras 52a e 52b, estão representadas a relação entre a largura e o reforço do cordão com a corrente média, respectivamente, nas condições de soldagem indicadas na tabela 9a, para o caso de deposição plana no processo convencional e duplo arame com disposição transversal dos eletrodos.

Como pode ser observado, a soldagem com corrente pulsada e posicionamento transversal de eletrodos com o processo duplo arame, não apresentou a geometria esperada, pois os depósitos ficaram ainda mais estreitos e com maior reforço que aqueles realizados no processo pulsado convencional. Este comportamento provavelmente é devido ao fato dos eletrodos estarem muito próximos um do outro (5.0 mm - distância centro a centro- no caso de eletrodo utilizado). Pelas características construtivas da tocha utilizada (distância fixa entre eletrodos) não foi possível determinar a influência do afastamento dos eletrodos na geometria do cordão.

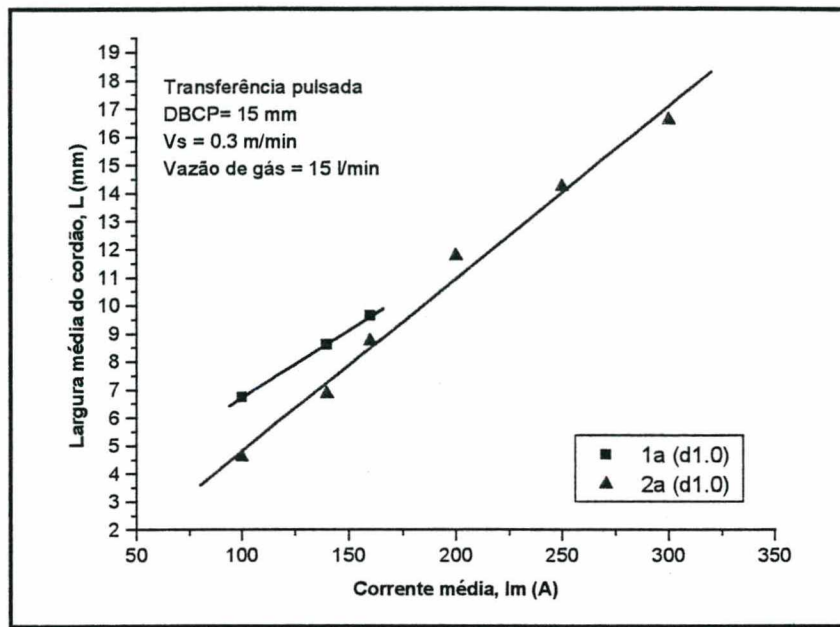


Figura 52a - Gráfico da largura média do cordão em função da corrente média no processo convencional e no duplo arame (posição transversal) - $\varnothing = 1.0$ mm

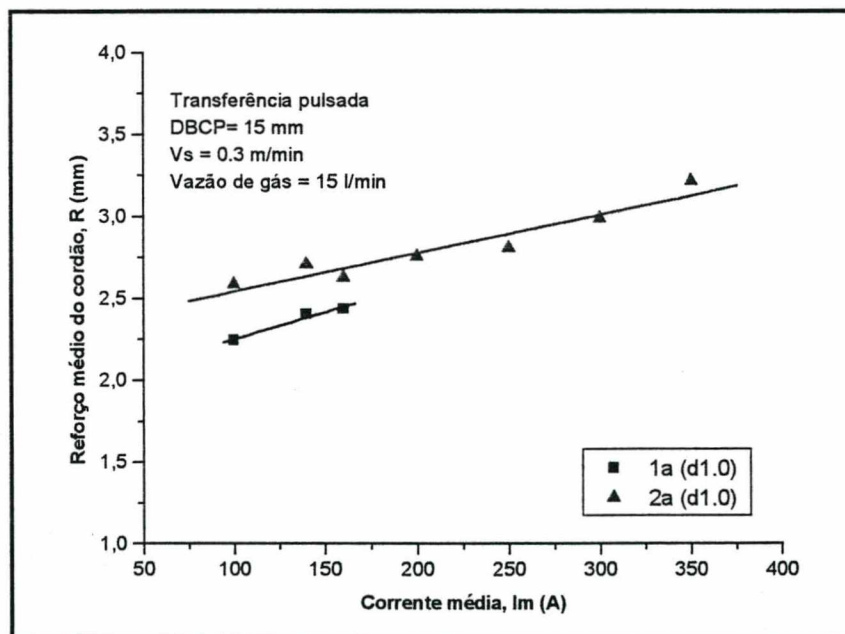


Figura 52b - Gráfico do reforço médio do cordão em função da corrente média no processo convencional e no duplo arame (posição transversal) - $\varnothing = 1.0$ mm

Uma comparação do perfil de penetração dos depósitos realizados no modo pulsado convencional e no duplo arame na posição transversal pode ser observada na figura 53 para um mesmo valor de corrente média.

Em termos de penetração, o cordão realizado no processo convencional apresentou maior penetração porém, a zona afetada pelo calor (ZAC) do corpo de prova soldado com disposição transversal dos eletrodos apresenta uma área maior daquela soldada no processo convencional.

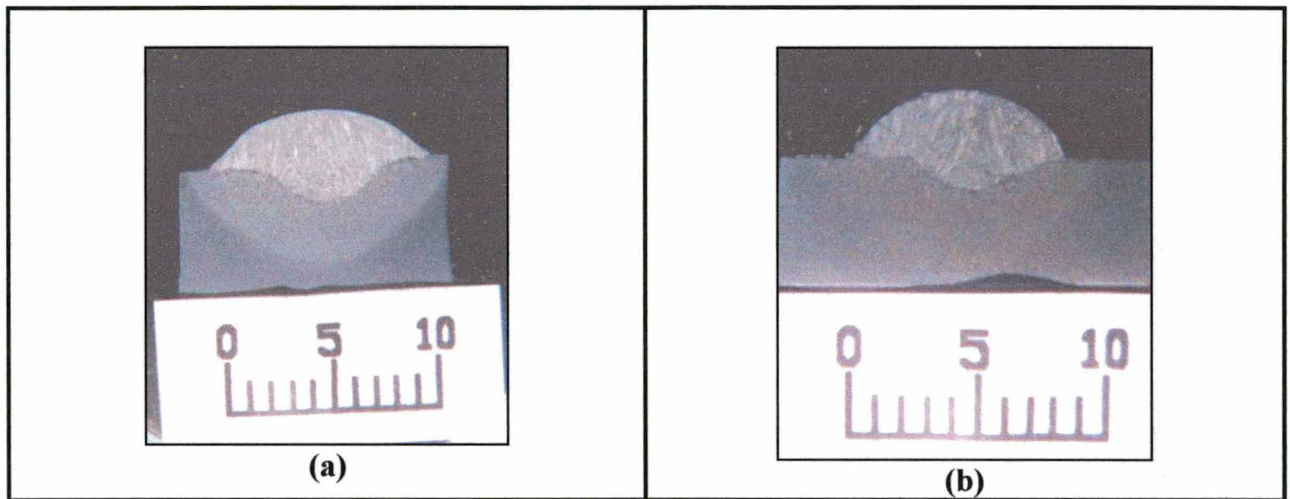


Figura 53 - Macrografia de soldas realizadas (a) processo convencional (b) duplo arame (posição transversal) com transferência pulsada. Ataque com nital a 5%.

Cabe destacar também que os depósitos realizados com duplo arame e posicionamento transversal apresentaram, de forma geral, boa aparência e qualidade similar aos depósitos realizados no modo pulsado e disposição em tandem.

7.3.5 Comentários Gerais e Observações na Transferência Pulsada

☞ Comando em Corrente e Modo Misto

Como foi mencionado no item 6.3.5 toda a análise com transferência pulsada foi realizada com comando em corrente. A utilização deste modo de operação no período de estabelecimento e definição dos parâmetros de soldagem acarretou em inúmeras dificuldades no

início do trabalho. De fato, sérios problemas, tais como, a destruição total de bicos de contato foram ocorrendo até acertar adequadamente o pacote de variáveis.

Uma das principais conclusões extraídas através destes ensaios foi que, utilizando o comando em corrente no processo duplo arame com potencial único, incorre-se num alto risco de provocar a fusão do arame no bico de contato ("burn-back") pois, na ocorrência de qualquer problema no fornecimento de um dos arames (por exemplo, trancamento do arame devido a um salpico no bico de contato), toda a corrente é obrigada a passar por um eletrodo só, que desta forma recebe o dobro da corrente necessária para a taxa fusão estabelecida. Conseqüentemente, ocorre um rápido aumento do comprimento do arco que acaba irremediavelmente na fusão do bico de contato. Este fato, além da inutilização das peças, que representa custos adicionais, acaba se traduzindo em perdas de tempo consideráveis que se contrapõem ao conceito de produtividade no qual o processo está inserido. O problema, no caso particular do trabalho, foi ainda mais crítico porque as peças de reposição teriam que ser importadas diretamente da Alemanha, envolvendo custos e tempo para a importação não incluídos no planejamento do trabalho.

Com as variáveis bem determinadas e ajustadas, o problema tem poucas chances de acontecer, porém o perigo é potencial. Toda a problemática apresentada pode ser minimizada mudando a metodologia de comando da transferência através da aplicação do comando em modo misto, com a tensão comandada na fase de pulso e a corrente na fase de base. Desta forma, no caso de eventuais interrupções na alimentação de um dos arames, a corrente de pulso atingiria só o nível necessário para fundir o outro, evitando assim o retrocesso do arco até o bico de contato. Evidentemente, a falta de alimentação de um dos arames afetaria a geometria do cordão de solda implicando na interrupção do processo sendo executado, porém a integridade do equipamento estaria resguardada.

☞ **Taxas Diferenciadas de Alimentação do Arame**

Na realização dos ensaios com o arame de 1.0 mm não foi necessário estabelecer uma diferença nas taxas de alimentação dos arames, porém com eletrodos de 1.2 mm, ocorreu novamente o mesmo fenômeno de união das gotas apresentado na seção 7.2.5, na análise da transferência por fluxo goticular, o que obrigou a estabelecer uma velocidade de alimentação do arame inferior no segundo eletrodo.

☞ **Estabilidade do processo**

O processo duplo arame apresentou seu melhor desempenho em termos de estabilidade do arco com a aplicação da transferência pulsada. Este fato foi evidenciado principalmente pelo comportamento da transferência, que de forma geral, foi mais suave e organizada, refletindo-se numa baixa produção de respingos.

☞ **Produtividade**

A produtividade do processo duplo arame ficou mais uma vez em evidência nesta análise pois a taxa de fusão absoluta foi duplicada em relação ao processo convencional. Como exemplo, é mencionado o caso do arame de 1.2 mm, que no processo convencional com um arame admite uma corrente média máxima de aproximadamente 220 A, no modo pulsado (equivalente a uma $V_a = 6.0$ m/min, aproximadamente). Já no processo duplo arame é possível

atingir facilmente uma corrente média de 240 A, com uma velocidade de arame total de aproximadamente 12.0 m/min (6.0 m/min para cada alimentador de arame).

7.4 Soldagem de Juntas

7.4.1 Soldagem de junta de ângulo com transferência por fluxo goticular

☞ Posição Plana

A figura 54a mostra a macrografia de uma solda de filete realizada no processo convencional transferência por fluxo goticular e a 54b outra realizada com duplo arame. Apesar dos cordões possuírem características geométricas externas similares é possível verificar pela análise metalográfica, a maior penetração obtida com o processo duplo arame.

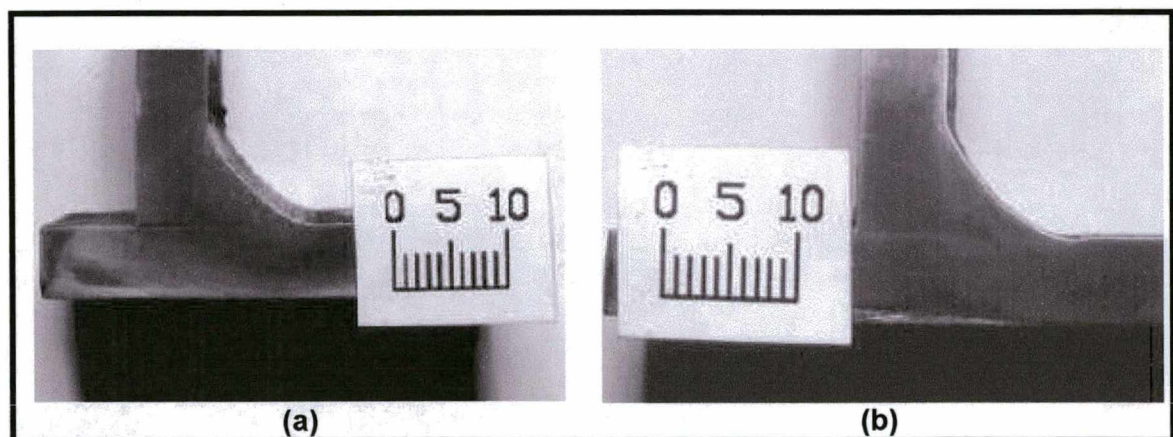


Figura 54 - Macrografia de solda realizada em junta de filete com transferência por fluxo goticular na posição plana a) processo convencional b) duplo arame. Ataque com nital a 5%.

Através da análise da tabela 10 podem ser verificados alguns indicativos de produtividade do processo duplo arame. Em termos da velocidade de soldagem, nota-se um ganho de 130 % na velocidade de soldagem do processo duplo arame em relação ao processo convencional para

realizar um cordão com a mesma geometria. Por outro lado, uma análise da energia de soldagem H , definida neste trabalho como a energia liberada pela fonte de calor por unidade de comprimento de solda, mostrou que no processo duplo arame este parâmetro foi inferior em comparação com processo convencional, verificando-se desta forma, uma das vantagens referenciadas ao processo.

☞ Posição Horizontal

A soldagem de juntas de filete na posição horizontal não apresentou bons resultados com o processo duplo arame na transferência por fluxo goticular. A tabela 11 indica um procedimento de soldagem otimizado, porém, este não permite a realização de uma junta dentro das tolerâncias estabelecidas por norma. Os principais problemas encontrados na soldagem de juntas em posição horizontal são o aparecimento de mordeduras na borda superior do cordão da solda e o escorrimento do metal de solda na direção da chapa de base deixando o cordão com geometria assimétrica.

7.4.2 Soldagem de junta de filete com transferência pulsada

☞ Posição Horizontal

Como foi mencionado na seção 6.3.7b, o objetivo de se utilizar a transferência pulsada consiste em diminuir o escorrimento de metal de solda e os níveis de corrente média de tal forma a evitar o aparecimento de mordeduras.

A figura 55a mostra a macrografia de uma junta de filete realizada no processo convencional e a figura 55b, a de uma junta realizada com o processo duplo arame, ambas no modo pulsado. Como pode ser observado, o cordão realizado com o processo convencional apresentou penetração deficiente na chapa de base. Já no cordão realizado com o processo duplo arame conseguiu-se excelente penetração.

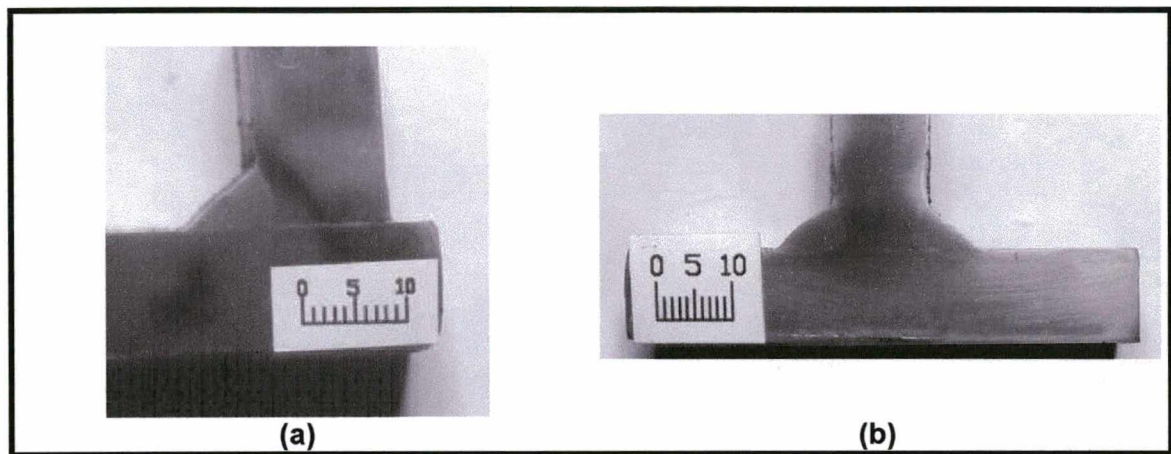


Figura 55 - Macrografia de solda realizada em junta de filete na posição horizontal com transferência pulsada a) processo convencional b) duplo arame. Ataque com nital a 5%.

Uma análise dos parâmetros de soldagem utilizados na soldagem da junta através da tabela 12, permite verificar a produtividade do processo duplo arame, pois além dos cordões de solda apresentarem dimensões e perfil de penetração aceitáveis, a velocidade de soldagem foi 30% mais rápida em relação ao processo convencional. Cabe destacar também que a energia de soldagem por liberada fornecida no processo duplo arame desta vez ficou maior em função da velocidade de soldagem em relação ao processo convencional. Neste ponto é bom esclarecer que, a utilização de maiores níveis de energia, na tentativa de aumentar a velocidade de soldagem, ocasionaram o aparecimento de mordeduras e escorrimentos no cordão de solda.

VIII - CONCLUSÕES

8.1 Introdução

A realização deste trabalho permitiu caracterizar o processo duplo arame com potencial único, determinando principalmente, seus parâmetros e faixas de funcionamento, assim como, as características gerais dos depósitos. Especial ênfase também foi dada à questão da produtividade do processo, a qual, em forma paralela, foi comparada com a do processo convencional com um arame. Neste sentido, é necessário destacar que a determinação da produtividade de um processo de soldagem é bastante subjetiva, pois ela depende de vários fatores, tais como, aplicação específica, critérios de aceitação, padrão de acabamento, entre outros. Portanto, apesar de que os fabricantes de equipamentos passem uma idéia de "dupla produtividade", não é pela simples duplicação de eletrodos que se pode afirmar que o processo é mais vantajoso ou produtivo, pois, neste caso, é necessário atentar também para as faixas de funcionamento e tipos de transferência envolvidos. Da mesma forma, ao longo do trabalho, percebeu-se a importância de estabelecer critérios claros e bem definidos na verificação da produtividade do processo MIG/MAG.

8.2 Conclusões Finais

8.2.1 Transferência por Curto-Circuito

- Na transferência por curto-circuito o processo duplo arame apresenta uma taxa de fusão específica ligeiramente inferior em relação ao processo convencional. Esta diferença é mais acentuada na transferência por curto-circuito de alta densidade de corrente.

- Apesar do processo duplo arame ter melhores condições de atingir maiores taxas de fusão absoluta, em relação ao processo convencional, neste trabalho, na transferência por curto-circuito, não foram obtidos valores mais elevados, devido à extrema instabilidade do arco.
- A geometria dos depósitos, com eletrodos posicionados em "tandem", no processo duplo arame, apresenta um perfil mais alargado e com menor altura no reforço em relação ao processo convencional na transferência por curto-circuito. Nestes ensaios, foi utilizada a mesma velocidade do arame em ambos processos, de tal forma que no processo duplo arame a velocidade de cada arame corresponde à metade daquela estabelecida no processo convencional. A análise macrográfica dos corpos de prova mostra que soldas realizadas no processo duplo arame apresentam menor penetração em relação ao processo convencional.

8.2.2 Transferência por Fluxo Goticular

- Na transferência por fluxo goticular o processo duplo arame apresenta, numa determinada faixa de corrente, uma taxa de fusão específica similar, quando comparado com o processo convencional.
- No processo duplo arame, na transferência por fluxo goticular, as velocidades de alimentação do arame atingidas, vão além dos limites de operação do processo convencional, traduzindo-se em ganhos na taxa de fusão absoluta. Neste trabalho, nos ensaios de deposição plana, com arame de 1.0 mm, a velocidade máxima de alimentação atingida no processo convencional foi de 14 m/min (320 A), em condições extremas. No processo duplo arame, chegou-se até a velocidade de 23 m/min - 11.5 m/min para cada arame - (450A), valor que só foi limitado pela capacidade de fornecimento de corrente do equipamento. Esta constatação permite

concluir que na transferência por fluxo goticular o processo duplo arame possui uma produtividade superior, em termos de taxa de fusão absoluta, em relação ao processo convencional.

- Os bons resultados obtidos em termos de qualidade e geometria do cordão, no modo tensão constante, demonstram que, a utilização de fontes que incorporam alta tecnologia não é uma condição absolutamente necessária na aplicação do processo duplo arame com potencial único. Em soldagens com regime de transferência com fluxo goticular, basta apenas, uma fonte convencional para processo MIG/MAG, com capacidade de corrente adequada para atender as elevadas taxas de fusão requeridas.

- Da mesma forma que na transferência por curto-circuito, a geometria dos depósitos com eletrodos posicionados em "tandem" no processo duplo arame, apresenta um perfil mais alargado e com menor altura no reforço em relação ao processo convencional na transferência por fluxo goticular. Na determinação desta característica, foi utilizada a mesma velocidade do arame em ambos processos, de tal forma que no processo duplo arame a velocidade de cada arame corresponde à metade daquela estabelecida no processo convencional.

8.2.3 Transferência Pulsada

- A principal vantagem da utilização do processo duplo arame com transferência pulsada consiste na duplicação da faixa de corrente aplicáveis. No processo convencional o limite máximo de corrente média na transferência pulsada está limitado pela corrente de transição do arame, onde a transferência por projétil muda para o tipo fluxo goticular. No processo

duplo arame, evidentemente, a corrente de transição não é duplicada, mas sim, a intensidade total de corrente necessária para que ambos eletrodos atinjam esta corrente. Conseqüentemente, é possível estender a faixa de corrente, conseguindo assim, maiores taxas de fusão absolutas, tirando proveito das excelentes características de transferência oferecidas pela transferência pulsada.

- Na transferência pulsada o processo duplo arame apresenta uma taxa de fusão específica similar ao processo convencional, principalmente com arames de 1.2 mm, até um determinado valor de corrente que, neste caso, é a corrente de transição que limita a passagem da transferência por projétil para a transferência por fluxo goticular.
- Quando é utilizado o comando em corrente no processo duplo arame com potencial único, há um risco potencial de provocar a fusão do arame no bico de contato, pois, na ocorrência de qualquer problema no fornecimento de um dos arames, toda a corrente é obrigada a passar pelo outro eletrodo, que desta forma, deve receber o dobro da corrente necessária para a taxa de fusão estabelecida.
- A geometria dos depósitos, com eletrodos posicionados em "tandem", no processo duplo arame, na transferência pulsada, apresenta um perfil mais estreito e com uma altura no reforço ligeiramente maior em relação ao processo convencional com um arame. A velocidade do arame utilizada nestes ensaios é equivalente para ambos processos, sendo que, no processo duplo arame a velocidade de cada arame corresponde à metade daquela estabelecida no processo convencional.

- A soldagem com eletrodos alinhados na direção transversal ao deslocamento da tocha não garante que os depósitos irão ser mais largos, baixos e de menor diluição que os realizados no processo convencional. Neste trabalho, constatou-se que em ensaios realizados na posição plana com esta configuração de eletrodos, utilizando a técnica pulsada, a geometria dos depósitos apresentou um perfil, inclusive, mais estreito e com maior altura no reforço em relação aos depósitos realizados no processo convencional, nas mesmas condições de velocidade do arame estabelecidas no item anterior.
- Da mesma forma que no processo convencional, através da aplicação da técnica pulsada é possível realizar soldas de boa qualidade em juntas de filete na posição horizontal no processo duplo arame, porém, com maior produtividade. A aplicação do procedimento de soldagem mostrado na tabela 12, permite obter ganhos de até 33 % na velocidade de soldagem, para uma mesma geometria do cordão, em relação ao processo convencional.

8.2.4 Conclusões Gerais

- Em relação ao consumo de gás de proteção, pode ser afirmado que para a geometria particular do bocal da tocha de soldagem utilizada, a vazão utilizada no processo convencional é suficiente para as aplicações no processo com duplo arame, mesmo na faixas de correntes mais elevadas.
- Na soldagem de juntas em ângulo na posição plana, pelo processo duplo arame, nas condições apresentadas na tabela 10, obteve-se ganhos de até 130% na velocidade de soldagem, para uma mesma geometria do cordão, em relação ao processo convencional. Por outro lado, através da análise de energia de soldagem liberada por comprimento de solda H ,

nas mesmas condições, constatou-se que o processo convencional precisou liberar 15 % a mais de energia, em relação ao processo duplo arame, na soldagem da mesma junta. Através destas constatações é possível concluir que o processo duplo arame, sob determinadas condições, apresenta vantagens interessantes em relação ao processo convencional, as quais devem ser levadas em consideração na avaliação de sua produtividade.

- Uma análise comparativa da potência consumida para cada processo em função das taxas de fusão, constatou que não há diferenças significativas de consumo na faixa de operação comum a ambos processos. Porém, para obter maiores taxas de fusão através do processo duplo arame é necessário aumentar os níveis de tensão e corrente. Conseqüentemente, a potência consumida nestes casos também aumenta.

8.2.5 Considerações Finais

- A manutenção de uma velocidade constante de alimentação do arame, tanto no processo convencional, quanto no duplo arame é um fator crítico, principalmente quando se atingem valores elevados de alimentação. Nesse sentido, a utilização de um dispositivo do tipo "endireitador" de arame (item 7.2.1), mostrou-se muito eficaz para evitar o excessivo atrito entre o arame e o bico de contato, diminuindo desta forma, as possibilidades de variação da velocidade de alimentação do arame.
- As altas taxas de fusão absoluta obtidas com o processo duplo arame, talvez, possam ser conseguidas no processo convencional mediante a utilização de arames de maior diâmetro, porém, é necessário chamar a atenção sobre a dificuldade de tracionamento destes arames, o que justificaria em certa forma a utilização de dois tracionadores com arames mais finos.

- Nesse sentido, é bom destacar os melhores resultados obtidos com o eletrodo de 1.0 mm, em relação à estabilidade do arco, quando comparados com o eletrodo de 1.2 mm. Ao longo do trabalho constatou-se que no processo duplo arame é preferível a utilização de eletrodos de menor diâmetro, com maiores taxas de alimentação de arame.
- Por último, um sistema de aquisição de imagens de transferência metálica de simples e de custo relativamente baixo foi implementado neste trabalho, permitindo verificar com qualidade razoável os fenômenos de transferência do processo MIG/MAG.

IX- PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

O processo MIG/MAG duplo arame é um processo relativamente novo que devido a suas características tecnológicas pode ser utilizado numa grande variedade de aplicações. Porém, em comparação ao processo MIG/MAG convencional, muito pouca informação encontra-se disponível na literatura para viabilizar sua implementação. Além disso, muitas variáveis estão envolvidas no processo e diversas configurações podem ser adotadas. Somente o estudo sistemático destas variáveis permitirá verificar toda a sua potencialidade. Este trabalho constituiu-se no primeiro passo na tentativa de uma melhor compreensão do funcionamento do processo, porém, ficam ainda muitas questões que deverão ser aprofundadas e recursos que poderão ser explorados. A seguir, propõe-se algumas linhas de pesquisa que certamente contribuirão no seu desenvolvimento.

- Desenvolvimento do processo duplo arame com potenciais isolados e arames maciços.
- Desenvolvimento do processo duplo arame com potenciais isolados e eletrodos tubulares.
- Com eletrodos alinhados na direção transversal ao deslocamento da tocha, verificar o efeito do afastamento dos eletrodos e a variação do ângulo entre as tochas, na geometria e diluição do cordão, visando uma aplicação em revestimentos soldados.
- Verificar a possibilidade de realizar depósitos na posição vertical e sobre-cabeça, utilizando a transferência pulsada.
- Verificação da aplicabilidade do processo duplo arame na soldagem semi-automática, visando uma aplicação em revestimentos soldados.
- No processo duplo arame com potenciais isolados, verificar o efeito de taxas diferenciadas de alimentação do arame na geometria dos depósitos e na estabilidade do arco.

- Estabelecer procedimentos de soldagem para juntas a topo e filete visando máxima produtividade, em termos de taxas de fusão absolutas e velocidade de soldagem.
- Em aplicações de corrente pulsada, desenvolvimento de um sistema de sincronismo entre fontes de soldagem, que permita a defasagem entre as correntes, com o objetivo de minimizar o efeito do sopro magnético, verificando a melhor condição de estabilidade do arco.
- Desenvolvimento e aplicação do processo MIG/MAG duplo arame na soldagem hiperbárica a seco

Além destas, outras alternativas do processo ainda inexploradas, poderiam decorrer em potenciais vantagens, como por exemplo

- Utilização de eletrodos com diferentes diâmetros numa mesma poça de fusão, verificando sua influência na otimização de velocidades de soldagem e na geometria do cordão.
- Utilização de eletrodos com diferentes composições químicas numa mesma poça de fusão, verificando o tipo de liga resultante e seu efeito na microestrutura. Como sugestão desta aplicação pode ser mencionada a possibilidade de obter no metal de solda a composição de um metal de difícil trefilação, como por exemplo, a liga Monel, cujos elementos no seu estado puro, apresentam boa ductilidade e, conseqüentemente, características favoráveis de trefilação.

Por último, em relação ao sistema de aquisição de imagens, propõe-se o melhoramento do sistema através da utilização de uma fonte LASER como luz de fundo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]-UTTRACHI, G. D. Multiple Electrode Systems for Submerged Arc Welding. Welding Journal, v.57, n.5, p. 15-22, May 1978.
- [2] BUNKER, T. A. Multi-Electrodes in SAW with Square Wave AC Power. Welding Journal.v.61, n.7, p. 36-40, July 1982.
- [3] SHERSTYK, V. N. Shape of the Weld Pool in Twin-Arc Welding, and Stability of the Process. Svar. Proiz., n. 11, p: 16-18, 1962
- [4] KUJANPÄÄ, L. P. KARJALAINEN, e SIKANEN, H. A. V. Role of Shielding Gases in Discontinuity Formation in GTAW of Austenitic Stainless Steel Strips. Welding Journal, v 63, n5, p.150s-155s, May 1984.
- [5] The Procedure Handbook of Arc Welding. The Lincoln Electric Company, Sec. 7.5.3 Cleveland, Ohio, 1973
- [6] - Welding Handbook AWS, v.2 - Welding Process, eight edition, p. 207. 1991.
- [7] PALMA, J. A., TIMERMAN, R. Ciencia y Técnica de la Soldadura, v1, Conarco, Buenos Aires, p. 128-130. 1983
- [8] MACHADO, I. G. Soldagem e Técnicas Conexas: Processos 475 p., Porto Alegre. 1996.
- [9] BROWN, K.W. Switched Arc MIG -Welding Proceedings from First International Conference on Development and Innovation for Improved Welding., Ed. TWI paper 45, p. 137-145. Birmingham, England 1983.
- [10] BROWN, K.W. Commutated Current Multiple Arc Welding. Welding Institute Report p70/75. 1975.
- [11] HACKL, H. Faster with Two Wire Electrodes Metal Inert Gas Welding of Aluminium Materials. Proceedings: Exploiting Advances in Arc Welding Technology. TWI. Abington, Cambrigde. U.K. 1997.
- [12] KIMURA, S. The Twist-arc Welding Process. Conference Proceedings from Advances in Welding Processes, TWI. 1978.
- [13] LASSALINE, B., ZAJACZKOWSKI, B & NORT, T. H. Narrow Groove Twin-Wire MIG/MAG of High-Strength Steel. Welding Journal, v.68, n.9, p. 53-58, September 1989.
- [14] WATANABE, I., SUZUKI, M e TAKEUCHI, I. A. Newly Developed Welding Technique for Heavy Walled Pipes. Proceedings from Fourth International on Advances in Welding Process. paper 39, p. P39-1, P39-13. Harragate, England 1978.

- [15] STOL, I. - Advances in Narrow -Groove Welding. Proceedings Conference Trends in Weld Research in the United State, Ed.: Join. Div. Amer. Soc. Metals. p.: 625-645. Lousiana, USA, 1981.
- [16] Catálogo da CLOOS Schweisstechnik - 10/96
- [17] Catálogo da LINCOLN ELECTRIC - E10.60 1/98
- [18] Catálogo BINZEL - ALL.5008.D/1 - 25.06.1996
- [19] RHEE, S., KANNATEY-ASIBU, JR. Observation of Metal Transfer during Gas Metal Arc Welding. Welding Journal. v. 71. n. 10. Welding Research Supplement. p. 381s-386s. October 1992.
- [20] BRANDI, S., TANIGUCHI, C. and LIU, S. "Analysis of Metal Transfer in Shielded Metal Arc Welding". Welding Journal. v. 70. n. 10. Welding Research Supplement, p. 261s - 270s. October 1991
- [21] CUNHA, J. A., e GRUNDMANN, J. A Influência dos Gases de Proteção nos Regimes de Transferência Metálica em Soldagem SAMG. XXI Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, ABS, Caxias do Sul, RS, v 2, p.513-528. junho 1995.
- [22] DUTRA, J. C. Procedimento Computadorizado de Determinação, Seleção e Controle de Variáveis na Soldagem MIG / MAG. Tese Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1989
- [23] BAIXO, C. E. I. Registro Fotográfico do Arco e Relações Paramétricas Tensão / Corrente - Duas Metodologias para o Estudo da Otimização da Soldagem MIG / MAG. Tese Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1990.
- [24] MODENESI, J. P., SILVA, A.V. Uma avaliação de Misturas de Proteção contendo H₂ N₂ para a Soldagem GMAW de Aços Inoxidáveis Austeníticos. XXI Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, ABS, Caxias do Sul, RS, v 2, p. 585-587. junho 1995
- [25] BAIXO, C.E.I. e DUTRA, J.C. Influência da Taxa de Variação da Corrente na Regularidade em Soldagem MIG/MAG por Curto-Circuito. XXI Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, ABS, Caxias do Sul, RS, v 2, p. 903-920. junho 1995
- [26] DILTNEY, U., REISGEN, U. e WARMUTH, P. High Production MAGM Welding with Solid and Flux-Cored Wires. Schweissen and Schneiden p. E47-E49. March 1999.
- [27] ZHANG, Y. M., LIGUO, E. e KOVACEVIC, R. Active Metal Transfer Control by Monitoring Excited Droplet Oscillation. Welding Journal. p.388s-395s. September 1998
- [28] AMIN, M. Pulse Current Parameters for Arc Stability and Controlled Metal Transfer in Arc Welding. The Welding Institute Research Bulletin, v 24, p.48-54. February 1983

- [29] LESNEWICH, A. Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas-Shielded Metal-Arc Welding. Part II- Control of Metal Transfer in Inert-Gas Shielded Arc Welding, British Welding Journal , p.297-305. August 1958
- [30] RHEE, S., KANNATEY-ASIBU, JR. Observation of Metal Transfer during Gas Metal Arc Welding. Welding Journal. v.70. n. 10 Welding Research Supplement, 381s - 386s. October 1992.
- [31] ALLEMAND C. D., SCHOEDER, D. E. and EAGAR, T.W. A Method of Filming Metal Transfer in Welding Arcs. Welding Journal, v. 64. n. 1. January 1985.
- [32] JÖNSSON, J., SZEKELY, R. B., MADIGAN e QUINN T. P. . Power Characteristics in GMAW: Experimental and Numerical Investigation.. Welding Journal. v. 74. n. 3. Welding Research Supplement. p. 93s-102s. March 1995,
- [33] JONES, L.A., EAGAR T.W. e HANG, J. H. Images of Steel Electrode en Ar-2% Shielding during Constant Current Gas Metal Arc Welding. Welding Journal. v. 77. n. 4. Welding Research Supplement. p.135s-141s. April 1998.