



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

LÚCIO DA SILVA BARBOZA FILHO

**ESTUDO DA TÉCNICA DE ENCHIMENTO DE CHANFRO DO AÇO NAVAL PELO
PROCESSO GMAW-CW**

**BELÉM
2011**

LÚCIO DA SILVA BARBOZA FILHO

**ESTUDO DA TÉCNICA DE ENCHIMENTO DE CHANFRO DO AÇO NAVAL PELO
PROCESSO GMAW-CW**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Materiais e Processos. Orientador: Prof. Dr. Eduardo de Magalhães Braga

BELÉM
2011

Dados Internacionais de catalogação na publicação (CIP), Biblioteca do Mestrado em Engenharia Mecânica/ UFPA, Belém, PA.

B238e Barboza Filho, Lúcio da Silva

Estudo da técnica de enchimento de chanfro do aço naval pelo processo gmaw-cw./ Lúcio da Silva Barboza Filho; Orientador: Prof. Dr. Eduardo de Magalhães Braga. – Belém, 2011. 124f.il.

Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2011.

1. Soldagem. 2. Preenchimento, GMAW e GMAW-CW.
3. Custo de Soldagem. I. Braga, Eduardo de Magalhães, orientador.
II. Título.

CDD 19.ed. 669.94

LÚCIO DA SILVA BARBOZA FILHO

**ESTUDO DA TÉCNICA DE ENCHIMENTO DE CHANFRO DO AÇO NAVAL PELO
PROCESSO GMAW-CW**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Materiais e Processos.

Data da Avaliação: ____ / ____ / ____.

BANCA EXAMINADORA

_____ - Orientador
Prof. Dr. Eduardo de Magalhães Braga
FEM/ ITEC/ UFPA

_____ - Membro Interno
Prof^a. Dr. Antonio Luciano Seabra Moreira
FEM/ ITEC/ UFPA

_____ - Membro Externo
Prof^a. Dr. Valtair Antonio Ferraresi
UFU

Dedico este trabalho a Deus o criador de tudo, aos meus pais, Sr. Lúcio (in memorian) e a minha mãe Dn. Maria Francisca, aos meus irmãos e sobrinhos e em especial à minha irmã Dr(a). Joelma Pereira de Souza e a mim mesmo, pela minha persistência e dedicação.

AGRADECIMENTOS

A Deus o criador de tudo,

A FAPESPA, pelo apoio financeiro.

Ao professor Dr. Eduardo Braga, pela paciência nas horas mais difíceis, pelo ensinamento, orientação, amizade e incentivo constantes, transmitindo o conhecimento de forma clara e objetiva para poder terminar este trabalho.

Aos demais professores do Centro Tecnológico, pelos conhecimentos passados ao longo do curso de pós-graduação, e principalmente ao professor Dr. Luciano Seabra pelo seu incentivo, conselhos e contribuições para a realização desta dissertação, pois foi um professor em que aprendi realmente a essência da dedicação como mestrando.

Ao Msc. Edson Andrade, pelas importantes contribuições no decorrer deste trabalho, dando apoio, força para a realização teórica e experimental.

Ao Tecnólogo Paulo Dangelo, pela ajuda e compromisso nas realizações dos ensaios, pelas dicas, ideias, incentivos, contribuições e principalmente ao que concerne conhecimento para realização dos ensaios com êxito.

Ao meu amigo M^{sc}. Luis Paulo, pela ajuda, força e contribuições no decorrer deste trabalho, principalmente na fase experimental.

Ao amigo Everton, aluno de iniciação científica, porém contribuiu bastante, ajudando, dando dica, principalmente nos gráficos e na elaboração deste trabalho da melhor forma possível.

Aos amigos de modo geral, Bruno, Diogo Castro, Baiano, pela ajuda, pelos desenhos gráficos e etc.

Ao amigo e professor Márcio pela ajuda e força.

Aos colegas da Empresa AMAZONSOLDA e do GRUPO LCAM, pela convivência, companheirismo, sugestões e pela permanente disponibilidade em compartilhar o conhecimento e a experiência adquirida. Por tudo aquilo que aprendemos e vivemos durante o tempo de convívio e pelo orgulho que temos em fazer parte desta família, muito obrigado a todos.

Aos meus pais, exemplos de força, caráter, dedicação e fonte de inspiração para uma busca constante de alçar vôos sempre mais altos. Por tudo que me foi ensinado, pelo incentivo e confiança nunca abalada, e pela amizade sempre presente.

Enfim, a todos aqueles que de alguma forma conviveram comigo e contribuíram para o sucesso deste trabalho.

“São fúteis e cheias de erros as ciências que não nasceram da experimentação, mãe
de todo o conhecimento”

Leonardo da Vinci

“A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original”
Albert Einstein

“Achar que mundo não tem um criador é mesmo que afirmar que um dicionário é o
resultado de uma explosão numa tipografia”

Benjamin Franklin

RESUMO

Nesse trabalho estudou-se a viabilidade operacional e as características econômicas e geométrica da técnica do processo de soldagem GMAW-CW (alimentação adicional de um arame frio) em comparação Gas Metal Arc Welding (GMAW). O sistema de alimentação de arame frio foi projetado e adaptado a pistola de soldagem MIG/MAG. Utilizou-se uma fonte eletrônica de múltiplos processos ajustada em tensão constante e CC+, a proteção gasosa foi uma mistura 75%Ar+25%CO₂ e CO₂ comercialmente puro. O arame utilizado foi o da classe ER70S-6 com diâmetro de 1,2 mm para o arame eletrodo e 1,0 mm para o arame frio, os dois arames foram alimentados em cabeçotes independentes. As variáveis operacionais de entrada foram: a velocidade de alimentação de arame energizado, em três níveis, 4, 6 e 8 m/min e a velocidade de alimentação do arame frio em 50%, 60% e 70% da velocidade de alimentação do arame energizado. As soldagens foram automatizadas em simples deposição no sentido empurrando e o posicionamento do arame frio, em um único nível, Tandem em chanfro em “U” de chapas de aço ASTM 1020. As variáveis de resposta utilizadas foram: inspeção superficial dos cordões; análise da geometria (largura, penetração, reforço e diluição) da solda e econômicas (taxa de fusão, taxa de deposição, rendimento e custo operacional). Os resultados indicaram que para a análise superficial, com o uso do gás Ar25%CO₂ a superfície dos cordões mostraram-se mais homogêneas em relação ao CO₂ e com menor índice de salpicagem, para a análise das características econômicas, o processo GMAW-CW sempre foi superior ao processo convencional, quanto aos custos operacionais o processo convencional mostrou-se menor, porém não houve o preenchimento do chanfro, o que ocorreu com a utilização do processo GMAW-CW.

Palavra-chaves: Soldagem. Preenchimento, GMAW e GMAW-CW. Custo de Soldagem.

ABSTRACT

In this work studied the operational viability and the characteristics economic and geometric of technique of the process welding GMAW -CW (additional alimentation of a cold wire) in comparison Gas Metal Arc Welding (GMAW). The alimentation system of cold wire was designed and adapted to welding gun GMAW. Used an electronic source of multiple processes adjusted in constant voltage and DC +, the gas shield was a mixture 75% Ar+25% CO₂ and commercially pure CO₂. The wire used was Class ER70S-6 with diameter of 1.2 mm for the electrode wire and 1.0 mm for the cold wire, the both wires were fed in heads independent. The input operating variables were the feed speed of wire energized at three levels, 4, 6 and 8 m / min and the wire feed speed in cold 50%, 60% and 70% of the wire feed speed energized . The welds were automated in simple deposited in the pushing direction and the positioning of the cold wire in a single level, Tandem in chamfer "U" steel plate ASTM 1020. The variables of response used were: superficial inspection of the cords, analysis of the geometry (width, penetration, reinforcement and dilution) and economic solder (melting rate, deposition rate, yield and operating cost). The results indicated that for surface analysis, using the AR25% CO₂ gas to the surface of the strands were more homogeneous with respect to CO₂ and less splash index for the analysis of economic characteristics, the process always GMAW-CW was superior to the conventional process, the operating costs the conventional process was lower, but without filling of the chamfer, which occurred with the use of GMAW-CW.

Keyword: Welding. Filling, GMAW e GMAW-CW. Welding Cost.

LISTA DE ILUSTRAÇÃO

Figura 1: Desenho esquemático da região soldagem pelo processo MIG/MAG, Cruz Jr. e Cabral.....	31
Figura 1.1: Esquema representativo da soldagem MIG/MAG	32
Figura 1.2: Desenho esquemático do processo MIG/MAG com adição de arame frio	33
Figura 1.3: Evolução dos injetores de arame não energizado (a) 2005; (b) 2007, (c) 2008 e (d) Protótipo atual instalado em uma tocha automatizada.....	34
Figura 1.4: Descrição genérica do processo MIG/MAG.	35
Figura 1.5: Efeito da inclinação do eletrodo	37
Figura 1.6: Ângulo de posicionamento da tocha	38
Figura 1.7: Extensão do eletrodo e taxa de deposição	39
Figura 1.8: Parâmetros de soldagem para os processos de alta produção	41
Figura 1.9: Esquema Comparativo das Velocidades de Soldagem do Processo GMAW Duplo Arame e outros Processos de Soldagem apud	43
Figura 2.0: Esquema comparativo das taxas de deposição de metal do processo GMAW Duplo Arame e outros processos de soldagem	44
Figura 2.1: Característica estática da fonte x curva do arco. a) tensão constante e b) corrente constante.....	48
Figura 2.2: Representação genérica do processo de pulsação, onde (a) características das ondas de pulso de corrente e (b) região ótima para o processo de transferência.....	58
Figura 2.3: Representação esquemática dos principais modos de transferência.....	59
Figura 2.4: Esquema do perfil geométrico do cordão de solda	65
Figura 2.5: Esquema representativo da diluição medida na seção transversal da solda.....	66
Figura 3.1: Bancada de Soldagem	69
Figura 3.2: Esquema representativo da peça nas dimensões 12,7 mm, 100 mm, 150 mm e 7,5 mm (E x L x C e R) a formar a junta a ser soldada.....	70
Figura 3.3: Detalhe da fonte eletrônica inversora, MIGARC 3200	73
Figura 3.4: Cabeçote de alimentação de arame.....	74
Figura 3.5: Cabeçote de alimentação de arame frio.....	75

Figura 3.6 B: Sistema de alimentação de arame frio em malha fechada – Placa Wire, a) Esquemático da localização b) Placas de circuito impresso	76
Figura 3.6 A: Diagrama de blocos do sistema	76
Figura 3.7: Pistola de soldagem com o sistema auxiliar de alimentação de arame não energizado acoplado	77
Figura 3.8: Protótipo do suporte auxiliar de alimentação de arame não-energizado. a) Montado e pronto a ser adaptado; b) Desmontado em peças	77
Figura 3.9: Balança Eletrônica Digital LABGAS	78
Figura 3.10: Suporte de atracação	79
Figura 3.10.1: Máquina automática de serrar (serra em fita)	80
Figura 3.10.2: Máquina politriz	81
Figura 3.10.3: Representação da posição da tocha	82
Figura 3.10.4: Esquema do corte para obtenção das amostras	89
Figura 3.10.5: Esquema do perfil geométrico do cordão de solda	91
Figura 3.10.6: Representação esquemática da análise geométrica e dos pontos para a análise micrografica	91
Figura 4.1: Imagem do processo de soldagem com adição de arame frio, apresentando a técnica de soldagem no sentido empurrando, com arame não energizado disposto e introduzido a frente da poça de fusão	94
Figura 4.2.1: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW, com velocidade de alimentação de arame de 4 m/min ou V_4 , CO_2	95
Figura 4.2.2: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW, com velocidade de alimentação de arame de 6 m/min ou V_6 , CO_2	96
Figura 4.2.3: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW, com velocidade de alimentação de arame de 8 m/min ou V_8 , CO_2	96
Figura 4.2.4: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW, com velocidade de alimentação de arame de 4 m/min ou V_4 , $ArCO$	96
Figura 4.2.5: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW, com velocidade de alimentação de arame de 6 m/min ou V_6 , $ArCO_2$	96
Figura 4.2.6: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW, com velocidade de alimentação de arame de 8 m/min ou V_8 , $ArCO_2$	96
Figura 4.3.1: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW-CW com adição de arame frio, com velocidade de alimentação de arames eletrodo/ frio igual a $v_6/50\%$ m/min	97

Figura 4.3.2: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW-CW, com velocidade de alimentação de arames eletrodo/ frio igual a $v_6/60\%$ m/min	97
Figura 4.3.3: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW-CW com adição de arame frio, com velocidade de alimentação de arames eletrodo/ frio igual a $v_6/70\%$ m/min.....	97
Figura 4.3.4: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW-CW com adição de arame frio, com velocidade de alimentação de arames eletrodo/ frio igual a $V_8/50\%$ m/min	98
Figura 4.3.5: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW-CW com adição de arame frio, com velocidade de alimentação de arames eletrodo/ frio igual a $V_8/60\%$ m/min	98
Figura 4.3.6: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW-CW com adição de arame frio, com velocidade de alimentação de arames eletrodo/ frio igual a $V_8/70\%$ m/min	98
Figura 4.3.7: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW-CW com adição de arame frio, com velocidade de alimentação de arames eletrodo/frio igual a $V_6/50\%$ m/min.....	99
Figura 4.3.8: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW-CW com adição de arame frio, com velocidade de alimentação de arames eletrodo/ frio igual a $V_6/60\%$ m/min.....	99
Figura 4.3.9: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW-CW com adição de arame frio, com velocidade de alimentação de arames eletrodo/ frio igual a $V_6/70\%$ m/min.....	99
Figura 4.3.10: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW-CW com adição de arame frio, com velocidade de alimentação de arames eletrodo/ frio igual a $V_8/50\%$ m/min.....	100
Figura 4.3.11: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW-CW com adição de arame frio, com velocidade de alimentação de arames eletrodo/ frio igual a $v_8/60\%$ m/min.....	100
Figura 4.3.12: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW-CW com adição de arame frio, com velocidade de alimentação de arames eletrodo/ frio igual a $8/70\%$ m/min	100
Figura 4.4: Efeito da velocidade de alimentação de arame eletrodo sobre a taxa de fusão. Soldagem GMAW, GMAW-CW, com mudanças de gases CO_2 e $ArCO_2$	104

Figura 4.4.1: Efeito da velocidade de alimentação de arame eletrodo sobre a taxa de deposição. Soldagem GMAW, GMAW-CW, com mudanças de gases CO ₂ e ArCO ₂	105
Figura 4.4.2: Efeito dos parâmetros operacionais sobre o rendimento. Soldagem GMAW, GMAW-CW, com mudanças de gases CO ₂ e ArCO ₂	105
Figura 4.4.3: Custo total por velocidade de alimentação de arame eletrodo para os processos de soldagem GMAW, GMAW-CW, com mudanças de gases CO ₂ e ArCO ₂	109
Figura 4.4.4: Custo total por velocidade de alimentação de arame eletrodo para os processos de soldagem GMAW, GMAW-CW, com mudanças de gases CO ₂ e ArCO ₂	110
Figura 4.4.5: Custo total por velocidade de alimentação de arame eletrodo para os processos de soldagem GMAW, GMAW-CW, com mudanças de gases CO ₂ e ArCO ₂	110
Figura 4.4.6: Custo total por velocidade de alimentação de arame eletrodo para os processos de soldagem GMAW, GMAW-CW, com mudanças de gases CO ₂ e ArCO ₂	111
Figura 4.5: Influencia da velocidade de alimentação de arame eletrodo sobre o Largura média	113
Figura 4.5.1: Influencia da velocidade de alimentação de arame eletrodo sobre o Reforço médio	114
Figura 4.5.2: Influencia da velocidade de alimentação de arame eletrodo sobre a Penetração Lateral média	114
Figura 4.5.3: Gráfico representativo da diluição média obtida dos processos de soldagem.....	115

LISTA DE TABELA

Tabela 1:	Processos de soldagem por fusão	28
Tabela 2:	Classificação de transferência metálica pelo IIW	60
Tabela 3:	Composição química padrão para o aço ao carbono AISI-SAE 1020.	70
Tabela 4:	Composição química do arame maciço ER70S-6, segundo AWS 5.18	71
Tabela 5:	Planejamento experimental por Fatorial Incompleto	83
Tabela 6:	Planejamento experimental dos ensaios	84
Tabela 7:	Parâmetros operacionais preliminares	85
Tabela 8:	Densidade linear dos arames utilizados	87
Tabela 9:	Parâmetros variáveis retificados dos processos de soldagem	94
Tabela 10:	Parâmetros de soldagem obtidos de Im e Um	101
Tabela 11:	Resultado das características econômicas. Soldagem GMAW, GMAW-CW	103
Tabela 12:	Custos médios para o Processo GMAW para cada ensaio	108
Tabela 13:	Custos médios para o Processo GMAW-CW para cada ensaio	111
Tabela 14:	Resultados das características geométricas para os ensaios experimentais realizados com a soldagem GMAW e GMAW-CW	116

LISTA DE SIMBOLOS

%	Percentual
Tander Wire	Tocha de soldagem com a disposição do arame frio em
Twin Wire	Tocha de soldagem com arranjo do arame frio em posição
A	Ampere
AE	Arame-eletrodo
Ar	Argônio
Ar25%CO2	Mistura Argônio dióxido de carbono
AWS	American Welding Society
L	Largura do cordão
CC+	Corrente contínua com o eletrodo no pólo positivo
CO2	Dióxido de carbono
DAPI	Duplo arame com potencial isolado
DAPU	Duplo arame com potencial único
DBCP	Distância bico de contato peça
et al	e outros
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GMAW-CW	Gas Metal Arc Welding – Cold Wire
IIW	International Institute of Welding
L	Comprimento do arame consumido
L/S	Vazão de gás
Lo	Comprimento do arco
L1	Comprimento linear do arame-eletrodo
L2	Comprimento linear do arame-frio
MA	Metal de Adição
MAG	Metal Active Gas

MAG-CW	Metal Active Gas – Cold Wire
MB	Metal de base
mf	Massa final da junta depois da soldagem
mi	Massa inicial da junta antes da soldagem
O2	Gás oxigênio
PL	Penetração Lateral posição longitudinal ao sentido de deslocamento da tocha
R	Reforço do cordão
R%	Rendimento do processo
s	Segundos
t	Tempo
t1	Tempo do arame-eletrodo
t2	Tempo do arame frio
TD	Taxa de deposição
TF	Taxa de fusão
Tm	Tempo médio de soldagem dos arames
tmax	Tempo máximo de reabertura do arco
tmin	Tempo mínimo de curto-circuito
U	Tensão
Us	Tensão de soldagem
V	Velocidade [m/s]
ZAC	Zona afetada pelo calor
ZTA	Zona termicamente afetada
δ	Diluição
Δt	Varição de tempo de curto-circuito
ΔU	Varição de tensão
ρ_1	Densidade linear do arame-eletrodo
ρ_2	Densidade linear do arame frio
ρ	Densidade linear do arame consumível

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	20
1 INTRODUÇÃO	20
1.1 OBJETIVOS.....	22
1.1.1 Objetivo Geral.....	22
1.1.2 Objetivo Específico.....	22
CAPÍTULO II	24
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1 INTRODUÇÃO.....	24
2.1.1 Evolução do Processo de Soldagem.....	25
2.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROCESSO GMAW E GMAW-CW	28
2.2.1 Conceitos do Processo de Soldagem GMAW-CW com Adição de Arame Frio.....	31
2.3 METAL DE ADIÇÃO.....	33
2.4 CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS E ECONÔMICAS	34
2.4.1 Influência da Inclinação da Pistola.....	35
2.4.2 Distância entre Bico de Contato e Peça (DBCP).....	37
2.4.3 Tensão e Corrente.....	40
2.4.4 Velocidade de Soldagem.....	41
2.4.5 Elevação das Taxas de Deposição.....	42
2.4.6 Distância do Bocal de Gás.....	44
2.4.7 Fonte de Soldagem.....	44
2.4.8 Gás de Proteção.....	47
2.5 MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA	55
2.6 PARÂMETROS DE SOLDAGEM.....	59
2.6.1 Tensão de soldagem (Us).....	60
2.6.2 Corrente de soldagem (Is).....	60
2.6.3 Velocidade de soldagem (Vs).....	61
2.6.4 Velocidade de alimentação.....	61
2.6.5 Ângulo da tocha.....	62
2.7 CARACTERÍSTICAS ECONÔMICAS.....	62
2.8 ENSAIOS NÃO DESTRUTÍVEIS (END).....	63
2.8.1 Ensaio de Sanidade do cordão de solda.....	63

2.9 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS.....	63
2.9.1 Influencia dos elementos de ligas.....	65
2.9.2 Aços Carbono e de Baixa Liga.....	66
CAPÍTULO III.....	67
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	67
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS.....	67
3.1.1 Material de Base.....	68
3.1.2 Material de Adição.....	69
3.1.3 Gás de Proteção.....	70
3.1.4 Bancada de Soldagem.....	71
3.1.4.1 Fonte de Soldagem EUTETIC (MIG ARC 3200/ LCAM).....	71
3.1.4.2 Sistema de Alimentação de Arame Eletrodo.....	72
3.1.4.3 Sistema de Alimentação de Arame Frio.....	73
3.1.4.4 Microcontrolador de velocidade do arame frio.....	74
3.1.4.5 Pistola de Soldagem com Suporte Auxiliar de Alimentação de Arame Frio.....	75
3.1.4.6 Balança digital.....	77
3.1.4.7 Suporte de Atracação do Corpo de Prova.....	77
3.1.4.8 Sistema de aquisição e processo de dados.....	78
3.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA METALOGRAFIA.....	78
3.2.1 Serra de Fita- FM18.....	78
3.2.2 Enbutimento do Corpo de Prova.....	79
3.2.3 Lixadeira/Politriz.....	79
3.3 CALIBRAÇÃO DAS VARIÁVEIS ENVOLVIDAS NA SOLDAGEM.....	80
3.3.1 Velocidade de Alimentação do Arame.....	80
3.3.2 Velocidade de Soldagem.....	81
3.3.3 Vazão de Gás.....	81
3.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	81
3.4.1 Ensaio preliminares.....	83
3.5 ASPECTO SUPERFICIAL DO METAL DEPOSITADO.....	84
3.6 CARACTERÍSTICAS ECONÔMICAS.....	84
3.6.1 Equações convencionais.....	84
3.6.2 Equações modificadas.....	86

3.6.3 Obtenção das amostras.....	87
3.6.4 Características Geométricas da Solda.....	88
3.7 CARACTERÍSTICAS METALÚRGICAS.....	90
3.8 MACROGRAFIA E MICROGRAFIA.....	90
CAPÍTULO IV.....	92
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	92
4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS PRELIMINARES.....	92
4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SANIDADE SUPERFICIAL.....	93
4.2.1 Ensaio Visual.....	94
4.2.2 Monitoramento dos valores de corrente e tensão.....	100
4.3 RESULTADO DAS CARACTERÍSTICAS ECONÔMICAS.....	101
4.4 CUSTOS DE SOLDAGEM.....	104
4.5 RESULTADOS DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS.....	110
5 CONCLUSÃO.....	117
6 TRABALHOS FUTUROS.....	119
REFERÊNCIAS.....	120
ANEXOS	

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

A modernização da indústria da soldagem tem sido impulsionada pela evolução da eletrônica, da informática e da metalurgia, que possibilitam o desenvolvimento de modernas fontes de energia, de softwares, de novos materiais e de consumíveis alternativos para a soldagem.

As tendências de inovações tecnológicas aplicadas ao setor de processos de fabricação e materiais voltadas às indústrias da soldagem tornam-se cada vez mais evidentes ao propor modificações nos processos produtivos já consolidados, garantido maior produtividade com qualidade. Nesse seguimento os processos de soldagem ganham maiores atenções ao proporcionar essas evoluções aos seus métodos e criação de novas técnicas voltadas ao setor produtivo.

Em tempos mais remotos, quando não existiam materiais adequados e técnicas de junção eficazes, muitas indústrias já utilizavam a soldagem no processo de fabricação, ou seja, as indústrias automobilísticas, naval, aeroespacial, robótica e dentre outras. Atualmente, tecnologia dos processos de soldagem apresenta-se em um estágio bastante avançado e ha sempre inovações surgindo, com o intuito de estabelecer padrões aos processos existentes e melhorar-los, e assim aumentar a produtividade e reduzir os custos de produção dos processos de fabricação.

Devido a essa carência foram criados processos visando maior produção, como o GMAW (Gas Metal Arc Welding) Duplo Arame. O desenvolvimento da soldagem com duplo arame apresenta como meta principal o aumento da produtividade pela redução no tempo de operação. Esta técnica e especialmente utilizada com vantagens na soldagem de revestimento e no enchimento de chanfros. No entanto, o processo GMAW com duplo arame necessita da utilização de duas fontes eletrônicas de soldagem sincronizadas, dois cabeçotes de alimentação de arame, programas computacionais complexos para comandar a sincronia operacional, além do aumento no consumo de insumos como energia elétrica, gás, entre outros. Todos estes fatores constituem custos adicionais elevados que limitam a sua aplicação em escala industrial. (CABRAL, 2011).

O projeto de pesquisa da soldagem GMAW-CW (Gás Metal Arc Welding – Cold Wire) com alimentação adicional de arame frio surgiu a partir da idéia do processo de soldagem MIG/MAG duplo arame.

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

Segundo Sábio (2007), a diferença entre o duplo arame e o arame frio está na inserção de apenas um arame maciço energizado conectado à fonte de soldagem e responsável por único arco voltaico e outro arame maciço não energizado, dito “frio”, adicionado à poça de fusão por um cabeçote alimentador. O arco elétrico funde simultaneamente os dois arames. Neste contexto, a adição de arame frio é uma técnica nova diante do que se pesquisou na bibliografia de soldagem com duplo arame, o que revela a possibilidade de pesquisas no desenvolvimento dessa nova alternativa de soldagem.

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

Como a demanda pelo aumento da produtividade num mercado cada vez mais competitivo, o processo MIG/MAG convencional começa a não atender mais plenamente às necessidades das indústrias no que diz respeito à produtividade; procuram-se taxas de deposição mais elevadas (similares às do processo Arco Submerso), possibilitando a redução do tempo de soldagem e, conseqüentemente, custos globais e a necessidade de inovações aos processos já consolidados nas linhas de produção (GROETELAARS, 2005; SCOTTI, 1991).

Nesta linha de pesquisa foi proposta a soldagem MIG/MAG e ou GMAW, com a adição de um arame não energizado, (Processo DWOA - Double Wire Only Arc) estabelecendo uma alternativa técnica e econômica em relação à soldagem MAG/MAG Duplo Arame.

A proposta da soldagem com GMAW-CW com adição de um arame frio se estabelece como uma alternativa técnica e econômica em relação a

soldagem GMAW convencional e GMAW com duplo arame. Este novo processo utiliza o equipamento convencional MIG/MAG, com um sistema extra de alimentação de arame, no auxílio da inclusão do arame frio conjugado a tocha de soldagem. Utiliza somente um sistema de proteção gasosa, ou seja, por um fluxo de gás inerte, ativo ou uma mistura de ambos, enquanto que a energia elétrica ao cabeçote auxiliar de alimentação do arame seja proveniente da fonte de energia a qual o mesmo está conectado.

As vantagens do emprego do processo de soldagem GMAW-CW em relação ao processo GMAW convencional estão associadas ao controle das características econômicas e geométricas, a alimentação dos arames em diferentes velocidades, ao emprego de arame-eletrodo e frio. O processo GMAW-CW também apresenta algumas limitações, como a capacidade mecânica do dispositivo guia do arame frio, a combinação das velocidades de alimentação do arame-eletrodo com a do arame frio limitando as taxas de fusão e de deposição.

Enfim, o estudo e aplicação do processo GMAW-CW têm sido realizados durante alguns anos. No entanto, este processo não está totalmente consolidado, por isso houve a necessidade de fazer um estudo comparativo com o processo convencional, assim, analisamos o comportamento desses processos em relação ao ganho de produtividade aplicado nas indústrias. Nesse sentido, estes fatos abrem espaço para investigação do comportamento desses processos, quando submetido à variação de alimentação do arame eletrodo com a variação de alimentação do arame frio e quando submetemos estes processos aos tipos de gases utilizados.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo desse trabalho é realizar um estudo para o desenvolvimento e aprimoramento do processo GMAW-CW para a produção industrial, principalmente a industrial naval da região do Pará, visando garantir uma maior produtividade com melhoria da relação custo/benefício, assegurando assim, uma continuidade das propriedades físicas e químicas da junta soldada.

1.1.2 Objetivos Específicos

A análise de interesse desse trabalho esta em:

- a) Estudar a viabilidade operacional do processo de soldagem GMAW-CW com adição de um arame frio, observadas as seguintes metas: redução de custos e incremento da produção com nível de qualidade que justifiquem a sua utilização em escala industrial.
- b) Avaliar aspecto superficial das soldas;
- c) Avaliar as características geométricas das soldas;
- d) Avaliar o desempenho econômico.

CAPÍTULO II

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como principal objetivo esclarecer e oferecer as bases tecnológicas inevitáveis para a clareza de compreensão, informação, conhecimento e entendimento no desenvolvimento desta dissertação.

O processo de soldagem MIG/MAG (*Gas Metal Arc Welding* - GMAW) apresenta-se como um dos principais processos de soldagem ao arco elétrico empregados na recuperação de áreas erodidas por cavitação e ainda pelo fato da tendência cada vez maior da aplicação de suas variantes sob condições automatizadas, tornar-se-á necessário que se faça uma abordagem mais detalhada deste processo. Nesta abordagem focar-se-á, numa primeira etapa, os princípios básicos característicos deste processo e, numa etapa final, suas variantes (pulsção térmica, soldagem com arame tubular) e as implicações que a automação do processo poderá trazer sobre o aspecto produtivo e qualidade do depósito (BARRA, 1998).

O processo de soldagem MIG/MAG duplo arame vem sendo comercializado, pesquisado e avaliado no mundo, com potencial de aplicação em franco desenvolvimento, (GROETELAARS, 2005; MICHIE, 1999; MOTTA, 2002; MULLIGAN e MELTON, 2002; KETRON; LONGENECKER; BROWN, 2002). Conforme MICHIE (1999), as variantes deste processo vêm sendo investigadas desde os anos 1950 e somente com a chegada de equipamentos de soldagem eletrônicos, o mesmo se tornou disponível ao mercado comercial.

Durante a investigação para a obtenção de dados na bibliografia deste trabalho, sobre a soldagem GMAW-CW com duplo arame, percebeu-se que o processo já foi consolidado, porém há carência de trabalhos científicos relativos ao processo de viabilidade econômica (custo) no que rege a mudança de gases, desempenho na transferência da gota e otimização de novos parâmetros para a automatização das soldagens em todo o processo o qual é utilizado na indústria, o que torna relevante a possibilidade de pesquisas no desenvolvimento dessa nova alternativa de soldagem com adição de arame frio ao processo GMAW-CW.

2.1.1 Evolução do processo de soldagem

Dutra (1989) e Brandi (1991), reportam como sendo 1948, a data do desenvolvimento do processo MIG/MAG. Contudo, somente em 18 de abril de 1950, Gibson, Muller e Anderson solicitaram patente para um processo de soldagem, a princípio para a soldagem de alumínio, que empregava metal de adição alimentado continuamente e com proteção gasosa similar a utilizada no processo TIG, isto é, Ar (argônio) como gás inerte e por isso a denominação *Metal Inerte Gas* - MIG. Esta patente é considerada hoje como a precursora do processo de soldagem MIG/MAG (MANZ,1990).

Em 1951 tornou-se possível a aplicação do processo na soldagem de aço devido a adição de uma pequena quantidade de oxigênio ao Ar, isto é, a aplicação de Ar puro provocava um arco instável e errático (GUERRA,1996).

Em 1953, em função do custo elevado do Ar, partiu-se para a substituição do Ar por CO₂ (dióxido de carbono que é um gás ativo). Como na época os arames empregados no processo apresentavam diâmetros elevados, o processo de transferência apresentava-se bastante instável. Com o desenvolvimento de arames com diâmetros menores o problema foi solucionado, possibilitando a soldagem com curto circuito mais estável (DUTRA, 1989).

Em 1960, aproveitando a estabilidade do arco obtida pela adição de oxigênio, desenvolveu-se o modo de transferência tipo *spray*.

O advento da corrente pulsada, em 1962, teve como meta a aplicação da transferência por *spray* com um nível de corrente média inferior a obtida em corrente convencional, além de facilitar a aplicação do MIG/MAG sob condições mecanizadas ou robotizadas (DUTRA, 1989; KIM, 1993).

No final dos anos 70 o IIW (INSTITUTE INTERNATIONALWELDING) emprega o termo *sinérgico* para descrever um método particular de controle do processo MIG pulsado (NORRISH,1995).

A incessante busca por maior qualidade, produtividade e redução de custos, faz com que o processo de soldagem semi-automático prevaleça sobre os processos manuais.

De acordo com WAINER et al. (1992), o processo de soldagem teve seu grande impulso na II Guerra Mundial, devido à fabricação de navios e aviões soldados, apesar de o arco elétrico ter sido desenvolvido no século XIX.

O processo de soldagem TIG (Tungsten Inert Gas) foi o primeiro processo de soldagem com proteção gasosa introduzido no final dos anos 1930, mas só foi disponibilizado para o comércio no início dos anos 1940. Este processo utilizando gases como o argônio e o hélio para a proteção gasosa soldava magnésio, aço inoxidável, alumínio e outros metais, com a alimentação manual de um metal de adição (vareta de adição) introduzida através do arco voltaico mantido entre um eletrodo de tungstênio não consumível e o metal de base. Este processo é ainda muito usado hoje. A idéia TIG ajudou a desenvolver e aprimorar um novo processo com maior velocidade, o MIG, haja vista, que o processo TIG utilizava baixa velocidade de soldagem (SÁBIO, 2007).

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

Novas pesquisas, a partir dos anos 1930, realizadas com gases produzidos na desintegração dos revestimentos dos eletrodos direcionaram as pesquisas a ensaios com gás carbônico com atmosfera protetora do arco voltaico.

Com o avanço das pesquisas os primeiros trabalhos foram desenvolvidos com gás ativo, CO₂, na soldagem dos aços (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992). Com isto, começa a ser usado um novo processo de soldagem com a sigla MAG (Metal Active Gas) ou Metal Gás Ativo e se torna bastante popular no início dos anos 1950 (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

MARQUES (2005), a soldagem é o mais importante processo de união de materiais utilizados industrialmente. Este método de união tem importante aplicação desde a indústria microeletrônica até a fabricação de navios e outras estruturas com centenas ou milhares de toneladas de peso. A soldagem é utilizada na fabricação de estruturas simples, como grades e portões, assim como em componentes

encontrados em aplicações com elevado grau de responsabilidade, como nas indústrias químicas, petrolífera e nuclear, e também na criação de peças de artesanatos, jóias e de outros objetos de arte. QUITES (1979). Conceituou a soldagem baseado nos processos existentes na época, por fusão, como: “Operação que visa à união de duas ou mais peças, assegurando na junta, a continuidade das propriedades, químicas e físicas”. Entretanto, com o avanço dos métodos de uniões de vários tipos de materiais, Marques (2005). apresenta uma definição mais abrangente para soldagem baseado no tipo de forças responsáveis pela união: “Processo de união de materiais baseado no estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais, na região de ligação entre os materiais que estão sendo unidos”.

No intuito de unir, revestir e/ou produzir materiais, desenvolveu-se diversos processos de soldagem, entre os quais estão os por fusão com as seguintes características e aplicações, apresentados na Tabela 1, a seguir, na qual apresenta os processos de soldagem fortemente ligados a indústria do aço. (MODENESI, 2006).

Tabela 1: Processos de soldagem por Fusão.

PROCESSO	CARACTERISTICA	APLICAÇÕES
Soldagem por Eletro-escória	Automática/mecanizada. Junta na vertical. Alimentação de arame mecanicamente na poça de fusão. Não existe arco	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, espessura ≥ 50 mm. Soldagem de peças de grande espessura, eixos etc.
Soldagem ao Arco Submerso	Automática/mecanizada ou semi automática. O arco arde sob uma camada de fluxo granular	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga. Espessura ≥ 10 mm. Posição plana ou horizontal de peças estruturais, tanques, vasos de pressão, etc.
Soldagem com Eletrodos Revestidos	Manual. Vareta metálica recoberta por camada de fluxo	Soldagem de quase todos os metais, exceto cobre puro, metais preciosos, reativos e de baixo ponto de fusão. Usado na soldagem em geral.
Soldagem com	O fluxo está contido dentro de um	Soldagem de aços carbono com

Arame Tubular	arame tubular de pequeno diâmetro. Automático ou semi-automático	espessura ≥ 1 mm. Soldagem de chapas
Soldagem MIG/MAG	Automática/mecanizada. ou semi-automática. O arame é sólido	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, não ferrosos, com espessura ≥ 1 mm. Soldagem de tubos, chapas, etc. Qualquer posição
Soldagem a Plasma	Manual ou automática. O arame é adicionado separadamente. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arco é constrito por um bocal	Todos os metais importantes em engenharia, exceto Zn, Be e suas ligas, com espessura de até 1,5 mm. Passes de raiz
Soldagem TIG	Manual ou automática. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arame é adicionado separadamente.	Soldagem de todos os metais, exceto Zn, Be e suas ligas, espessura entre 1 e 6 mm. Soldagem de não ferrosos e aços inox. Passe de raiz de soldas em tubulações
Soldagem por Feixe Eletrônico	Soldagem automática. Não há transferência de metal. Feixe de elétrons focalizado em um pequeno ponto.	Soldagem de todos os metais, exceto nos casos de evolução de gases ou vaporização excessiva, a partir de 25 mm de espessura. Indústria nuclear e aeroespacial.
Soldagem a Laser	Como acima	Corte de materiais não metálicos
Soldagem a Gás	Manual. Arame adicionado separadamente	Soldagem manual de aço carbono, Cu, Al, Zn, Pb e bronze. Soldagem de chapas finas e tubos de pequeno diâmetro

Fonte: Modenesi (2006) e Marques (2005).

2.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROCESSO GMAW E GMAW-CW

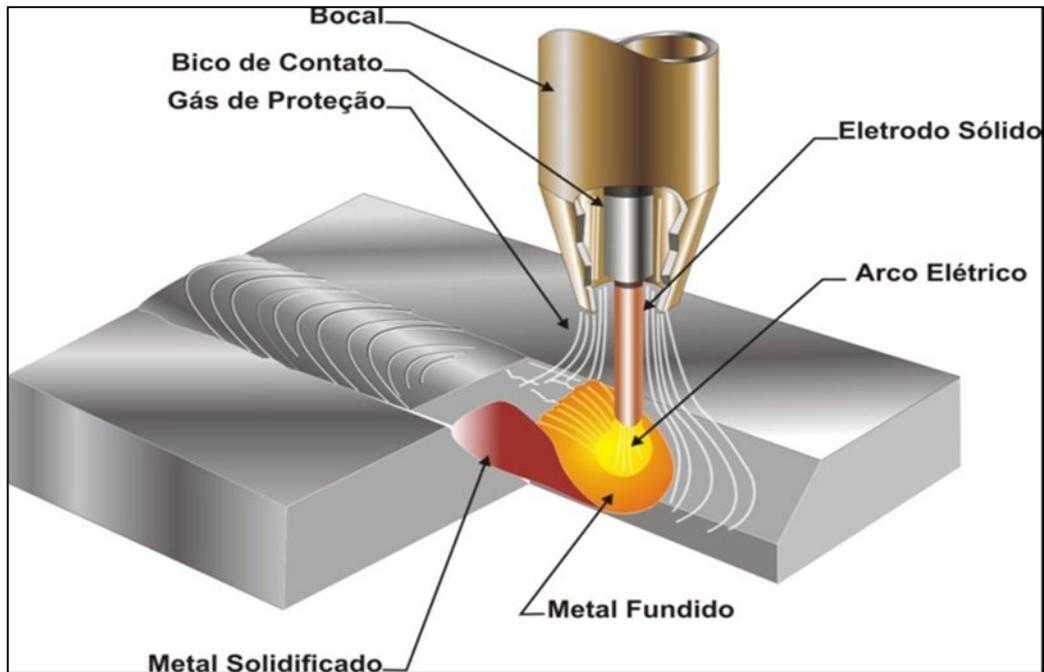
O processo de soldagem GMAW foi inicialmente desenvolvido e primeiro usado principalmente para soldar alumínio e ainda é popular para este propósito. Mas logo converteu-se em um método de manufatura eficiente para união de juntas e componentes em aço. Porém, também é usado amplamente por soldar todos os principais metais comerciais inclusive aço carbono, ligas e aços inoxidáveis, como também metais não ferrosos como o cobre (ADLER, 1999).

A soldagem a arco com proteção gasosa GMAW (Gás Metal Arc Welding), é um processo em que a união de peças metálicas é produzida pelo aquecimento destas com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico nu, consumível, e a peça de trabalho. A proteção do arco e da região da solda contra contaminação pela atmosfera é feita por um gás ou mistura de gases, que podem ser inertes ou ativos (MARQUES, 2005).

Cabral (2011), a soldagem a arco elétrico com gás de proteção (GMAW – Gas Metal Arc Welding), também conhecida como soldagem MIG/MAG (MIG – Metal Inert Gas e MAG – Metal Active Gas), um arco elétrico é estabelecido entre a peça e um consumível na forma de arame. O arco funde continuamente o arame à medida que este é alimentado à poça de fusão. O metal de solda é protegido da atmosfera pelo fluxo de um gás (ou mistura de gases) inerte ou ativo. A Figura 1 mostra o desenho esquemático da região de soldagem, em corte, do processo de soldagem GMAW.

Na soldagem GMAW o dióxido de carbono (CO_2) puro, ou misturado com outros gases em menores proporções, é o gás de proteção utilizado que flui através do bocal da tocha para proteger o arco elétrico, o material em fusão e o metal que já se encontra fundido. Este gás desempenha importantes funções metalúrgicas durante a soldagem através de reações químicas na atmosfera do arco, com o metal líquido e/ou com a escória fundida (LABSOLDA, 2011).

Figura1: Desenho esquemático da região soldagem pelo processo MIG/MA

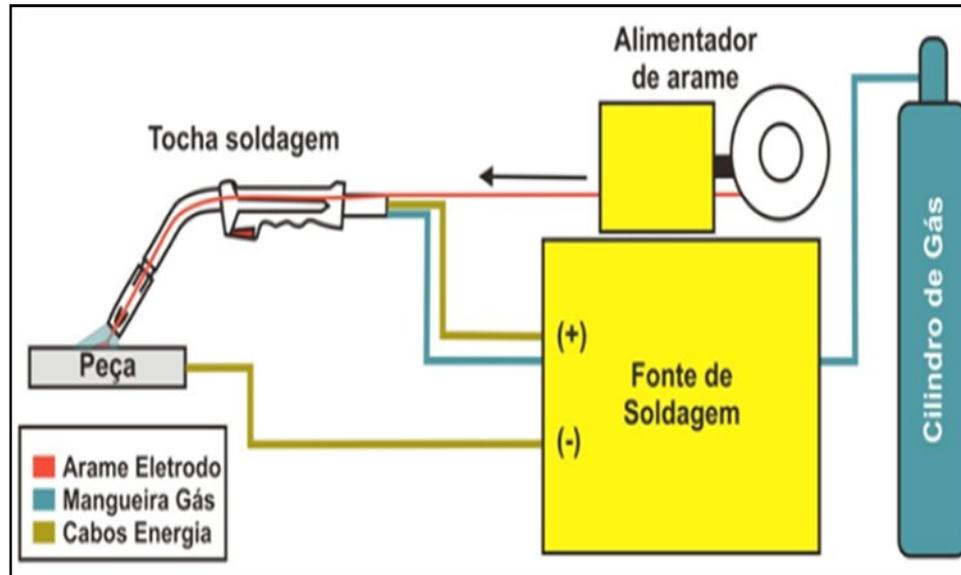


Fonte: (Cruz, 2008).

O processo GMAW, ilustrado esquematicamente na Figura 1.1, é composto basicamente por uma fonte de soldagem, um sistema de alimentação de arame eletrodo, uma tocha de soldagem, um sistema de fornecimento de gás e, normalmente, um sistema independente de refrigeração da tocha.

Dos equipamentos citados, a fonte de energia é considerada a mais importante, pois é responsável pelo controle dos principais parâmetros de soldagem. Normalmente, este processo opera na faixa de 15 a 35 V e de 60 a 600 A, (MIRANDA, 2002), em corrente contínua com polaridade positiva (CC+), resultando em um arco estável com transferência metálica regular, baixa quantidade relativa de respingos dependendo do processo e gás de proteção.

Figura 1.1: Esquema representativo da soldagem MIG/MAG



Fonte: (Cruz, 2008).

A elevada quantidade de solda depositada por tempo em kg/h; a relativa facilidade de mecanização ou automatização do processo GMAW; o alto ciclo de operação com tempo de arco aberto/tempo total de produção caracteriza-se como vantagens e são as razões do empenho em aperfeiçoar o processo de soldagem para torná-lo menos passível ao aparecimento de defeitos de deposição (SÁBIO, 2007).

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

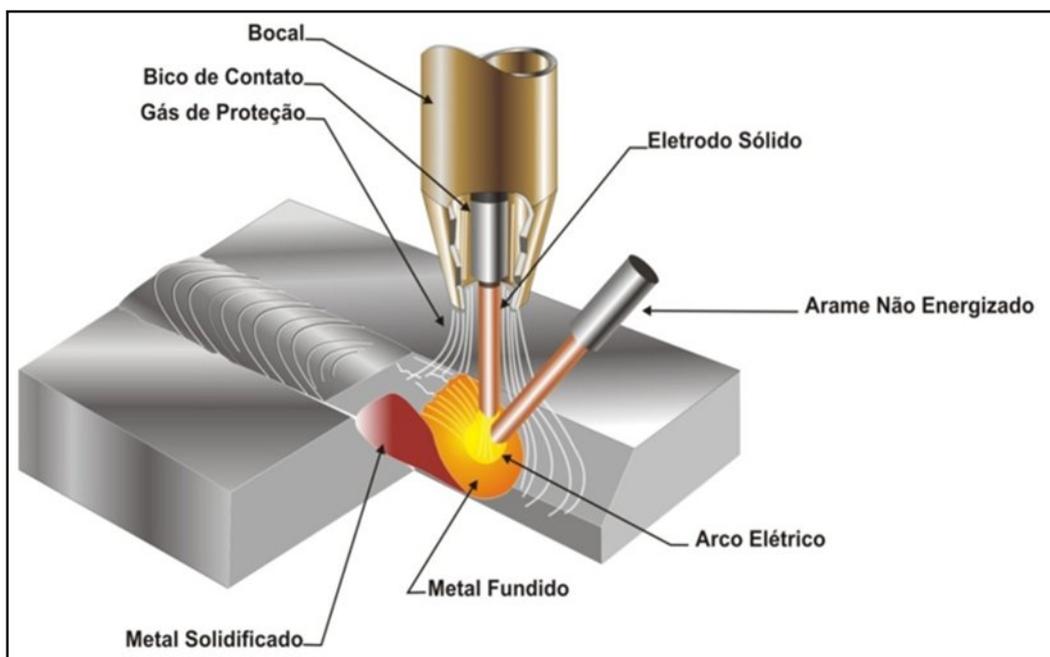
2.2.1 Conceitos do Processo de Soldagem GMAW-CW com Adição de Arame Frio

Uma linha de pesquisa está sendo desenvolvida pela Universidade Federal do Pará – UFPA, que é tratada como uma variação dos processos MIG/MAG e ou GMAW, com a adição de um arame não energizado, (Processo *DWOA - Double Wire Only Arc*) estabelecendo uma alternativa técnica e econômica em relação à soldagem MAG/MAG Duplo Arame. O processo de soldagem com a injeção de arame não energizado teve início com os estudos desenvolvidos Bacelar e Ferraz

(2005), utilizando o processo *MAG*, o que resultou num aumento considerável da produção média em relação à soldagem *MAG* convencional (CABRAL, 2011).

O processo de soldagem *GMAW-CW* consiste na introdução de um arame frio na atmosfera do arco voltaico gerado pelo arame energizado, desta forma, ele funde-se juntamente com o arame energizado somando o material depositado sobre a junta soldada. Diferente do processo de soldagem duplo arame o processo *GMAW-CW* não necessita de aparatos muitos caros, complexos e treinamento especializado para realização das soldagens, mostrando-se versátil em soldagens automatizadas e semi-automatizadas, (SÁBIO, 2007; CRUZ, 2008; SILVA, 2010 e CABRAL, 2011). A Figura 1.2 mostra um desenho esquemático do processo *GMAW-CW*.

Figura 1.2: Desenho esquemático do processo *MIG/MAG* com adição de arame frio

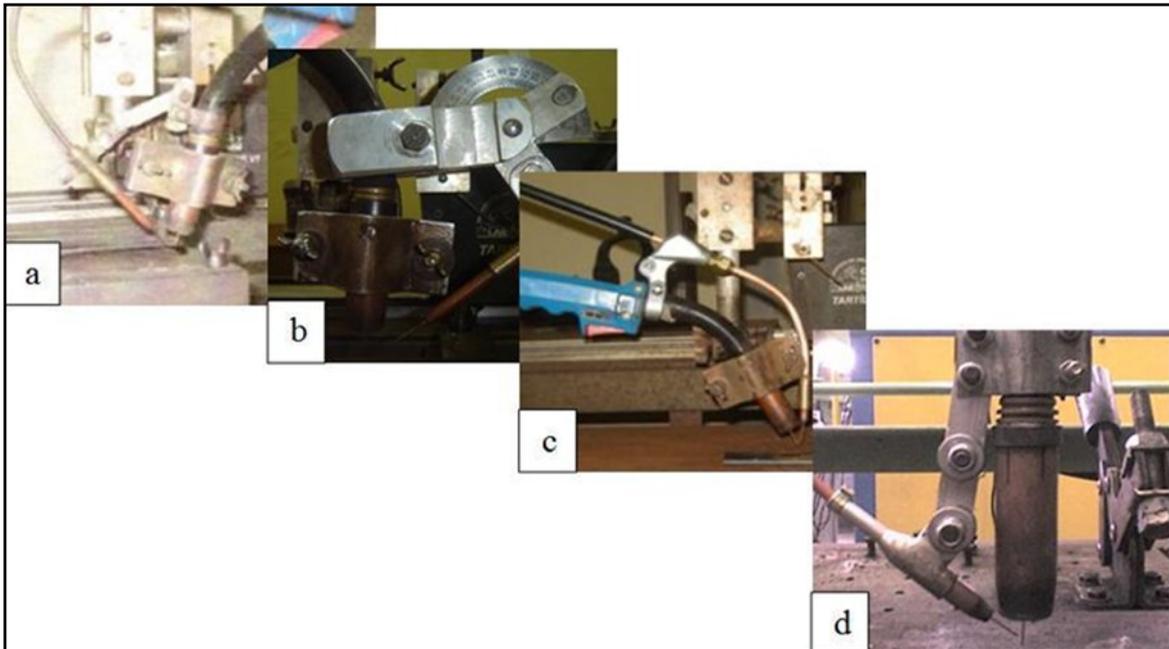


Fonte: CABRAL (2011).

Estudos iniciais desenvolvidos por Bacelar e Ferraz (2005), apresentaram a soldagem *MIG/MAG* com adição de arame frio que resultou numa produção média de 70% acima da soldagem *MIG/MAG*, com bons níveis de estabilidade e qualidade superficial da união. Para a realização dessas pesquisas, foi necessário o desenvolvimento do injetor que permitiria a condução do arame não energizado à região da poça de fusão, que vem sendo inovado com as necessidades de adaptação ao processo, conforme apresentado também por (SÁBIO, 2007; CRUZ,

2008 e SILVA, 2010), tal evolução é mostrada na Fig. 1.3 (a, b e c), culminando no protótipo atual, Fig. 1.3 (d), com mais graus de liberdade, agregando as vantagens dos anteriormente construídos.

Figura 1.3: Evolução dos injetores de arame não energizado (a) 2005; (b) 2007, (c) 2008 e (d) Protótipo atual instalado em uma tocha automatizada, 2009



Fonte: (CABRAL, 2011).

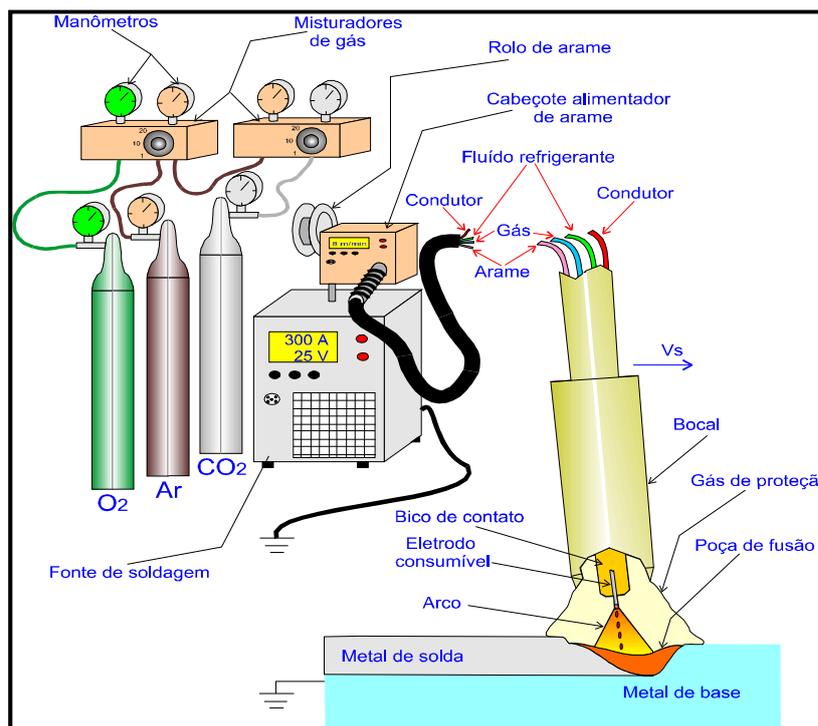
2.3 METAL DE ADIÇÃO

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

O eletrodo é constituído de um arame delgado, com diâmetros reduzidos e bitolas que variam entre 0,8 mm e 1,6 mm, podendo chegar a certos casos até 2,4 mm, o qual é bobinado em carretéis apropriados e impulsionados até o local de contato da corrente elétrica por pequenos rolos acionados por um motor elétrico (QUITES, 1979).

Sabendo que o pólo negativo (-) da fonte de energia está ligado a obra e o outro pólo positivo ao arame-eletrodo, o arco voltaico se estabelece entre o arame consumível e o metal de base. O eletrodo, portanto, é ao mesmo tempo suporte do arco elétrico e metal de adição. O calor do arco funde a extremidade do arame eletrodo e a superfície do metal de base, a fim de formar a poça de fusão na junta soldada. O arame eletrodo se funde no calor do arco e o metal líquido é impelido por um conjunto de forças, predominantemente eletromagnéticas, em direção ao metal de base, formando a poça de fusão, conforme a Figura 1.4 mostra o arco voltaico, as gotas metálicas em transferência, juntamente com o metal de base fundido na poça de fusão são inteiramente protegidos pelo gás de proteção, da oxidação causada pelo contato com o ar atmosférico. O gás é alimentado externamente e flui por um bocal concêntrico da tocha de soldagem. (QUITES, 1979); GOHR, 2002).

Figura 1.4: Descrição genérica do processo MIG/MAG



Fonte: Arquivo Pessoal.

2.4 CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS E ECONÔMICAS

O processo de soldagem GMAW-CW poderá ser utilizado em trabalhos de pequeno, médio e grande porte na indústria em geral e setores de serviço, para

produção e manutenção. O processo pode ser usado em soldagem semi-automática e em instalações automáticas (dependendo do desenvolvimento tecnológico). (SÁBIO, 2007).

A) Características e vantagens da soldagem GMAW-CW

As principais vantagens atribuídas à soldagem GMAW/FCAW-CW estão listadas a seguir: (EDSON,2009)

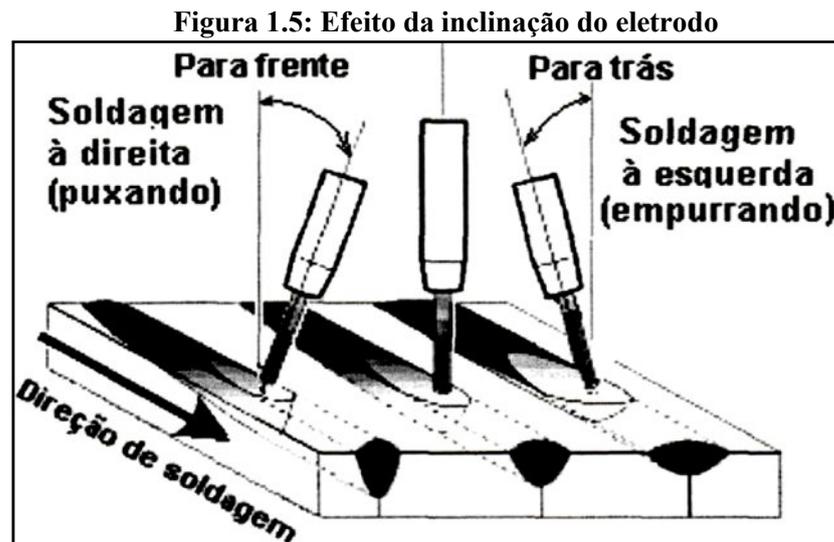
- ✓ Reúne as vantagens dos processos GMAW/FCAW;
- ✓ Soldagem nas versões semi-automática e automatizada;
- ✓ Utiliza o mesmo equipamento GMAW/FCAW, adaptado com um cabeçote alimentador do arame frio: baixo investimento em acessórios adicionais;
- ✓ Soldagem em todas as posições: leveza e facilidade de manipulação da pistola, poça de fusão mais fria;
- ✓ Versatilidade na composição química do metal depositado: facilidade de combinação de diferentes diâmetros e composição de arames: o arame frio pode ser maciço ou tubular;
- ✓ Econômica: utiliza a mesma alimentação de energia e o gás de proteção do processo GMAW/FCAW;
- ✓ Reduz tempo de execução: maior taxa de deposição e rendimento equivalente a soldagem GMAW/FCAW, e maior área revestida na unidade de tempo;
- ✓ Excelente qualidade superficial e performance do depósito de solda;
- ✓ Facilidade na montagem e preparação da área de trabalho;
- ✓ Ausência do sopro magnético;

2.4.1 Influência da inclinação da Pistola

A inclinação da tocha de soldagem forma com a reta vertical situada perpendicularmente a linha de soldagem, um ângulo de deslocamento ou de ataque que pode ser para frente ou para trás, negativo ou positivo, segundo as Figuras 1.5 e 1.6. A utilização da pistola de soldagem pode ser contra ou a favor da direção de soldagem, podendo influir na geometria de solda. A pistola se inclinando para frente, Figura 1.5, ângulo positivo e a favor da direção da soldagem, imaginando-se que

esta direção seja efetuada da esquerda para a direita, tem-se a chamada soldagem “à direita”. Neste caso, o jato de plasma empurra o metal líquido para trás e o arco incide mais diretamente no metal de base. Assim, a largura do cordão será menor, com maior penetração e reforço convexo, embora o controle da operação de soldagem seja mais difícil e o efeito da proteção de gás tende a diminuir gerando porosidades. (SABIO, 2007).

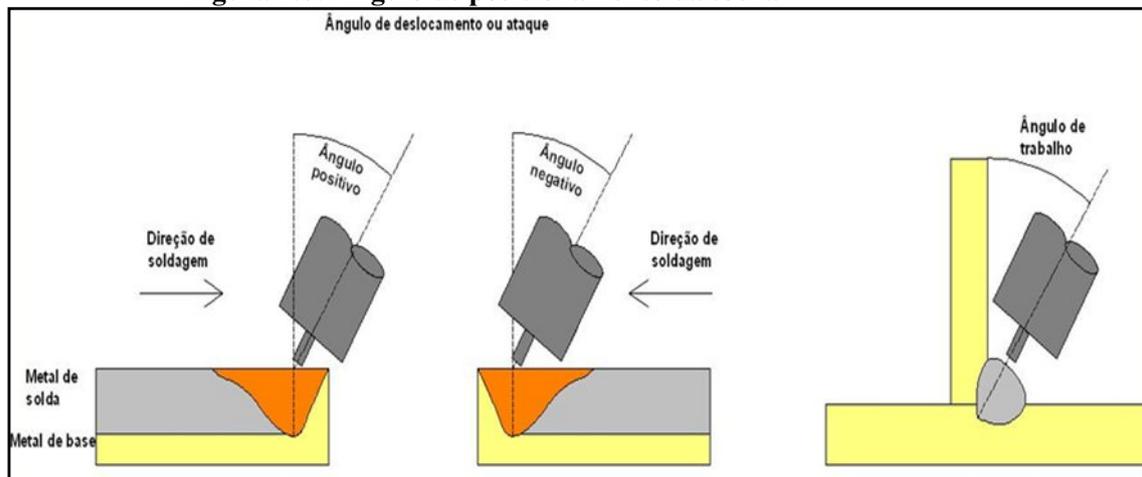
A pistola juntamente com o eletrodo inclinados para trás, para o lado da solda, ângulo de deslocamento negativo, Figuras 1.5, imaginando-se que a direção de soldagem seja efetuada da esquerda para a direita, têm-se a chamada soldagem “à esquerda”. Desta forma o jato de plasma espalha o material líquido na forma de um colchão fluído. Isto faz aumentar a largura do cordão de solda e diminuir o reforço e a penetração (QUITE, 1979).



Fonte: (SABIO, 2007).

A utilização de um ângulo de deslocamento ou ataque compreendido entre 0 a 20°, já que seu valor depende da posição de soldagem empregada, correspondem à aplicação de ângulos negativos, Figuras 1.6, apesar da facilidade na operação, também provocará baixa penetração além de um cordão largo e chato e com reduzida incidência de salpicos (BARRA, 2003).

Figura 1.6: Ângulo de posicionamento da tocha



Fonte: (BARRA, 2003).

O ângulo de trabalho localiza-se transversalmente à solda, conforme representa na Figura 1.7, corresponde normalmente entre 35 a 115° em relação à vertical, que apresenta influência sobre a simetria do cordão de solda. A seleção do ângulo de trabalho dependerá da posição de soldagem e do tipo de junta. Para soldagem automatizada em campo industrial não há necessidade de um profissional que mantenha uma regularidade operacional na deposição do metal de adição.

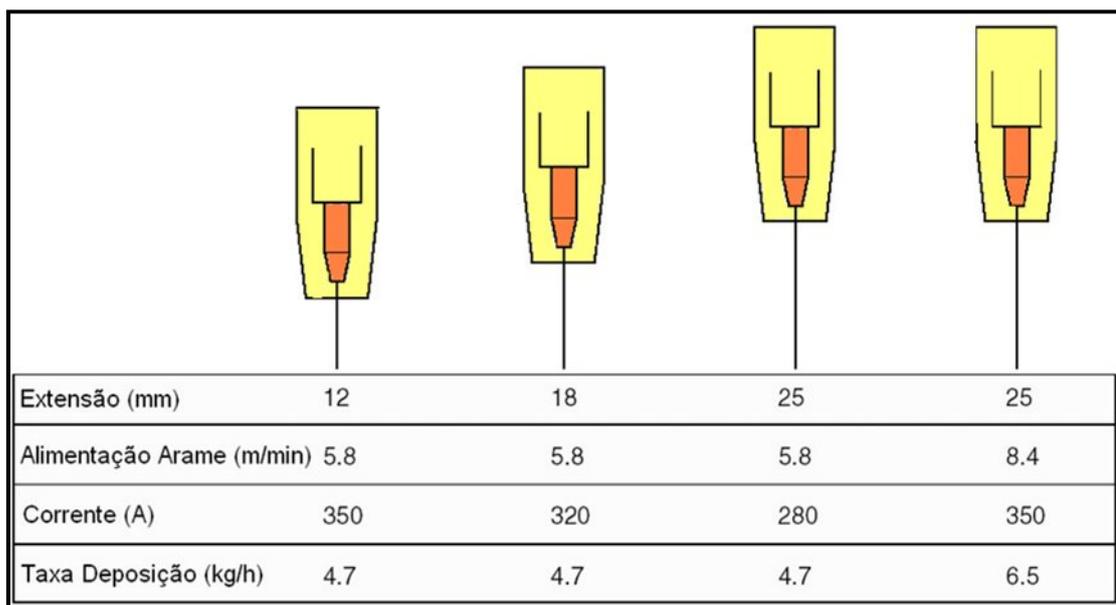
2.4.2 Distância entre Bico de Contato e Peça (DBCP)

A extensão do eletrodo descreve a distância entre o bico de contato da tocha e o arco, chamado também de *stickout*. As condições de corrente devem ser ajustadas no botão de controle, mas durante a soldagem pode ser necessário reduzir a quantidade de calor na poça de fusão para acomodar uma montagem deficiente ou uma soldagem fora de posição. Um aumento na extensão do eletrodo e a resistência elétrica adicional resultante produzirão uma poça de fusão mais fria e menos fluida. Da mesma forma, qualquer redução na extensão do eletrodo terá o efeito de aumentar a corrente de soldagem, podendo trazer algum benefício no controle da penetração, especialmente onde houver alguma montagem inconsistente (SILVA, 2010).

Em alguns casos especiais, onde houver dificuldade de acesso ou em chanfros estreitos, pode ser aplicada uma montagem em que o bico de contato fique protuberante em relação ao bocal, mas deve ser tomado um cuidado especial para garantir uma ação efetiva do gás de proteção.

Fortes (2004), cita que quando se opera no modo de transferência por curto-circuito, uma extensão do eletrodo de 12 mm será suficiente para a maioria das aplicações, enquanto que a transferência por aerossol produz uma quantidade maior de calor irradiado e deve ter uma extensão do eletrodo de aproximadamente 20 - 30 mm. Durante a soldagem propriamente dita, qualquer grande variação produzirá um depósito de solda inconsistente, sendo que uma extensão do eletrodo excessivamente grande reduzirá a eficiência da proteção do gás. Para uma dada taxa de alimentação de arame, qualquer aumento na extensão do eletrodo tem o efeito de reduzir a corrente fornecida pela fonte. Aumentando-se a velocidade de alimentação do arame para compensar a queda de corrente resultará em um significativo aumento na taxa de deposição do metal de solda, conforme a Figura 1.7.

Figura 1.7: Extensão do eletrodo e taxa de deposição



Extensão (mm)	12	18	25	25
Alimentação Arame (m/min)	5.8	5.8	5.8	8.4
Corrente (A)	350	320	280	350
Taxa Deposição (kg/h)	4.7	4.7	4.7	6.5

Fonte: (FORTES, 2004).

Segundo Sábio (2007), valores baixos da distância bico de contato e peça (metal de base) DBCP podem ocasionar penetração profunda, reforços altos e cordões estreitos (pela redução no valor de tensão) e aderência de salpico no bocal.

Segundo Barra, 2003 valores altos de DBCP podem prejudicar a proteção do local de soldagem e facilitar a oscilação do arame projetado, aumentar a incidência de respingos e porosidade e tornar o cordão irregular.

O comprimento do arame entre o bico de contato e sua extremidade é relativamente curto, assim podem ser empregadas altas densidades de corrente (100 A/mm²), apesar do pequeno diâmetro dos eletrodos (APENGSOLD, 1997). Segundo Quites (1979), o comprimento do arame-eletrodo no processo de soldagem MIG/MAG é muito importante porque o diâmetro deste é muito pequeno. Nele é produzida uma perda de energia por efeito Joule, (aquecimento já citado anteriormente). Esta perda aumenta com o comprimento do arame-eletrodo (stickout).

Para uma velocidade de alimentação de arame constante no modo tensão constante, o aumento do comprimento do eletrodo implica em redução da corrente. Por isto, este comprimento deve ser mantido, durante a soldagem, o mais invariável possível. Por sua vez, o comprimento do arco também deve ser mantido constante. Logo, o comprimento do arame influi decisivamente na geometria da solda (SÁBIO, 2007).

A distância da tomada de corrente (DBCP) pode ser calculada pela soma do comprimento do arco com o comprimento do eletrodo, no entanto deve ser estabelecida a princípio e conservada constante durante a operação. Para o processo MAG, Quites (1979), informa que comumente se trabalha tornando DBCP igual a Z, Figura 1.8, logo:

$$Z = I / 20 ; \textbf{(1)}$$

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

V= velocidade;

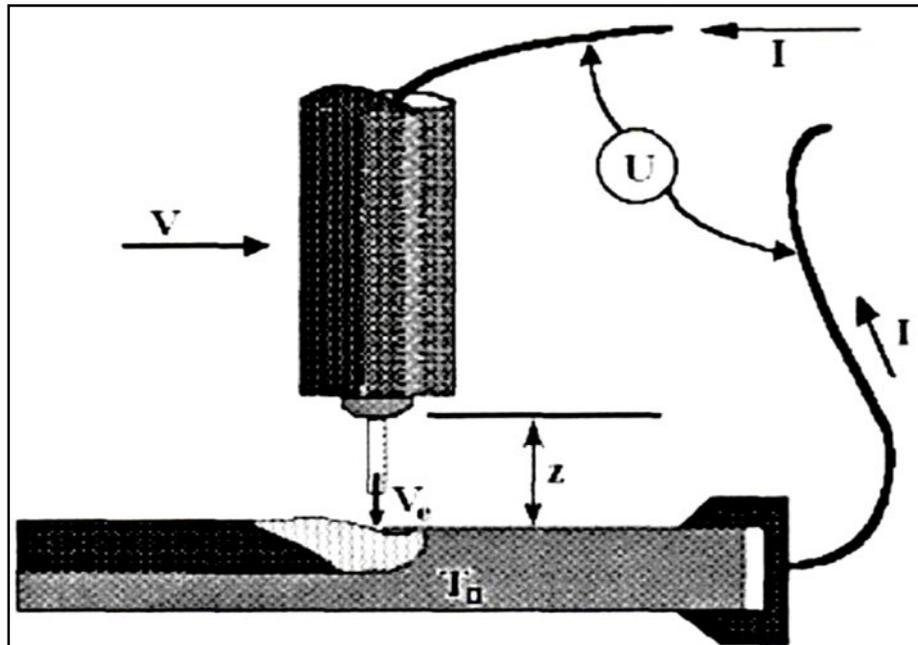
Ve= velocidade de mergulho do eletrodo;

Z= altura da tomada de corrente;

U= tensão de soldagem;

I= corrente de soldagem.

Figura 1.8: Parâmetros de soldagem para os processos de alta produção



Fonte: (QUITES, 1979).

2.4.3 Tensão e Corrente

A tensão do arco tem uma influência direta no comprimento do arco que controla o perfil do cordão, a profundidade da penetração e a quantidade de respingos. À medida que a tensão do arco é reduzida, a penetração aumenta, sendo particularmente importante em juntas de topo em “V”.

Um aumento na tensão resultará em um comprimento de arco também longo, aumentando a probabilidade de ocorrência de porosidade e de mordeduras.

Em fontes de tensão constante, a corrente de soldagem está diretamente relacionada à velocidade de alimentação do arame. Quanto maior for a velocidade de alimentação, maior será a corrente fornecida pela fonte de modo a fundir o arame alimentado à poça de fusão.

Com arames tubulares com fluxo não metálico, a corrente aplicada deve permanecer preferencialmente na metade superior da faixa recomendada para um determinado diâmetro, exceto para soldagem fora de posição nos diâmetros 1,2 mm e 1,4 mm e quando for empregado o modo de transferência por curto-circuito a correntes abaixo de 220 A. (FORTES, 2004 e FIGUEIREDO, 2005).

2.4.4 Velocidade de Soldagem

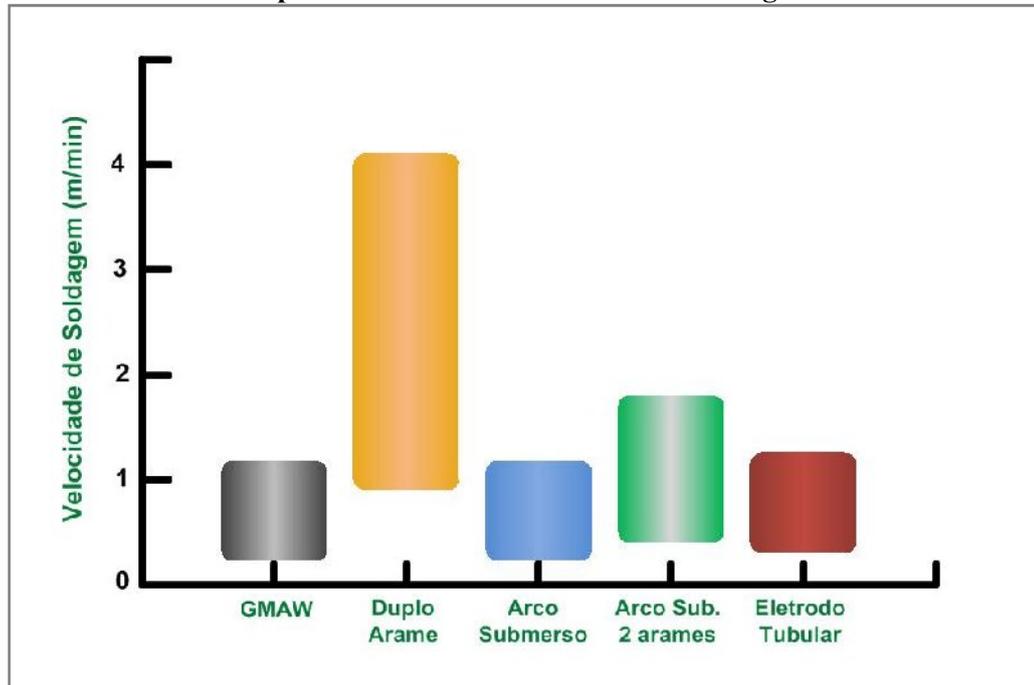
Este parâmetro do processo GMAW Duplo Arame corresponde ao grande trunfo quando comparado aos outros processos, pois está diretamente ligado ao aumento da produtividade, principalmente para a aplicação deste método em soldagens de chapas finas sem que ocorra a perfuração das chapas. Mas esta é uma abordagem simples e de fácil compreensão, embora esta velocidade não influencie apenas nesta questão operacional do processo (RODRIGUES, 2011).

Fortes (2004) e FIGUEIREDO (2005), comentam que, da mesma forma, ocorre uma redução na penetração se a velocidade de soldagem baixar para valores menores que 30 cm/min, tendo em vista que o arco pode tender mais para a poça de fusão do que para o metal de base. Ainda, o uso de baixas velocidades de soldagem deve ser evitado quando são requeridas propriedades de impacto a baixas temperaturas. Mesmo que a junta possa ser preenchida em poucos passes, os volumosos depósitos de solda resultarão em grandes aportes térmicos e por isso a tenacidade ao impacto será reduzida. Além disso, no caso de arames tubulares com fluxo não metálico, deve ser considerada a dificuldade de controle da escória a baixas velocidades de soldagem, que pode passar à frente da poça de fusão e gerar inclusões de escória.

Quanto a empregabilidade, Groetelaars (2005), cita que velocidades de soldagem acima de 3,5 m/min podem ser aplicadas na soldagem de chapas de aço carbono de 2mm de espessura usando o processo MIG/MAG com a disposição em série com DAPU (Duplo arame com potencial único) de acordo com catálogos da empresa Lincoln Electric (1999). Em outro estudo feito por Obnawa et al. (2003), velocidades de soldagem de até 8 m/min foram alcançadas com sucesso na soldagem de filetes em juntas sobrepostas na posição vertical ascendente.

De acordo com as observações de Bohme (1996), altas velocidades de soldagem são conseguidas a partir do formato alongado do arco, o que significa que o mesmo aquece o material por um maior tempo antes da transferência metálica ocorrer. Na Figura 1.9 a seguir encontra-se um esquema comparativo entre as velocidades de soldagem para vários processos.

Figura 1.9: Esquema Comparativo das Velocidades de Soldagem do Processo GMAW Duplo Arame e outros Processos de Soldagem

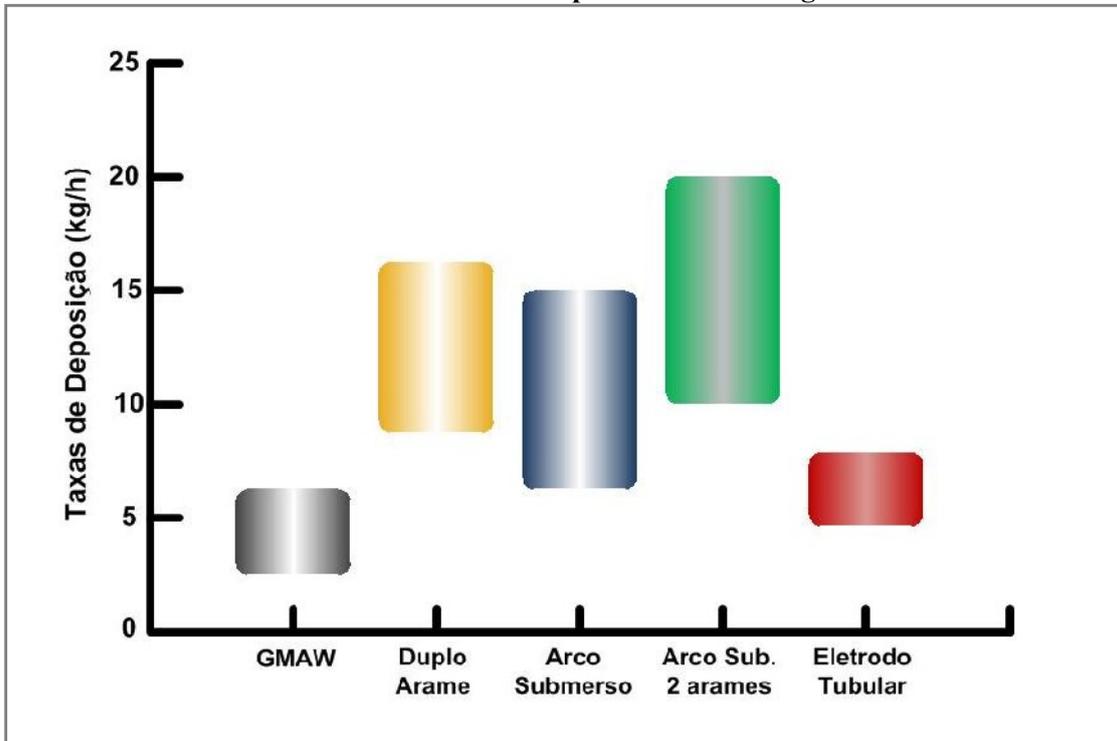


Fonte: White Martins (apud RODRIGUES,2011).

2.4.5 Elevação das Taxas de Deposição

Espera-se que o processo duplo arame aumente pelo menos em duas vezes a taxa de deposição em relação ao processo convencional que utiliza apenas um arame e, presume-se a redução do tempo de soldagem pela metade, potencializando a produtividade do processo ocasionada pela redução no número de passes nas juntas soldadas. Segundo Meyer e Lahnsteiner (1998), estudos mostram resultados próximos à realidade de taxa de deposição que giram em torno de 13 a 14 Kg/h. Sendo que este resultado não pode ser possível sem que se alterem outras variáveis. Embora mais recentemente os autores (PLATZAPUD; MULLIGAN e MELTON, 2002), supõem que taxas de deposição de até 24 kg/h podem ser esperadas dispondo-se do processo MIG/MAG DAPI (Duplo arame com potencial isolado) seqüencial. Um comparativo entre as taxas de deposição podem ser observados na Figura 2.0 na seqüência (RODRIGUES, 2011).

Figura 2.0: Esquema comparativo das taxas de deposição de metal do processo GMAW Duplo Arame e outros processos de soldagem



Fonte: White Martins (apud RODRIGUES, 2011).

Todavia, alguns fenômenos são inevitáveis quando se alimenta a poça de fusão com dois arames simultaneamente, tais como: interferência do campo magnético, alargamento da poça de fusão para uma dada velocidade de soldagem, etc. Estes fatores possuem importância fundamental tratando-se da possibilidade da obtenção de acréscimos na taxa de deposição. Onde, além do mais, outra vantagem é de manter uma boa qualidade no perfil do cordão de solda e o aporte de calor por unidade de comprimento, sem que descontinuidades como mordeduras, por exemplo, surjam e prejudiquem o trabalho, já que a velocidade de alimentação (taxa de deposição) é aumentada juntamente com a velocidade de soldagem. (BOEME et al. 1996; BLACKMAN et al., 2004) demonstraram que, tanto para sistemas de dupla e simples alimentação, a velocidade de resfriamento não se altera para uma mesma energia de arco calculada, garantindo a manutenção do calor imposto por unidade de comprimento.

2.4.6 Distância do Bocal de Gás

No processo de soldagem MAG com gás de proteção ativo (CO_2), Quites (1979), cita que para garantir uma melhor proteção gasosa é freqüente, para intensidades de correntes entre 200 e 300 A, que as alturas do bocal e da tomada de corrente (Z) sejam iguais (extremidade do bico de contato e bocal esta no mesmo plano) e a altura da tomada de corrente seja de 10 mm para correntes da ordem de 100 A e de 15 mm para corrente de 400 A.

2.4.7 Fonte de Soldagem

Os principais tipos de fontes de soldagem, em corrente contínua, empregados no processo MIG/MAG são (QUITES,1979; AMERICAN WELDING SOCIETY 1991; GUERRA, 1996).

a) Fontes do tipo convencional

- ◆ *Transformador-retificador* (estático) \Rightarrow comumente empregado por produzir corrente contínua e apresentar resposta mais rápida a uma possível alteração no comprimento do arco;
- ◆ *Moto-gerador* (rotativo) \Rightarrow empregado em situações onde não se dispõe de energia elétrica.

b) Fontes eletrônicas

Apresentam excelente dinâmica de resposta, além de possibilitarem diferentes formas de ondas de corrente, excelente repetibilidade e possibilidade de controle remoto. As desvantagens apresentadas por esta categoria de fontes são a complexidade de operação e manutenção e os custos relativamente elevados (DESTAFAN,1995). A seguir relacionar-se-á as duas principais fontes que compõem esta categoria.

- *Fontes tiristorizadas (SCR)* \Rightarrow possuem melhor agilidade no controle da energia entregue ao arco em relação aos transformadores/retificadores convencionais, isto é, os SCR permitem ao mesmo tempo retificação e um controle adequado da abertura/fechamento de circuitos eletrônicos. Apresentam dificuldade na implantação de comando *sinérgico* devido o

inconveniente da freqüência de pulso está na dependência da freqüência da rede (DESTAFAN,1995; GUERRA 1996; DUTRA, 1989).

- *Fontes transistorizadas* ⇒ possibilitam maior facilidade na abertura do arco e um controle muito rápido da corrente contínua, de saída, criada pelo transformador e diodos. Este controle é muito vantajoso na soldagem em corrente pulsada pela velocidade de resposta na subida e descida da onda corrente de pulso (DESTAFAN,1995). Quanto as características construtivas as fontes transistorizadas podem ser classificadas em: *Fontes de energia transistorizada analógica, transistorizada chaveada no primário e transistorizada chaveada no secundário* (DUTRA,1989);

Em decorrência dos avanços tecnológicos, nas últimas décadas, de instrumentos e equipamentos empregados na soldagem, através da pesquisa tem ocorrido apreciável benefício para a indústria permitindo metodologias de controle da transferência por meio de informações fornecidas pelas próprias variáveis de soldagem. O avanço tecnológico proporcionou o desenvolvimento de componentes eletrônicos do estado sólido como o dos diodos que viabilizaram o controle, os tiristores SCR, os transistores IGBT e os sistemas de memória – EPROM, FLASH ROM e outras. O avanço da informática, iniciado nos anos 80, também proporcionou o desenvolvimento e disponibilidade de computadores (hardware) e programas computacionais (software) com velocidade de processamento cada vez maior. A dupla “eletrônica/informática” possibilitou o progresso tecnológico de fontes de soldagem eletrônicas com controle sobre a dinâmica de resposta, como: tensão e velocidade de alimentação do arame em função do tempo; flutuação da corrente Ting, 2000; Altshuller, 1998; Machado, 1996; Dutra, 1995 (apud BARRA, 2003) cita que tal controle viabiliza o melhoramento, o desenvolvimento e a inserção de novas variantes na soldagem MIG/MAG.

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

No processo MIG/MAG existe a possibilidade da utilização de fontes de soldagem retificadoras convencionais ou de fontes eletrônicas. Entretanto, estas fontes podem apresentar duas características estáticas: tensão constante ou curva corrente constante. A característica do arco determinará qual o tipo de fonte a ser utilizada, ou seja, característica estática do tipo tensão constante (ou plana) ou do tipo corrente constante (ou tombante), conforme esquematizado, respectivamente na Figura 2.3a e 2.3b (BARRA, 2003).

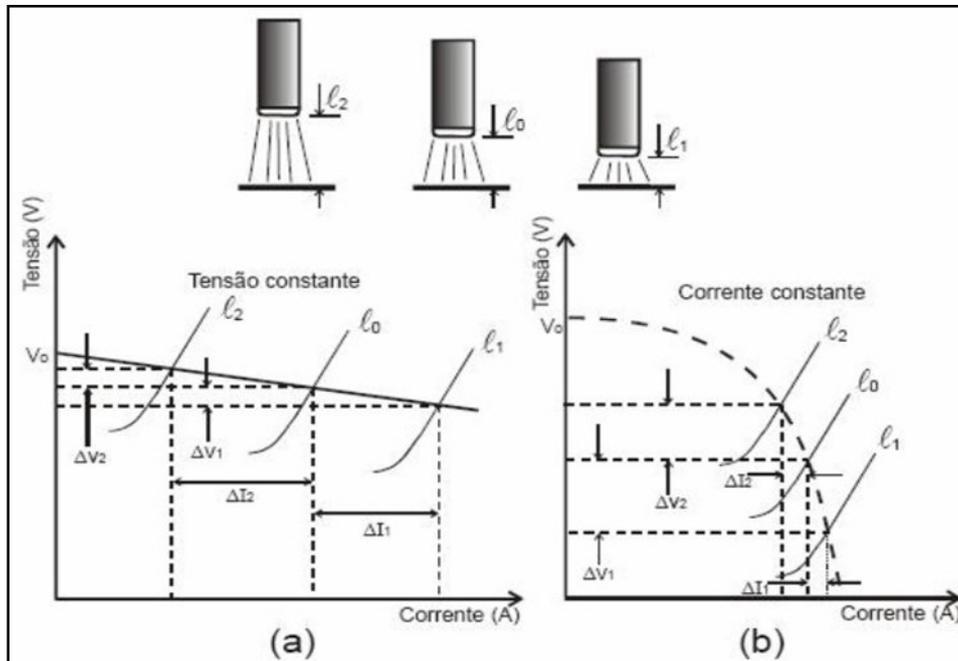
A tensão em vazio V_0 , chamada de tensão de circuito aberto, está situado na ordem de 70 V (com valor máximo normalizado de 100 V). Em regime, este valor decresce para o patamar da tensão de soldagem U_s ou tensão do arco de 15 a 40 V.

A escolha pela aplicação de fontes do tipo tensão constante, Figura 2.1 recai no controle interno da máquina, onde qualquer variação na distância entre o bico de contato e a peça (DBCP) provocará uma mudança no comprimento do arco em relação à condição do equilíbrio (l_0), além de uma alteração na taxa de fusão. Entretanto, a alteração brusca na corrente de soldagem (I_s) tende a manter o Comprimento do arco constante em l_0 e, conseqüentemente, alterando a projeção do arame, sem alteração na velocidade de alimentação do arame.

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

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

Figura 2.1: Característica estática da fonte x curva do arco. a) tensão constante e b) corrente constante



Fonte: (BARRA, 2003)

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

Apenas como informação, para a escolha de fontes de energia convencional com características estáticas do tipo curva tombante ou corrente constante, o controle da manutenção do comprimento L_0 , será através do controle externo, de forma que, qualquer variação de L_0 é detectada através da tensão de soldagem, o que implica em corrente de soldagem com pequenas variações ou aproximadamente constante (SÁBIO, 2007).

2.4.8 Gás de Proteção

O objetivo da aplicação de uma coluna gasosa, no processo MIG/MAG, encapsulando o arame, região do arco e a poça de fusão é o de proteger o metal fundido de reações de oxidação e da formação de nitretos, além de facilitar o estabelecimento e a manutenção do arco voltaico. Adicionalmente à característica

de proteção a coluna gasosa também apresenta influência sobre (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991):

- Modo de transferência;
- Formato do cordão (molhabilidade) e diluição, onde He, CO₂ e Ar apresentam um alto, intermediário e baixo nível de penetração respectivamente;
- Velocidade de soldagem;
- Tendência a formação de mordeduras;
- Ação de limpeza;
- Propriedades mecânicas do metal depositado.

Influências da adição de O₂ ou CO₂ no argônio quando da soldagem em corrente pulsada de ligas inoxidáveis. O principal motivo da adição de gases ativos ao Ar, quando da soldagem de ligas ferrosas, está relacionado a promoção de um grande número de pontos catódicos sobre a poça de fusão, a estabilidade do arco e redução na tendência a formação de mordeduras. A quantidade de O₂ ou CO₂ adicionado dependerá do tipo de transferência metálica selecionada, grau de limpeza da superfície, posição de soldagem ou técnica e composição do metal de base.

A adição de O₂ ao Ar melhora as características de fluidez da poça de fusão, penetração e estabilidade do arco, como já citado anteriormente, além de baixar a corrente de transição. Um aumento progressivo de O₂ produz maior oxidação do metal fundido e até 9% provoca um contínuo aumento na penetração. (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991; GUERRA, 1996), citam que 5% de O₂ na mistura ocasionam uma redução de 10% na taxa de fusão. Quando da soldagem de aço inoxidável em corrente pulsada a AWS recomenda a adição de 1 a 2% de O₂ ao Ar.

Quanto ao CO₂, verifica-se que seu acréscimo ao Ar tende à elevar a corrente de transição, impossibilitando a soldagem por *spray*, quando adicionado acima de 25%, possibilitar uma maior velocidade de soldagem, baixar os custos e aumentar as perdas por salpicos. Teores em torno de 5% favorecem a soldagem em corrente pulsada de aço carbono. Para a soldagem de aço inoxidável, a AWS recomenda a aplicação de uma mistura tripla de Ar, He e CO₂. O fato do CO₂ não ser recomendado na soldagem em corrente pulsada de arames inoxidáveis, reside em

problemas, tanto de ordem metalúrgica como processual, melhor dizendo, uma atmosfera rica em CO₂ apresenta a característica de que o carbono, preenchendo a região do arco, possa ser transferido para a poça de fusão ou extraído desta, o que acarretaria uma carbonização ou descarbonização, respectivamente do metal depositado. Esta característica do carbono ser absorvido ou expelido da região fundida é denominada de *potencial de carbono* (PC). De uma maneira geral, para a soldagem de aços, o carbono tende a se estabilizar em torno de um valor próximo a 0,10%. Caso o arame apresente um teor de carbono inferior a 0,05% haverá uma tendência a carbonização do depósito e por outro lado se o arame de solda apresentar teor maior do que 0,10% o depósito tenderá a ser descarbonizado (FOLKHARD, 1988; AMERICAN WELDING SOCIETY 1991, GUERRA, 1996). De uma maneira geral pode-se dizer que em um depósito de caracter inoxidável um acréscimo no teor de carbono ocasionará um decréscimo na resistência à corrosão, com risco de falha por corrosão sob tensão devido ao fenômeno de sensitização (TORRES, 1995).

Com relação a taxa de fusão, alguns trabalhos, (AMERICAN WELDING SOCIETY 1991; GUERRA, 1996), citam que esta atinge um valor máximo para uma partição em torno de 30% de CO₂ na mistura com Ar.

Pierre (1987); Lyttle e Stapon (1990), sintetizam os fatores que governam a seleção de gases de proteção para o processo MIG/MAG, entre eles estão o material de base a ser soldado, o tipo de transferência metálica desejado, o diâmetro do eletrodo e o tipo e posição de soldagem. De acordo com Pierre (1987), a escolha do gás de proteção para uso em MIG/MAG deve ser baseada em um conhecimento das características de desempenho deste processo e deve considerar o seu efeito na eficiência de proteção, na qualidade do metal de solda depositado, na forma da penetração, na estabilidade do arco, na geometria do cordão de solda e nas propriedades mecânicas da solda.

Os gases de proteção para soldagem MIG/MAG são classificados pelos seus efeitos sobre as características do arco, a transferência metálica e o comportamento da poça fundida (BENNETT, 1989). Duas características de extrema importância em gases de proteção, são o potencial de ionização e a condutividade térmica.

- **Potencial de Ionização:** A formação do plasma é dependente do “potencial de ionização” (a tensão necessária para remover um elétron de um átomo tornando este em um íon) dos gases vizinhos ao arco. Variações nesta

propriedade criam algumas das diferenças distintas de desempenho vistas entre os gases de proteção (LYTTLE e STAPON, 1990).

O acendimento e a estabilidade do arco são grandemente influenciados pelo potencial de ionização dos gases de proteção usados nos processos de soldagem. Um gás com baixo potencial de ionização, como o argônio, pode transformar átomos em íons facilmente. Isto ajuda a manter um arco suave e estável (LYTTLE e STAPON, 1990).

- **Conductividade Térmica:** Diferenças na condutividade térmica dos componentes do gás de proteção também criam diferenças nas características do depósito de solda resultante. Aqueles gases que têm alta condutividade térmica transferem mais calor para a peça, influenciando, assim, a forma e o perfil de penetração da solda. Uma melhor transferência de calor para o metal de base promove uma melhor penetração na junta e maior fluidez da poça de solda. Alta condutividade térmica é crítica, especialmente quando se solda metais altamente condutores como o alumínio e o cobre, isto é, metais que perdem calor rapidamente, geralmente necessitam um arco que transfere mais calor para a peça, para que não haja uma perda de produtividade devido à necessidade de redução da velocidade de soldagem, para que a solda não apresente problemas de falta de fusão e/ou de penetração (LYTTLE e STAPON, 1990).

Para obter-se um gás de proteção que seja adequado para uma aplicação específica, uma mistura de gases geralmente é necessária. Cada gás básico contribui com determinadas propriedades para o desempenho global da mistura (SCOTTI, 1991) em acréscimo os fenômenos de separação (demixing). Um entendimento destas contribuições deverá tornar o processo de seleção mais fácil. As características e efeitos dos principais gases e de suas misturas para o processo MIG/MAG são descritas nos itens a seguir.

a) Argônio (Ar)

O Argônio é um gás inerte com baixo potencial de ionização (15,8 eV), baixo potencial de oxidação e baixa condutividade térmica (PIERRE, 1987; LYTTLE e STAPON, 1990). De acordo com Dillenbeck e Castagno (1987), a relativamente alta densidade do argônio (1,38 em relação ao ar) promove uma efetiva ação protetora

em fluxo de gás moderado, porque o argônio facilmente substitui o ar em torno da solda. Esta é uma característica importante para o processo duplo arame que demanda altas velocidades ou produzem poças de grandes dimensões (SÁBIO, 2007).

Argônio puro é fornecido comercialmente para soldagem MIG/MAG normalmente com 99,95% de pureza e é usado como gás de proteção para soldagem de alumínio, magnésio cobre e suas ligas, ligas de níquel e ligas reativas, tais como, titânio e zircônio. A soldagem desses materiais proporciona um arco estável, boa penetração e cordões suaves. Em seções espessas e em materiais de alta condutividade térmica, como o alumínio, a adição de hélio ao argônio aumenta o calor imposto (BENNETT, 1989 e LUCAS, 1992).

Uma atmosfera rica em Ar (90% ou mais) é necessária para obter transferência goticular (“spray”) convencional e goticular (“spray”) com alta densidade de corrente no processo MIG/MAG. Além disso, altas taxas de deposição com melhor eficiência da deposição do arame (baixos níveis de respingos) são geralmente obtidas quando se usa misturas à base de argônio como gás de proteção para a soldagem de aço (PIERRE, 1987; LYTTLE e STAPON, 1990).

A característica não desoxidante deste gás proporciona soldas livres de inclusões, mas isto leva a uma coluna de arco mais estreita e um arco instável em aços carbono comuns, além de uma pobre molhabilidade. Adicionando O₂ ou CO₂ ao Ar, supera-se esta dificuldade, porque os óxidos formados por estes gases promovem a fixação de cátodos, por isto aumentando a estabilidade do arco. Proteção à base de Ar promove retenção de elementos de liga, devido a este gás ser inerte ou não reativo, melhorando as propriedades mecânicas; bom acendimento e estabilidade do arco em baixas correntes, além de permitir transferência goticular (“spray”) (PIERRE, 1987; BENNETT, 1989; SCOTTI, 1991 e LUCAS, 1992). A combinação da baixa penetração e da menor quantidade de respingos gerados torna o uso do argônio puro desejável somente na soldagem de chapas finas, onde excessiva fusão da chapa e aparência superficial são de principal interesse (DILLENBECK e CASTAGNO, 1987; GROETELAARS, 2005).

b) Dióxido de Carbono (CO₂)

O gás Dióxido de Carbono é o mais barato (comercialmente ele é quatro vezes mais barato que o argônio) e o mais utilizado gás de proteção para soldagem MIG/MAG e eletrodo tubular em aço, sendo largamente usado sozinho em MIG/MAG de aço carbono com transferência subarco ou curto-circuito (DILLENBECK e CASTAGNO, 1987; PIERRE, 1987; LYTTLE e STAPON, 1990). Porém, freqüentemente, o uso do CO₂ gera uma falsa economia, visto que os resultados obtidos com ele podem requerer maiores custos para a limpeza após a soldagem (LYTTLE e STAPON, 1990).

Sua alta condutividade térmica é responsável por uma alta transferência de calor para o metal de BASE (LYTTLE; STAPON, 1990 e SCOTTI, 1991). A tensão do arco é de 1 a 2 V maior em CO₂ (para uma corrente e comprimento de arco equivalente) do que aquela encontrada em misturas a base de argônio, e o calor de entrada é ligeiramente maior, resultando em uma maior fusão do metal de base Norrish (apud PERREIRA, 2001). Um perfil de penetração mais largo e arredondado é obtido quando se compara com o argônio, mas a maior distorção na chapa de base e a maior probabilidade de o arco atravessar a chapa são possíveis problemas (LYTTLE e STAPON, 1990; SCOTTI, 1991; LUCAS, 1992).

Quando a proteção com CO₂ puro é empregada, uma complexa interação de forças (devido a sua baixa condutividade elétrica) ocorre à medida que as gotas metálicas se formam na ponta do arame. A resultante destas forças atua no sentido de retenção da gota na ponta do arame e, desta forma, há um crescimento excessivo e instável das gotas na ponta do eletrodo que são repelidas pelo arco e, então, transferem-se de modo explosivo gerando respingo excessivo. Este efeito também explica a elevação da corrente de transição do modo globular para o modo goticular (“spray”) com o aumento da quantidade de CO₂ em misturas à base de argônio (DILLENBECK e CASTAGNO, 1987; PIERRE, 1987; LYTTLE e STAPON, 1990; LUCAS, 1992; GROETELAARS, 2005).

O uso de arcos curtos e controle de indutância da fonte, obtendo-se desta forma, uma transferência por curto-circuito mais estável, pode melhorar o desempenho do processo. Porém, de acordo com Scotti (1991), sempre pode ocorrer uma quantidade indesejável de respingos. Normalmente, a soldagem com

CO₂ puro não produz transferência gótica (“spray”), devido à elevação da corrente de transição globular/“spray” com o aumento da quantidade de CO₂.

c) Misturas

Misturas de gases de proteção são formuladas para soldagem de tipos específicos de metais. A AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS) teve dois sub-comitês trabalhando para desenvolver especificações para os gases de proteção e recomendações de uso (PIERRE, 1987).

Tradicionalmente, misturas Ar+CO₂+O₂ e Ar+CO₂, ou CO₂ puro têm sido usados em uma ampla variedade de aplicações em soldagem MIG/MAG em aço. A seleção da mistura tem sido freqüentemente baseada na disponibilidade e não nas necessidades específicas do trabalho. Para muitas aplicações, uma mistura específica de Ar+CO₂ pode ser usada muito bem. Misturas de gases de proteção baseadas em Ar+He+CO₂ ou Ar+He+CO₂+O₂ são desejáveis para melhorar a produtividade de soldagem MIG/MAG com alta densidade de corrente (BENNETT, 1989; LYTTLE e STAPON, 1990).

O CO₂ é normalmente usado para dar maior penetração na junta, embora uma mistura de Ar+CO₂ com seu arco mais estável e níveis de corrente controlados possa proporcionar ótima penetração. Quando se necessita de uma grande penetração, os níveis de corrente devem ser aumentados, isto é, o nível de corrente de soldagem, e não o gás, que determina qual quantidade de penetração na junta será obtida, além de favorecer a produtividade da operação. Quantidades pequenas de CO₂ em argônio são mais convenientes para chapas finas enquanto maiores níveis de CO₂ são convenientes para seções grossas (HILTON, 1990; LYTTLE e STAPON, 1990).

Eagar (1990), descreve a influência do gás de proteção na coroa do ponto anódico. Com hélio ou CO₂, o ponto anódico é atacado na superfície inferior da gota pendente na extremidade do eletrodo. O tamanho do ponto não muda significativamente quando a corrente aumenta. Com argônio, o ponto anódico é mais difuso e aumenta visivelmente em tamanho quando a corrente aumenta. Em correntes suficientemente altas, o ponto anódico preenche a gota fundida e começa a escalar o lado da parede cilíndrica do eletrodo, levando-o à fusão e à formação de conicidade na extremidade do eletrodo, que não se desenvolve em proteção de

argônio e CO₂ puros. Sob esta condição, argônio transfere gotas menores que He e CO₂ na mesma corrente, mas ele é menos eficiente em transferência de calor para o eletrodo (GROETELAARS, 2005).

Conseqüentemente, a formação de conicidade reduz a taxa de fusão do eletrodo. O autor conclui que a maior taxa de fusão do metal de base em He, por exemplo, não é devido ao maior potencial de ionização deste gás como é normalmente assumido, mas a uma maior área de contato líquido/sólido no qual o calor é transferido para o eletrodo sólido.

Na soldagem de aço carbono, usa-se misturas de argônio com uma alta porcentagem de CO₂ (acima de 20%) ou O₂ (10-15%) para transferência por curto-circuito. Utilizam-se estas mesmas famílias de gases, mas com uma porcentagem mais baixa do componente oxidante (5-18% CO₂, 2-5% O₂) para transferência goticular (“spray”) convencional e pulsada (Lyttle & Stapon, 1990).

Em aço não é possível realizar soldagem pulsada com transferência controlada usando CO₂ puro, pois o nível de transição para goticular é extremamente alto e, portanto, misturas de CO₂ e O₂ em argônio e hélio são normalmente usadas. Com misturas ricas em argônio, o comportamento da transferência metálica é pouco afetado pela quantidade de gás ativo na mistura (MODENESI e NIXON, 1994).

Misturas de três ou mais gases chegaram ao mercado mais recentemente. Estas oferecem melhorias especializadas e, às vezes, mínimas. São geralmente selecionadas pela versatilidade que elas podem proporcionar do ponto de vista da transferência metálica ou pela maior qualidade da solda que elas podem oferecer. Para aplicações críticas especiais, tais como soldagem de aços de alta resistência fora de posição para aplicações estruturais, estes gases podem vir a ser úteis e econômicos. Por exemplo, a combinação de três gases tais como Ar+CO₂+O₂ ou Ar+He+CO₂ pode produzir ótimas características de desempenho em várias aplicações de soldagem. Hilton (1990), observou que uma mistura contendo cerca de 12% CO₂ e 2% O₂ produz uma condição de transferência goticular muito estável, tornando esta mistura particularmente conveniente para uso em aplicações robóticas ou pulsadas (GROETELAARS, 2005).

d) Custo Comparativo entre os Gases Ar e CO₂.

O custo direto do Ar é várias vezes maior que o do CO₂. Melhoramentos indiretos, porém, reduzem esta diferença. Gases à base de Ar produzem menos respingos que CO₂, reduzindo a necessidade de manutenção do equipamento e limpeza da solda. Eles reduzem a geração de fumos, porque a oxidação é menor. O contorno do cordão é mais plano, reduzindo ou eliminando operações de acabamento. As propriedades mecânicas do metal de solda são melhores e o menor índice de oxidação proporciona o uso de arames de soldagem mais baratos (GROETELAARS, 2005).

De todos os gases inertes, o argônio tem sido mais extensivamente usado em soldagens com proteção gasosa por causa de sua maior disponibilidade. O ar atmosférico contém aproximadamente 0,94% de argônio por volume. Embora isto pareça pouco, é preciso lembrar que tirando os 21% de oxigênio e os 78% de nitrogênio, todos os outros gases juntos correspondem a 0,04% da atmosfera (DILLENBECK e CASTAGNO, 1987).

2.5 MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA

O processo de soldagem MIG/MAG pode operar com três tipos distintos de transferência metálica, ou seja, *curto-circuito*, *globular* e *spray*. Tendo como base o objetivo desta Dissertação será feita uma descrição mais detalhada apenas do modo de transferência por *spray* e de suas variantes.

De uma maneira geral o modo transferência presente em uma determinada condição de soldagem dependerá de (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991):

- Tipo e magnitude da corrente empregada;
- Diâmetro do eletrodo;
- Composição química do eletrodo;
- Projeção do eletrodo em relação ao bico de contato “**stick-out**”;
- Tipo de gás de proteção utilizado (inerte ou ativo).

Transferência metálica tipo *spray* (aerossol)

Este modo de transferência é normalmente obtido quando da utilização de uma mistura gasosa de caráter inerte, isto é, baixo teor CO₂. Nesta condição é possível a obtenção da transferência de finíssimas gotículas metálicas sem a presença de salpicos e com um arco bastante estável. O nível de corrente empregado à obtenção deste modo transferência, denominada de *corrente de transição*, apresenta-se acima do valor normalmente empregado na transferência *globular*. A corrente de transição apresenta uma dependência com a tensão superficial da gota metálica e, em contrapartida, uma relação inversa com o diâmetro do arame e numa menor escala com o *stick-out*. Devido ao patamar de corrente e tensão, superior ao empregado na transferência *globular*, há um aumento na penetração e taxa de deposição.

A transferência por *spray*, dependendo do nível de corrente, pode apresentar-se na forma *axial* ou *rotativa* (QUITES, 1979). Na forma *axial*, as gotas são transferidas num jato de formato cônico e concêntrico com o eixo de simetria do arame. Na transferência *rotativa*, o globo metálico encontra-se deslocado em relação ao eixo de simetria do arame e gira dando um efeito rotacional ao jato de gotículas metálicas.

Corrente pulsada

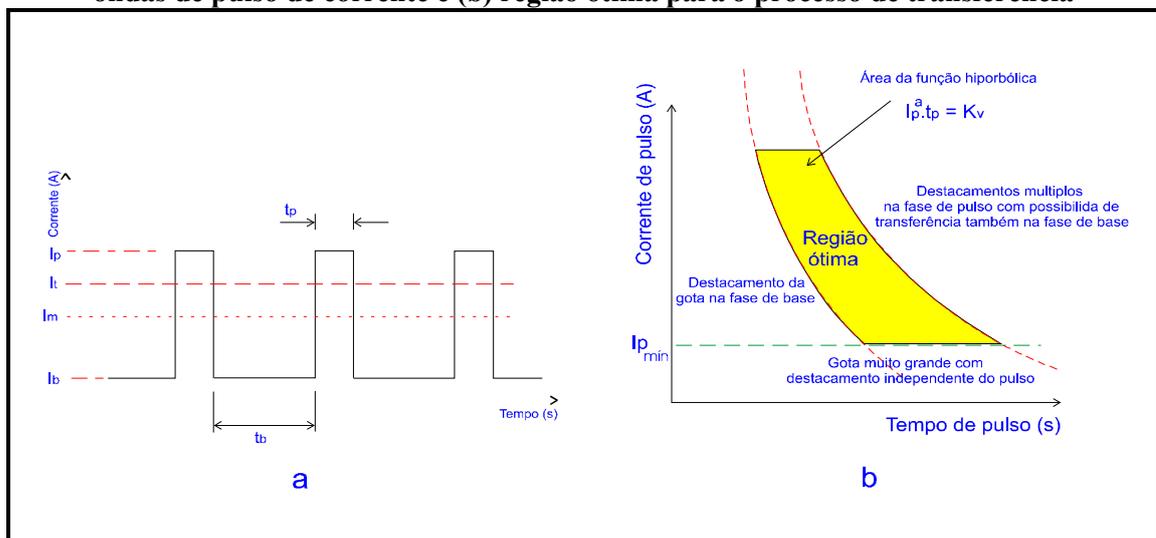
Este modo de transferência, considerado um variante do *spray*, apresenta a característica de que as gotas metálicas são transferidas por meio de pulsos de corrente, com frequência e amplitude pré-estabelecidas. As principais vantagens desta variante são: (a) possibilidade de soldagem em todas as posições; (b) transferência por *spray* com corrente média igual ou inferior a corrente de transição; (c) aumento na eficiência de deposição devido a redução no nível de salpico e (d) menor sensibilidade a mudanças no *stick-out* na soldagem com arame tubular em relação ao arame sólido.

Na corrente pulsada a transferência metálica é obtida com uma baixa corrente média, em virtude da aplicação de altas forças eletromagnéticas em curtíssimos espaços de tempo, geradas pela superposição da corrente de pulso acima do valor de transição. Como resultado, a gota metálica é destacada e projetada em direção a poça. A figura 2.3a apresenta as características da corrente pulsada. Observa-se que a corrente de soldagem varia em dois patamares, corrente de base (I_b) e corrente de pulso (I_p), onde o nível mais baixo de corrente, I_b , objetiva a manutenção

do arco entre os pulsos de corrente e o nível mais alto, I_p , objetiva fundir, destacar e projetar a gota metálica. Para que o processo de transferência seja estável apenas uma gota deverá ser transferida a cada pulso de corrente, melhor dizendo, para um determinado material haverá uma relação “região” ótima entre a velocidade de alimentação do arame, intensidade da corrente e tempo de pulso (vide figura 2.2). Uma vez que as gotas metálicas adquirem considerável aceleração em direção a poça, a operação de soldagem poderá ser executada em todas as posições. Além disso, a baixa corrente média, característica desta variante, possibilita a soldagem de chapas finas.

Os avanços no campo da eletrônica e da informática permitiram o desenvolvimento de fontes mais modernas, incorporando *softwares* que possibilitam um auto-controle do processo de pulsação, baseando-se apenas na mistura gasosa e diâmetro e material do arame empregados. Esta característica de controle recebe a denominação de “sinérgico”, isto é, harmonia ou cooperação entre os vários fatores envolvidos no processo de transferência metálica. Segundo o IIW define-se MIG/MAG sinérgico como “Controle que abrange qualquer sistema (aberto ou fechado) no qual um parâmetro de pulso de corrente significante (ou a velocidade de alimentação do arame correspondente) é compensada de forma tal que uma condição de equilíbrio é mantida por uma faixa de velocidades de alimentação de arame (ou níveis de corrente média)” (NORRISH,1995).

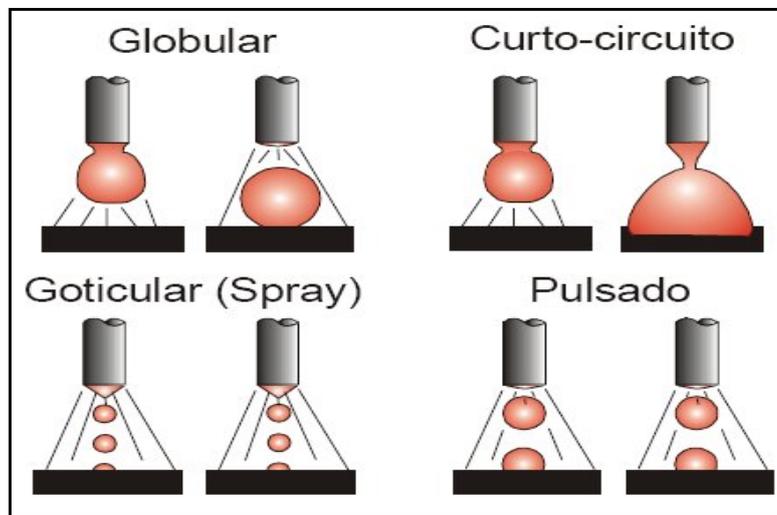
Figura 2.2: Representação genérica do processo de pulsação, onde (a) características das ondas de pulso de corrente e (b) região ótima para o processo de transferência



Fonte: Adaptado de (GUERRA et al., 1996).

Segundo Modenesi (2006) e Marques (2006), pode-se conceituar transferência metálica como sendo o transporte de gotas fundidas de metal da ponta de um eletrodo consumível para a poção de fusão. A classificação dos modos de transferências se faz levando-se em consideração o tamanho da gota, e as características como é transferida. Assim pode-se classificar os modos de transferência metálica como: curto-circuito, globular e spray (aerossol), apresentados esquematicamente na Figura 2.3.

Figura 2.3: Representação esquemática dos principais modos de transferência



Fonte: (BARRA, 2003).

Para Miranda (2002), uma forma prática de controlar diretamente a transferência metálica consiste em empregar sensores que identifiquem a transferência da gota e reajustar os parâmetros de soldagem (caso necessário) para melhorar a transferência metálica e, conseqüentemente, otimizar o processo. Entretanto, isto nem sempre é fácil de ser realizado em virtude da complexidade dos fenômenos envolvidos, o que dificulta a identificação da transferência metálica.

A Tabela 2 apresenta a classificação completa dos tipos de transferência metálica MIG/MAG. A transferência metálica pode ser classificada, segundo o IIW (International Institute of Welding) por um sistema composto por três grupos principais: transferência por vôo livre, transferência por contato e transferência guiada por escória, mas, em geral, três tipos são geralmente citados nas publicações científicas, como sendo: curto-circuito, globular e goticular (GROETELAARS, 2005; VILARINHO, 2000; MACHADO, 1996; LIU e SIEWERT, 1989).

Tabela 2: Classificação de transferência metálica pelo IIW.

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

Fonte: Arquivo Pessoal.

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

2.6 PARÂMETROS DE SOLDAGEM

Na soldagem MIG/MAG a penetração da solda está diretamente ligada à pressão que o arco exerce sobre a poça fundida. A pressão do arco tem influência sobre a transferência metálica, a penetração da solda e o formato do cordão. A pressão do arco é composta pelo jato de gás de plasma, pela componente axial da força de Lorents e pela inércia das gotas que se chocam com a poça de fusão. É

ainda, responsável pela compressão da superfície líquida abrindo um canal que permite ao calor fluir para o metal de base (MOTTA, 2002).

A correta utilização do processo dependerá do perfeito entendimento como as diversas variáveis envolvidas na operação de soldagem podem influenciar na estabilidade do arco e na qualidade final do metal depositado. As variáveis mais importantes do processo e sua influência no cordão de solda, conforme (BARRA, 2003), são:

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

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

2.6.1 Tensão de soldagem (Us)

A tensão de soldagem influencia no insumo de calor e apresenta uma relação direta com o comprimento do arco e a largura do arco. De uma maneira geral, tensões baixas favorecem a transferência por curto-circuito.

Para uma mesma intensidade de corrente, provocará cordões de solda mais estreitos e maior penetração. O oposto ocorrendo para tensões mais altas, além da ocorrência de salpicos grosseiros. Valores elevados de tensão podem proporcionar o aparecimento de salpicos, mordedura e porosidade e já para valores baixos de tensão podem propiciar o aparecimento de sobreposição de metal na margem do cordão de solda e porosidade (SÁBIO, 2007).

2.6.2 Corrente de soldagem (Is)

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

A corrente de soldagem pode alterar o modo de transferência metálica. Para a soldagem com o processo MAG-CW, usou-se basicamente corrente contínua CC (+), na qual o pólo positivo está ligado ao arame-eletrodo. Para o processo duplo arame, a corrente de soldagem é dependente direta da velocidade de alimentação do arame-eletrodo no processo e pode variar de acordo com as velocidades de alimentação do mesmo. É possível controlar a corrente e a tensão no arco mantendo ou não o consumo.

2.6.3 Velocidade de soldagem (V_s)

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

O processo MIG/MAG soldando em altas velocidades proporciona descontinuidades nos cordões de solda ocasionadas por uma intensa força do arco voltaico, que se origina de altas correntes de soldagem (MICHIE, 1999). Um aumento na velocidade de soldagem proporciona uma diminuição na largura do cordão e um aumento na penetração, num primeiro instante e diminuição desta em valores mais altos. Em velocidades muito elevadas poderá ocorrer o surgimento de trincas de solidificação e de mordeduras (geometria irregular do cordão). Mantidos os outros parâmetros fixos, o incremento na velocidade de soldagem acarretará em um nível de distorção menor, tamanho da ZTA e modificação na microestrutura do metal depositado.

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

2.6.4 Velocidade de alimentação

A soldagem com o processo duplo arame emprega dois arames, logo há a possibilidade de variar a velocidade de alimentação dos dois arames, pois o processo trabalha independentemente com dois cabeçotes alimentadores de arame. Uma das grandes vantagens do MIG/MAG duplo arame com potencial isolado é justamente a possibilidade de obter maiores variações de velocidade de alimentação para cada arame, por causa da maior capacidade de ajustes de parâmetros para cada arame (GROETELAARS, 2005). Segundo esse autor, para uma aplicação em chapa fina a opção empurrando parece mais atrativa.

2.6.5 Ângulo da tocha

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

2.7 CARACTERÍSTICAS ECONÔMICAS

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

As características econômicas do arame consumível são compostas através do consumo, da produção e dos rendimentos de deposição. Para Mota (1998) um dos fatores de grande importância na seleção de um arame consumível ou eletrodo para soldagem é o seu desempenho econômico. No entanto, dentre as variáveis capazes de interferir ou influenciar no desempenho do consumível destacam-se: a

composição química; o modo de transferência metálica; a natureza e o valor da corrente e a polaridade; os valores da tensão e do comprimento da distância do eletrodo (“stick-out”), além das perdas de metal por salpicagem. Deve-se considerar, ainda, o diâmetro do arame consumível, o tipo de proteção e a fonte de energia, bem como, as condutividades elétricas e térmicas do consumível que, juntamente com as demais condições de soldagem, as quais interferem de maneira bastante complexa no balanço energético do arco voltaico, responsável pela fusão do arame-eletrodo.

2.8 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS (END)

Existe um grande número de métodos de ensaio não destrutivo (END), vários dos quais têm aplicação na inspeção de juntas e equipamentos soldados. Já que são realizados em algumas peças e não interferem ou prejudicam o uso ou o processamento posterior das mesmas. Em geral, um END não mede diretamente a propriedade de interesse, sendo o valor desta obtido por alguma correlação entre essa e a propriedade realmente medida. Assim, por exemplo, na inspeção por ultrassom, usualmente se mede a intensidade e tempo de retorno da onda sonora refletida pela descontinuidade, sendo esta informação usada para localizar e dimensionar esta descontinuidade. Assim, a confiabilidade de um END depende da unicidade e precisão da correlação entre a propriedade medida e a de interesse (MODENESI, 2001).

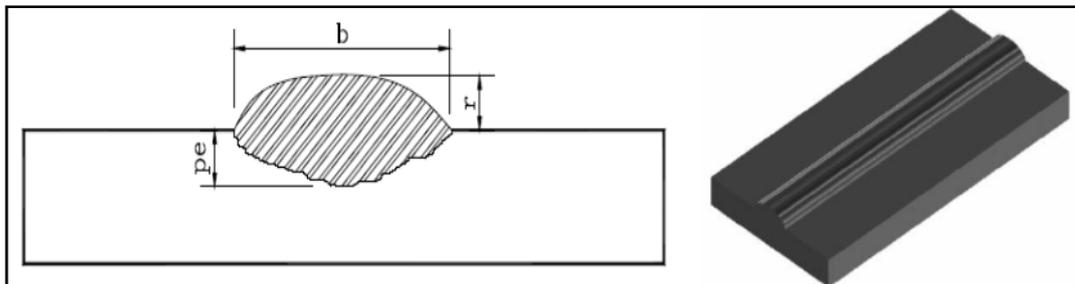
2.8.1 Ensaio de Sanidade do cordão de solda

O ensaio de Sanidade do cordão de solda ou ensaio visual é o método mais utilizado, precede qualquer outro tipo de ensaio. É usado na inspeção de superfícies externas para a determinação de tamanho, forma, acabamento, existência de trincas, poros etc, que possam ser observados ao longo do cordão de solda. Pode ser feito a olho nu ou com o uso de instrumentos como microscópios, lupas, espelhos etc. Além disso, instrumentos como réguas e gabaritos são comumente utilizados (MENDONÇA, 2007).

2.9 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

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

Figura 2.4: Esquema do perfil geométrico do cordão de solda



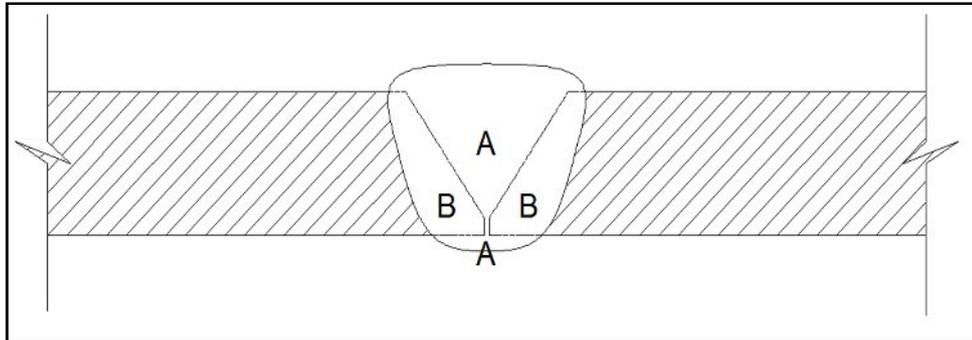
Fonte: (SÁBIO, 2007).

As medidas de largura (b), reforço (r) e penetração (pe), definem tais características geométricas do cordão de solda depositado na superfície da placa metálica. Portanto, a largura do cordão de solda tem relação diretamente proporcional a corrente de soldagem, a tensão do arco elétrico e ao diâmetro do consumível, porém, uma relação inversamente proporcional com a velocidade de soldagem (FARIAS, 1993). O reforço da solda tem relação direta com a corrente de soldagem e inversa com a tensão, com o diâmetro do consumível e com a velocidade de soldagem. Entretanto, alguns estudos com eletrodos revestidos, comprovam que a penetração da solda no metal de base tem relação inversa com a velocidade de soldagem, com o diâmetro do arame eletrodo e direta com a corrente de soldagem (FARIAS, 1993).

De acordo com Figueiredo (2005), a composição química final da zona fundida depende da intensidade nas interações das composições químicas do metal de base e da adição e da participação relativa destes na formação da zona fundida. Esta participação relativa é conhecida como “coeficiente de diluição” ou, simplesmente, como “diluição” (δ), que pode ser expressa pela Equação 1, como definida abaixo:

$$\delta = \frac{B}{B + A} \cdot 100\% \quad (1)$$

Figura 2.5: Esquema representativo da diluição medida na seção transversal da solda



Fonte: (FIGUEIREDO, 2005).

A diluição pode ser medida em macrografias da seção transversal de soldas, como mostra a Figura 3.0, seu valor pode variar entre 100% (soldas sem metal de adição) e 0% (brasagem).

Em Figueiredo (2005), o controle da diluição é importante na soldagem de metais dissimilares, na deposição de revestimentos especiais sobre uma superfície metálica, na soldagem de metais de composição química desconhecida, caso muito comum em soldagem de manutenção e na soldagem de materiais que tenham altos teores de elementos prejudiciais à zona fundida, como o carbono e o enxofre.

2.9.1 Influência dos elementos de ligas.

Os aços-liga são os que possuem outros elementos de liga, não se considerando como tais os, elementos adicionados para melhorar sua usinabilidade, de acordo com ABNT. A soma de todos esses elementos, inclusive carbono, silício, manganês, fósforo e enxofre não devem ultrapassar 6%. No caso do silício, manganês e alumínio, sempre presentes nos aços-carbono, os aços serão considerados ligados quando seus teores ultrapassarem 0,6%, 1,65% e 0,1% respectivamente. (CHIAVERINI, 1977 E BROWN, 2000).

Uma característica muito importante para este tipo de material de construção é a soldabilidade, já que a soldagem de peças estruturais é comum. Por serem soldados sem alteração da estrutura os aços-carbono comuns também satisfazem plenamente esse requisito. De acordo com Modenesi (2004) e Brandi (1995), uma

das mais conhecidas é o efeito da composição química expressa em termos de fórmulas de carbono-equivalente, Equação 2, pode ser observado que quanto maior for o carbono equivalente, menor será a soldabilidade do aço, e mais lentamente deverá ser o efeito do resfriamento. Em Kou (2002), as temperaturas de pré-aquecimento e interpasses deverão ser maiores e o controle do hidrogênio também deverá ser maior.

$$\%C_{eq} = \% \left(C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \right) \quad (2)$$

2.9.2 Aços Carbono e de Baixa Liga

Aços carbono são ligas de ferro e carbono (até 2%C) contendo ainda, como residuais (de matérias primas ou do processo de fabricação), outros elementos como Mn, Si, S e P. Aços de baixo carbono têm um teor de carbono inferior a 0,15% a 0,3%C. Aços de baixa liga têm uma quantidade total de liga inferior a 2% (SMALLMAN, 1999; MODENESI, 2001 e FORTES, 2004).

Aços de baixo carbono o teor varia entre 0,10 e 0,25%C, o Manganês entre 0,25 e 1,5%Mn, o fósforo máximo é de 0,4%P e de enxofre de 0,5%S, sendo considerados elementos desoxidantes o Mn e o Si (SMALLMAN, 1999 e BROWN, 2000). Estes são os aços mais comumente usados em fabricação e construção. São materiais soldáveis por qualquer processo a arco, gás ou resistência. Os aços resistentes ao tempo são aços de baixa liga que podem ser expostos ao ambiente sem serem pintados, a sua resistência a corrosão é quatro vezes a de aços estruturais ao carbono, e são especificados pela ASTM A242. (MODENESI, 2001 e GOTTARDO, 2006).

CAPITULO III

3 MATERIAIS E METODOS

Este capítulo apresenta as especificações e as descrições dos materiais, equipamentos e métodos utilizados para o desenvolvimento e análise deste trabalho.

Além disso, as análises teóricas e o processamento das informações devem-se dispor principalmente de: literatura técnica, software e equipamentos especializados para o desenvolvimento do trabalho. No entanto, buscou-se trabalhar com metodologia simples, porém eficazes tentando, desta maneira, aperfeiçoar os procedimentos experimentais para uma boa realização e avaliação desta investigação. Neste sentido, foram utilizados os laboratórios do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará contendo materiais e equipamentos necessários para realização e desenvolvimento desta dissertação.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Para o desenvolvimento dos experimentos foi montada uma bancada de soldagem (Figura 3.1) que possibilitasse a transferência metálica por curto-circuito e controle dos diversos parâmetros utilizados. Essa bancada foi composta por uma fonte de soldagem com respectivo cabeçote alimentador e um cabeçote alimentador independente da fonte, tocha de soldagem, mesa de soldagem, sistema de deslocamento e demais acessórios.

Figura 3.1: Bancada de Soldagem

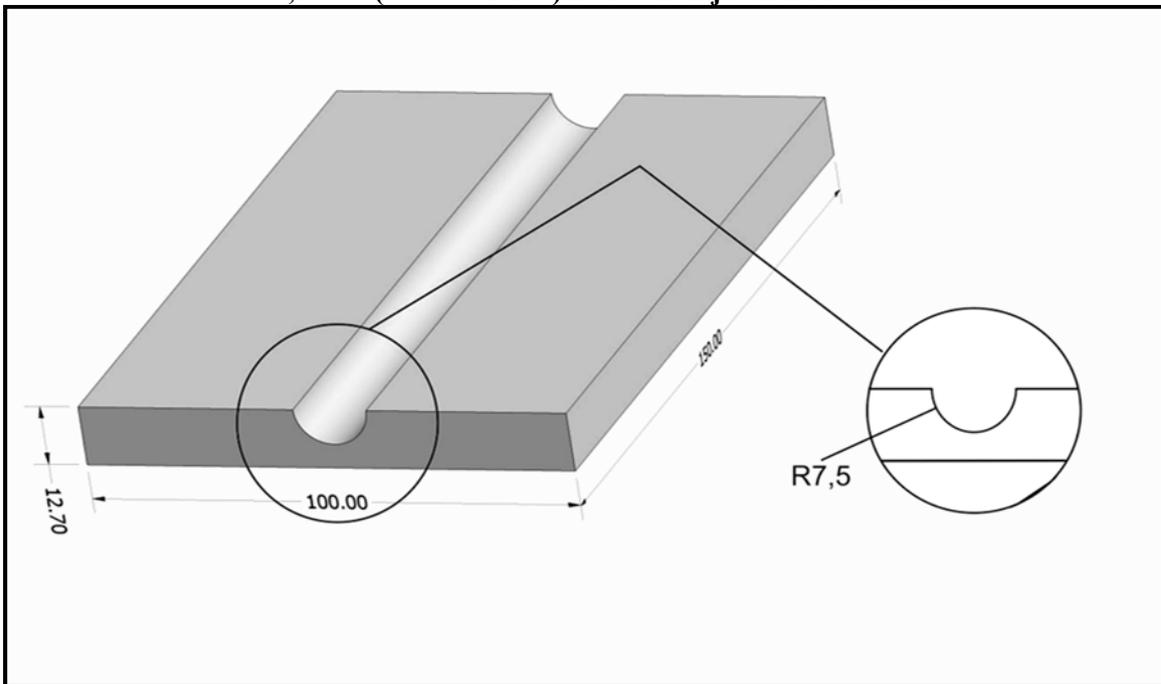


Fonte: Arquivo Pessoal

3.1.1 Metal de Base

Como metal de base, utilizou-se o aço carbono do tipo ASTM 1020. Pertence à classe dos aços com baixo teor de carbono e é utilizado em componentes estruturais onde, em princípio, não se exigem grandes requisitos de propriedades mecânicas. O material de base empregado foi na forma de barra chata com dimensões de 100 x 150 x 12,7 mm (largura x comprimento x espessura), com a realização das soldas paralelas ao sentido de laminação do material, com um chanfro em 'U', central a chapa, onde foi depositado o cordão. A Figura 3.2 mostra o esquema representativo do corpo de prova com detalhe do chanfro.

Figura 3.2: Esquema representativo da peça nas dimensões 12,7 mm, 100 mm, 150 mm e 7,5 mm (E x L x C e R) a formar a junta a ser soldada



Fonte: Arquivo Pessoal.

A análise química do metal de base para o aço AISI-SAE 1020, apresentou as seguintes especificações conforme tabela abaixo.

Tabela 3: Composição química padrão para o aço ao carbono AISI-SAE 1020.

Número SAE	C	Mn	P, max	S,max	Correspondente Número Aisi
1020	0,18 – 0,23	0,30 – 0,60	0,04	0,05	1020

Fonte: (LOBATO, 2010).

3.1.2 Material de Adição

Para o desenvolvimento deste trabalho utilizou-se, como metal de adição, dois arames da classe AWS E70S-6, sendo o arame energizado de diâmetro 1,2 mm e o arame frio de 1,0 mm, conforme a classificação da norma AWS 5.18. A seleção deste tipo de consumível está relacionada às suas características de elevada

produção, facilidade de manutenção da estabilidade do arco e, em especial, a sua adequação experimental ao processo de soldagem com alimentação de arame frio. Além disso, trata-se de arames largamente utilizado em diversas aplicações no setor metal-mecânica na soldagem de aços baixo carbono.

Esse arame sólido contém uma camada fina de cobre na sua superfície, que tem a função de proteger o arame da corrosão ou oxidação. O processo foi realizado em um único passe com o intuito de preenchimento total do chanfro. Este arame é recomendado para soldagem tanto em passe único como em múltiplos passes, em CC+. Na tabela 4 esta apresentada a composição química do arame AWS ER70S-6.

Tabela 4: Composição química do arame maciço ER70S-6, segundo AWS 5.18-2001.

Classificação AWS	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Ti	Zr	Al
ER70S-6	0,07 a 0,15	0,80 a 1,15	1,40 a 1,85	0,025	0,035	C	C	C	C	0,025	0,035	0,035	0,05 A 0,15

Fonte: Arquivo Pessoal.

Nota: Os valores simples indicados correspondem a percentagens máximas.

^aA máxima percentagem de cobre nas varetas ou eletrodos, devida ao total resultante da soma de qualquer recobrimento de cobre com o teor residual de cobre no aço, deve ser 0,50%, (apud LOBATO, 2010).

3.1.3 Gases de Proteção

Foram utilizados como proteção gasosa neste trabalho o dióxido de carbono (CO₂) comercialmente puro e uma mistura de gases Ar + 25%CO₂. Os quais foram selecionados por ser bastante utilizado na indústria de transformação metal-mecânica, na soldagem de aços carbono e de baixa liga pelo processo de soldagem GMAW. Seus fatores determinantes são o seu baixo custo em relação a outros gases de proteção e suas características físico-químicas que proporcionam vantagens operacionais em aplicações ligadas à soldagem de estruturas em aço.

A utilização do gás CO₂ nos processos de soldagem estudados foi elaborada a partir da análise de utilização da indústria local.

Além disso, o outro gás utilizado Ar+25%CO₂ nos processos de soldagem foi concebida para uma análise comparativa em relação ao CO₂.

3.1.4 Bancada de Soldagem

A bancada para o desenvolvimento dos ensaios para a realização desta dissertação foi constituída pelos seguintes equipamentos operacionais:

- Uma fonte de soldagem;
- Dois sistemas de alimentação de arame independentes;
- Uma pistola de soldagem;
- Uma balança digital;
- Um sistema de medição das velocidades dos arames;
- Programas computacionais;
- Equipamentos auxiliares de metalografia;
- Equipamentos auxiliar de velocidade de alimentação de arame frio;
- Sistema de Aquisição Óptico Computadorizado

Os equipamentos utilizados são descritos a seguir:

3.1.4.1 Fonte de Soldagem – EUTETIC (MIG ARC 3200/ LCAM)

A fonte de soldagem utilizada é de multi-processos, Figura 3.3, optando-se pelo processo GMAW, conforme empregado na linha de produção, no modo ajuste da fonte em tensão constante, natureza de corrente e polaridade CC+.

Tipo: Fonte eletrônica inversora chaveada no secundário

Modelo: MIGARC 3200.

Fabricante: Eutetic.

Tensão de alimentação: 3x 220, 380, ou 440 V.

Tensão em vazio: 50 V.

Corrente nominal: 220A 100% FC

Corrente Máxima: 400A

Compensação de parâmetros: $\pm 10\%$ de variação da rede elétrica.

Figura3.3: Detalhe da fonte eletrônica inversora, MIGARC 3200



Fonte: Arquivo Pessoal.

3.1.4.2 Sistema de Alimentação de Arame Eletrodo

O sistema de alimentação de arame eletrodo é composto por um cabeçote auxilia máquina que fica na parte interna, Figura 3.4 mostra p cabeçote alimentador.

Modelo: Eutetic

Fabricante: Eutétic

Faixa de velocidade do arame: 1,5 – 20 m/min.

Sistema de 02 roldanas.

Alimentação elétrica: 42 VCA.

Figura 3.4: Cabeçote de alimentação de arame



Fonte: LCAM.

3.1.4.3 Sistema de Alimentação de Arame Frio

O sistema de alimentação de arame frio é composto por um cabeçote similar ao alimentador de arame eletrodo, Figura 3.5, sem a energização do arame.

Modelo: MEF 30.

Fabricante: ESAB.

Faixa de velocidade do arame: 1,5 – 22 m/min.

Sistema de 04 roldanas.

Alimentação elétrica: 42 VCA.

Figura 3.5: Cabeçote de alimentação de arame frio



Fonte: Estaleiro Rio Maguari.

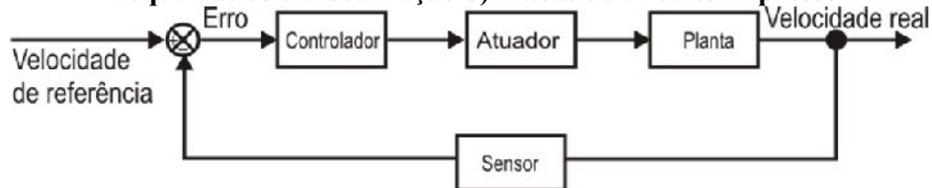
3.1.4.4 Microcontrolador de velocidade do arame frio

Na literatura especializada um sistema a malha fechada é definido como “Os sistemas de controle com retroação são freqüentemente referidos como sistemas de controle a malha fechada. Na prática, os termos controle com retroação e controle a malha fechada são usados indistintamente. Num sistema de controle a malha fechada, o sinal atuante de erro, que é a diferença entre o sinal de entrada e o sinal de retroação (que pode ser o próprio sinal de saída ou uma função do sinal de saída e de suas derivadas e/ou integrais), excita o controlador de modo a reduzir o erro e trazer o valor do sinal de saída para o valor desejado. A expressão controle a malha fechada acarreta sempre o uso da retroação a fim de reduzir o erro do sistema” (OGATA, 2000 e NISE, 2002).

O sistema de controle foi desenvolvido para manter a velocidade de alimentação do arame frio constante. A velocidade do arame, tracionado pelo rolete e impulsionado pelo motor CC, é amostrada por um sensor de velocidade que gera um sinal do tipo onda quadrada de freqüência variável. Este sinal após seu condicionamento é entregue a um microcontrolador, localizado na placa wire, conforme mostra a Figura 3.6, responsável pela análise do mesmo através de um algoritmo de controle. Assim, o microcontrolador faz a análise desse sinal através de

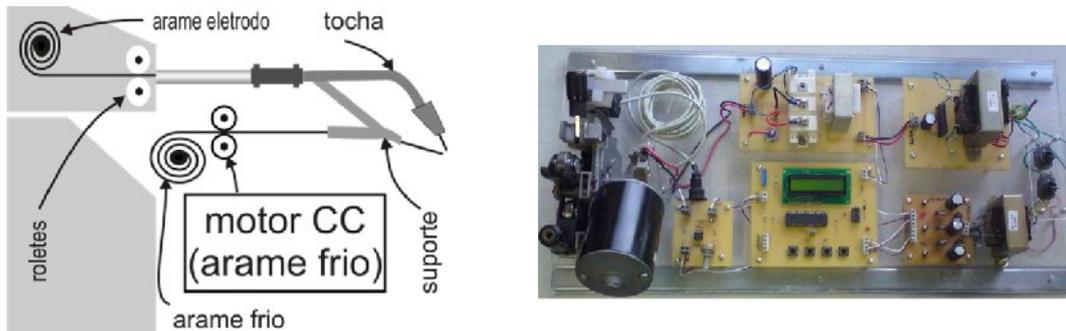
um algoritmo de controle e, se existir erro, modifica instantaneamente o sinal PWM (modulação por largura de pulso) para que o atuador possa manter a velocidade de alimentação do arame próxima do ponto de operação selecionado, otimizando as condições operacionais de soldagem, a estabilidade de arco e a qualidade do metal de solda.

Figura 3.6 B: Sistema de alimentação de arame frio em malha fechada – Placa Wire, a) Esquemático da localização b) Placas de circuito impresso



Fonte: Arquivo Pessoal.

Figura 3.6 A: Diagrama de blocos do sistema



Fonte: Edson 2010.

3.1.4.5 Pistola de Soldagem com Suporte Auxiliar de Alimentação de Arame Frio

A pistola de soldagem utilizada foi do tipo “push”, conforme especificações e características apresentadas a seguir. Na Figura 3.7, apresenta-se o detalhe da pistola com o sistema auxiliar de alimentação de arame frio acoplado.

Fabricante: Oximig.

Modelo: Tocha PLUS 500.

Fonte: Arquivo Pessoal.

3.1.4.6 Balança Digital

A balança digital foi utilizada para a pesagem dos corpos de prova, antes e após a deposição do metal de solda, apresenta as seguintes especificações e características a seguir.

Modelo: KB 30.000.

Fabricante: KRATOS – CAS Balanças eletrônicas LTDA.

Valor máximo: 30 Kg.

Valor mínimo: 125 g.

Divisão: 5 g.

Erro: $\pm 0,1g$.

Figura 3.9: Balança Eletrônica Digital – LABGAS

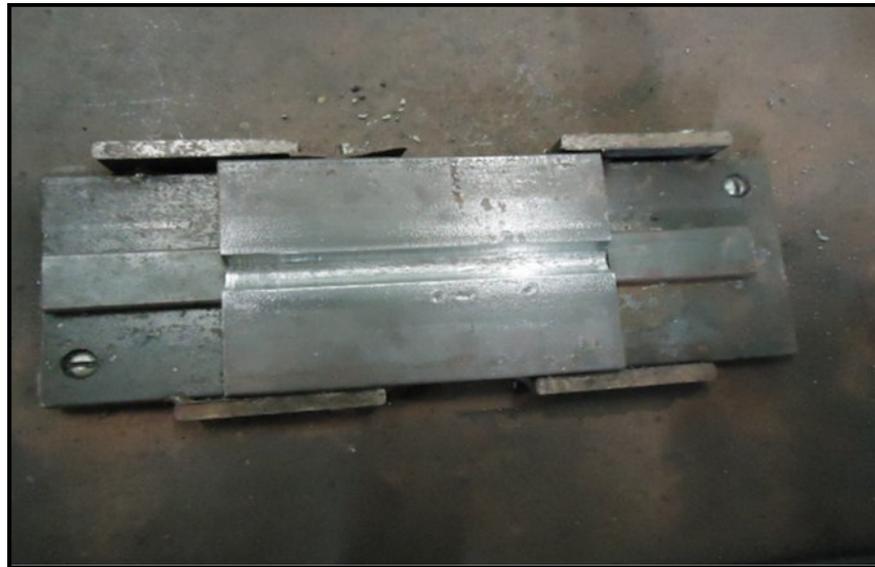


Fonte: Arquivo Pessoal.

3.1.4.7 Suporte de Atracação

Suporte de atracação, Figura 3.10, para evitar distorções na junta soldada. Em ensaios preliminares, sem o uso deste dispositivo, foram observadas grandes distorções nos corpos de prova.

Figura 3.10: Suporte de atracação



Fonte: Arquivo Pessoal.

3.1.4.8 Sistema de Aquisição e Processamento de Dados

Equipamentos utilizados para aquisição e aferição de dados em tempo real, tais como, velocidade de soldagem e velocidade de alimentação de arame.

a) Programas Computacionais

Matlab

Programa para análise gráfica - empregado na geração de gráficos.

AutoCAD 2009 – Fabricante Microsoft. Programa comercial de computação gráfica usado na modelagem de sólidos 3D e na medição da geometria das amostras soldadas.

B) Programas de medição de tempo

Cronometro- utilizado para medir o tempo e curto espaço

Régua – utilizado para medir a distância em 150 mm

3.2. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA METALOGRAFIA

3.2.1 Serra de Fita- FM18

Máquina automática de serrar, Figura 3.10.1, responsável pelo corte dos corpos de prova.

Modelo: FM18

Fabricante: FRANHO - Máquinas e Equipamentos S/A

Figura 3.10.1: Máquina automática de serrar (serra em fita)



Fonte: (Laboratório de Metalografia/UFPA).

3.2.2 Embutimento dos Corpos de Prova

Realizado após o corte, os corpos de não precisaram ser embutidos, pois os corpos de provas tinham um bom comprimento 45mm para realizar os teste de microdureza e micrografia.

3.2.3 Lixadeira/Politriz

Utilizada para lixar e polir os corpos de prova após o corte, Figura 3.10.2

Modelo: DPU-10

Fabricante: Panambra S/A

Figura 3.10.2: Máquina politriz



Fonte: Arquivo Pessoal.

3.3 CALIBRAÇÃO DAS VARIÁVEIS ENVOLVIDAS NA SOLDAGEM

3.3.1 Velocidade de Alimentação do Arame

Para fazer a aferição da velocidade de alimentação do arame, foram tomadas algumas medidas de comprimento de arame impulsionado para fora da tocha (sem abertura do arco) em diferentes velocidades de alimentação ajustadas em seu respectivo tempo. Entretanto, para se ter certeza de que esse procedimento daria valores de velocidades de alimentação com uma pequena margem de erro, propôs-se monitorar a velocidade em uma fonte durante o processo de calibração. Para monitorar, foi utilizado um cronômetro, e uma tocha de disparo automático por várias vezes, totalizando em média sete repetições para cada velocidade. Assim, podemos obter um valor muito próximo do real com algumas pequenas variações percentuais quase insignificantes de erros.

O processo de aferição do alimentador de velocidade é o mesmo de calibração da fonte. Desta forma, para realizar a aferição e a calibração simultaneamente, baseados na medição do comprimento do eletrodo impulsionado para fora da tocha. Para eliminar o efeito da inércia do motor no início e no final da operação, idealizou-se um procedimento pelo qual, em todo o tempo de medida, o sistema de alimentação estivesse operando em regime permanente, ou seja, a velocidade não varie com o tempo. Para isso, estipulou-se um referencial com certa distância inicial conhecida, no caso, dois metros, iniciando-se a cronometragem do tempo quando o arame passasse pelo mesmo. Através desses dados, pôde-se traçar uma curva de calibração para os alimentadores da fonte de soldagem e do cabeçote independente, e, portanto, obter a velocidade de alimentação real dos arames no (Anexo I).

3.3.2 Velocidade de Soldagem

A calibração da velocidade de soldagem foi feita através do uso de um cronômetro e de um espaço (distância) de 150,0mm. Para aferir a velocidade de soldagem, houve a necessidade de várias medições de tempo, ou seja, totalizando 30 medições de tempo.

Inicialmente, escolheu-se uma larga faixa de velocidade mais utilizada para executar a aferição. Com isto, ajustava-se a velocidade no equipamento e iniciava-se o processo. A velocidade obtida (real) foi calculada através da simples equação de espaço sobre o tempo, gerando assim uma curva e uma equação de ajuste no (Anexo II).

3.3.3 Vazão de Gás

Segundo, Groetelaars 2005 a vazão é uma função das perdas de carga (tubulações, Válvulas e tochas, à vazante) e do tipo de gás. Então, faz-se necessário uma calibração para se saber a vazão real na saída do bocal. No entanto, esta medição não aconteceu em virtude da falta de equipamentos. Porém, acreditamos que a válvula medidora de gás adquirida pelo laboratório de caracterização de materiais, esteja aferida pelo fabricante.

3.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Nesta etapa do trabalho, os corpos de prova foram soldados na posição plana utilizando uma fonte eletrônica inversora chaveada. A tocha permaneceu perpendicular ao corpo de prova, conforme a figura 3.10.3. Foram mantidos constantes os valores da tensão em 24V, do 'stickout' (distância bico de contato peça) em 13 mm, da velocidade de soldagem em 15cm/min e da vazão de gás em 15l/min. Os ensaios foram automatizados tanto no processo GMAW quanto no GMAW-CW (Soldagem Gas Metal Arc Welding- Cold Wire). Como variáveis de influencia utilizou-se os dois processos de soldagem, os gases de proteção (ambos já citados anteriormente), a velocidade de alimentação de arame em três níveis – 4, 6 e 8 m/min e a velocidade de alimentação do arame frio em 50%, 60% e 70% da velocidade de alimentação do arame energizado.

Figura 3.10.3: Representação da posição da tocha



Fonte: Arquivo Pessoal.

As tabelas 5 e 6 mostram os parâmetros das variáveis de influência como foram executadas as soldagens (tabela 5), e a tabela 6 mostra a quantidade dos corpos de provas processados e posteriormente avaliados para a obtenção dos resultados. Segue no anexo III a distribuição do fatorial incompleto.

Tabela 5: Planejamento experimental por Fatorial Incompleto

Fatores (Variáveis de Influência)	Níveis		
	1	2	3
-	1	2	3
Vel.Alimentação arame eletrodo (Vane)/(Vaf)	4	6	8
Velocidade do arame frio	50	60	70
Tipos de Gases Utilizados	CO ₂	Ar+25%CO ₂	-

Fonte: Arquivo Pessoal.

Tabela 6: Planejamento experimental dos ensaios

Processos	Quantidades de Ensaios	Nº de réplicas	Sub-total dos Ensaios
Nº de ensaios com o processo GMAW	6	2	12
Nº de ensaios com o processo GMAW-CW (DWOA)	18	2	36
Total de Ensaios a executar	24	2	48

Fonte: Arquivo Pessoal.

As soldagens dos corpos de provas foram realizadas em laboratório (UFPA-LCAM), simulando as condições em ambiente industrial.

Durante as soldagens, os valores médios da corrente e tensão de soldagem foram determinados por testes preliminares, sendo assim, esses valores são constantes em todos os processos.

3.4.1 Ensaios preliminares

Para o levantamento dos parâmetros de soldagem como a corrente e a tensão, foram realizados vários testes preliminares com o objetivo de avaliar se

esses parâmetros variavam significativamente com a variação da velocidade de alimentação eletrodo, arame frio e vazão de gás. Neste sentido os parâmetros estão apresentados na tabela 7.

Tabela 7: Parâmetros operacionais preliminares.

Fatores	Nível
Velocidade Arame Sólido (AWS ER70S-6), $\varnothing = 1,2$ mm	15 cm/min
Velocidade Arame Frio (AWS ER70S-6), $\varnothing = 1,0$ mm	15cm/min
Vazão do Gás de Proteção (CO ₂ 100%)	15 l/min
Tensão (U)	24 V
Corrente (I)	212 A
Modo Operacional	automático

Fonte: Arquivo Pessoal.

3.5 ASPECTO SUPERFICIAL DO METAL DEPOSITADO

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

3.6 CARACTERÍSTICAS ECONÔMICAS

3.6.1 Equações convencionais

As características econômicas são avaliadas mediante os valores da taxa de fusão (TF), da taxa de deposição (TD) e a eficiência do processo na deposição (ED), foram obtidos para cada ensaio realizado, tanto para o modo convencional GMAW e também para o modo GMAW-CW a partir da utilização das Equações 3.1, 3.2 e 3.3, respectivamente.

A taxa de fusão (TF) representa a quantidade de material (massa) do eletrodo ou arame consumível que é fundida por unidade de tempo. Esta taxa representa a produção em tempo gasto para a realização da soldagem. A taxa de fusão é determinada pela massa de metal (arame) fundida por unidade de tempo, equação 3.1. A taxa de deposição (TD) é definida como a massa fundida do arame-eletrodo depositada e realmente incorporada ao metal de solda, por unidade de tempo, equação 3.2. E está equação estar relacionada com o custo total da operação da massa depositada na soldagem. A eficiência da deposição real (ED) é a razão entre a massa do consumível incorporada ao metal de solda e a massa de arame consumida durante a operação de soldagem, na mesma unidade de tempo, equação 3.3.

Taxa de Fusão (TF) – Consumo:

$$TF = \frac{3,6 \times \rho_a \times \ell_a}{t_s} \left(\frac{Kg}{h} \right) \quad (3.1)$$

Sendo,

ℓ_a - Comprimento do arame consumido (m);

ρ_a - Densidade linear do arame (g/m);

t_s - Tempo de soldagem (s)

Taxa de Deposição (TD) - Produção:

$$TD = \frac{3,6 \times (m_f - m_i)}{t_s} \left(\frac{Kg}{h} \right) \quad (3.2)$$

Onde:

m_f - é a massa final da chapa (g)

m_i - é a massa inicial da chapa (g)

t_s - é o tempo de soldagem (s)

Eficiência de Deposição:

$$ED = \left(\frac{T_D}{T_F} \right) \times 100 (\%) \quad (3.3)$$

Onde,

T_D - taxa de deposição (kg/h);

T_F - Taxa de fusão (kg/h)

3.6.2 Equações modificadas

Para a avaliação das características econômicas foram confrontados e realizados os seguintes processos de soldagem: GMAW e GMAW-CW, com a finalidade de comparar o modo produção de ambos os processos para obter qual dos dois apresenta um melhor rendimento e um custo menor. Para trabalhar com dois arames sólidos na experiência foram indispensável à utilização de dois tempos de soldagem, sendo: t_1 - tempo de soldagem relativo à execução da soldagem com o arame-eletrodo; t_2 - tempo de soldagem relativo à execução da soldagem com o arame frio. Sendo, estes tempos t_1 e t_2 iguais para o processo GMAW-CW, ao iniciar a soldagem com o arame eletrodo, imediatamente iniciava a injeção de arame frio ao arco elétrico, no entanto, a contagem do tempo de soldagem foi realizada nos momentos de entrada e saída da poça de fusão no chanfro, porém esses tempos foram calibrado no momento da soldagem.

Para o cálculo da taxa de fusão se faz necessário o valor da densidade linear do arame sólido (maciço), da classe ER70S-6, empregado nas soldagens com dois diâmetros diferentes, ou seja, um para o arame eletrodo com diâmetro de (1,2 mm) e para o arame frio (1.0 mm). Sendo assim, o valor da densidade foi obtido experimentalmente a partir de dez verificações, com amostras retiradas aleatoriamente, cujo valor médio encontrado para a densidade linear dos arames citados estão dispostos na Tabela 8.

Tabela 8: Densidade linear dos arames utilizados

ER70S-6, densid. Linear (g/m), Ø = 1,2mm	6,32
ER70S-6, densid. Linear (g/m), Ø = 1,0mm	5,96

Fonte: Arquivo Pessoal.

As Equações 3.4 e 3.5 são referentes a taxa de fusão e a taxa de deposição para dois arames. Logo, estas equações foram modificadas tomando como base as equações 3.1 e 3.2 para atender as necessidades implementadas ao processo GMAW-CW. No entanto, a equação 3.3 referente ao rendimento de deposição não foi alterada.

Taxa de Fusão

$$TF = 3,6x \left(\rho_1 \frac{\ell_1}{T_1} + \rho_2 \frac{\ell_2}{T_2} \right) \left[\frac{Kg}{h} \right] \quad (3.4)$$

Sendo,

T_1 - tempo do arame-eletrodo (s);

T_2 - tempo do arame frio (s);

ρ_1 - densidade linear do arame-eletrodo (g/m);

ρ_2 - densidade linear do arame-frio (g/m);

ℓ_1 - comprimento linear do arame-eletrodo (m);

ℓ_2 - comprimento linear do arame-frio (m).

Taxa de Deposição

$$TD = 3,6x \left(\frac{m_f - m_i}{t_m} \right) \left[\frac{Kg}{h} \right] \quad (3.5)$$

$$t_M = \frac{t_1 - t_2}{2}$$

Sendo,

t_M - tempo médio de soldagem dos arames (s)

m_f massa final da junta depois da soldagem (g)

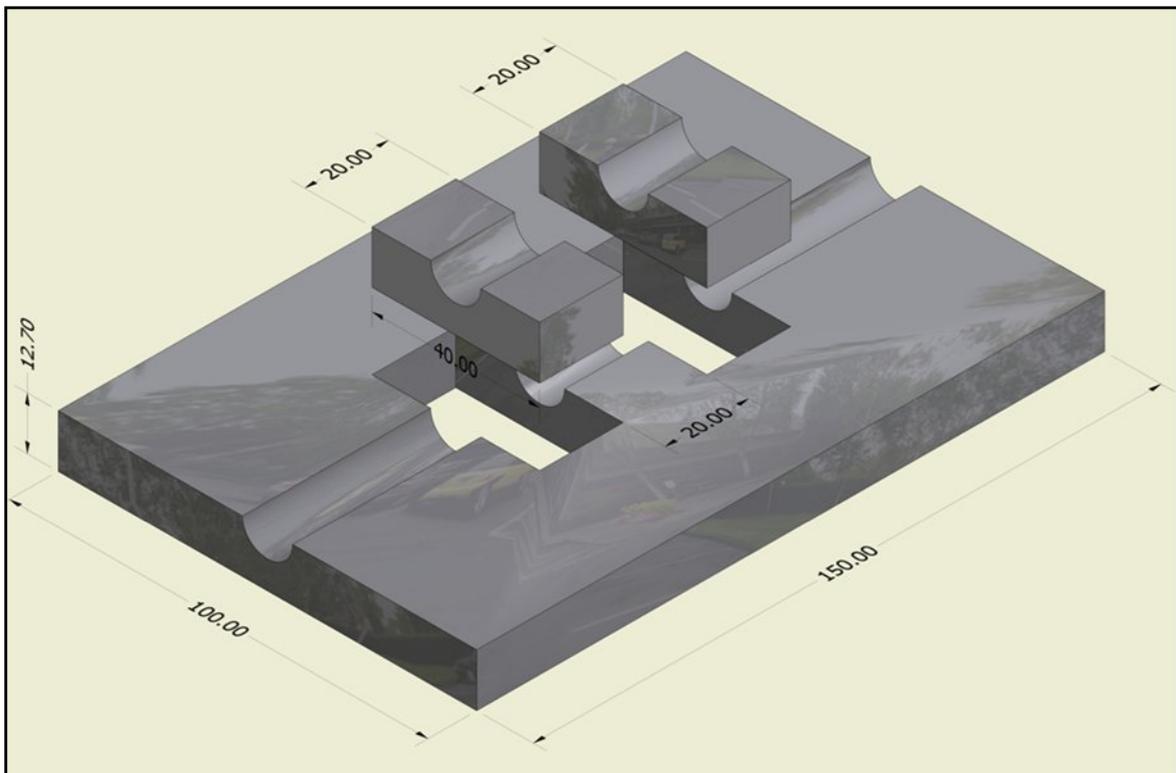
m_i - massa inicial da junta antes da soldagem (g)

3.6.3 Obtenção das amostras

As amostras dos corpos de prova são necessárias para a análise geométrica do cordão de solda e foram obtidas através da máquina automática de serrar, lixamento e polimento. O critério utilizado para a posição do corte da amostra foi a de seccioná-la na região central, que se julgava a região do cordão onde o arco, bem como, a transferência metálica estivesse mais estável. De cada experimento, foram retiradas duas (2) amostras do modo convencional GMAW, e duas (2) amostras do processo GAMW-CW e assim também para as replicas de cada amostra.

A Figura 3.10.4 apresenta o desenho esquemático do seccionamento transversal das soldas experimentais dos corpos de prova, detalhando o corte para a remoção das amostras.

Figura 3.10.4: Esquema do corte para obtenção das amostras



Fonte: Arquivo Pessoal.

3.6.4 Características Geométricas da Solda

A avaliação da geometria do cordão de solda foi realizada pela análise dimensional de sua seção transversal em seis amostras do GMAW utilizando tanto gás carbônico CO₂ comercialmente puro e o Ar25%CO₂, uma de cada velocidade de alimentação de arame, e em 18 amostras do GMAW-CW, duas para cada parâmetro de velocidade, totalizando quinze 36 amostras dos experimentos. Em cada uma dos corpos de prova soldados (em simples deposição) foi efetuado cortes transversais ao cordão de solda a uma distância mediana, conforme a Figura 3.10.4, a fim de obter as amostras para caracterização geométrica.

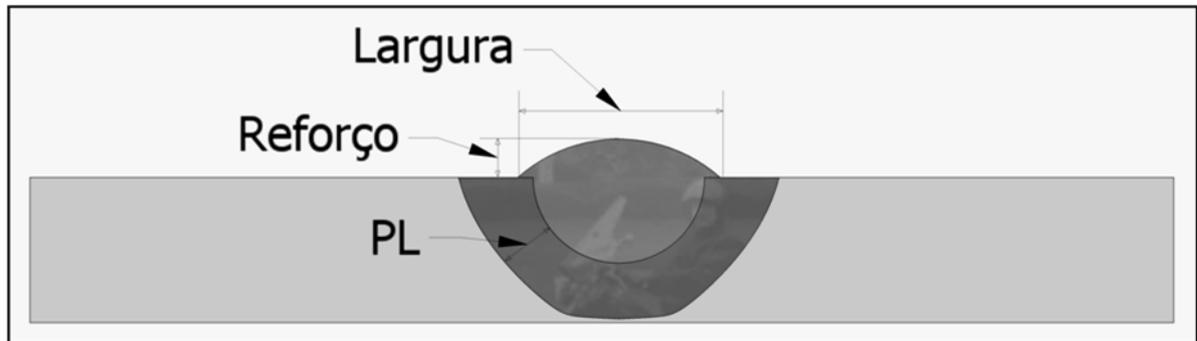
As superfícies das seções transversais das amostras foram lixadas por via úmida e atacadas com um reagente químico para posteriormente experimentar o ensaio macrográfico.

A preparação da superfície foi executada através do lixamento iniciado com a lixa número 100, em direção normal aos riscos já existentes, passando-se sucessivamente para lixas de granulação mais fina. Em todo o caso, para cada geometria de lixamento foi mudada a direção de lixamento em 90°. Entretanto, após cada série de lixamento a superfície foi cuidadosamente limpa a fim de que o novo lixamento não fosse contaminado com resíduos da operação anterior. Finalmente, a preparação da superfície é concluída com a lixa de granulometria 600 mesh.

De posse da superfície da amostra limpa, lixada e seca efetuou-se o ataque químico, sendo a composição química do reagente: ácido nítrico comercial com concentração de 2% em etanol (NITAL 2%). Portanto, o ataque químico foi realizado com reagente por imersão durante 15 segundos, em seguida a superfície lavada com álcool etílico hidratado para cessar a reação, e finalmente secar.

A superfície lixada da amostra foi imediatamente escaneada e a imagem gerada transferida ao computador. Em seguida, os parâmetros largura (b), reforço (r) e a penetração lateral da solda (PL) e a diluição (d), ilustrados na Figura 3.10.5, foram medidos na seção transversal ao cordão de solda com o auxílio do programa comercial de computação gráfica AutoCAD definindo as características geométricas do material depositado.

Figura 3.10.5: Esquema do perfil geométrico do cordão de solda

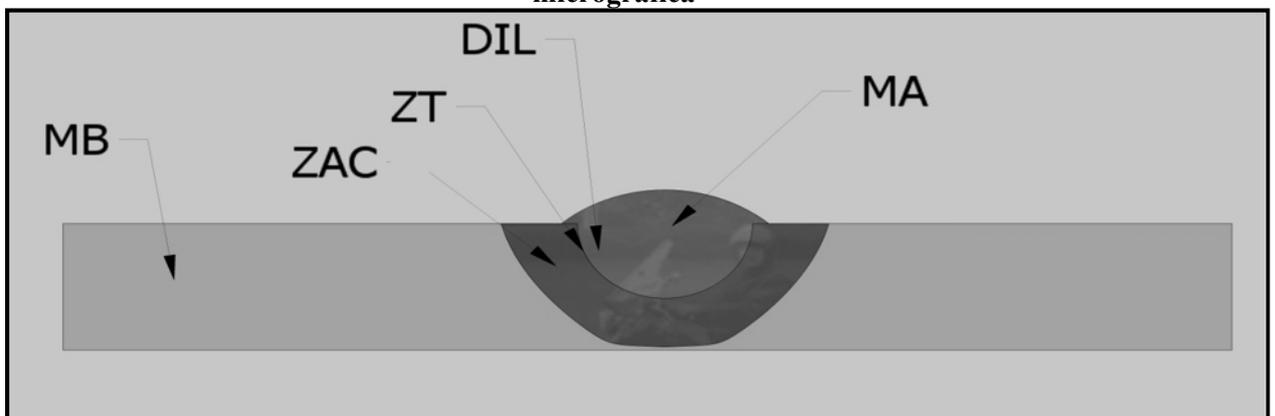


Fonte: Arquivo Pessoal.

3.7 CARACTERÍSTICAS METALÚRGICAS

O exame metalográfico consistiu na análise macrografias e micrografias, foram realizados nas seções transversais das soldas. Um outro aspecto importante ao ser analisado, foi o metal de solda de todas as amostras utilizadas na caracterização geométrica. O objetivo deste exame é identificar nas soldas o tipo de microestruturas presentes. Além disso, verificar em cada região as fases presentes predominantes. A Figura 3.10.6 apresenta o “*lay-out*” dos pontos analisados em cada amostra da junta soldada para a realização de exames metalográficos.

Figura 3.10.6: Representação esquemática da análise geométrica e dos pontos para a análise micrografica



Fonte: Arquivo Pessoal.

3.8 MACROGRAFIA E MICROGRAFIA

A análise macrográfica foi realizada na seção transversal das soldas em chanfro com formato de U com o objetivo de caracterizar o perfil macroestrutural nesta seção, houve todo cuidado no corte das amostras em duas partes iguais de cada corpo de prova, havendo uma separação pequena entre os mesmos que dista aproximadamente de 20 mm, em virtude de se verificar a incidência de descontinuidade (falta de fusão, porosidade, trincas e etc.) e também a zona termicamente afetada. A preparação da superfície consistiu-se em um lixamento de granulometria de 80 até 400 mesh, e em seguida a superfície foi polida com um pano de polimento ultra e mais alumina de 2 μm e na sequência houve o ataque químico com solução de nital 3%, pelo método de imersão e lavagem com água hidratada.

Além disso, outra análise que é muito importante para a verificação do comportamento e crescimento dos grãos é a micrográfica. Tem como objetivo na junta soldada de avaliar a microestrutura do metal de solda e a zona termicamente afetada o comportamento desses grãos e a geometria e o crescimento. As observações e as análises foram realizadas com o auxílio de um microscópio óptico de marca Leica, e de fotomicrografias de pontos selecionados na superfície observada conforme a Figura 3.10.6. Para a identificação dos principais microconstituintes será adotada a terminologia de padronização proposta na “*revisão bibliográfica*”, item 2.10-*Microestruturas*, deste trabalho.

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos durante o desenvolvimento experimental. Os processos GMAW e GMAW-CW, foram correlacionados com os valores da variação da velocidade de alimentação do arame eletrodo/arame frio, com os teores de CO₂e Ar25%CO₂ como gás de proteção. Assim, buscando avaliar, discutir e interpretar melhor os resultados.

4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS PRELIMINARES

Os ensaios preliminares consistiram em observações das melhores condições de soldagem para o processo de soldagem GMAW e GMAW-CW. Analisando os resultados das soldagens GMAW e GMAW-CW, observou-se que o processo com injeção de arame frio obteve as melhores características desejadas neste estudo.

Inicialmente foram realizadas as soldagens com o processo GMAW e posteriormente as soldagens com o processo GMAW-CW, assim comparando ambos os processos, principalmente no que rege custo e benefício. Também foram comparadas as mudanças na velocidade de alimentação de arame frio e no tipo de gás de proteção. Baseado em exaustivos ensaios, observações e análises foi possível estabelecer parâmetros de soldagem que, de modo geral, se mostraram satisfatórios, ou seja, o cordão de solda apresentou boa homogeneidade, reforço mediano e sem descontinuidades. A Figura 4.1 ilustra esquematicamente a técnica adotada em todos os ensaios.

Figura 4.1: Imagem do processo de soldagem com adição de arame frio, apresentando a técnica de soldagem no sentido empurrando, com arame não energizado disposto e introduzido a frente da poça de fusão



Fonte: Arquivo Pessoal.

Nos ensaios de soldagem para a otimização do processo com os parâmetros planejados, observou-se que, para o processo de soldagem GMAW com velocidade de alimentação de arame 10 m/min ocorreu a perfuração de todas as peças, porém ao se adicionar o arame frio, isso não mais aconteceu, possivelmente em virtude da diminuição do aporte térmico. O pacote operacional adotado apresentou baixas respicagem, o que é uma característica da transferência metálica com misturas de Argônio. A tabela 9 apresenta de forma resumida os parâmetros utilizados para as condições de soldagem.

Tabela 9: Parâmetros variáveis retificados dos processos de soldagem.

Velocidade de Alimentação (m/min) e Tipo de Gás	Nível		
Arame Eletrodo, GMAW - $\varnothing=1.2$ mm	4,0	6,0	8,0
Arame Frio, GMAW-CW - $\varnothing=1.0$ mm*	50%	60%	70%
Tipo do Gás	ArCO ₂		CO ₂

Fonte: Arquivo pessoal.

*Percentual relacionado à velocidade de alimentação de arame eletrodo.

4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SANIDADE SUPERFICIAL

4.2.1 Ensaio Visual

As Figuras 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3, 4.2.4, 4.2.5 e 4.2.6 mostram o aspecto superficial das soldas depositadas pelo processo GMAW, nas velocidades 4, 6 e 8 m/min (ou V_4 , V_6 e V_8) do arame eletrodo tanto para o uso de CO_2 quanto para o $\text{Ar}25\%\text{CO}_2$. As Figuras 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3, 4.3.4, 4.3.5, 4.3.6, 4.3.7, 4.3.8, 4.3.9, 4.3.10, 4.3.11 e 4.3.12, apresentam o aspecto superficial das soldas depositadas pelo processo de soldagem GMAW-CW, nas velocidades de alimentação do arame eletrodo/ arame não energizado: $V_{4/50\%}$, $V_{4/60\%}$, $V_{4/70\%}$, / $V_{6/50\%}$, $V_{6/60\%}$, $V_{6/70\%}$, / $V_{8/50\%}$, $V_{8/60\%}$, $V_{8/70\%}$ m/min.

Para as soldagens utilizando as relações $V_{4/50\%}$, $V_{4/60\%}$, $V_{4/70\%}$, / $V_{6/50\%}$, $V_{6/60\%}$, $V_{6/70\%}$ observou-se que as soldas GMAW-CW em comparação com o processo GMAW, foram relativamente equivalentes quanto ao aspecto superficial do cordão de solda, nas três condições de velocidade do arame eletrodo. A incidência de respingos não foi observada durante este processo, muito provavelmente, devido a uma boa transferência da gota, associada a parâmetros operacionais adequados. A regularidade geométrica na largura do depósito se mantém uniforme ao longo do comprimento em cada condição de soldagem, porém há uma diferença, quando da mudança do tipo de gás utilizado, no aspecto superficial, pois o que apresentou melhor aspecto no cordão de solda foi com a utilização do $\text{Ar}25\%\text{CO}_2$.

Através da análise visual, nota-se que o aumento na velocidade do arame eletrodo (energizado) e conseqüentemente a variação da velocidade de arame frio alterou significativamente o reforço da solda. Entretanto todas as soldagens apresentaram um reforço negativo, ou seja, não foi observado o preenchimento total do chanfro. Outra observação importante foi que, as soldas não apresentaram descontinuidades em suas superfícies.

Figura 4.2.1: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW, com velocidade de alimentação de arame de 4 m/min ou V_4 , CO_2



Fonte: Arquivo Pessoal.

Figura 4.2.2: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW, com velocidade de alimentação de arame de 6 m/min ou V_6 , CO_2



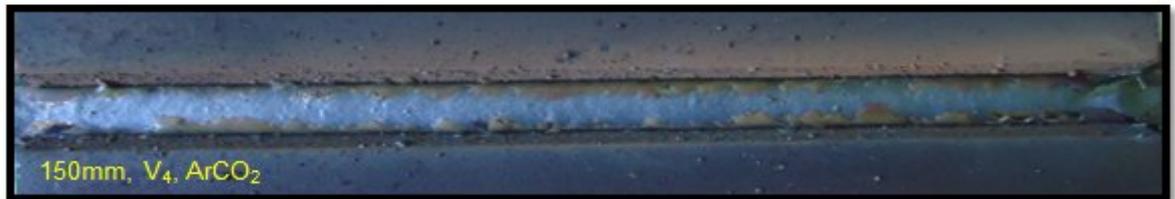
Fonte: Arquivo Pessoal.

Figura 4.2.3: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW, com velocidade de alimentação de arame de 8 m/min ou V_8 , CO_2



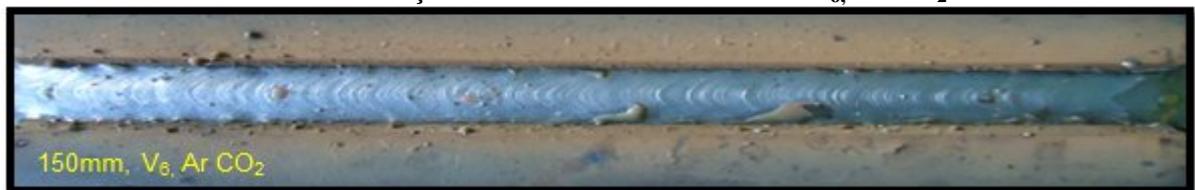
Fonte: Arquivo Pessoal.

Figura 4.2.4: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW, com velocidade de alimentação de arame de 4 m/min ou V_4 , $ArCO_2$



Fonte: Arquivo Pessoal.

Figura 4.2.5: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW, com velocidade de alimentação de arame de 6 m/min ou V_6 , $ArCO_2$



Fonte: Arquivo Pessoal.

Figura 4.2.6: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW, com velocidade de alimentação de arame de 8 m/min ou V_8 , $ArCO_2$



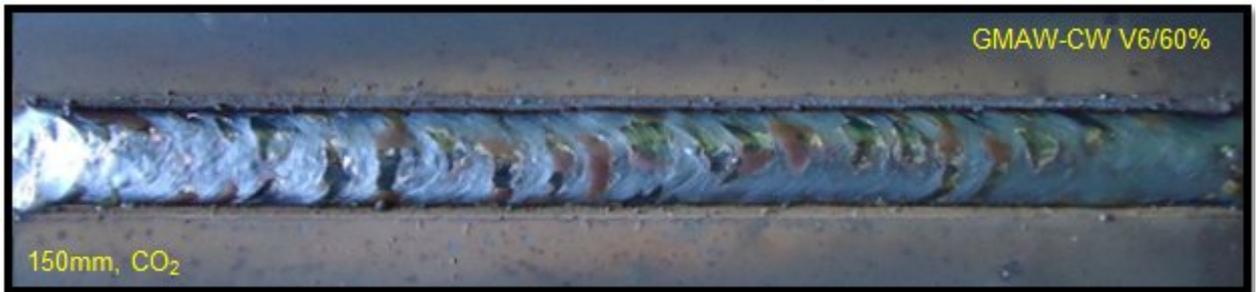
Fonte: Arquivo Pessoal.

Figura 4.3.1: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW-CW com adição de arame frio, com velocidade de alimentação de arames eletrodo/ frio igual a $v_6/50\%$ m/min



Fonte: Arquivo Pessoal.

Figura 4.3.2: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW-CW, com velocidade de alimentação de arames eletrodo/ frio igual a $v_6/60\%$ m/min



Fonte: Arquivo Pessoal.

Figura 4.3.3: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW-CW com adição de arame frio, com velocidade de alimentação de arames eletrodo/ frio igual a $v_6/70\%$ m/min



Fonte: Arquivo Pessoal.

Figura 4.3.4: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW-CW com adição de arame frio, com velocidade de alimentação de arames eletrodo/ frio igual a V8/50% m/min



Fonte: Arquivo Pessoal.

Figura 4.3.5: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW-CW com adição de arame frio, com velocidade de alimentação de arames eletrodo/ frio igual a V8/60% m/min



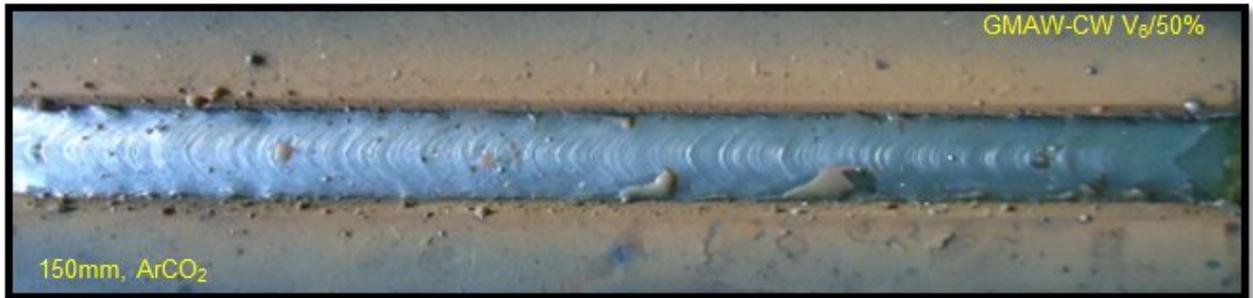
Fonte: Arquivo Pessoal.

Figura 4.3.6: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW-CW com adição de arame frio, com velocidade de alimentação de arames eletrodo/ frio igual a V8/70% m/min



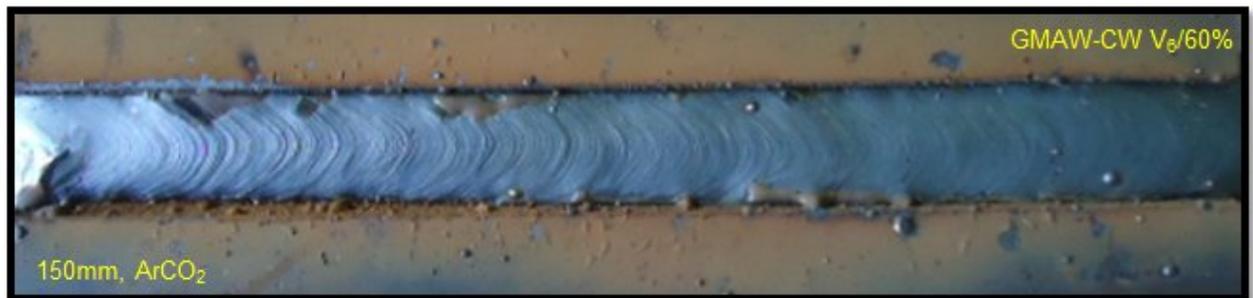
Fonte: Arquivo Pessoal.

Figura 4.3.7: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW-CW com adição de arame frio, com velocidade de alimentação de arames eletrodo/frio igual a $V_6/50\%$ m/min



Fonte: Arquivo Pessoal.

Figura 4.3.8: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW-CW com adição de arame frio, com velocidade de alimentação de arames eletrodo/ frio igual a $V_6/60\%$ m/min



Fonte: Arquivo Pessoal.

Figura 4.3.9: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW-CW com adição de arame frio, com velocidade de alimentação de arames eletrodo/ frio igual a $V_6/70\%$ m/min



Fonte: Arquivo Pessoal.

Para as soldagens utilizando as relações $V_8/50\%$, $V_8/60\%$, $V_8/70\%$ em comparação ao modo convencional, o comportamento das soldas foram semelhantes as observadas quando da utilização das relações de velocidade do parágrafo anterior nos aspectos dos respingos, regularidade geométrica e aumento do reforço. Observou também que não apresentaram quaisquer descontinuidade que

comprometeram o cordão de solda, assim como as características do cordão ficaram muito mais uniforme com a utilização do gás ArCO₂

Em todas as condições de soldagem utilizando-se das velocidades de arame eletrodo igual a 8 m/min, independente do gás de proteção, o chanfro foi totalmente preenchido.

Figura 4.3.10: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW-CW com adição de arame frio, com velocidade de alimentação de arames eletrodo/ frio igual a $V_8/50\%$ m/min



Fonte: Arquivo Pessoal.

Figura 4.3.11: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW-CW com adição de arame frio, com velocidade de alimentação de arames eletrodo/ frio igual a $v_8/60\%$ m/min



Fonte: Arquivo Pessoal.

Figura 4.3.12: Aspecto superficial do cordão de solda. Processo GMAW-CW com adição de arame frio, com velocidade de alimentação de arames eletrodo/ frio igual a $8/70\%$ m/min



Fonte: Arquivo Pessoal.

Segundo Fábio (2009), em seu trabalho verificou que a maioria de incidências de respingos são verificadas sobre as soldas depositadas pelo processo GMAW-CW, nas maiores velocidades de alimentação de arame frio e está relacionada à instabilidade do processo provocada pela vibração do arame frio quando entra em contato com a poça de fusão e ao arame eletrodo. Porém, neste trabalho, observou-se que, muito provavelmente, o arame frio passa livremente através do arco voltaico e atinge abruptamente a poça de fusão onde se energiza momentaneamente provocando turbulências e níveis diferentes de respingos.

4.2.2 Monitoramento dos valores de corrente e tensão

As características da tensão e corrente em todo o processo foram monitoradas para a faixa dos parâmetros operacionais de soldagem adotados. A Tabela 10 apresenta os dados obtidos para a corrente e tensão durante os experimentos. Observa-se, que com o aumento da velocidade de alimentação de arame, ocorreu aumento dos valores da corrente e os valores de tensão permaneceram, em média, constantes com valor de 24 V.

Tabela 10: Parâmetros de soldagem obtidos de I_m e U_m .

Processo de Soldagem	Vel. Arame Eletrodo (m/min)	Vel. Arame Frio (m/min)	Parâmetros Obtidos	
			I_m (A)	U_m (V)
GMAW	4	-	168	24,0
	6	-	204	24,2
	8	-	240	23,9
GMAW-CW	4	50%	170	24,2
	6	50%	206	24,2
	8	50%	244	24,0
GMAW-CW	4	60%	172	24,4
	6	60%	206	24,2
	8	60%	248	24,4

GMAW-CW	4	70%	172	24,2
	6	70%	208	24,8
	8	70%	248	24,4

Fonte: Arquivo Pessoal.

4.3 RESULTADO DAS CARACTERÍSTICAS ECONÔMICAS

O desempenho das características econômicas foram calculados utilizando as Equações 1, 2 e 3 para o processo GMAW, e as Equações 1.1, 1.2 e 1.3, para o processo GMAW-CW no (capítulo 3),

A Tabela 11 apresenta os valores médios da taxa de fusão (TF), taxa de deposição (TD) e do rendimento de deposição (R), obtidos para os processos GMAW, GMAW-CW nos três níveis de velocidade de alimentação de arame eletrodo (6, 8 e 10 m/min) e nos três níveis de velocidade de alimentação do arame frio, para os dois tipos de gás utilizado. Observa-se que os maiores valores encontrados correspondem para a TF: 65,5% de aumento em relação ao processo convencional, Td: 45,45% de aumento e o R: 12% de aumento, em negrito, que os maiores valores das taxas de fusão e deposição, não necessariamente representam maiores rendimentos para os processos em estudo.

Tabela 11: Resultado das características econômicas. Soldagem GMAW, GMAW-CW

Processo de Soldagem	Vel.Arame Eletrodo (m/min)	Vel.Arame Frio (m/min)	Gas	Características Econômicas.		
				TF (kg/h)	TD (Kg/h)	R (%)
GMAW	4	-	CO ₂	1,4	1,7	80,7
			Ar25%CO ₂	1,4	1,7	80,7
	6		CO ₂	2,4	2,5	95,6
			Ar25%CO ₂	2,1	2,5	83,6
	8		CO ₂	2,9	3,3	85,1
			Ar25%CO ₂	3,2	3,3	96,8

GMAW- CW	4	50	CO ₂	2,1	2,4	87,9
			Ar25%CO ₂	2,1	2,4	87,9
		60	CO ₂	2,4	2,5	94,8
			Ar25%CO ₂	2,1	2,5	82,9
		70	CO ₂	2,2	2,7	89,7
			Ar25%CO ₂	2,2	2,7	83,0
	6	50	CO ₂	3,2	3,6	87,9
			Ar25%CO ₂	3,2	3,6	87,9
		60	CO ₂	3,6	3,8	94,8
			Ar25%CO ₂	3,5	3,8	90,8
		70	CO ₂	3,6	4,0	93,4
			Ar25%CO ₂	3,9	4,0	97,2
	8	50	CO ₂	4,5	4,8	94,2
			Ar25%CO ₂	4,5	4,8	94,2
		60	CO ₂	4,8	5,1	94,8
			Ar25%CO ₂	4,3	5,1	84,7
		70	CO ₂	4,8	5,4	89,7
			Ar25%CO ₂	4,6	5,4	85,8

Fonte: Arquivo Pessoal.

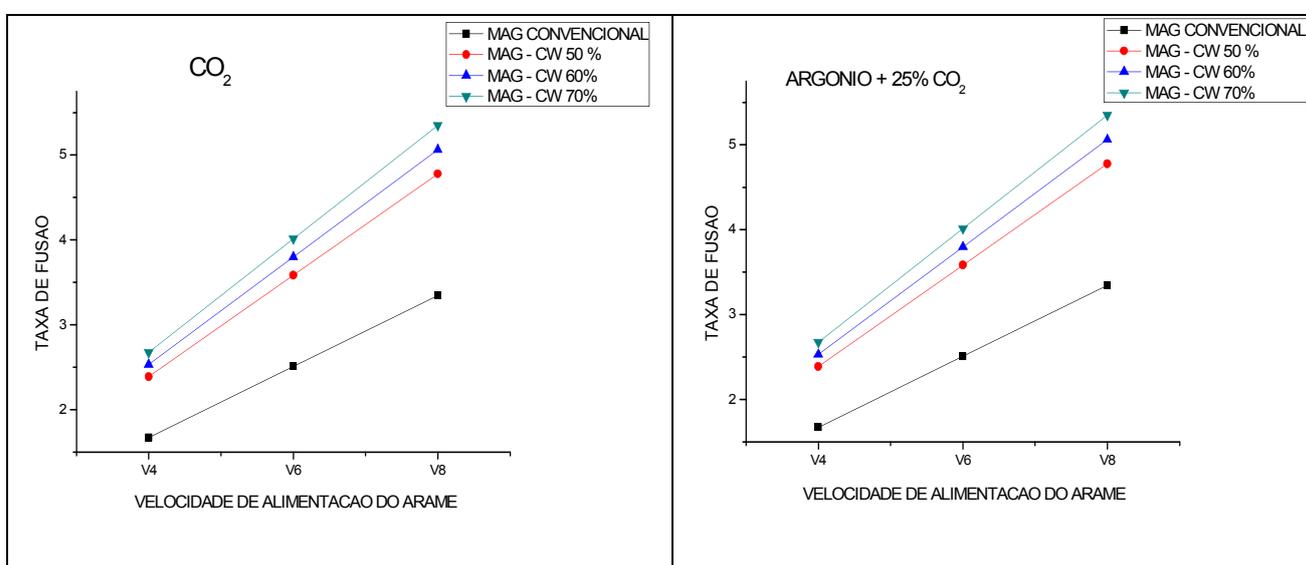
De modo geral, as taxas de fusão e a taxa de deposição tenderam a crescer com o aumento da velocidade de alimentação de arame para ambos os processos.

As Figuras 4.4, 4.4.1, 4.4.2 apresentam os valores apresentados na tabela 14 em forma gráfica. Observa-se pela figura 4.4 o aumento da taxa de fusão com o aumento da velocidade de alimentação de arame, para ambos os processos e tipos de gases. Observa-se também que, para cada velocidade, houve aumento da TF de 65,5% quando do aumento do percentual de alimentação do arame frio, processo GMAW-CW, em relação ao modo convencional.

A Figura 4.4.1 apresenta graficamente os valores da taxa de deposição. Observa-se que os valores de Td de 45,45% cresceram com o aumento da velocidade de alimentação de arame, para ambos os processos e tipos de gases. Neste sentido, todos os valores relacionados ao processo GMAW-CW ficaram acima do correspondente ao modo convencional, ficando esses valores muito próximos entre si.

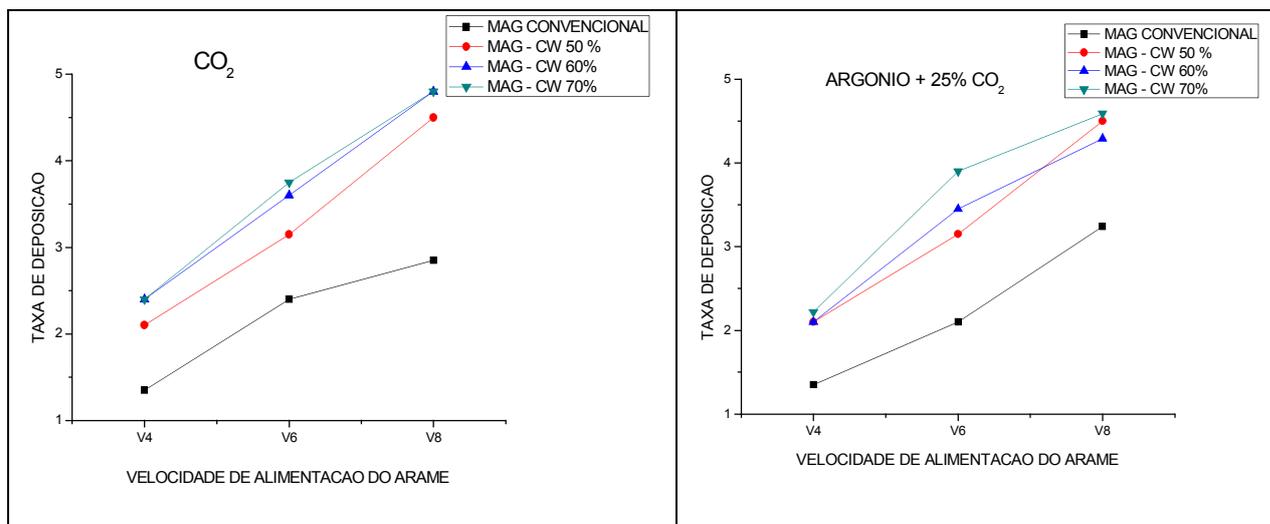
A Figura 4.4.2 mostra os resultados para os valores do rendimento de deposição. Em média os valores obtidos quando da soldagem com GMAW-CW ficaram acima dos valores correspondente ao processo convencional que corresponderam em 12% de aumento. Contudo, analisa-se que alguns pontos ficaram fora da curva de tendencia, sendo necessário um reensaio, como o ponto V₆ com o gás CO₂ e os pontos V₆ e V₈ com a mistura, ambos no processo convencional, prejudicando uma melhor análise.

Figura 4.4: Efeito da velocidade de alimentação de arame eletrodo sobre a taxa de fusão. Soldagem GMAW, GMAW-CW, com mudanças de gases CO₂ e ArCO₂



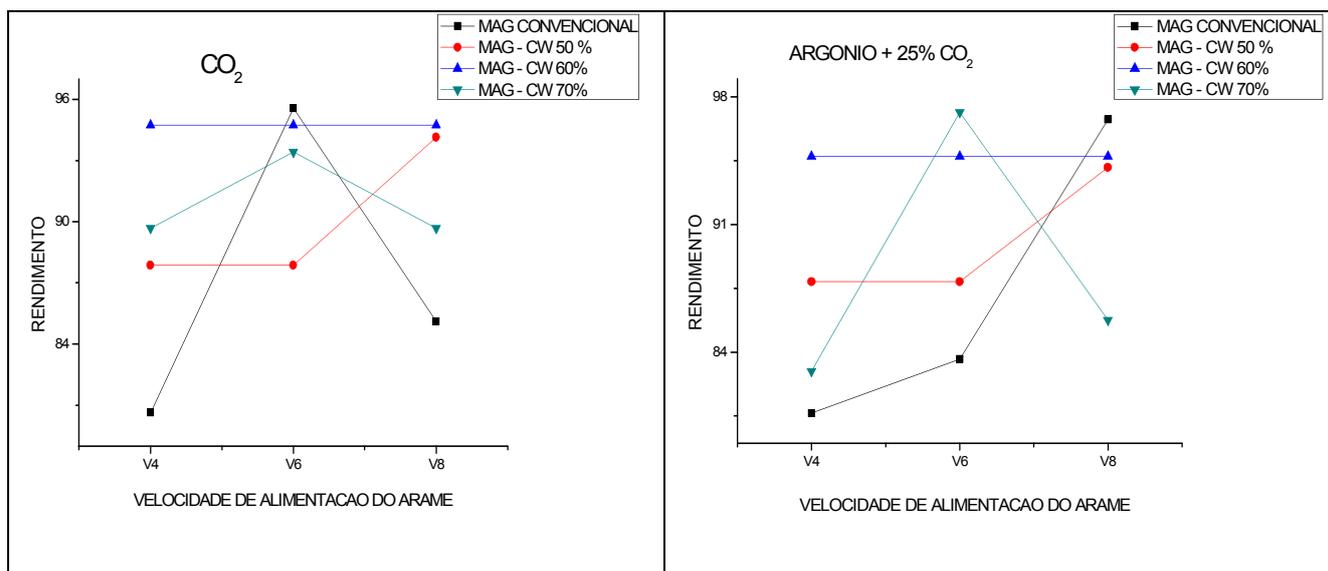
Fonte: Arquivo Pessoal.

Figura 4.4.1: Efeito da velocidade de alimentação de arame eletrodo sobre a taxa de deposição. Soldagem GMAW, GMAW-CW, com mudanças de gases CO₂ e ArCO₂



Fonte: Arquivo Pessoal.

Figura 4.4.2: Efeito dos parâmetros operacionais sobre o rendimento. Soldagem GMAW, GMAW-CW, com mudanças de gases CO₂ e ArCO₂



Fonte: Arquivo Pessoal.

4.4 CUSTOS DE SOLDAGEM

Para realização dos custos de soldagem foram utilizados os valores da tabela 14 para a taxa de fusão (TF), da taxa de deposição (TD) e de rendimento da deposição (R%) obtidos para cada ensaio.

Com os resultados da Tabela 11 e os dados relacionados abaixo, os custos diretos da soldagem GMAW e GMAW-CW, em R\$/kg de solda, foram calculados de acordo com as equações 4.1, 4.2, 4.3 e 4.5.

Alguns dados obtidos, como custos gerais e o fator de operação, foi consultado do artigo do (PEREIRA, 2011).

➤ Custo unitário do gás (G):

CO₂ puro: 5,77 R\$/m³;

75% de argônio + 25% de CO₂: 18,00 R\$/m³;

➤ Vazão do gás (F): 1,0 m³/h;

➤ Custo da energia (P): 0,3699 R\$/kWh;

➤ Custo da arme-eletrodo (M):

- AWS ER70S-6 (1,2): 121,50 R\$/kg;

- AWS ER70S-6 (1,0): 130,04 R\$/kg;

➤ Salário do soldador (S): 8 R\$/h;

➤ Fator de operação (K): 50%;

➤ Custos gerais (O): 1 R\$/h.

Custo do gás (CG) por unidade de peso de metal depositado (R\$/kg)

$$C_G = \frac{G \times F}{TD} \quad (4.1)$$

Onde:

TD = taxa de deposição (kg/h);

F = vazão de gás (m³/h);

G = custo unitário de gás (R\$/m³)

• Custo da energia (C_E) por unidade de peso de metal depositado (R\$/kg)

$$C_E = \frac{P \times V \times A}{1000 \times TD} \quad (4.2)$$

Onde:

A = corrente de soldagem (A);

V = tensão (V);

P = custo da energia (R\$/kWh).

- Custo do arame-eletrodo (CAE) por unidade de peso de metal depositado (R\$/kg)

$$C_{AE} = \frac{M}{R} \quad (4.3)$$

Onde:

M = custo do arame-eletrodo (R\$/kg);
R = Rendimento de deposição (%);

- Custo do soldador (CS) por unidade de peso de metal depositado (R\$/kg)

$$C_S = \frac{SxK}{TDx100} \quad (4.4)$$

Onde:

K = fator de operação (%);
S = Salário do soldador (R\$/h);

- Custos gerais (C_{Ge}) por unidade de peso de metal depositado (R\$/kg)

$$C_{Ge} = \frac{O}{TDx(k/100)} \quad (4.5)$$

Onde:

O = custos gerais (R\$/h);

- Custo direto total (C_{DT}) por unidade de peso de metal depositado (R\$/kg)

$$C_{DT} = \frac{C_G + C_E + C_{AE} + C_S + C_{Ge}}{TDx(k/100)} \quad (4.6)$$

A tabela 12 mostra os valores médios dos custos de soldagem para cada ensaio realizado nos processos GMAW e GMAW-CW. Com base nos resultados de custo operacional da soldagem, houve a necessidade de separarmos aqueles que apresentaram o menor custo, a melhor taxa de fusão e o melhor reforço. As Figuras 4.4.3, 4.4.4 e 4.4.5 mostram que quando comparamos o custo total envolvido dos processos, verificamos que o processo GMAW-CW apresentou maior viabilidade econômica, ou seja, para as mesmas condições impostas, o processo com adição

de arame frio, em ambas as proteções gasosas, ofereceu o preenchimento total do chanfro, o que não ocorreu em nenhum ensaio para o processo convencional.

Tabela 12: Custos médios para o Processo GMAW e GMAW-CW para cada ensaio.

Processo de Soldagem	Vel. Arame Eletrodo (m/min)	Vel. Arame Frio (m/min)	Gas	Custo de Soldagem.				
				Custo do Gás (R\$/Kg)	Custo energia (R\$/kg)	Custo materiais (R\$/kg)	Custos gerais (R\$/kg)	Custo direto total (R\$/kg)
GMAW	4	-	CO ₂	4,32	1,115	152,55	1,385	159,37
			Ar25%CO ₂	13,5	1,24	135,6	1,385	151,6
	6		CO ₂	2,4	0,76	127,13	0,83	131,12
			Ar25%CO ₂	8,57	0,87	145,28	0,95	155,67
	8		CO ₂	2,025	0,745	143,13	0,7	146,6
			Ar25%CO ₂	5,555	0,66	125,6	0,61	134,88
GMAW-CW	4	50	CO ₂	4,75	0,72	286,26	0,95	292,68
			Ar25%CO ₂	20,48	0,72	286,26	0,95	308,41
		60	CO ₂	6,575	0,58	286,925	0,63	294,71
			Ar25%CO ₂	20,525	0,58	286,925	0,63	308,66
		70	CO ₂	6,12	0,48	267,17	0,44	274,21
			Ar25%CO ₂	19,11	0,48	267,17	0,44	287,2
	6	50	CO ₂	6,08	0,64	265,48	0,83	273,03
			Ar25%CO ₂	21,71	0,73	303,42	0,95	326,81
		60	CO ₂	6,08	0,51	265,48	0,55	272,62
			Ar25%CO ₂	19,855	0,535	265,48	0,575	310,635
		70	CO ₂	6,08	0,46	265,48	0,42	272,44
			Ar25%CO ₂	21,3	0,525	297,78	0,465	320,07
	8	50	CO ₂	6,43	0,64	280,48	0,83	288,38
			Ar25%CO ₂	21,71	0,7	303,455	0,91	326,775
		60	CO ₂	6,18	0,515	269,695	0,53	276,92
			Ar25%CO ₂	18,52	0,5	258,91	0,51	278,44
		70	CO ₂	6,065	0,47	281,6	0,415	288,55
			Ar25%CO ₂	20,81	0,49	293,435	0,43	315,165

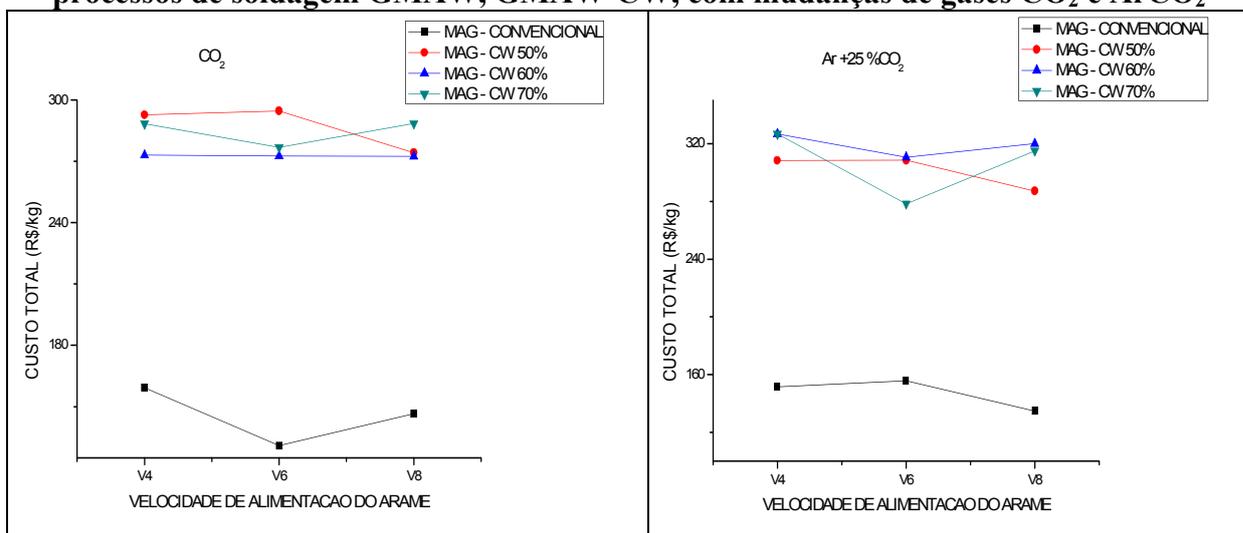
Fonte: Arquivo Pessoal.

As Figuras 4.4.3, 4.4.4, 4.4.5 e 4.4.6 foram obtidas dos dados da tabela 15 em forma gráfica. Pelas Figuras 4.4.3, 4.4.4 e 4.4.6 observa-se que, independente do gás de proteção, com o aumento da velocidade de alimentação de arame não houve efeito significativo para o custo total, de gás e de materiais, porém o GMAW-CW sempre apresentou maiores valores.

A Figura 4.4.5 mostra a variação do custo de energia com o aumento da velocidade de alimentação de arame. Observa-se, por essa Figura que, independente do tipo de gás de proteção, o processo GMAW gerou o menor custo

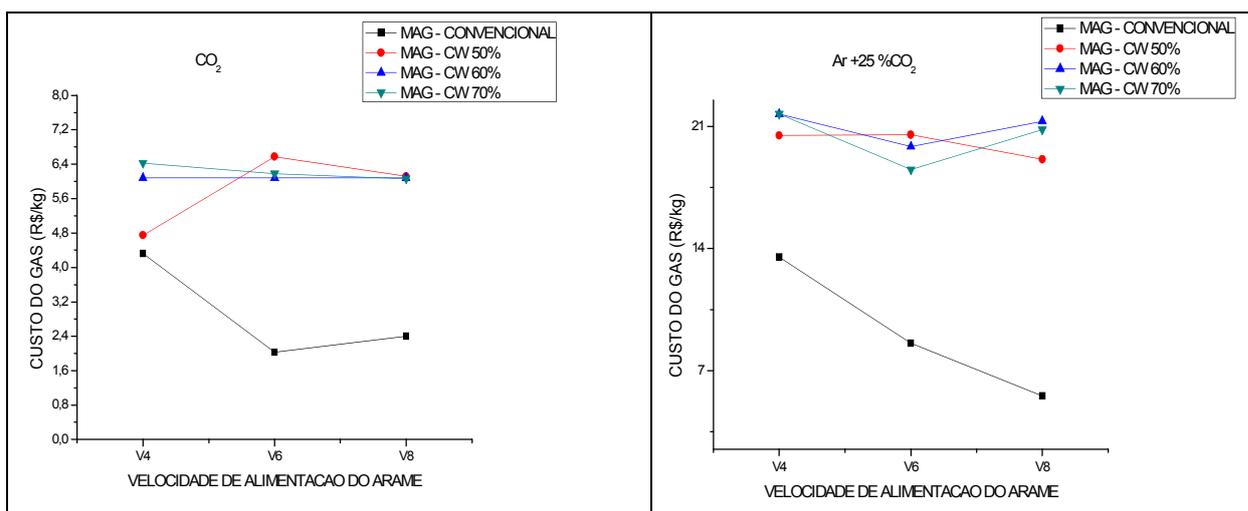
de energia em relação ao processo GMAW-CW. Nota-se também que com o aumento do valor da velocidade de alimentação de arame ocorreu uma tendência de decréscimo deste custo.

Figura 4.4.3: Custo total por velocidade de alimentação de arame eletrodo para os processos de soldagem GMAW, GMAW-CW, com mudanças de gases CO_2 e ArCO_2



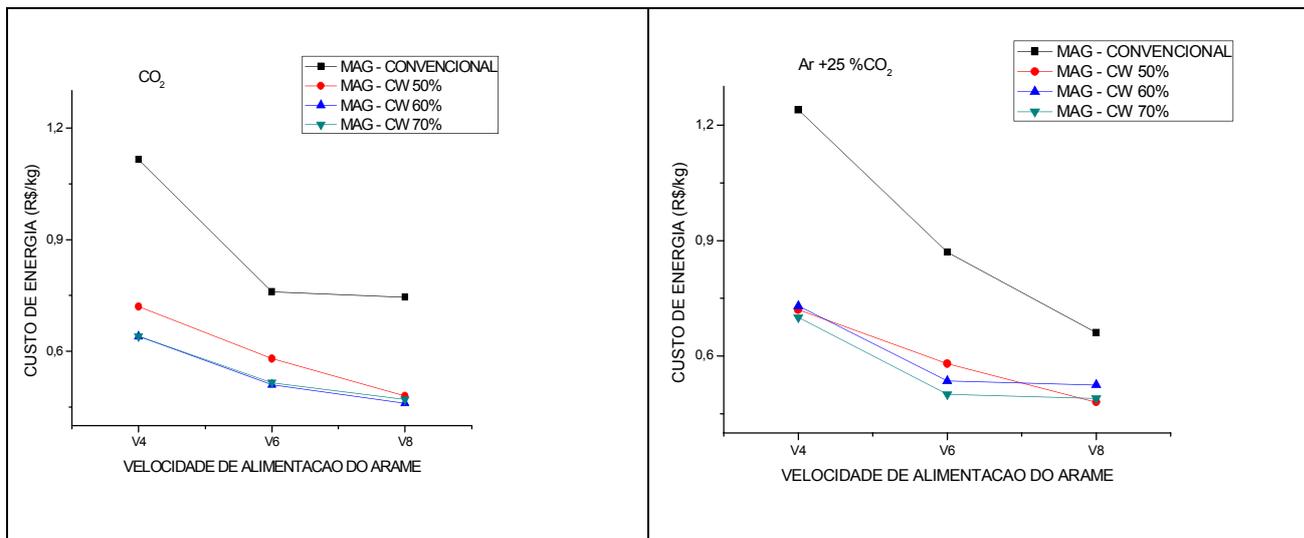
Fonte: Arquivo Pessoal.

Figura 4.4.4: Custo total por velocidade de alimentação de arame eletrodo para os processos de soldagem GMAW, GMAW-CW, com mudanças de gases CO_2 e ArCO_2



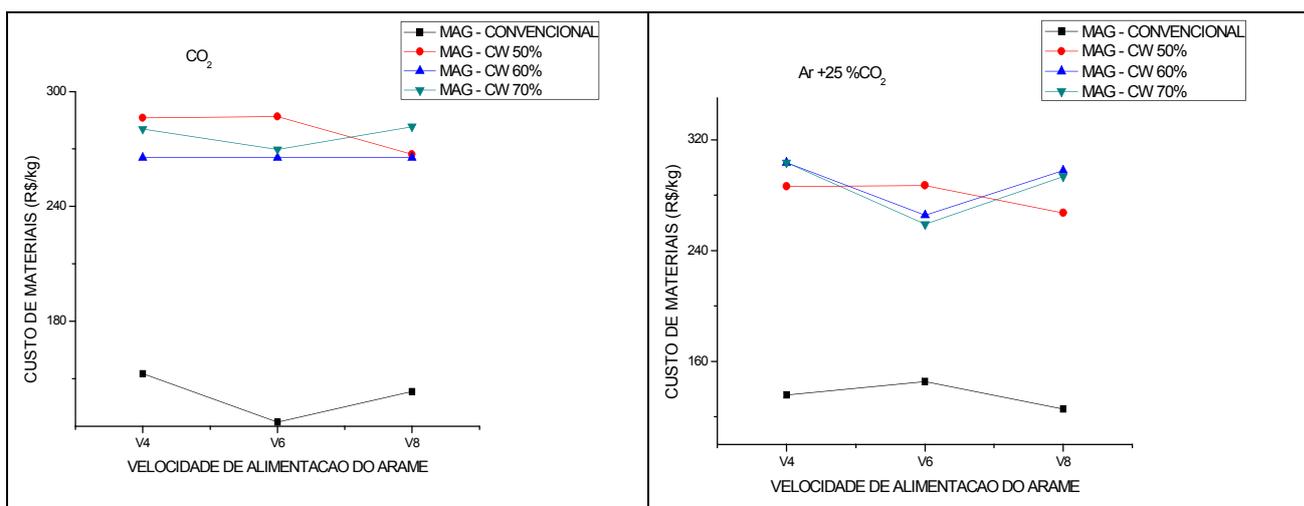
Fonte: Arquivo Pessoal.

Figura 4.4.5: Custo total por velocidade de alimentação de arame eletrodo para os processos de soldagem GMAW, GMAW-CW, com mudanças de gases CO₂ e ArCO₂



Fonte: Arquivo Pessoal.

Figura 4.4.6: Custo total por velocidade de alimentação de arame eletrodo para os processos de soldagem GMAW, GMAW-CW, com mudanças de gases CO₂ e ArCO₂



Fonte: Arquivo Pessoal.

4.5 RESULTADOS DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

Na Tabela 13, estão expostos às medidas dos resultados do desempenho das características geométricas [penetração lateral (P_L), o reforço (R), a largura (L) e a diluição ($\bar{\delta}$)] para os diferentes ensaios. Para as medidas dessas características, os corpos de prova foram seccionados transversalmente, lixados e atacados, conforme mostra a Tabela 13.

Tabela 13: Resultados das características geométricas para os ensaios experimentais realizados com a soldagem GMAW e GMAW-CW.

Processo de Soldagem	Vel.Arame Eletrodo (m/min)	Vel.Arame Frio (m/min)	Gas	Características Geométricas.			
				Largura (L) (mm)	Reforço (R) (mm)	Penetração Lateral (PL) (mm)	Diluição (δ) (%)
GMAW	4	-	CO ₂	10,3	-3,2	1,5	0,39
			Ar25%CO ₂	10,7	-3,6	1,9	0,29
	6		CO ₂	11,6	-2,4	2,9	0,39
			Ar25%CO ₂	11,9	-3,2	0,9	0,09
	8		CO ₂	12	-2,6	3,6	0,25
			Ar25%CO ₂	14,2	-1,7	2,6	0,19
GMAW -CW	4	50	CO ₂	10,8	-2	1,6	0,28
			Ar25%CO ₂	11,7	-3,02	2,04	0,25
		60	CO ₂	10,5	-0,5	1,5	0,31
			Ar25%CO ₂	12	-2,8	0,6	0,10
		70	CO ₂	11,3	0,5	0,3	0,62
			Ar25%CO ₂	12,5	-2,1	0,9	0,08
	6	50	CO ₂	12,2	-2,1	1,6	0,19
			Ar25%CO ₂	12,5	-1,6	1	0,10
		60	CO ₂	12,8	-0,7	1,27	0,14
			Ar25%CO ₂	13,7	-1,12	0,98	0,11
		70	CO ₂	12,3	-0,8	0,2	0,88
			Ar25%CO ₂	13,1	-2,0	1,8	0,23
	8	50	CO ₂	12,9	-1	2,27	0,14
			Ar25%CO ₂	14,7	0	2,27	0,14
		60	CO ₂	13,0	0	1,69	0,18
			Ar25%CO ₂	17,5	1,03	1,13	0,1
		70	CO ₂	12,7	0,8	1,61	0,12
			Ar25%CO ₂	17,2	1,1	2	0,11

Fonte: Arquivo Pessoal.

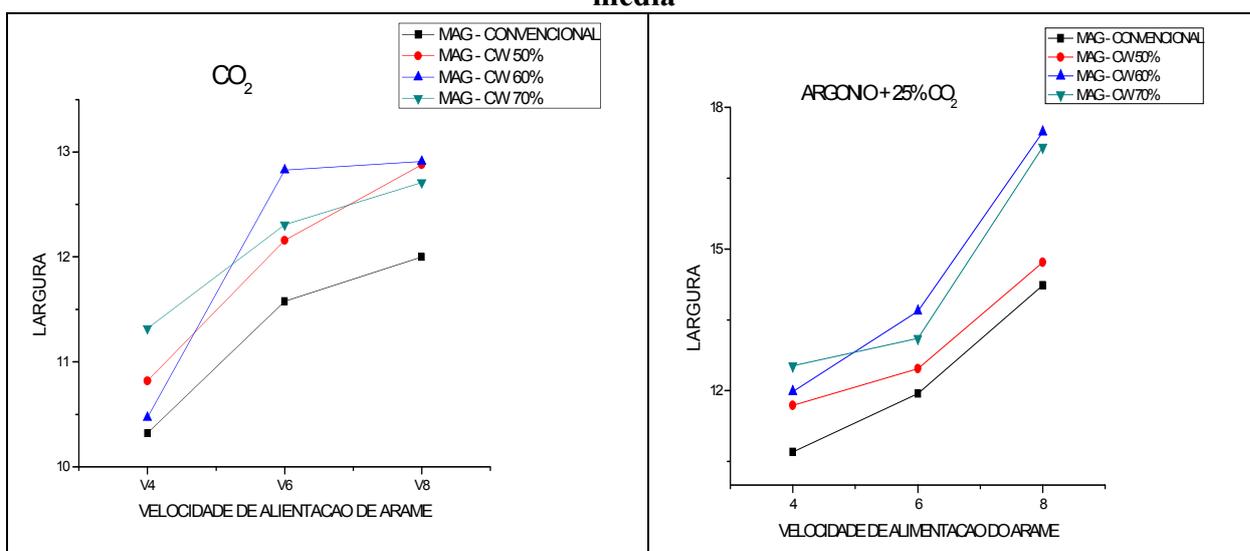
Para uma melhor visualização, os resultados da Tabela 16 estão apresentados de maneira gráfica. Para a análise do perfil do cordão de solda, os corpos de prova foram seccionados em sua secção transversal.

A Figura 4.5 mostra a variação da largura com a variação da velocidade de alimentação de arame para ambos os gases de proteção e percentuais de adição de

arame frio. Por esta Figura observa-se que com o aumento da velocidade de alimentação de arame ocorreu o aumento da largura do cordão para ambos os processos e tipos de gases. Observa-se também que os valores, com o uso do processo GMAW-CW, foram maiores do que aqueles com o GMAW. Os maiores valores para a largura foram obtidos com o uso do processo GMAW-CW no gás Ar25%CO₂ em percentuais de 60 e 70% de adição de arame frio.

A Figura 4.5.1 mostra a variação do reforço com a variação da velocidade de alimentação de arame para ambos os gases de proteção e percentuais de adição de arame frio. Para efeito de análise os valores abaixo da linha de referencia (ponto 0) foram considerados “reforço negativo” e os valores acima dessa mesma linha foram considerados “reforço positivo”. Observa-se por esta Figura que com o aumento da velocidade de alimentação de arame não ocorreu efeito significativo na largura do cordão. Porém ao analisarmos o efeito do percentual de adição de arame frio para cada condição de velocidade de alimentação de arame, observa-se um aumento progressivo e significativo no reforço, quando do uso do gás CO₂, onde os valores com 70% de adição de arame frio apresentaram reforço positivo. Já com o uso do gás Ar25%CO₂ ocorreu aumento quando da comparação entre os processos, onde os valores para 60 e 70 % para a velocidade de alimentação de 8 m/min., apresentaram reforço positivo (preenchimento do chanfro).

Figura 4.5: Influencia da velocidade de alimentação de arame eletrodo sobre o Largura média

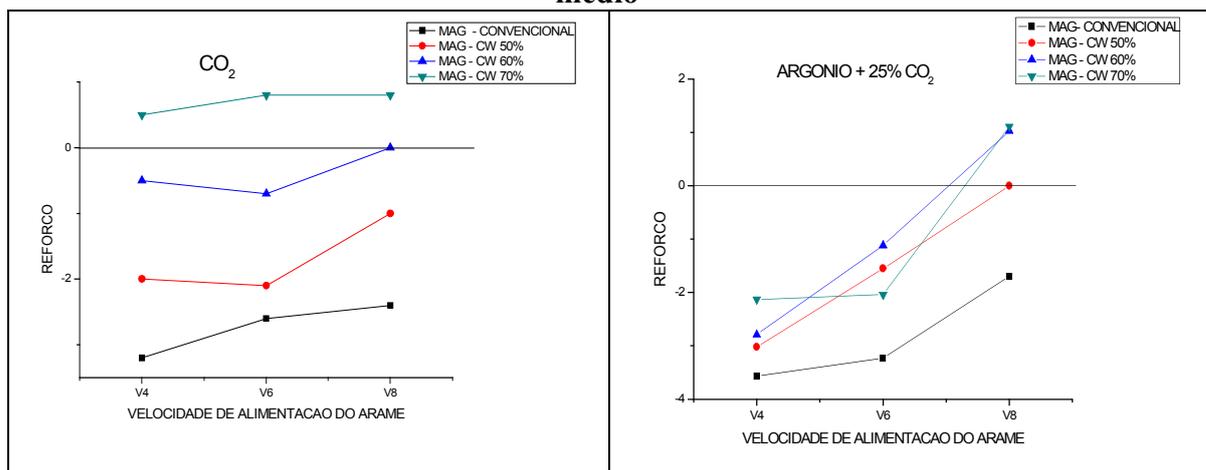


Fonte: Arquivo Pessoal.

A Figura 4.5.2 mostra a variação da penetração lateral com o aumento da velocidade de alimentação de arame. Por esta Figura observa-se que os valores de penetração ficaram, em média, para o processo GMAW, acima dos aqueles com o GMAW-CW, para ambos os tipos de gases. Outra observação verificada foi que com o aumento da velocidade de alimentação de arame frio houve uma tendência de aumento da penetração, muito provavelmente, pelo aumento da corrente verificada na Tabela 10.

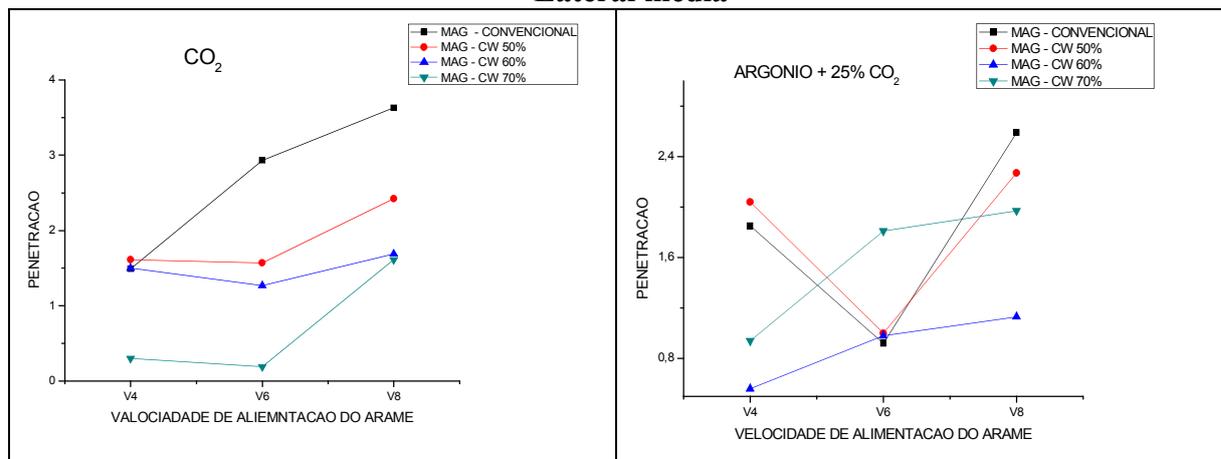
A Figura 4.5.3 mostra a variação da diluição com o aumento da velocidade de alimentação de arame. Observa-se que, em média, os valores de diluição ficaram maiores com o uso do processo GMAW em relação ao GMAW-CW para ambos os tipos de gases. Observa-se também a tendência de decréscimo da diluição com o aumento da velocidade de alimentação de arame com o uso do gás CO_2 nos processos GMAW e GMAW-CW com percentuais de 50 e 60%, já para o percentual de 70% a curva se comportou contrariamente. Quando da análise do comportamento das curvas com o uso do gás $\text{Ar}25\%\text{CO}_2$, observa-se uma variação muito grande prejudicando uma melhor discussão, o que acredita-se que haverá a necessidade de refazer alguns ensaios.

Figura 4.5.1: Influencia da velocidade de alimentação de arame eletrodo sobre o Reforço médio



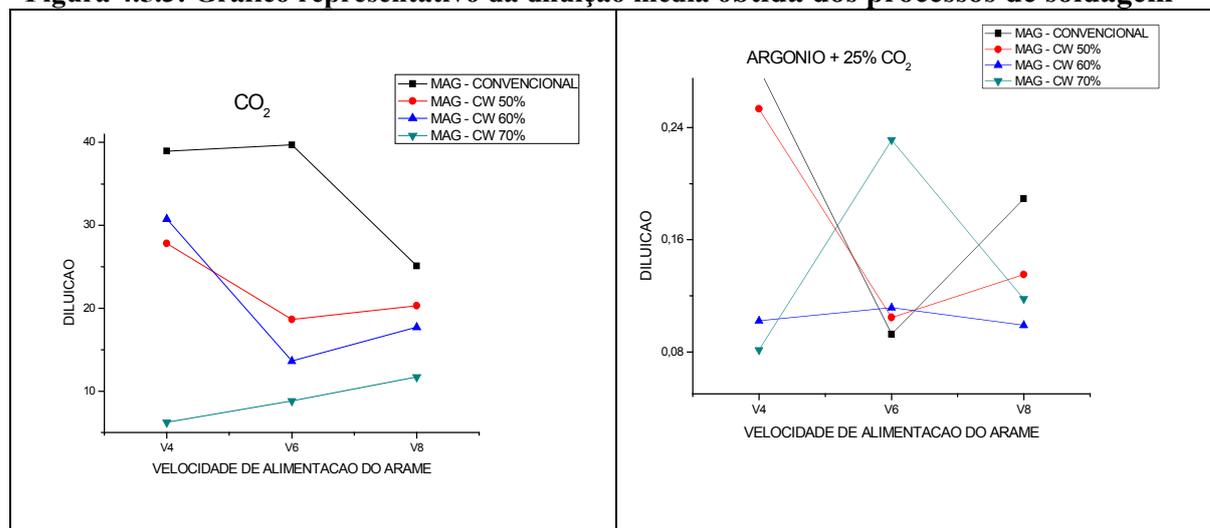
Fonte: Arquivo Pessoal.

Figura 4.5.2: Influencia da velocidade de alimentação de arame eletrodo sobre a Penetração Lateral média



Fonte: Arquivo Pessoal.

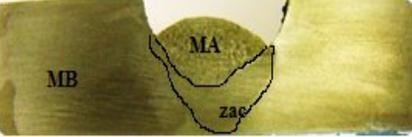
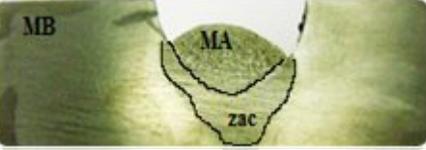
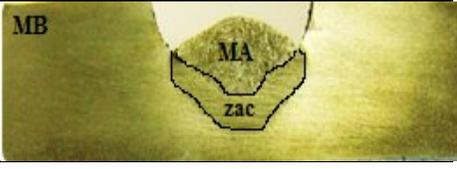
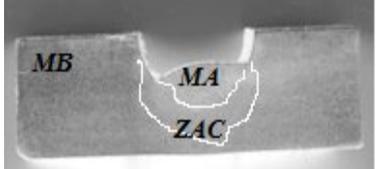
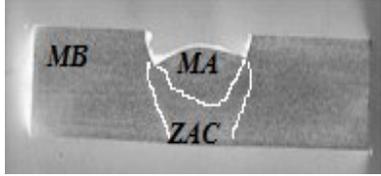
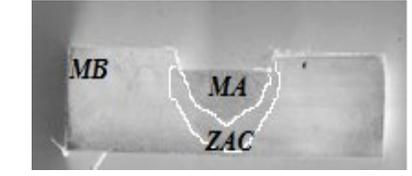
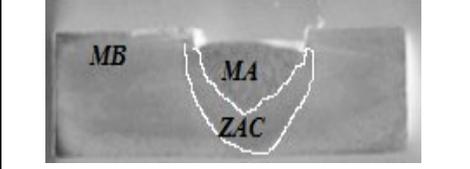
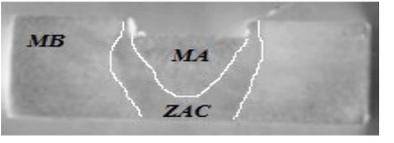
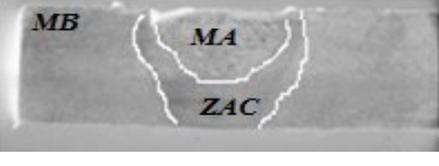
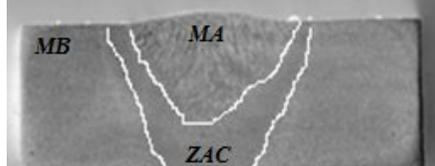
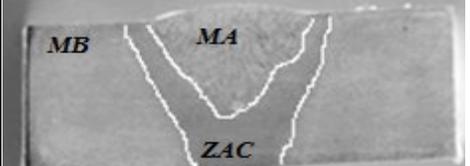
Figura 4.5.3: Gráfico representativo da diluição média obtida dos processos de soldagem



Fonte: Arquivo Pessoal.

A Tabela 14 mostra o perfil do cordão de solda a partir da secção transversal. Observa-se por esta Tabela que somente com o uso do processo GMAW-CW, na velocidade de alimentação de arame 8 m/min, com percentuais de 60 e 70 % e gás Ar25%CO₂, foi possível o preenchimento do chanfro. Neste sentido analisa-se que, mesmo tendo apresentado um custo inicial maior, o processo GMAW-CW, nas condições estabelecidas acima, ganhou no tempo de preenchimento do chanfro, já que foi necessário apenas um passe, e que muito provavelmente, seria necessário, para os outros parâmetros e processo de soldagem, um ou dois passes a mais para o preenchimento total do chanfro. Por esta análise, verifica-se que o processo GMAW-CW ganha em produtividade.

Tabela 14: Imagens do perfil das características geométricas para os diferentes ensaios.

Veloc./Gás	GMAW	GMAW-CW			
		50%	60%	70%	
4	CO2				
	Ar + 25% CO2				
6	CO2				
	Ar + 25% CO2				
8	CO2				
	Ar + 25% CO2				

Fonte: Arquivo Pessoal.

5 CONCLUSÃO

Nas condições deste trabalho, as análises e os resultados obtidos a partir das consultas bibliográficas e das condições experimentais utilizadas, pode-se concluir que:

- Na avaliação de sanidade superficial das juntas soldadas, foi observado o bom aspecto visual das soldas em todos os processos, apresentando uma regularidade na largura e reforço, sem apresentar qualquer descontinuidade ao longo do cordão;
- O aspecto superficial dos depósitos pelo processo GMAW-CW foi satisfatório e manteve-se uniforme longitudinalmente em cada condição de soldagem, proporcionando cordões com forma regular e contínua;
- Não houve nenhum caso de descontinuidade, porém os cordões depositados por ambos os processos de soldagem apresentaram salpicagem, no entanto, estes respingos não influenciaram na regularidade do cordão de solda.
- Para o processo GMAW-CW quando utilizamos o gás de proteção Ar25%CO₂, apresentou um comportamento bastante similar ao processo GMAW, porém o processo GMAW-CW apresentou um avanço significativo na uniformidade do cordão de solda em relação ao GMAW.
- O processo de soldagem GMAG-CW demonstrou melhor produção alcançada, em relação ao processo GMAW, indicado boa performance no aumento das taxas de fusão e de deposição, observando que a maior evidência no desempenho destas características econômicas ocorreu em função da adição de arame frio, contribuindo na evolução da quantidade de massa depositada (fundida) dos arames que foi efetivamente incorporada ao metal de solda por unidade de tempo;
- A taxa de fusão, de deposição e o rendimento tenderam a aumentar com o aumento da velocidade de alimentação de arame eletrodo, independente do processo e tipo de gás;
- A penetração tende a crescer com o aumento da velocidade de alimentação de arame.
- A diluição tendeu a decrescer com o aumento da velocidade de alimentação de arame para os processos GMAW e GMAW-CW nos percentuais de 50 e

70% e de crescimento no processo GMAW-CW com percentual de 60% com o uso do gás CO₂.

- O preenchimento do chanfro foi alcançado quando do uso do processo GMAW-CW, com percentuais de 60 e 70% e gás Ar25%CO₂ em um único passe.
- Este trabalho mostrou a viabilidade operacional do processo GMAW-CW em relação ao processo GMAW nos diferentes tipos de gases.

6 TRABALHOS FUTUROS

Trabalhos futuros poderiam ser feitos com intuito de aumentar a abrangência dos resultados e com isso ter possibilidade de otimizar parâmetros. Entre esses novos estudos, estariam os seguintes:

- ✓ Avaliar as condições propostas neste trabalho para velocidades de soldagem superiores ou inferiores;
- ✓ Avaliar a influência da vazão do gás de proteção sobre a transferência metálica e sobre o tamanho poça.
- ✓ Estudar o comportamento da angulação e da posição de entrada do arame frio em relação à estabilidade do arco voltaico;
- ✓ Estudar a estabilidade de arco voltaico com auxílio de câmeras de alta velocidade para compreender as possíveis formas de transferência da gota;

REFERÊNCIA

- ADLER, H. A Look at the Fundamentals of GMAW. **Welding Journal**, maio, 1999.
- AMERICAN Welding Society. 8th. Miami: Welding Process, v.2, 1991. (Welding Handbook).
- AMERICAN Society of Mechanical Engineers. SFA-5.18 (AWS 5.18-79) – **IBP**: Especificação de Materiais. (seção II, parte C).
- CURSO de Especialização em Engenharia de Soldagem**. APENGSOLD; SENAI-RJ, FBTS, SLV – Mannheim, 1997. (Apostila).
- BACELAR, A. R. C.; FERRAZ, A. C. **Estudo da Viabilidade Operacional do Processo de Soldagem MAG com Alimentação Adicional de um Arame Frio**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica)- Universidade Federal do Pará, Belém, 2005.
- BARRA, S. R. **Influência do Processo MIG/MAG Térmico sobre a Microestrutura e a Geometria da Zona Fundida**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- BARRA, S. R. **Influência dos Procedimentos de Soldagem Sobre a Resistência à Cavitação de Depósitos Obtidos com a Utilização de Arames Tubulares de Aços Inoxidáveis Ligados ao Cobalto**. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.
- BRACARENSE, A. Q. **Processo de Soldagem por Arame Tubular – FCAW**. 2000. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2000. (disciplina Processo de Soldagem).
- BRAGA, E. M. **Soldagem a Arame Tubular Autoprottegido em Corrente Pulsada**. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Belém, 1997.
- BRANDI, S. D.; TANIGUCHI, C.; LIU, S. Analysis of Metal Transfer in Shielded Metal Arc. **Welding Journal**, p. 261-270, Oct. 1991.
- BENNETT, B. Effects of Shielding Gas in Pulsed MIG Welding. **Joining & Materials**, jun., 1989, p. 38-40.
- BOHME, D.; NENTIWIG, R.; KNOCH, R., 1996. **A High Efficiency Welding Process**: The Double Wire Welding. Proc Conf IIW Asian Welding Congress (Productivity Beyond 1996), Auckland, New Zealand, feb.1996, p. 867-881.
- CABRAL, T. D. **Sinfluência dos Procedimentos e Processos de Soldagem MAG na Redução de Deformações em Painéis de Estruturas Navais**. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

CRUZ, JÚNIOR; CABRAL, T. S. **Especificação de Procedimentos de Soldagem MIG para o Preenchimento de Cavidades pela Técnica de Camadas Sucessivas**. 2008. 78p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)- Universidade Federal do Pará, Belém.

DILLENBECK, V. R.; Castagno, L. The Effects of Various Shielding Gases and Associated Mixtures in GMA Welding of Mild Steel. **Welding Journal**, set. 1987, v. 66, n.9, p. 45- 49.

DESTAFAN, D. Basics to Know when Chosing a GTAW Power Source. **Welding Journal**, p. 67-72, jan., 1995.

DILTHEY, U., REISGEN, U. ; Bachem H. **Increased Productivity as a Result of Higher Welding Speed by Using Two-Wire-GMAW Process**. European Conference on Joining Technology –Eurojoin. 3, Apr. 1998, p. 219-231.

DUTRA, J. C. **Procedimento Computadorizado de Determinação, Seleção e Controle de Variáveis na Soldagem MIG/MAG**. Tese (Doutorado)- Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 1989.

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

FIGUEIREDO, K. M. **Tecnologia da Soldagem**. Centro Federal de Educação Tecnológica do Maranhão, Departamento de Mecânica e Materiais, São Luis, 2005. (Apostila).

FOLKHARD, E. **Welding Metallurgy of Stainless Steels**. Verlag Wien, New York: Springer, 1988.

FORTES, C. **Arame Tubulares OK**, Catálogo de Soldagem. ESAB, MAIO/2004 disponível em: <<http://www.esab.com.br>>. Acesso em: abr. 2011.

GARCIA, N. D. **Soldagem MIG com Arame Frio Aplicada ao Revestimento de Chapas Planas com uma Superliga de Níquel Tipo HASTELLOY C-276**. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

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

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

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

- GUERRA, I. M. **Soldagem e Técnicas Conexas**: Processo. Porto Alegre: [s.n.], 1996.
- HILTON, D. Shielding Gases for Gas Metal Arc Welding. **Welding & Metal Fabrication**. jul. 1990, p. 332 – 334.
- KETRON, D. L.; LONGENECKER R. E.; BROWN S. B. **Evaluation of Two-Wire GMAW Technology for Problematic Steel Welding Applications**. USA: [s.n.], 28 p., jun. 2002. (EWI, Project n. 4263lrp, report n. MR0213).
- KIM, Y.; EAGAR, T. W. Metal Transfer in Pulsed Current Gas Metal Arc Welding. **Welding Journal**, p. 279-287, jul. 1993.
- LABSOLDA. **Desenvolvimento de Processos, Procedimentos Equipamentos e Instrumentação de Soldagem**. Disponível em: <<http://www.labsolda.ufsc.br>>. Acessado em: jul. 2011.
- LIU, S.; SIEWERT, T. A. Metal Transfer In Gas Metal Arc Welding: Droplet Rate. **Welding Journal**, fev. 1989, p. 52 – 58. Welding Research Supplement.
- LYTTLE, K. A.; STAPON, F. G. Select the Best Shielding Gas Blend for the Application. **Welding Journal**, nov. 1990, p. 21 – 28.
- MACHADO, I. G. **Soldagem e Técnicas Conexas**: Processos. Porto Alegre: [s.n.], 1996.
- MANZ, A. F. The Dawn of Gas Metal Arc Welding. **Welding Journal**, p. 67-68, jan. 1990.
- MARQUES, P. V. **Soldagem**: fundamentos e tecnologia. Belo Horizonte: UFMG, p. 86, 2005.
- MICHIE, K.; BLACKMAN, S.; OGUNBIYI, T. E. B. **Twin-Wire GMAW**: Process Characteristics and Applications. **Welding journal**, v. 78, n. 5, 1999. AWS.
- MICHIE, K.; Blackman, S.; Ogunbiyi, T. E. B. Twin-Wire GMAW: Process Characteristics and Applications. **Welding Journal**, AWS, v.78, n.5, p. 31-34.
- MIRANDA, H. C. **Reconhecimento e Controle da Transferência Metálica no Processo MIG/MAG Pulsado**. Tese (Doutorado)– Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2002.
- MEYER, M.,; LAHNSTEINER R. **GMAW**: High Deposition Welding in Automotive Applications. Proc conf WTIA Annual Conference .46. 1998. (Planning, Production and Productivity), p. 9, Perth, Australia, p. 1-9, 1998.
- MODENESI, P. J. **Soldagem I**: descontinuidades e inspeção em juntas soldadas. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, p. 9-10, nov. 2001.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; Santos, D. B. **Introdução a Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, mai. 2006.

MODENESI, P. J.; NIXON, J. H. Arc Instability Phenomena in GMA Welding. **Welding Journal**, set. 1994, p. 219 – 224. (Welding Research Supplement).

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

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

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

NORRISH, J.; Richardson, I. F. Metal Transfer Mechanisms. **Welding & Metal Fabrication**, jan./fev. 1988, p. 17 – 22.

NORRISH, J. O que é MIG Sinérgico ?. **Soldagem & Inspeção**, n. 3, p. 16-18,1995.

OBNAWA, T. et al. **High: Speed Welding of Steel Sheets by the Tandem Pulsed Gas Metal Arc Welding System**. Romania: [s.n.], jul., 2003, , p. 47-55.

OJO, E.; MORAIS, C. M; SCOTTI, A. **Influencia da Posição e Afastamento da Tocha na Geometria de Filetes pelo Processo MIG/MAG Duplo Arame Potencial Isolado**. XII . Ilha Solteira, SP: CREEM, 2005.

PIERRE, E. R. Shielding Gases for Welding. **Welding Design & Fabrication**, mar., 1987, p. 63 – 65.

QUITES, A. M.; DUTRA, J. C. **Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico**. [s.l.]: EDEME, 1979.

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

SÁBIO, A. D. **Estudo da Viabilidade Operacional do Processo de Soldagem MAG com Alimentação Adicional de Arame Frio**. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

SCOTTI, A. **Process Modeling to Establish Control Algorithms for Automated GMAW**". Thesis (Doctorate)- Cranfield Institute of Technology, UK, set. 1991.

SILVA. F. G. **Estudo da Viabilidade do Processo de Soldagem FCAW com Adição de Arame Frio, Aplicado a Indústria Naval**. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

STENBACKA, N.; Persson, K. A. Shielding Gases For Gas Metal Arc Welding. **Welding Journal**, nov. 1989, p. 41 – 48.

TORRES, R. Alguns Cuidados na Soldagem de Aços Inoxidáveis. **Soldagem & Inspeção**, n. 2, 1995.

VILARINHO, L. O.; SCOTTI, A. An Alternative Algorithm for Synergic Pulsed GMAW of Aluminum. **Welding Journal Australasian**, v. 45 , 2000, p. 36-44. Trimestral.

W., Lucas. Choosing a Shielding Gas. **Welding & Metal Fabrication**. jul. 1992, p. 269 – 276. (Part 2).

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F.D.H. de. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. 2. ed .São Paulo: Edgard Blücher, 1992.