

CLAUDIO IVANEI DE SOUZA

**ANÁLISE COMPARATIVA DOS PROCESSOS DE
SOLDAGEM GMAW E FCAW COM TRANSFERÊNCIA
METÁLICA POR CURTO-CIRCUITO NA POSIÇÃO
HORIZONTAL**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2011

CLAUDIO IVANEI DE SOUZA

**ANÁLISE COMPARATIVA DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM
GMAW E FCAW COM TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR CURTO-
CIRCUITO NA POSIÇÃO HORIZONTAL**

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Valtair Antônio Ferraresi.

UBERLÂNDIA – MG

2011

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

- S729a Souza, Cláudio Ivanei de, 1949-
Análise comparativa dos processos GMAW e FCAW com transferência metálica por curto-circuito na posição horizontal / Cláudio Ivanei de Souza. - 2011.
121 f. : il.
- Orientador: Valtair Antônio Ferraresi.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.
1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Soldagem - Teses. I. Ferraresi, Valtair Antônio. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

*Dedico este trabalho a todas as pessoas que,
de uma forma ou de outra, contribuíram para
que o mesmo se realizasse, e em especial a
minha esposa Daisy e as minhas filhas:
Nádia, Cláudia e Denise, pelo apoio
e compreensão.*

AGRADECIMENTOS

- Ao Professor Valtair Antônio Ferraresi pela orientação, ensinamento, confiança e profissionalismo os quais contribuíram para a minha formação;
- Ao Professor Louriel Oliveira Vilarinho e Professor Américo Scotti, pelos ensinamentos, os quais possibilitaram a realização desse trabalho;
- Ao programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia pela oportunidade da realização deste curso;
- Ao CNPq pelo apoio financeiro;
- Ao LAPROSOLDA/UFU pelo apoio técnico e laboratorial na realização deste trabalho;
- Aos companheiros e companheiras que me ajudaram à realização desse curso;
- Agradecimento especial ao Lindbergh, Hélio, Marcelo Rossi, Ribeiro, André Resende, Regina, José Francisco, Diandro, Hernández, Tércio e muitos outros, que pelo apoio e orientação contribuiu na realização desse curso;
- À Ângela Maria de Andrade, técnica do Laboratório de Tribologia e Materiais, pelas orientações e ensinamentos.

SUMÁRIO

<i>Lista de Figuras</i>	x
<i>Lista de Tabelas</i>	xiv
<i>Simbologia</i>	xv
<i>Resumo</i>	xvii
<i>Abstract</i>	xviii
CAPÍTULO I	
Introdução.....	1
CAPÍTULO II	
Revisão Bibliográfica	4
2.1 Introdução.....	4
2.2 Processo de soldagem GMAW.....	6
2.3 Processo de soldagem FCAW.....	7
2.4 Parâmetros do processo GMAW e FCAW.....	8
2.4.1 Modos de transferência metálica.....	9
2.4.2 Proteção gasosa.....	14
2.4.3 Principais gases de proteção utilizado no processo GMAW e FCAW.....	16
2.4.4 Corrente de soldagem e velocidade de alimentação do arame.....	17
2.4.5 Tensão e comprimento do arco.....	19
2.4.6 Velocidade de soldagem.....	19
2.4.7 Comprimento do eletrodo (stick-out) e distância bico de contato peça (DBCP).....	20
2.4.8 Diâmetro e composição do eletrodo.....	21
2.5 Regularidade de transferência metálica.....	21

2.6	Características econômicas e morfológicas do cordão.....	25
-----	--	----

CAPÍTULO III

	Equipamentos e Metodologia Experimental.....	29
3.1	Metodologia.....	29
3.2	Diretrizes estabelecidas para análise dos resultados.....	32
3.3	Procedimentos para cálculo dos parâmetros dos processos GMAW e FCAW.....	33
3.4	Consumíveis utilizados nos processos.....	37
	3.4.1 Gases.....	37
	3.4.2 Metais de adição utilizado nos processos.....	37
	3.4.3 Metal de base.....	38
3.5	Placas de teste utilizadas nos processos.....	38
3.6	Preparação do corpo de prova para análise macrográfica.....	39
3.7	Componentes utilizados na realização do processo.....	39
	3.7.1 Fonte de soldagem.....	39
	3.7.2 Tocha de soldagem.....	40
	3.7.3 Mesa de coordenadas para soldagem.....	41
	3.7.4 Dispositivo para fixação da placa de teste.....	41
	3.7.5 Sistema de aquisição dos sinais elétricos.....	42
	3.7.6 Balança eletrônica digital.....	43
	3.7.7 Sistema de aquisição e tratamento de imagens.....	43
	3.7.8 Medição do escorrimento do cordão.....	44

CAPÍTULO IV

	Testes Preliminares.....	45
4.1	Definição das faixas operacionais.....	45
	4.1.1 Introdução.....	45
	4.1.2 Definição das velocidades de alimentação.....	46
	4.1.3 Verificação das faixas de tensão de soldagem.....	49
	4.1.4 Definição das velocidades de soldagem.....	49

CAPÍTULO V

	Resultados e Análises dos Processos.....	51
5.1	Introdução.....	51

5.2	Condições de soldagem.....	51
5.3	Resultados dos ensaios.....	53
5.4	Análise dos resultados baseado na transferência metálica.....	55
5.4.1	Transferência metálica do processo GMAW.....	55
5.4.2	Transferência metálica do processo FCAW.....	60
5.5	Regularidade de transferência metálica.....	65
5.5.1	Análise de regularidade de transferência baseada na frequência de curto-circuito.....	67
5.5.2	Análise de regularidade de transferência metálica através do período e seu desvio padrão.....	68
5.5.3	Análise de regularidade de transferência através do índice Vilarinho de Regularidade por Transferência por curto-circuito.....	72
5.5.4	Análise comparativa de regularidade de transferência metálica para cada processo estudado.....	74
5.6	Análises dos fatores econômicos.....	75
5.7	Análise da geometria e descontinuidade do cordão de solda...	82
5.7.1	Análise da largura dos cordões de solda.....	84
5.7.2	Análise do reforço dos cordões de solda.....	86
5.7.3	Análise da penetração dos cordões de solda.....	87
5.7.4	Análise do escorrimento dos cordões de solda.....	88
 CAPÍTULO VI		
	Conclusões.....	94
 CAPÍTULO VII		
	Trabalhos futuros.....	96
 CAPÍTULO VIII		
	Referências Bibliográficas.....	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Desenho esquemático do equipamento de soldagem GMAW e FCAW, com proteção gasosa (MODENESI; MARQUES, 2006).....	5
Figura 2.2	Desenho esquemático do processo de soldagem GMAW (MODENESI; MARQUES, 2006).....	6
Figura 2.3	Desenho esquemático do processo de soldagem com arames tubulares com gás de proteção (FORTES, 2004).....	8
Figura 2.4	Modos fundamentais de transferência metálica, proposto pelo IIW (adaptado de Vilarinho, 2007).....	10
Figura 2.5	Representação esquemática de corrente e tensão versus tempo, típico do ciclo de curto-circuito (AWS, 1991).....	11
Figura 2.6	Representação do comportamento das gotas na transferência globular (Luz et al., 2005).....	12
Figura 2.7	Representação da força reativa agindo na transferência globular repulsiva (Luz et al., 2005).....	13
Figura 2.8	Representação do comportamento das gotas na transferência goticular (spray) (Luz et al., 2005).....	14
Figura 2.9	Distância do ponto de tomada de corrente à peça (DBCP), stick-out (S) e comprimento do arco (La) (adaptado de Modenesi, 2009).....	20
Figura 2.10	Parâmetros de transferência metálica por curto-circuito (adaptado de Ferreira Filho, 2007).....	22
Figura 2.11	Taxa de fusão em função da intensidade de corrente, para diferentes diâmetros (\emptyset) de arame maciço (MACHADO, 1996).....	25
Figura 3.1	Dimensões (mm) do cordão padrão e teórico, adotado.....	30
Figura 3.2	Esquema da posição da tocha em relação ao tipo de junta utilizado.....	31
Figura 3.3	Dimensões (mm) e divisão da área do cordão teórico adotado.....	34
Figura 3.4	Desenho esquemático e dimensões (mm) da placa de teste.....	38
Figura 3.5	Dimensões aproximadas do corpo de prova.....	39

Figura 3.6	Fonte de soldagem modelo TEM DIGITEC 300.....	40
Figura 3.7	Conjunto: tocha reta; dispositivo de fixação; placa de teste e mesa coordenada.....	40
Figura 3.8	Mesa de coordenadas	41
Figura 3.9	Desenho esquematizado do dispositivo de fixação da placa de teste.....	42
Figura 3.10	Desenho esquematizado da montagem do sistema de aquisição de dado..	43
Figura 3.11	Desenho esquematizado do sistema de aquisição e tratamento de imagens.	44
Figura 3.12	Escorrimento do reforço.....	44
Figura 4.1	Cordão padrão do processo FCAW.....	50
Figura 5.1	Oscilogramas de corrente e tensão, GMAW, 120 A, gás Ar+25%CO ₂ e tensão de referência: (a) 18 V; (b) 20 V; (c) 22 V e (d) 24 V.....	56
Figura 5.2	Oscilogramas de corrente e tensão, GMAW, 160 A, gás Ar+25%CO ₂ e tensão de referência: (a) 18 V; (b) 20 V; (c) 22 V e (d) 24 V.....	57
Figura 5.3	Oscilogramas de corrente e tensão, GMAW, 120 A, gás 100%CO ₂ e tensão de referência: (a) 18 V; (b) 20 V; (c) 22 V e (d) 24 V.....	58
Figura 5.4	Oscilogramas de corrente e tensão, GMAW, 160 A, gás 100%CO ₂ e tensão de referência: (a) 18 V; (b) 20 V; (c) 22 V e (d) 24 V.....	59
Figura 5.5	Oscilogramas de corrente e tensão, FCAW, 120 A, gás Ar+25%CO ₂ e tensão de referência: (a) 18 V; (b) 20 V; (c) 22 V e (d) 24 V.....	61
Figura 5.6	Oscilogramas de corrente e tensão, FCAW, 160 A, gás Ar+25%CO ₂ e tensão de referência: (a) 18 V; (b) 20 V; (c) 22 V e (d) 24 V.....	62
Figura 5.7	Oscilogramas de corrente e tensão, FCAW, 120 A, gás 100%CO ₂ e tensão de referência: (a) 18 V; (b) 20 V; (c) 22 V e (d) 24 V.....	63
Figura 5.8	Oscilogramas de corrente e tensão, FCAW, 160 A, gás 100%CO ₂ e tensão de referência: (a) 18 V; (b) 20 V; (c) 22 V e (d) 24 V.....	64
Figura 5.9	Período e desvio padrão do processo GMAW, transferência por curto-circuito: (a) 120 A e gás Ar+25%CO ₂ ; 160 A gás Ar+25%CO ₂	69
Figura 5.10	Período e desvio padrão do processo GMAW, transferência por curto-circuito: (a) 120 A e gás 100%CO ₂ ; 160 A gás 100%CO ₂	70
Figura 5.11	Período e desvio padrão do processo FCAW, transferência por curto-circuito: (a) 120 A e gás Ar+25%CO ₂ ; 160 A gás Ar+25%CO ₂	71
Figura 5.12	Período e desvio padrão do processo FCAW, transferência por curto-circuito: (a) 120 A e gás 100%CO ₂ ; 160 A gás 100%CO ₂	72

Figura 5.13 Índice Vilarinho de Regulagem por Transferência por curto-circuito (IV _{cc}), tensão de soldagem (U), faixas de 120 A e 160 A e processo GMAW: (a) gás Ar+25%CO ₂ e (b) gás 100%CO ₂	73
Figura 5.14 Índice Vilarinho de Regulagem por Transferência por curto-circuito (IV _{cc}), tensão de soldagem(U), corrente de 120 A e 160 A e processo FCAW: (a) gás Ar+25%CO ₂ e (b) gás 100%CO ₂	74
Figura 5.15 Taxa de fusão (T _f) para os processos GMAW e FCAW: (a) 120 A e gás Ar+25%CO ₂ ; (b) 160 A e gás Ar+25%CO ₂ ; (c) 120 A e gás 100%CO ₂ e (d) 160 A e gás 100%CO ₂	77
Figura 5.16 Taxa de depósito (T _d) para os processos GMAW e FCAW: (a) 120 A e gás Ar+25%CO ₂ ; (b) 120 A e gás 100%CO ₂ ; (c) 160 A e gás Ar25%CO ₂ e (d) 160 A e gás 100%CO ₂	79
Figura 5.17 Rendimento de depósito (η _D) para os processos GMAW e FCAW: (a) 120 A e gás Ar+25%CO ₂ ; (b) 120 A e gás 100%CO ₂ ; (c) 160 A e gás Ar25%CO ₂ e (d) 160 A e gás 100%CO ₂	82
Figura 5.18 Desenho esquemático da geometria do perfil do cordão de solda: Zona fundida (ZF); largura (L); reforço (R); penetração (p) e escorrimento (E). ..	84
Figura 5.19 Largura dos cordões de solda para os processos GMAW e FCAW: (a) 120 A e gás Ar+25%CO ₂ ; (b) 160 A e gás Ar+25%CO ₂ ; (c) 120 A e gás 100%CO ₂ e (d) 160 A e gás 100%CO ₂	85
Figura 5.20 Reforço dos cordões de solda para os processos GMAW e FCAW: (a) 120 A e gás Ar+25%CO ₂ ; (b) 160 A e gás Ar+25%CO ₂ ; (c) 120 A e gás 100%CO ₂ e (d) 160 A e gás 100%CO ₂	86
Figura 5.21 Penetração dos cordões de solda para os processos GMAW e FCAW: (a) 120 A e gás Ar+25%CO ₂ ; (b) 160 A e gás Ar+25%CO ₂ ; (c) 120 A e gás 100%CO ₂ e (d) 160 A e gás 100%CO ₂	88
Figura 5.22 Perfis dos cordões soldados com arame maciço e corrente de 120 A: (a) com proteção do gás Ar + 25%CO ₂ e (b) com proteção do gás 100%CO ₂ ..	89
Figura 5.23 Perfis dos cordões soldados com arame maciço e corrente de 160 A: (a) com proteção do gás Ar + 25%CO ₂ e (b) com proteção do gás 100%CO ₂	90
Figura 5.24 Perfis dos cordões soldados com arame tubular e corrente de 120 A: (a) com proteção do gás Ar + 25%CO ₂ e (b) com proteção do gás 100%CO ₂ .	90
Figura 5.25 Perfis dos cordões soldados com arame tubular e corrente de 160 A:(a) com proteção do gás Ar + 25%CO ₂ e (b) com proteção do gás 100%CO ₂ .	91

Figura 5.26 Escorrimento dos cordões de solda para os processos GMAW e FCAW: (a) 120 A e gás Ar+25%CO₂; (b) 160 A e gás Ar+25%CO₂; (c) 120 A e gás 100%CO₂; e (d) 160 A e gás 100%CO₂.....

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Rendimento de depósito (η_D) para o arame tubular (GMAW) e maciço (FCAW) (adaptado de Garcia, 2010).....	27
Tabela 3.1	Composição química e propriedades mecânicas nominais dos arames utilizados para o desenvolvimento do trabalho (informações fornecidas pelos fabricantes), adaptado de Garcia (2010).....	37
Tabela 4.1	Valores dos parâmetros medidos e regulados para obtenção das faixas de corrente desejadas.....	47
Tabela 4.2	Valores dos parâmetros regulados e adquiridos, na segunda fase dos testes exploratórios.....	48
Tabela 4.3	Valores de velocidades de alimentação e faixas de corrente desejada, na soldagem dos testes definitivos.....	48
Tabela 4.4	Velocidade de soldagem calculada e velocidade de alimentação, correspondente.....	50
Tabela 5.1	Parâmetros de soldagem.....	52
Tabela 5.2	Valores médios dos parâmetros de soldagem.....	53
Tabela 5.3	Valores médios dos parâmetros de cálculos dos índices de estabilidade	54
Tabela 5.4	Valores médios dos parâmetros de soldagem com predominância por transferência por curto-circuito (Processo GMAW).....	60
Tabela 5.5	Valores médios dos parâmetros de soldagem com predominância por transferência metálica conduzida pelo fluxo com predominância de curto-circuito (Processo FCAW).....	65
Tabela 5.6	Valores médios dos índices de regularidade.....	66
Tabela 5.7	Indicação da melhor regularidade de transferência metálica baseado nos ensaios em que ocorreram curtos-circuitos por tipo de gás de proteção....	74
Tabela 5.8	Parâmetros médios de soldagem e rendimento de deposição.....	76
Tabela 5.9	Parâmetros definidos de soldagem e mensurados da geometria do cordão.....	83

SIMBOLOGIA

ρ	- Densidade do arame;
\emptyset	- Diâmetro do arame eletrodo;
η_D	- Rendimento de depósito;
$\sigma_{t_{mab}}$	- Desvio padrão do tempo médio de arco aberto;
$\sigma_{t_{mcc}}$	- Desvio padrão do tempo médio de curto-circuito;
$\sigma_{p_{cc}}$	- Desvio padrão do período de curto-circuito;
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas;
Ac	- Área do cordão de solda;
ASTM	- American Society for Testing Materials;
AWS	- American Welding Society;
CO ₂	- Dióxido de carbono;
C25	- Argônio com 25% de Dióxido de Carbono;
CC+	- Corrente contínua com eletrodo no pólo positivo;
CC-	- Corrente contínua com eletrodo no pólo negativo;
DBCP	- Distância do Bico de Contato à Peça;
E	- Escorrimento;
em	- teste exploratório para arame maciço;
et	- teste exploratório para arame tubular;
FCAW	- Flux Cored Arc Welding;
f_{cc}	- frequência de curto-circuito
GMAW	- Gás Metal Arc Welding;
IIW	- Instituto Internacional de soldagem;
I	- Corrente;
IV _{cc}	- Índice Vilarinho de Regularidade da transferência em curto-circuito;
Kd	- Constante de depósito;
L	- Largura do cordão;
La	- Comprimento do arco;

Mf	- Massa final da placa de teste;
Mi	- Massa inicial da placa de teste;
MIG/MAG	- Metal Inert Gas / Metal Active Gas;
P _{cc}	- Período de curto-circuito;
p	- penetração;
pm	- pré-teste para arame maciço;
pt	- pré-teste par arame tubular;
R	- Reforço;
S	- Stick-out;
t _{ab}	- Tempo de arco aberto;
t _{mab}	- Tempo médio de arco aberto;
t _{cc}	- Tempo de curto-circuito;
t _{mcc}	- tempo médio de curto-circuito;
T _f	- Taxa de fusão;
T _d	- Taxa de depósito;
TIG	- Tungsten Inert Gas
Tm	- Teste com arame maciço;
Tt	- Teste com arame tubular;
Ur	- Tensão regulada na fonte;
U	- Tensão adquirida;
Vs	- Velocidade de soldagem;
Va	- Velocidade de alimentação do arame;
ZF	- Zona fundida.

SOUZA, C. I. 2011. **Análise Comparativa dos Processos de Soldagem GMAW e FCAW com Transferência Metálica por Curto-Circuito na Posição Horizontal.** 121 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG.

Resumo

Os processos de soldagem com arame maciço (GMAW) e arame tubular (FCAW), processos que competem entre si em termos de qualidade, produtividade e operacionalidade, necessitam de informações seguras de suas principais características e aplicações para uma determinada condição de soldagem. Desta forma, o objetivo deste trabalho é comparar a potencialidade de cada processo na soldagem horizontal de aço carbono ABNT 1020, variando o tipo de gás de proteção sob um mesmo nível de corrente e tensão de soldagem, mantendo constante a taxa de deposição por unidade de comprimento. Para a realização deste estudo foram utilizados os arames E71T-1 e ER 70S-6 sob as proteções gasosas 100%CO₂ e Ar+25%CO₂ em duas faixas de corrente e quatro faixas de tensão. As características avaliadas foram a regularidade de transferência metálica no modo curto-circuito e a capacidade produtiva através do rendimento de depósito e presença de discontinuidades. De maneira geral, o processo utilizando arame tubular apresentou maior taxa de deposição em relação ao arame maciço, porém com menor rendimento de depósito. Também se observou que, na mesma faixa de corrente e com a elevação da faixa de tensão, houve uma mudança nas características de transferências para os dois processos. Em relação ao escorrimento dos cordões de solda, o arame maciço apresentou melhores cordões com menores faixas de tensão. Para o arame tubular os valores dos escorrimentos foram próximos, tendo uma condição melhor que o arame maciço para maiores valores de tensão de soldagem (região de predominância de transferência metálica conduzida pelo fluxo sem curto-circuito). O gás de proteção 100%CO₂, para ambos os processos, foi o que proporcionou melhor rendimento de depósito e maiores faixas de tensão com transferência com predominância de curto-circuito.

Palavras-chave: GMAW, FCAW, transferência metálica por curto-circuito, gás de proteção, posição horizontal.

SOUZA, C. I. 2011. **Comparative Analysis of Processes Welding FCAW and GMAW Metal Transfer to Short-Circuit in a Horizontal Position.** 121 p. M.Sc. Dissertation, Federal University of Uberlandia, Uberlandia – MG.

Abstract

The process of welding with solid wire (GMAW) and cored wire (FCAW) processes that compete in quality, productivity and operational, need reliable information of its main features and applications for a given welding condition. Thus, the goal is to compare the capability of each process in the horizontal welding carbon steel ABNT 1020, varying the type of shielding gas on the same level of welding current and voltage to maintain a constant deposition rate per unit length. For this study we used the wire E71T-1 and ER 70S-6 under the shielding 100% CO₂ gas and Ar +25% CO₂ in two bands of four current and voltage ranges. We evaluated the stability of metal transfer mode and short-circuit capacity through income and presence of deposit discontinuity. In general, the process using a tubular wire had a higher deposition rate compared to solid wire, but with lower performance deposit. It was noted that, the same current range and with increasing voltage range, there was a change in transfer characteristics for both processes. With regard to straining of the weld beads, the solid wire bends showed better with lower voltage ranges. Cored wire for the values of runoff was similar, with a condition better than solid wire for higher values of welding voltage (region of predominance of metal transfer carried by the flow without short circuit). The shielding gas 100% CO₂, for both processes, which was provided better performance and higher deposit with transfer voltage ranges with a predominance of short-circuit.

Keywords: GMAW, FCAW, short-circuit metal transfer, shielding gas, horizontal position

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A evolução na economia mundial requer grandes exigências por produtos e serviços com qualidade e preço acessível, estes fatores estimulam a produtividade com reduzido custo operacional, os quais garantem a competitividade no ambiente empresarial. Para que haja qualidade com produtividade e baixos custos, as empresas buscam o desenvolvimento de novas tecnologias e o aprimoramento das já existentes que sejam capazes de satisfazer as exigências supracitadas. No segmento da metalurgia e da mecânica, e em particular os da união permanente de peças, há um desenvolvimento constante em tecnologias correlatas de processos de soldagem. Na união permanente, a soldagem é o método mais direto e sua importância está na capacidade de poder unir a maioria dos metais e ligas comerciais e até recuperar produtos manufaturados, permitindo flexibilidade de projeto, redução de custo e facilidade de aplicação em qualquer local.

Os processos de soldagem apresentam um grande campo de aplicação e por isso são empregados para fabricação de produtos diversos, tais como estruturas metálicas, navios, aeronaves, veículos terrestres, equipamentos espaciais. Entre os processos que se destacam no segmento da soldagem, com utilização crescente, está o processo GMAW (Gas Metal Arc Welding). Neste processo, um arco de soldagem é formado entre um arame-eletrodo maciço continuamente alimentado e o material de base, formando uma poça que é protegida por gás de proteção. Este processo é evidenciado no meio industrial por apresentar grande capacidade produtiva, assegurada principalmente pela alta densidade de corrente, o que garante alta taxa de fusão, além de que sua alimentação contínua de arame possibilitar em alto fator de trabalho e automatização do processo. Também este processo de soldagem apresenta uma complexa correlação entre suas variáveis as quais requerem

certo grau de conhecimento e habilidade do operador, supervisor e engenheiro de soldagem, para garantir o melhor aproveitamento de suas qualidades operacionais. Outra restrição pertinente ao uso de processo GMAW ocorre devido às limitadas ações metalúrgicas proporcionada pelo mesmo e composições disponíveis no mercado, com isso comprometendo a versatilidade na soldagem de materiais com exigências de composições especiais. Diante destes fatores supracitados, foi lançado no mercado, por algumas empresas fabricantes de arame eletrodos, um tipo de arame tubular (processo FCAW - Flux Cored Arc Welding) que viesse a suprir a deficiência do arame maciço.

O arame tubular é fabricado de fita de aço em forma de tubo e contém um fluxo interno (metálico ou inorgânico) com características operacionais adequada ao tipo de soldagem requerida. Para Fortes (2004), na soldagem com arame maciço ou com arame tubular (com pouquíssima exceção) utilizam basicamente os mesmos equipamentos, e quando necessárias mudanças para adequação a alguma aplicação particular ou em algum requisito especial, os arames tubulares são mais fáceis de serem adaptados e isso envolve alterações na formulação e no percentual de fluxo. Também para este autor, a soldagem a arco com arame tubular é um processo que reúne as principais vantagens da soldagem com arame maciço e proteção gasosa, tais como: alto fator de trabalho do soldador; alta taxa de deposição; alto rendimento; resultando em alta produtividade e qualidade da solda aliados com as vantagens da soldagem manual com eletrodos revestidos como a grande versatilidade, possibilidades de ajustes da composição química do cordão de solda, e facilidade de operação em campo.

Gomes (2006), em seus estudos, comenta que a popularidade do processo FCAW tem crescido devido às possíveis vantagens que este processo oferece, tais como: alta qualidade do metal de solda depositado; excelente aparência do cordão de solda; boas características de arco; além de baixo número de respingos. Também acrescentando, a razão de fusão do arame tubular na soldagem ser maior que do arame sólido, pois na mesma faixa de corrente, o invólucro tubular metálico tem menor massa condutora e isso proporciona maior intensidade relativa de corrente. A maior limitação no uso do arame tubular está no custo de aquisição deste consumível, embora mantendo de forma semelhante as variáveis de ambos os processos. No lançamento do eletrodo tubular, foi atribuído e este processo alta produtividade e capacidade de formação de cordão de solda com qualidade, e sendo estas características estabelecidas como benefícios compensatórios ao elevado custo do arame. Há afirmação que o processo de soldagem com arame tubular, de maneira geral, apresenta desempenho superior ao processo de soldagem

com arame maciço. Entretanto o processo GMAW continua merecendo grande aceitação no meio industrial, principalmente com estudo e aperfeiçoamento de equipamentos que proporcionam melhorar o desempenho de uso do arame maciço.

As duas opções de soldagem (GMAW e FCAW) deixam os usuários confusos na hora da seleção de qual processo utilizar. Contudo, pode-se esperar que cada processo tenha a sua individualidade e corresponda com melhor desempenho relativo em determinada situação de uso. Para que cada processo seja utilizado corretamente é necessário conhecer as suas características operacionais em função de sua aplicação. Apesar do grande volume de informações citadas na literatura, existe ainda deficiência em relação à comparação dos dois processos para uma determinada aplicação.

As literaturas correlatas destacam alguns aspectos operacionais fazendo comparações entres os processos na soldagem por deposição na posição plana, o que nem sempre corresponde com a capacidade operacional de cada processo. Desta forma, é necessário o desenvolvimento de uma metodologia que tenha capacidade de analisar de maneira comparativa os dois processos, para uma determinada aplicação e condições de soldagem. Com isso, o objetivo deste trabalho é avaliar, nas mesmas condições de soldagem os dois arames de grande aplicação no mercado (maciço AWS ER 70S-6 e tubular AWS E71T-1) e dois gases de proteção ($\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e $100\%\text{CO}_2$), e comparar a potencialidade de cada processo na soldagem horizontal de aço carbono ABNT 1020, mantendo constante a taxa de deposição por unidade de comprimento.

A metodologia utilizada deverá ser capaz de focar e comparar a eficácia de cada processo, na estabilidade de transferência metálica por curto-circuito, fator econômico (taxa de fusão, taxa de deposição e rendimentos de deposição) e geometria do cordão de solda. Este estudo não será capaz de avaliar todas as variáveis envolvidas nos processos, limitando-se apenas a um tipo de bitola de arame para ambos os processos, sob dois tipos de gases de proteção, apenas na posição horizontal de soldagem, para um tipo de chanfro e a poucas faixas de correntes nominais e tensão de soldagem. Também não será avaliado o efeito da indutância, sobre os dois processos de soldagem. Assim, do ponto de vista técnico, deixa-se claro de que não se pode estar falando de comparação completa entre os processos, mesmo porque os fabricantes de consumíveis não apresentam produtos com iguais comportamentos. Acredita-se que o resultado deste estudo seja útil para acrescentar um número maior de informações aos usuários dos processos, e que estes tenham maiores conhecimentos e argumentos na escolha do processo adequado.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica que será apresentada, neste capítulo, tem como finalidade reunir informações a respeito dos processos de soldagem com eletrodo maciço (GMAW) e com eletrodo tubular (FCAW), as quais servirão de base no conhecimento técnico e científico para a realização e discussão dos resultados adquiridos nesta pesquisa. Esta revisão dará mais ênfase em transferência metálica por curto-circuito e na soldagem fora da posição plana (horizontal), que é a proposta desse trabalho.

2.1 Introdução

Na união permanente de peças, a soldagem é o método mais direto e pode ser utilizado só ou em conjunto com outros tipos de processos de fabricação. Sua importância está na capacidade de poder unir a maioria dos metais e ligas comerciais e até recuperar produtos manufaturados, permitindo flexibilidade de projeto, redução de custo e facilidade de aplicação em qualquer local. Os processos de soldagem apresentam um grande campo de aplicação e por isso são empregados para fabricação de produtos diversos, tais como estruturas metálicas, navios, aeronaves, veículos terrestres, equipamentos espaciais.

Os processos de soldagem GMAW (Gás Metal Arc Welding) e FCAW (Flux Cored Arc Welding) com proteção gasosa, são realizados por um arco elétrico estabelecido entre um arame nu, continuamente alimentado, e a peça. A proteção do arame e da poça de fusão é realizada por gás que flui pelo bocal, concentricamente com o eletrodo. E o tamanho das gotas, forma e frequência desta deposição caracterizam um determinado tipo de transferência metálica (WANG et al., 1995; MACHADO, 1996).

Os arames dos processos GMAW e FCAW são diferentes, pelo fato deste possuir um formato tubular, tendo em seu núcleo um fluxo composto por materiais inorgânicos e/ou metálicos que possuem várias funções, entre as quais a melhoria das características do arco elétrico, a transferência do metal de solda, a proteção do banho de fusão e em alguns casos a adição de elementos de liga, além de atuar como formador de escória. Este processo possui basicamente duas variantes: podendo ser protegido por gás inerte, por gás ativo ou mistura destes ou autoprotégido, sem a utilização de gases de proteção.

Os dois processos de soldagem utilizam basicamente os mesmos equipamentos, embora, em alguns casos, o processo FCAW requeira equipamentos de maior capacidade (maior velocidade do arame eletrodo) em relação ao processo GMAW. Quando é necessário mudanças para adequação a alguma aplicação particular ou em algum requisito especial, os arames tubulares são mais fáceis de serem adaptados e isso envolve alterações na formulação e no percentual de fluxo (FORTES, 2004).

Os processos GMAW e FCAW são utilizados principalmente no modo semi-automático e também podendo ser usados no modo automático, através de robôs industriais. O equipamento básico para ambos os processos inclui fonte de energia, cabos, tocha de soldagem, alimentador de arame e seu sistema de controle, bobina de arame (eletrodo), fonte de gás de proteção com regulador de vazão, ferramentas e material de segurança, exemplificado na Figura 2.1, (MODENESI; MARQUES, 2006).

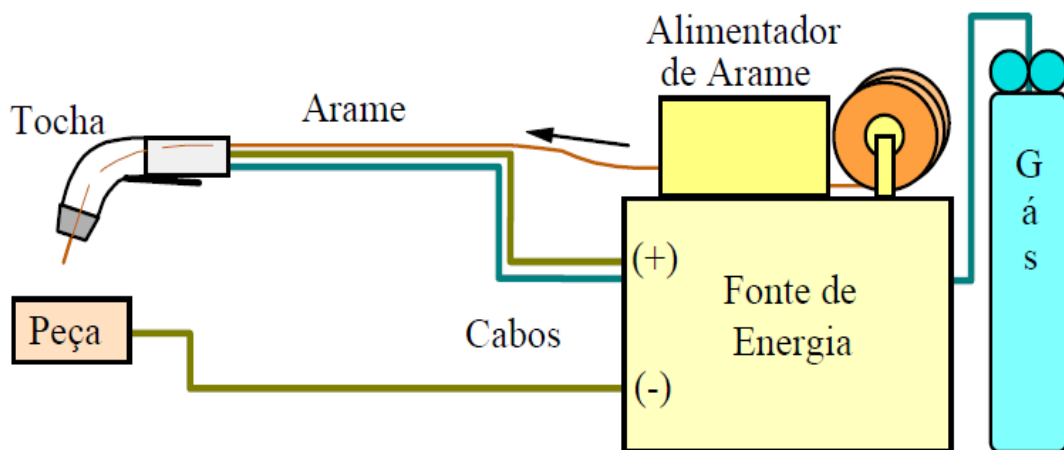


Figura 2.1 – Desenho esquemático do equipamento de soldagem GMAW e FCAW, com proteção gasosa (MODENESI; MARQUES, 2006).

2.2 Processo de soldagem GMAW

No processo GMAW todos os metais de uso comercial, tais como aços carbono, aços de alta resistência e baixa liga, aço inoxidável, alumínio, titânio e ligas de níquel podem ser soldados em todas as posições de soldagem através da escolha apropriada de gás de proteção, de eletrodos e das variáveis de soldagem (BRACARENSE, 2003). Para Gimenes e Ramalho (2005), neste processo o modo de transferência metálica mais utilizada é por curto-circuito, pois produz uma poça de fusão pequena e de rápido resfriamento, sendo por isto, adequada para chapas finas e soldagem fora de posição.

Geralmente os gases de proteção utilizados no processo GMAW são inertes, como Argônio e Hélio, ou tipo oxidante, também denominado “ativo”, tais como CO_2 ou $\text{Ar}+\text{O}_2$, ou uma combinação desses gases (MACHADO, 1996). Segundo Modenesi e Marques (2006) os gases inertes puros são geralmente usados na soldagem de metais e ligas não ferrosas, e misturas de gases inertes com pequenas quantidades de gases ativos são usadas geralmente com aços ligados, enquanto que misturas mais ricas em gases ativos ou CO_2 puro são usados na soldagem de aços carbono. A Figura 2.2 apresenta, de maneira esquemática, a soldagem de materiais metálicos pelo seu aquecimento e fusão localizados através de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico não revestido na forma de fio e a peça.

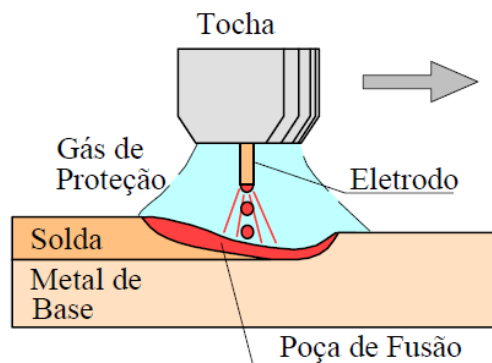


Figura 2.2 – Desenho esquemático do processo de soldagem GMAW (MODENESI; MARQUES, 2006).

As características positivas do processo GMAW são a relativamente elevada taxa de fusão de arame-eletrodo, a possibilidade da variação de modos com que a taxa de transferência metálica se dá e a relativa portabilidade da tocha. O pequeno comprimento do eletrodo, ou seja, a extensão energizada do arame-eletrodo permite o uso de alta densidade de corrente e com isso aumentando o consumo sem afetar a rigidez mecânica do eletrodo por aquecimento ao longo de seu comprimento. E os seus pequenos diâmetros conferem

um arco elétrico concentrado de alto poder de fusão do metal de base. Estas são as principais razões de se creditar ao processo GMAW uma alta capacidade de produção (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

2.3 Processo de soldagem FCAW

O processo de soldagem com arame tubular (FCAW) proporciona alta qualidade ao metal de solda depositado, boa aparência ao cordão de solda, boas características de arco, além de diminuir o número de respingos e possibilidade de solda em todas as posições. Este processo adquiriu popularidade para soldagem de aços carbono e baixa liga, em chapas de diferente espessura. Muitas vezes sendo utilizado em grandes espessuras onde a geometria de junta e posição de soldagem não permitia a aplicação de outros processos de alto rendimento tal como arco submerso ou eletroescória. Segundo Joaquim (2001), utilizando “arame tubular com proteção gasosa” a queima e vaporização do fluxo proporciona a estabilidade do arco elétrico, bem como a melhoria das características do metal depositado. No entanto, sendo pouca a quantidade de fluxo, a sua queima não permite obter o volume necessário de gases para total proteção da poça de fusão, sendo necessário utilizar uma proteção adicional de gás. Este gás pode ser inerte (argônio, hélio), ativo (dióxido de carbono) ou mesmo a mistura destes.

Os arames tubulares com proteção gasosa podem ser do tipo com fluxo metálico (metal cored wires) ou do tipo com fluxo não metálico (flux cored wires). O primeiro é caracterizado por um fluxo composto na sua quase totalidade por pós-metálicos e ferro-ligas, o segundo, por sua vez, possui em sua composição, grandes quantidades de minérios e minerais que conferem aos arames tubulares “flux cored wires” o caráter rutilico ou básico (FORTES, 2004).

Quando o fluxo é metálico (metal cored wires), de acordo com estudos de Bauné et al. (2000), seus elementos têm a função de unir o metal de solda juntamente com os elementos contidos no interior do eletrodo, para aumentar a resistência do material depositado e também para desoxidá-lo.

O fluxo de caráter rutilico é uma forma do dióxido de titânio, que permite controlar o ponto de fusão e a viscosidade da escória, de tal modo que torna possível fabricar eletrodos com escória consistente para a soldagem na posição vertical, ou escórias fluidas para a soldagem em altas velocidades na posição plana. O dióxido de titânio é um componente

estável que contribui com pouco oxigênio para a solda, porém favorece a transferência globular devido à fluidez (GOMES, 2006).

O fluxo de caráter básico têm como resultado solda com excelente ductilidade e tenacidade. Seu modo de transferência é mais globular e sua soldabilidade não é tão boa, quando comparada com o eletrodo rutilico, gerando também uma quantidade maior de respingos e um cordão mais convexo (GOMES, 2006). Até mesmo com diâmetro pequeno não é usado fora de posição, devido às baixas correntes de soldagem e ao modo de transferência globular que necessita do efeito da gravidade para completar sua transferência. A escória formada pelo eletrodo básico não dá o suporte à poça de fusão, conseguido com o eletrodo rutilico (FRENCH et al., 1995). A Figura 2.3 mostra um esquema da soldagem com arame tubular com proteção gasosa onde o gás de proteção é introduzido pela tocha.

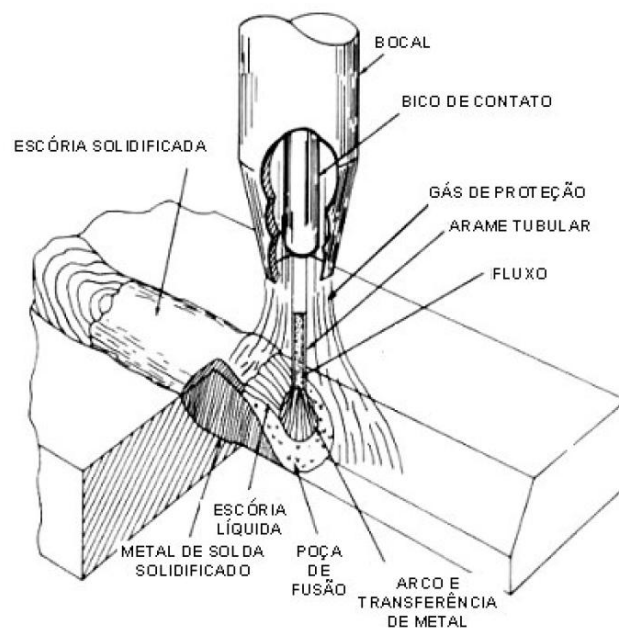


Figura 2.3 – Desenho esquemático do processo de soldagem com arames tubulares com gás de proteção (FORTES, 2004).

2.4 Parâmetros do processo GMAW e FCAW

Na soldagem com arame maciço (GMAW) e com arame tubular (FCAW), existe uma série considerada de parâmetros capazes de influenciar e governar, em maior ou menor grau, a saída (resposta) do processo. Alguns parâmetros a ser considerar são: o modo de transferência metálica, corrente, tensão, distância bico de contato peça (DBCP), gás de

proteção, composição química do arame eletrodo, diâmetro do eletrodo, indutância, posição de soldagem, etc. A inter-relação entre esses parâmetros é capaz de influenciar nas características operacionais do processo bem como na produção, geometria e no aspecto final do cordão (GARCIA, 2010).

2.4.1 Modos de transferência Metálica

Uma das mais relevantes características de processos de soldagem a arco nos quais há adição de material é a forma em que se dá a transferência desse material para a peça a ser soldada, o modo de transferência influi grandemente à eficiência de deposição, à qualidade estética e estrutural da junta realizada, à geometria da solda, às formas pelas quais cada operação pode ser realizada, o aporte térmico ao material de base, entre outros aspectos relacionados. Como consequência, o modo de transferência determina junto a outras variáveis e parâmetros de soldagem, os custos e a produtividade alcançada nas operações produtivas adotadas nas empresas (SILVA, 2006).

O modo pelo qual o material fundido é transferido do eletrodo consumível para a peça de fusão exerce grande influência sobre o desempenho do processo, podendo afetar diretamente a estabilidade do processo, a geração de respingo, a capacidade posicional do processo, a qualidade e o aspecto visual do cordão de solda (NORRISH, 1992).

O tipo de transferência é determinado por um grande número de fatores. Os que mais influenciam são: magnitude e tipo de corrente e tensão de soldagem; diâmetro do eletrodo; composição do eletrodo; extensão do eletrodo e proteção de gás (NORRISH, 1992).

Conforme Lucas et al. (2005), recentemente o Instituto Internacional de Soldagem (IIW) vem propondo atualizações e revisões na classificação dos modos de transferência metálica adicionando as novas variantes dos mecanismos obtidos com os avanços na tecnologia de fontes e de sistema de controle. Com isso, foi proposto um conceito básico denominado “Modos Fundamentais de Transferência Metálica”, ou seja, o conjunto de modos de transferência que são bem definidos e podem ser claramente distintos uns dos outros. Estes modos podem ser naturais ou controlados. No modo natural, a transferência metálica varia naturalmente dentro de uma faixa de corrente e níveis de tensão. No modo controlado, controladores são usados nas fontes de soldagem para fornecer formatos de onda de corrente, de tal forma que a transferência ocorra de forma controlada. A Figura 2.4 mostra a classificação dos modos de transferência metálica proposto pelo Instituto Internacional de Soldagem.

Para Bracarense (2003), neste modo de transferência o metal é transferido do eletrodo para a peça somente durante o tempo em que o eletrodo está em contato com a poça de fusão e que nenhum metal é transferido através do arco e acrescenta que a poça de fusão formada é pequena e de rápido resfriamento e por isso é geralmente utilizada para unir seções finas, para soldagem fora de posição e para aberturas de raiz. Também conforme este autor, quando o arame toca a poça de fusão a taxa em que a corrente aumenta deve ser alta o suficiente para aquecer o eletrodo e promover a transferência metálica, mas baixa o suficiente para minimizar respingos causados pela separação violenta da gota de metal. Esta taxa de aumento de corrente pode ser controlada pela indutância da fonte de energia.

A Figura 2.5 ilustra um ciclo completo de curto-circuito. Quando o arame toca a poça de fusão (A), a corrente começa a aumentar para uma corrente de curto-circuito. Quando esse valor alto de corrente é atingido (E), o metal é transferido e o arco é então reaberto. Como o arame está sendo alimentado mais rapidamente que o arco consegue fundi-lo, o arco será eventualmente extinguido por outro curto (I). O ciclo recomeça e não há metal transferido durante o período de arco aberto, somente nos curtos-circuitos (FORTES, 2005).

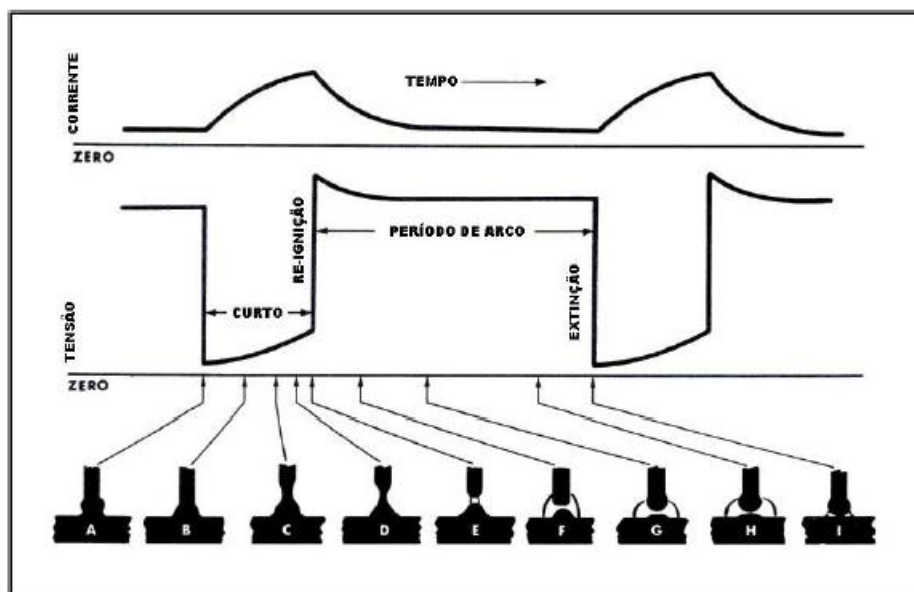


Figura 2.5 – Representação esquemática de corrente e tensão versus tempo, típico do ciclo de curto-circuito (AWS, 1991).

A transferência metálica globular, Figura 2.4B (B1), ocorre tipicamente com correntes baixas e moderadas, mas com faixa de tensão relativamente alta (arco relativamente mais longo) o suficiente para evitar a transferência por curto-circuito. Nessa transferência, onde os destacamentos das gotas se dão basicamente pela ação gravitacional, as gotas que se

formam têm o seu diâmetro geralmente maior que o diâmetro do seu eletrodo, antes do destacamento.

O tamanho, a forma e a posição da gota, assim como a sua frequência de transferência (1 a 10 Hz) dependem principalmente do diâmetro e composição do arame-eletrodo, do gás de proteção e da intensidade da corrente de soldagem e também durante a formação e o destacamento da gota, a resistência elétrica no trecho “gota-arco” vai progressivamente se alterando, o que dá um caráter dinâmico bem característico aos sinais de corrente e tensão (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

Para Modenesi (2009), em uma primeira aproximação, a transferência globular típica é semelhante ao gotejamento de água em uma torneira parcialmente aberta. O metal líquido forma-se na ponta do arame pela fusão deste e mantém-se preso a este por ação da tensão superficial. Com o aumento do tamanho da gota, o seu peso aumenta e acaba por ocasionar a sua separação do arame e a gota de metal líquido se transfere para a poça de fusão por ação da gravidade, como apresentado na Figura 2.6. Também para este autor, na soldagem com um gás de proteção a base de argônio, esta forma de transferência é observada para correntes relativamente baixas e tensões elevadas, mas para soldagem de aço com gases a base de CO_2 , a transferência globular ocorre mesmo com valores elevados de corrente.

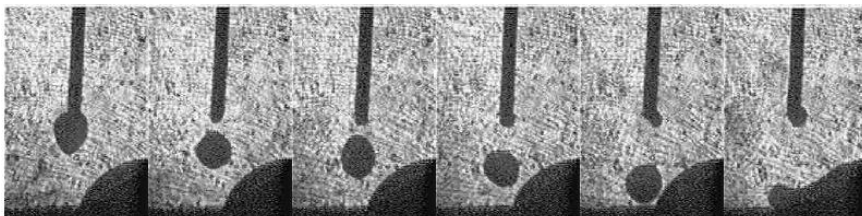


Figura 2.6 – Representação do comportamento das gotas na transferência globular (Luz et al., 2005).

Com a mesma intensidade de corrente e comprimento do arco, o modo globular pode sofrer alteração quando o eletrodo muda de polaridade positivo para polaridade negativa, ou na mesma polaridade positiva, mas utilizando gases (hélio ou dióxido de carbono puro) que favoreçam o aparecimento de força reativa e com o aumento dessa reação proporcione a transferência metálica globular repelida, Figura 2.4B (B2) e Figura 2.7. Com essa força reativa a gota passa a sofrer uma pressão elevada sobre uma pequena área, na sua parte inferior, podendo ser empurrada para cima e desviando a sua trajetória normal e, por consequência, dificultando a sua transferência para a poça de fusão (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

Para Ushio et al. (1995), a utilização de gases de proteção com teor superior a 10% de CO_2 na mistura pode causar repulsão nas gotas, resultando no modo de transferência globular repelida, este gás também causa um aumento da força no arco, que age sobre a gota, no sentido de dificultar o destacamento da mesma.

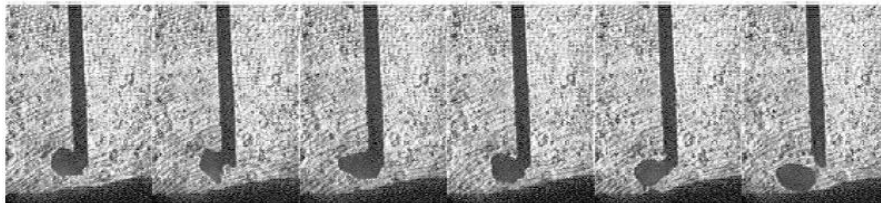


Figura 2.7 – Representação da força reativa agindo na transferência globular repelida (Luz et al., 2005).

A transferência metálica pulsada, apresentada na Figura 2.4C, é conseguida com fontes especiais que impõem uma forma especial à onda de corrente de soldagem, caracterizada por pulsos periódicos de alta corrente (acima da corrente de transição). Esta pulsação permite uma transferência goticular com valores médios de corrente inferiores aos valores nos quais esta forma de transferência ocorre. Assim, obtêm-se as vantagens desta transferência com baixos valores de corrente, permitindo a soldagem fora de posição plana e de juntas de pequena espessura. As maiores limitações desta forma de operação são a sua maior complexidade de operação e a necessidade de equipamentos especiais.

Na transferência metálica goticular, Figura 2.4D, causada pelo aumento da corrente de soldagem, o diâmetro das gotas de metal que se transferem para a peça diminui, até certa faixa de corrente onde o modo de transferência muda bruscamente de globular para goticular. Este tipo de transferência é caracterizado pela grande quantidade de pequenas gotas (menor que o diâmetro do arame eletrodo) a alta frequência, quase formando um jato contínuo, apresentada na Figura 2.8, e essas gotas formadas são depositadas com alta energia (altas correntes e tensões) proporcionando uma poça de fusão bastante fluída, limitando o processo para a posição plana e de chapas grossas (CAMPOS, 2005).

Esse modo é habitualmente empregado em situações onde são possíveis e desejáveis taxas de deposição máximas. Não há restrições relativamente ao uso de quaisquer arames tubulares com esse modo de transferência (FORTES, 2004)

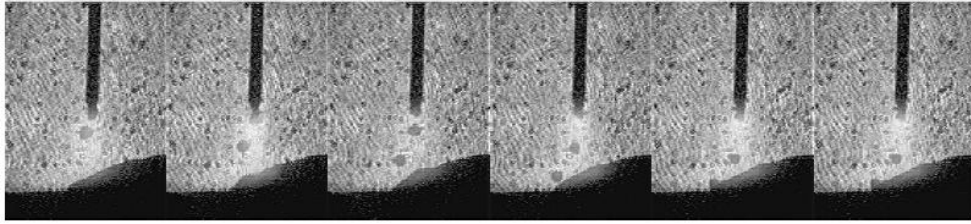


Figura 2.8 – Representação do comportamento das gotas na transferência goticular (spray) (Luz et al., 2005).

Na transferência metálica goticular com alongamento, forma-se um filamento líquido na ponta do eletrodo, na extremidade do qual são formadas finas gotas que são transferidas axialmente para a poça, apresentado Figura 2.4D (D1). O filamento líquido pode se tornar longo o suficiente para tocar a poça de fusão causando curtos-circuitos ocasionais e perturbando a estabilidade do processo.

A transferência metálica explosiva, apresentada na Figura 2.4D (D2), é caracterizada por reações químicas entre os componentes do eletrodo que formam bolhas no interior das gotas que explodem antes do destacamento, podendo ser observada no processo GMAW na soldagem de alumínio com eletrodo contendo magnésio, causando um alto índice de fumos e respingos.

A transferência metálica rotacional ocorre com correntes elevadas, onde uma nova transição ocorre com o aparecimento de uma instabilidade no filamento líquido que passa a girar, apresentada Figura 2.4E. Nestas condições, a transferência não é mais axial. A transição para transferência rotacional depende mais fortemente do comprimento do eletrodo do que da corrente de transição, tendendo a se aproximar desta quando este comprimento é aumentado.

2.4.2 Proteção gasosa

O processo de soldagem com proteção gasosa requer um fluxo de gás de proteção em torno do conjunto metal de base e arame-eletrodo para produzir soldas com qualidade, principalmente para proteger a poça de fusão e gotas em transferência. Devido a estas principais funções, o gás fornecido é denominado de proteção, apesar de também exercer efeitos adicionais (não menos importantes de que a função principal), como estabilizar o arco, controlar a operacionalidade e transferência metálica, influir sobre a geometria, propriedades mecânicas e características metalúrgicas da solda (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

As principais características de um gás de proteção são:

✓ Potencial de ionização

Diferença de potencial necessária para remover um elétron de um átomo de gás, tornando este um íon. A ignição e a estabilidade do arco são grandemente influenciadas pelo potencial de ionização dos gases de proteção. Gases com baixo potencial de ionização, como o Argônio, têm seus átomos facilmente transformados em íons e isto ajuda a manter um arco suave e estável (LYTTLE; STAPON, 1990).

✓ Condutividade térmica

Está relacionada com a capacidade de transferência do calor gerado pelo arco para o metal de base e meio ambiente. A condutividade térmica dos gases varia em função da temperatura. Gases que possuem elevada condutividade térmica transferem mais calor para o metal de base, influenciando, assim, tanto características geométricas quanto microestruturais do cordão (MOREIRA, 2008).

Quando a condutividade térmica aumenta, maior tensão de soldagem é necessária para sustentar o arco. O gás dióxido de carbono tem maior condutividade térmica que o gás argônio e devido a isso aquele gás transfere mais calor à solda e, portanto o dióxido de carbono necessita de uma tensão de soldagem maior para manter o arco estável (FORTES, 2005);

✓ Potencial de oxidação

A natureza oxidante que determinado gás de proteção tem de promover a oxidação, altera o desempenho e as propriedades do arco e, como consequência, influi no resultado de depósito dessa solda.

Na soldagem de aços, o efeito de oxidação pode reduzir a estabilidade do processo quando as camadas de óxido próximas da poça de fusão são consumidas e o arco tende a se desviar para longe desta, em busca de novas regiões para a emissão de elétrons. Para regenerar a camada de óxido e, assim, eliminar este efeito, uma quantidade de gás oxidante (O_2 ou CO_2) é adicionada à mistura de proteção (MODENESI, 2009).

Conforme estudos, a presença de O_2 no gás de proteção favorece a estabilidade do arco promovendo uma região de maior limpeza catódica nas adjacências do cordão, e esse potencial de oxidação também influi na fluidez da poça de fusão, ou seja, na facilidade em que o metal líquido se desloca sobre o metal de base, volume de fumos, tenacidade e resistência mecânica do metal de solda, entre outros fatores, (COSTA et al., 2007).

2.4.3 Principais gases de proteção utilizados no processo GMAW e FCAW

Os gases de proteção utilizados no processo GMAW podem ser inertes, ativos ou misturas destes dois tipos e a simples mudança do gás, por sua vez, poderá ser responsável por uma série de alterações no comportamento da soldagem (GIMENES; RAMALHO, 2005).

Para Joaquim (2001), os gases utilizados para soldagem com arame Tubular (FCAW) são basicamente os mesmos utilizados na soldagem GMAW com arame maciço, sendo os mais utilizados o dióxido de carbono como gás ativo e argônio e ou hélio como gases inertes, podendo também utilizar-se a mistura destes, de acordo com as especificações do fabricante de consumível.

O argônio (Ar), o hélio (He) ou as misturas do Ar com He são gases inertes e não reagem metalurgicamente com a gota ou a poça de fusão, mas atuam somente como proteção da região em processo e auxiliam na formação e estabilização do arco. Os gases ativos, além das funções de proteção e formação do arco elétrico, também reagem metalurgicamente com a gota em transferência e a poça de fusão. Destes gases ativos os mais usados são: o dióxido de carbono (CO_2) puro, as misturas (Ar + CO_2), as misturas (Ar + O_2) e as misturas (Ar+ CO_2 + O_2) (QUITES; DUTRA, 1979).

a) Dióxido de Carbono (CO_2)

Por não ser inerte, o CO_2 não pode ser utilizado em materiais reativos e o seu uso deve ser restrito a materiais de baixos teores de carbono e alguns aços inoxidáveis, por poder transferir carbono para a solda destes aços. A sua grande capacidade de troca de calor e de energia liberada na recomposição das moléculas faz transferir mais calor para o metal de base em relação com o argônio puro, e forma um cordão semelhante à geometria do cordão formado pelo gás He. O CO_2 possibilita a transferência metálica por curto-circuito e precariamente a transferência metálica globular, devido a uma maior tensão superficial, e não permite a transferência metálica por spray. Mesmos no modo de transferência metálica por curto-circuito, o CO_2 leva a um acabamento irregular e oxidado da superfície do cordão, gerando muitos respingos e fumos, mas com a vantagem de proporcionar maiores velocidades e penetração profunda (MACHADO, 1996). Também para Sales (2001) e Qites (2002), a elevada condutividade térmica do CO_2 faz com que o núcleo de condução do arco tenha pequeno diâmetro, tornando o arco mais constrito, o que provoca uma maior pressão do arco sobre a poça de fusão, promovendo uma influência marcante na geometria do cordão, aumentando não somente a penetração, mas também o reforço e diminuindo a largura do cordão. Para Stenbakca e Person (1989) e Irving (1994), uma mesma corrente

impõe tensões maiores para misturas com mais CO₂. Isto se traduz em maior fluidez na poça de fusão, pela maior geração de calor, e consequente maior molhabilidade.

No processo FCAW com a maioria dos arames tubulares com fluxo não metálico pode ser aplicada apenas com CO₂, produzindo bons resultados. Arames tubulares básicos também produzem características física superiores quando utilizados com CO₂ (FORTES, 2004).

b) Argônio – Dióxido de Carbono (Ar - CO₂)

As misturas binárias com Ar e CO₂ são muito usadas no processo MIG/MAG, principalmente para a soldagem dos aços carbonos e de baixa liga e, com aplicação limitada, em aços inoxidáveis. Os teores de CO₂ variam de 3% a 25% para aços de baixo carbono e menores de 3% para soldagem de aços inoxidáveis. A adição do CO₂ ao Ar, em sua devida proporção, dá maior estabilidade na soldagem de metais ferrosos e aumenta o desempenho do gás em transferência metálica por curto-circuito. A adição de Ar no CO₂ diminui os níveis de respingo e melhora o aspecto superficial do cordão em comparação ao CO₂ puro. Na mistura Ar e CO₂, a redução do teor de CO₂ torna o arco mais frio e facilitando a soldagem de chapas de menor espessura (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

A mistura de Ar com 25%CO₂ é conhecida universalmente como o gás usado na soldagem GMAW com transferência por curto-circuito em aços doces. Foi originalmente formulado para maximizar a frequência de curto-circuito em arames sólidos de diâmetros 0,8 mm e 0,9 mm, mas, ao longo dos anos, tornou-se o padrão de fato para a soldagem da maioria dos diâmetros dos arames sólidos (GMAW) e também para a soldagem dos arames tubulares (FCAW) mais comuns. Essa mistura funciona bem em aplicações de altas correntes em materiais espessos, e pode alcançar boa estabilidade do arco, controle da poça de fusão e aparência do cordão, bem como alta produtividade (FORTES, 2005).

2.4.4 Corrente de soldagem e velocidade de alimentação do arame

- Variáveis dos processos - durante a soldagem, certos números de fatores (variáveis) podem influenciar direta ou indiretamente as condições gerais de operação e outras características da solda, tais como: o formato da poça de fusão, a sua penetração no metal de base, a posição da escória em relação à poça de fusão, a geometria do cordão, a estabilidade do processo e aspecto econômico do processo (MODENESI, 2009). Porém existe uma correlação de dependência entre as variáveis e isso torna muito difícil ajustar um parâmetro sem provocar alterações em outro e consequentemente causam mudanças no

aspecto final do cordão. Com isso torna-se necessário conhecer as influências de cada variável sobre a geometria do cordão bem como os efeitos correlacionados (GARCIA, 2010).

Conforme a norma ASM (1993), as variáveis mais importantes dentro do processo de soldagem GMAW são: corrente de soldagem e velocidade de alimentação do arame; tensão e comprimento do arco; velocidade de soldagem; DBCP e comprimento livre do eletrodo; diâmetro e composição do eletrodo; gás de proteção (visto anteriormente).

- Corrente de soldagem e velocidade de alimentação do arame - nos processos GMAW e FCAW a corrente de soldagem está diretamente relacionada à velocidade de alimentação do arame. Quando a velocidade de alimentação do arame é alterada, a corrente de soldagem varia no mesmo sentido. Em outras palavras, um aumento (ou diminuição) na velocidade de alimentação do arame causará um aumento (ou diminuição) da corrente de soldagem. E tanto a corrente como a velocidade de alimentação tem relação direta com a taxa de fusão do arame, ou seja, quanto maior for a velocidade de alimentação maior será a corrente fornecida pela fonte de modo a fundir o arame e alimentando à poça de fusão (FORTES, 2005).

Segundo Machado (1996), a corrente é o parâmetro com maior influência sobre a taxa de consumo; modo de transferência; penetração e reforço. A taxa de fusão varia linearmente com esse parâmetro, sendo que em altas correntes o efeito é mais pronunciado, provavelmente devido ao aquecimento (I^2R) do eletrodo após o bico de contato. Também para este autor, o tipo de polaridade mais usada no processo GMAW é a inversa onde a corrente é contínua e o eletrodo está no pólo positivo (CC+). Nesta polaridade o arco torna-se mais estável e proporciona melhor penetração. A polaridade direta (CC-), onde o eletrodo está ligado no pólo negativo, é de pouco uso na soldagem com o processo GMAW e pode ser eventualmente utilizada quando se quer aumentar a velocidade de depósito e não for necessária grande penetração. Para Quites (2002) e Machado (1996), a técnica de soldagem com a utilização da corrente alternada (CA) ainda está sendo estudada e aprimorada.

Conforme Fortes (2004), para o processo FCAW, a polaridade CC+ é recomendada para arames tubulares rútilicos, pois na polaridade negativa as características produzidas podem ser inferiores e eventualmente causar porosidade. E alguns arames tubulares metálicos funcionam bem em CC+ e em CC-, enquanto que outro arame deste mesmo tipo e o básico opera melhor com CC-, resultando em uma ação mais efetiva do arco com poucos respingos e um bom acabamento do cordão de solda. Também para este autor, para um

arame eletrodo tubular rutilico com diâmetro de 1,2 mm e soldagem na posição plana/horizontal recomenda-se faixa de corrente de 150 a 290 A e tensão de 23 a 30 V.

2.4.5 Tensão e comprimento do arco

A tensão do arco e o seu comprimento estão diretamente relacionados, e podem afetar a aparência, penetração e as propriedades do cordão de solda. Grandes comprimentos de arco causam muitos respingos e irregularidade na morfologia do cordão, enquanto que para tensões baixas (arco com comprimento menor) há uma diminuição na tensão superficial da poça de fusão, pois a área de contato entre o arco e o metal base é menor, então a poça receberá menos calor irradiado do arco, originando cordão convexo de pouca penetração com superfície estreita (BRACARENSE, 2000; JOAQUIM, 2001; GOMES, 2006).

A escolha da tensão mais adequada é função da intensidade de corrente (para estabilizar o arco); tipo do arame e do gás de proteção, além da geometria desejada do cordão. Uma muito baixa tensão pode causar porosidade (nos lados do cordão); cordão estreito e convexo. Um aumento excessivo deste parâmetro faz com que o arco aumente proporcionalmente, causando porosidade; salpico e mordedura. Em ambos os casos, a estabilidade do arco é prejudicada (MACHADO, 1996).

Partindo de um valor estipulado para tensão do arco, um aumento na tensão tende a achatar o cordão de solda e aumentar a zona de fusão. Tensões excessivamente grandes podem causar porosidades, respingos, e trincas. Redução na tensão resulta em um cordão mais estreito e penetração profunda. Tensões excessivamente baixas podem causar toque do eletrodo (BRACARENSE, 2003).

2.4.6 Velocidade de soldagem

A velocidade de soldagem, que é o deslocamento linear do arco ao longo da junta a ser soldada, influencia a energia e a quantidade de calor cedido para a poça de fusão. Para Miranda (1999), a variação da penetração, primeiro aumenta e depois diminui com o aumento da velocidade de soldagem, sendo máxima para velocidades intermediárias, e quando a velocidade é muito baixa, a quantidade de material depositado por unidade de comprimento da solda aumenta, a poça de fusão fica com dimensões elevadas e o calor do arco atua diretamente na poça e não no metal de base, fazendo com que a penetração seja baixa. Por outro lado para velocidades de soldagem muito altas, a quantidade de calor transferida por unidade de comprimento é reduzida e a penetração também diminui, podendo ocorrer ainda mordeduras ao longo do cordão.

2.4.7 Comprimento do eletrodo (stick-out) e distância bico de contato peça (DBCP)

O comprimento energizado do eletrodo (stick-out) é definido como a distância entre a extremidade do bico de contato da tocha e a extremidade do arame em contato com o arco. Quando esta distância aumenta, também aumenta a resistência elétrica do arame eletrodo causando um maior aquecimento pelo efeito joule (I^2R). E ao mesmo tempo, há variação na corrente média de soldagem e consequente variação na temperatura e fluidez do metal de solda (KVASOY, 2000; SILVA, 2005).

A distância entre a extremidade do bico de contato e a peça ($S + La$) é conhecida como DBCP, apresentada na Figura 2.9.

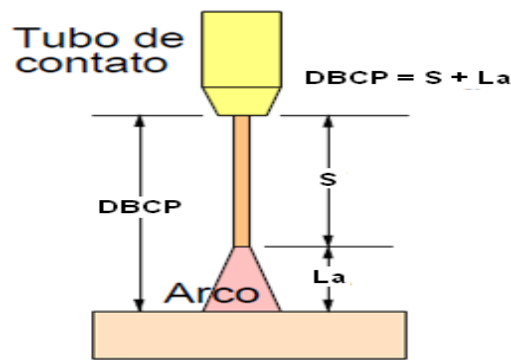


Figura 2.9 – Distância do ponto de tomada de corrente à peça (DBCP), stick-out (S) e comprimento de arco (La), (adaptado de Modenesi, 2009).

O aumento da DBCP pode provocar um crescimento significativo do reforço do cordão de solda e diminuição da largura do cordão. Isto acontece principalmente na soldagem utilizando o gás CO_2 como proteção. Fixando-se a velocidade de alimentação do arame, qualquer aumento na distância bico de contato peça (DBCP) e conseqüentemente do comprimento livre do eletrodo, tem o efeito de reduzir a corrente.

É importante controlar a distância entre o bico de contato e a peça, pois grandes extensões de eletrodo resultam em excesso de metal de solda sendo depositado com baixo calor do arco e isso pode causar geometria desfavorável do cordão e baixa penetração. Adicionalmente, quando DBCP aumenta, o arco torna-se menos estável e por isso é importante que a extensão do eletrodo seja mantida constante durante a atividade de soldagem (FORTES, 2005). Esse autor sugere a DBCP entre 10 a 12 mm para o arame tubular quando a transferência é pelo modo curto-circuito, para o mesmo modo de transferência, mas na soldagem com arame maciço Bracarense (2003) sugere a DBCP entre 6 a 13 mm.

2.4.8 Diâmetro e composição do eletrodo

Cada arame eletrodo de uma dada concepção e natureza tem uma faixa de corrente admissível de trabalho. Esta faixa é naturalmente delineada por efeitos indesejáveis, tais como ausência de molhabilidade em valores muito baixos de correntes, e salpicos e porosidades no caso de valores muito elevados. Tanto a taxa de fusão de um eletrodo, como sua penetração, são entre outras coisas função da densidade de corrente. Assim, em igualdade de corrente, um eletrodo mais fino penetrará mais e depositará mais rapidamente do que um eletrodo de maior diâmetro. Deve-se lembrar, porém, que esta aparente vantagem acabará saindo mais caro uma vez que, devido ao processo produtivo, em igualdade de peso, o arame de menor diâmetro é sempre mais caro (GIMENES; RAMALHO, 2005).

Na soldagem de materiais de aço de médio e baixo carbono os arames eletrodos maciços são representados pela norma AWS A5. 18 e os arames tubulares com fluxo não metálico pela norma AWS A5. 20, estas normas da American Welding Society (AWS), com suas classificações e especificações baseadas na composição química e nas propriedades mecânicas do metal de soldagem e também no tipo de gás a ser empregado.

No processo de soldagem, a escolha do material de adição a ser aplicado é caracterizada como um fator de extrema importância na qualidade e custo final da junta soldada. Na especificação do material do eletrodo devem ser considerados os seguintes fatores mais importantes: metal base a ser soldado; gás de proteção a ser usado; taxa de depósito e fusão necessária; desempenho da fonte de soldagem e corrente; tamanho do cordão; penetração e diluição; espessura do material de base a ser soldado e tipo de transferência metálica pretendida (ALVES, 2009; CORTINA, 2005).

Os arames maciços para aços são normalmente revestidos com uma camada protetiva (oxidação ambiental) de cobre, com espessura normatizada. Diferentemente do que ocorre com arame tubular (FCAW), a soldagem de arames maciços (GMAW) apresenta pouca escória e a proteção da poça se dá totalmente pelo gás de proteção. O arame, em combinação com o gás de proteção, influenciará nas propriedades químicas, físicas e mecânicas da solda (BRACARENSE, 2003)

2.5 Regularidade de transferência metálica

A regularidade na transferência metálica é dependente das características do equipamento, das propriedades físicas e químicas do eletrodo, da atmosfera ionizante e do

material de base. Estes fatores interagem de forma complexa e, mesmo fixando a característica do equipamento, uma boa regularidade só será alcançada com base no conhecimento das propriedades do arco. O melhor ajuste das variáveis elétricas para a obtenção de uma boa regularidade do arco não é fácil, e deve ser realizado com base nas necessidades de ionização do gás, nas dimensões do eletrodo, no tipo de metal de base e do eletrodo, na posição de soldagem e nas exigências de qualidade (MIRANDA, 1999)

Atualmente as análises de regularidade de soldagem são realizadas fundamentalmente mediante o monitoramento dos parâmetros do processo como tensão e corrente do arco. A análise estatística das curvas de tensão e corrente do arco é um método bastante eficaz para a determinação da regularidade do processo de soldagem (FERREIRA FILHO, 2007).

A Figura 2.10 ilustra esquematicamente os parâmetros imprescindíveis para uma melhor observação do comportamento do arco e conseqüentemente do conhecimento do processo, em transferência por curto-circuito, tais como: período de curto-circuito, tempo de arco aberto, tempo de curto-circuito, corrente de pico e tensão de reabertura.

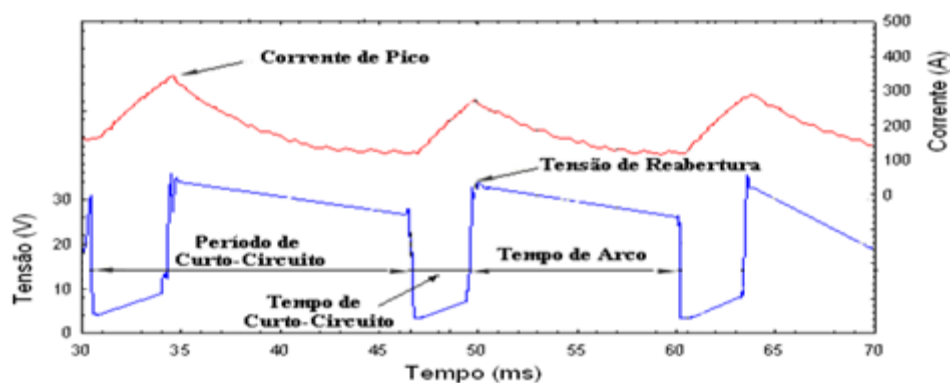


Figura 2.10 – Parâmetros de transferência metálica por curto-circuito (adaptado de Ferreira Filho, 2007).

A regularidade do arco em transferência por curto-circuito é afetada pelas extinções do arco. Um arco com regularidade, nesse caso, é o que possui uma transferência periódica e cujo tempo de apagamento do mesmo seja o mínimo possível, isto pode ser resumido em um menor período de curto-circuito e menor tempo de transferência, com a transferência de gotas menores em uma maior frequência e maior regularidade. Assim o modo de transferência por curto-circuito tem as suas particularidades que afetam muito o comportamento do arco desde a formação das gotas até a sua transferência definitiva, sendo as características dinâmicas da tensão e correntes durante a soldagem fatores

fundamentais para o estabelecimento dos critérios de regularidade (DOBIGNIES , 2008; GOMES, 2006).

As regularidades na ocorrência de picos de corrente e do período de curtos-circuitos, entre outros, podem ser caracterizados como indícios de uma regularidade no momento da transferência. Desta forma, a regularidade do arco é altamente influenciada pela formação do curto-circuito e análises do comportamento do arco durante sua ocorrência permite um melhor controle dos parâmetros, de tal forma a manter uma transferência regular gerando melhor qualidade na solda e menor formação de respingos (GOMES, 2006).

Entre os parâmetros do processo, o nível de indutância também tem influência marcante no comportamento do curto-circuito. Vários pesquisadores têm estudado a influência desse fator assim como o nível de regulação na ocorrência dos curtos-circuitos e perceberam que a gota pode ser transferida de uma forma muito brusca caso nenhuma indutância esteja presente, durante a constrição do eletrodo (efeito “pinch”) no instante do curto-circuito e desta forma a corrente sobe a uma taxa muito elevada, para um dado intervalo de tempo, provocando uma geração excessiva de respingos e instabilidade do arco (DUTRA e BAIXO, 1990; MIRANDA, 1999)

Dutra e Baixo (1990), ao analisarem a regularidade do arco em processo de soldagem GMAW, usaram como parâmetros característicos períodos de duração do curto-circuito, período de transferência e nível máximo do pico da corrente de curto, bem como os desvios padrão relativo a estes índices. O período de duração do curto-circuito explica a dispersão dos parâmetros não controlados da operação de soldagem em fontes moduladas em tensão constante. Irregularidades no período de curto influem diretamente no nível do pico da corrente de curto nos ciclos de transferência. Períodos mais prolongados fazem com que a corrente atinja valores de picos mais elevados, aumentando os respingos.

Adolfson et al. (1999) acrescentam que condições ótimas de regularidade correspondem a quatro características básicas, ou seja, uma máxima taxa de curto-circuito, uma mínima variação no período de curto; uma mínima taxa de massa transferida por curto-circuito associada a uma mínima perda por respingos.

Shinoda et al. (1989) também avaliaram a regularidade do processo GMAW no modo de transferência por curto-circuito, utilizando coeficiente de variação de dados baseados no tempo do arco, tempo de duração dos curtos-circuitos, oscilogramas da tensão e corrente de soldagem.

Hermans e Den Ouden (1999) registraram que uma máxima regularidade do processo e conseqüentemente do arco é possível quando o desvio padrão da frequência de curto-circuito é mínimo. Na transferência por curto-circuito a oscilação da poça de fusão é

acelerada com a reignição do arco e ruptura da ponte metálica no momento da transferência do metal líquido. A regularidade ocorre quando a frequência de curto-circuito e a frequência de oscilação da poça fundida são iguais. Dutra e Baixo (1990) acrescentam a esta regularidade o mínimo desvio padrão relativo do tempo de curto-circuito e nível de corrente de pico.

Em sua bibliografia Scotti e Ponomarev (2008), mencionam que os índices correlacionados com o modo de transferência por curto-circuito são:

a) Os dois índices básicos:

- tempo de arco aberto (t_{ab}) - tempo de duração do crescimento da gota metálica fundida na ponta do eletrodo
- tempo de curto-circuito (t_{cc}) - duração da transferência da gota fundida, para a poça de fusão.

b) E outros índices auxiliares:

- período de curto-circuito (P_{cc}) – que é a soma $t_{ab} + t_{cc}$;
- frequência de curto-circuito (f_{cc}) - $1/P_{cc}$.

Outro índice utilizado para verificar a regularidade do arco é o “Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência em Curto-circuito (IV_{CC})”. Trata-se de um fator numérico desenvolvido com o intuito de analisar o quanto a transferência metálica por curto-circuito pode ser considerada regular. Esse índice é a somatória da relação entre desvio padrão de tempo médio de arco aberto ($\sigma_{t_{mab}}$) e tempo médio de arco aberto (t_{mab}) e da relação entre desvio padrão de tempo médio de curto-circuito ($\sigma_{t_{mcc}}$) e tempo médio de curto-circuito (t_{mcc}). Quanto menor o valor de IV_{CC} , melhor é a regularidade da transferência metálica.

O Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência em Curto-circuito junto com os demais índices básicos e índices auxiliares (vistos acima), com seus respectivos desvios padrão e valor médio da corrente de pico são calculados por um programa desenvolvido pelo grupo de pesquisadores do LAPROSOLDA no ambiente MATLAB, (GARCIA, 2010). O Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência em Curto-circuito também poderá ser calculado pela Equação 2.1.

$$IV_{CC} = (\sigma_{t_{mcc}} / t_{mcc}) + (\sigma_{t_{mab}} / t_{mab}) \quad (2.1)$$

2.6 Características econômicas e morfológicas do cordão

Nos processos de soldagem, frequentemente necessita-se avaliar algumas características de desempenho de comportamento produtivo, sendo estas retratadas como a taxa de fusão, a taxa de deposição e o rendimento de deposição, entre outra. E também no aspecto morfológico tanto a geometria, tais como: largura, reforço e penetração e também as descontinuidades, tais como: falta de fusão, mordedura, porosidade e trincas longitudinais, todos afetando diretamente com maior ou menor intensidade as propriedades mecânicas da junta soldada. As propriedades mecânicas constituem uma das características mais importantes dos metais em suas várias aplicações na engenharia, visto que, o projeto e a execução dos equipamentos e de estruturas metálicas são baseados no comportamento destas propriedades.

a) taxa de fusão (T_f)

A taxa de fusão é a quantidade de eletrodo fundido por unidade de tempo. Essa taxa pode ser calculada através da velocidade de alimentação do arame, a qual, por sua vez, está relacionada com a corrente de soldagem, para uma dada extensão do eletrodo, mantidas as outras condições constantes. Dessa forma, se deve determinar a velocidade de alimentação do arame, com relação à intensidade da corrente, para as condições típicas de uso, Machado (1996). Também para este autor, em uma dada corrente, a taxa de fusão aumenta quase linearmente, para uma extensão constante, com o aumento da densidade de corrente. Portanto, menores diâmetros de eletrodo fundem numa maior taxa para uma mesma intensidade de corrente.

A Figura 2.11 mostra as variações das taxas de fusão dos eletrodos em aço carbono, com vários diâmetros, extensão de 20 mm e com gás de proteção CO_2 .

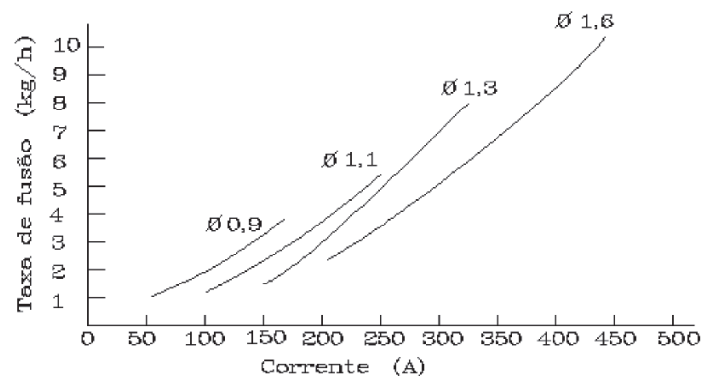


Figura 2.11 – Taxa de fusão em função da intensidade de corrente, para diferentes diâmetros (\emptyset) de arame maciço (MACHADO, 1996).

Outros fatores que também governam a taxa de fusão são o tipo de gás e a regularidade da transferência metálica. Valores muito baixos de tensão podem provocar interrupções no arco ocasionando falhas na transferência do metal de adição, assim como o tipo de gás de proteção utilizado no processo ocasiona irregularidades na transferência podendo provocar uma grande formação de respingos (OLIVEIRA, 2005).

b) taxa de deposição (T_d)

A taxa de deposição, isto é a massa de metal de adição depositada na solda por unidade de tempo, está relacionada com a velocidade de alimentação e rendimento de deposição.

Na soldagem com eletrodo consumível (GMAW e FCAW) a forma de transferência de metal de adição pode exercer uma influência importante na regularidade operacional do arco e, por conseguinte na sua taxa de deposição. Nessas soldagens e na operação com transferência por curto-circuito em particular, a regularidade do processo, incluindo o nível de respingos depende fortemente dos parâmetros de soldagem empregados (MODENESI, 2009).

c) rendimento de deposição (η_D)

O rendimento de deposição é a relação entre a taxa de deposição e a taxa de fusão. Como já visto, a taxa de fusão é a quantidade de eletrodo fundido por unidade de tempo e por sua vez, a taxa de deposição é a quantidade de eletrodo (em peso) depositado por unidade de tempo.

O rendimento é uma característica importante na análise de um processo de soldagem, pois influencia diretamente nos custos de soldagem. Os fatores que levam ao decréscimo no rendimento são normalmente as perdas por formação de respingos.

Segundo Fortes (2004), para um arame eletrodo tubular rutilico com diâmetro de 1,2 mm, corrente na faixa de 150 a 210 A, tensão entre 28 a 29 V e com extensão do eletrodo de 10 a 20 mm, obtém-se um rendimento de deposição aproximado de 87 %.

Garcia (2010), em estudo comparativo entre os processos de soldagem com arame tubular rutilico e arame maciço, semelhante ao proposto nessa pesquisa, mas em soldagem na posição plana, verificou os valores dos rendimentos de depósitos para os processos GMAW e FCAW, conforme apresentado na Tabela 2.1. O menor rendimento de deposição do arame tubular (aproximadamente 10%) em relação ao arame maciço, segundo essa autora, pode ser justificado nas perdas não somente com respingos, similar ao maciço, mas também na forma de escória e/ou fumos.

Tabela 2.1 – Rendimento de depósito (η_D) para o arame tubular (GMAW) e maciço (FCAW) (adaptado de Garcia, 2010).

Arame	Gás	I [A]	U [V]	η_D [%]
Tubular	100%CO ₂	149 - 200	25 - 27	85 - 86
	Ar+25%CO ₂	148 - 200	25 - 27	87 - 88
Maciço	100%CO ₂	148 - 200	21 - 23	93 - 95
	Ar+25%CO ₂	148 - 195	19 - 21	94 - 96

Sendo: Faixa de corrente (I); faixa de tensão (V) e rendimento de deposição (η_D).

d) Efeito dos Parâmetros na morfologia do Cordão de solda

- Penetração – é a distância que a linha de fusão se estende abaixo da superfície do material sendo soldado. A corrente de soldagem é de primordial importância na penetração. Um aumento ou uma diminuição na corrente aumentará ou diminuirá a penetração da solda, respectivamente, Fortes (2004). Também para esse autor, existem outros fatores que de maneira pequena ou não possuem efeito sobre a penetração, tais como: tensão adequada para a corrente empregada, o qual garante o arco mais estável; velocidade de soldagem, em que a penetração é máxima para um determinado valor e diminui quando essa velocidade é alterada e a extensão do eletrodo, que em algumas aplicações muitos soldadores acham útil recorrer a essa propriedade para controlar a penetração, pois um aumento na extensão do eletrodo diminuirá a corrente de soldagem e a penetração da solda e vice-versa.

A penetração dos arames tubulares tem uma forma mais rasa, porém mais larga, possibilitando uma tolerância muito maior para desalinhamentos da tocha de soldagem e, adicionalmente, reduzindo os riscos de defeitos de falta de fusão. O arco mais largo dos arames tubulares produz uma poça de fusão calma e plana que promove um cordão de solda de aspecto liso (GOMES, 2006). Esse efeito é ainda mais pronunciado quando o CO₂ é usado como gás de proteção em vez de misturas Ar+CO₂. Como o gás CO₂ tem uma condutibilidade térmica maior, a energia térmica do arco espalha-se sobre uma área maior, o que favorece uma penetração na forma circular, Fortes (2004).

Tipicamente, a penetração de arame maciço é pequena e estreita, ou seja, é uma penetração característica no formato dediforme, e embora o arco desse arame tenda a escavar profundamente o metal de base, há um risco de defeitos de falta de fusão por causa da penetração em forma de dedo. O menor desalinhamento da tocha pode causar falta de fusão lateral para uma junta em ângulo.

- Largura e altura - são duas características importantes do cordão para garantir que a junta seja adequadamente preenchida. Quanto mais protuberante e estreito for o cordão de solda, maior a probabilidade de ocorrer falta de fusão. A largura é inversamente proporcional à altura do cordão de solda, quando uma aumenta a outra diminui.

A tensão de soldagem é usada para controlar a forma do cordão de solda, quando a tensão do arco (ou o comprimento do arco) aumenta, a altura do cordão de solda diminui e sua largura aumenta. Aumentando-se a largura do cordão de solda, seu topo torna-se mais achatado e o metal de solda "molha" os materiais de base mais eficientemente. Melhorando a fusão do metal de base, Machado (1995). Também para Scotti e Ponomarev (2008), a largura do cordão, no contexto da formação do cordão, governa os dois outros parâmetros geométricos, a saber, o reforço e a área penetrada. Para uma mesma energia de aporte e mesmo volume de material depositado por unidade de comprimento, quanto maior se torna a largura, menor o reforço.

CAPÍTULO III

EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Este capítulo apresenta uma descrição da metodologia que foi utilizada para a realização dos ensaios propostos, bem como a seleção de parâmetros visando resultados quantitativos e comparáveis. Também foram descritos materiais de consumo empregados com suas respectivas especificações, os equipamentos e acessórios, bem como a montagem geral das bancadas experimentais para a realização de todos os ensaios necessários.

3.1 Metodologia

A metodologia proposta neste trabalho teve como objetivo relacionar os resultados obtidos no processo de soldagem GMAW na posição horizontal no modo de transferência metálica por curto-circuito e na mesma região de trabalho para o processo FCAW, utilizando os gases de proteção: gás mistura Ar+25%CO₂ e o gás puro 100%CO₂. Para ambos os processos foram utilizados arames eletrodo de diâmetro 1,2 mm, com especificação AWS ER 70S-6 para o maciço e AWS E71T-1 para o tubular.

Esta metodologia foi capaz de focar e comparar a eficácia de cada processo com ambos os gases de proteção na regularidade do arco elétrico, geometria do cordão de solda, presença de descontinuidades do cordão de solda e rendimento de deposição.

Para as faixas operacionais de corrente e de tensão e as demais variáveis do processo (vazão do gás, DBCP e tipo de arame), elas foram adotadas considerando as

literaturas correlatas existentes e as recomendações dos fabricantes de arames eletrodos maciços e tubulares, para soldagem de aço carbono ABNT 1020.

As faixas de corrente de soldagem utilizadas para os dois processos foram de 120 e 160 A. Estas faixas de corrente estão entre as indicadas por alguns pesquisadores e fabricantes, apresentados no Capítulo II, os quais recomendam o emprego de correntes relativamente baixas na transferência pelo modo curto-circuito, para proporcionar boa estabilidade relativa do arco. Como visto no Capítulo II, para Machado (1996) no processo GMAW as faixas de corrente geralmente utilizadas vão de 30 a 200 A, e para Fortes (2004) o processo FCAW utiliza geralmente faixas de corrente abaixo de 220 A em soldagem fora da posição plana.

As faixas de tensão utilizadas foram de 18, 20, 22 e 24 V para ambos os processos, visto que nesse modo de transferência adotado o arco é relativamente curto e é formado em uma faixa relativamente baixa de tensão. Como visto no Capítulo II, Machado (1996) faz referência à faixa de 15 a 22 V para a soldagem com arame maciço, na transferência pelo modo curto-circuito, e Fortes (2004) refere-se à faixa de 23 a 30 V para o arame tubular rutilico, no diâmetro de 1,2 mm e na soldagem com posição plana/horizontal.

As obtenções das velocidades de soldagem, para os dois processos, foram através de cálculos envolvendo as velocidades de alimentação e as constantes de deposição. Como a massa por comprimento linear e as velocidades de alimentação dos arames são diferentes, então as suas constantes de deposição e respectivas velocidades de soldagem também são diferentes, sendo o valor desta constante maior para o arame tubular devido a sua menor massa relativa por unidade de comprimento.

A constante de deposição (K_d) para o arame maciço, obtida de um cordão padrão e teórico, Figura 3.1, foi utilizada com as velocidades de alimentação (adquirida em testes exploratórios) para calcular as velocidades de soldagem.

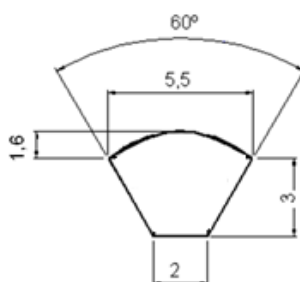


Figura 3.1 – Dimensões (mm) do cordão padrão e teórico, adotado.

Para o arame tubular foi confeccionado um cordão com geometria semelhante ao cordão padrão e teórico, Figura 3.1, e a velocidade de alimentação e velocidade de soldagem utilizada serviram como base para o cálculo da constante de deposição (Kd), referente a esse arame.

As soldagens foram realizadas com a tocha fazendo ângulo de ataque reto com o comprimento do cordão (ângulo de ataque perpendicular) e também com a placa de teste a ser soldada. A distância bico de contato peça (DBCP) teve como referência o lado superior do fundo da raiz do chanfro, apresentado na Figura 3.2. Todos os cordões foram feitos com apenas um passe de enchimento (monopasse) e sem oscilação da tocha.

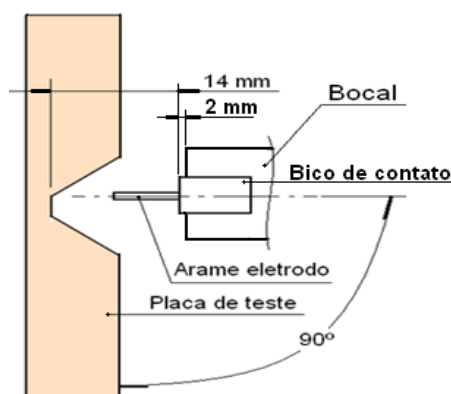


Figura 3.2 – Esquema da posição da tocha em relação ao tipo de junta utilizado

Este tipo de junta, apresentado na Figura 3.2, não é a mais adequada para esta posição de soldagem (posição horizontal), mas foi adotado visando uma situação crítica para a poça de fusão, em relação a um possível escoamento do metal fundido.

Como visto anteriormente, este estudo foi realizado apenas para um diâmetro de arame eletrodo e na posição horizontal de soldagem com a DBCP medindo 14 mm, a vazão do gás com 14 l/min e a indutância teve um valor fixo para todos os ensaios realizados (colocada no centro da faixa de trabalho da fonte utilizada).

A vazão de 14 l/min foi adotada considerando os comentários de Scotti e Ponomarev (2008), que em suas literaturas mencionam que o fluxo adequado para praticamente todas as condições de soldagem é de 10 a 16 l/min, atingindo o limite superior para maiores correntes e que valores de fluxo baixo ou muito alto (causador de turbulência) pode diminuir a eficiência de proteção.

A DBCP, medindo 14 mm do fundo do rasgo e 11 mm com a superfície da placa, Figura 3.2, foram adotadas tendo como referência as sugestões de alguns autores, na

soldagem com transferência pelo modo curto-circuito. Bracarense (2003), em sua literatura, sugere a DBCP entre 6 a 13 mm para a soldagem do arame maciço e Fortes (2005), sugere a DBCP entre 10 a 12 para a soldagem do arame tubular.

3.2 Diretrizes estabelecidas para análise dos resultados

As análises dos resultados, para os processos GMAW e FCAW, foram feitas comparando as respostas, as calculadas e as adquiridas, com fatores pré-estabelecidos chamados de “diretrizes estabelecidas para análise”. Nestas diretrizes estão representadas as condições de regularidade, fatores econômicos e rendimento de deposição. Estas diretrizes estão em consonância com alguns pesquisadores, Miranda (1999) associou uma máxima regularidade do arco aos menores períodos e os menores tempos de curto-circuito. E Adolfsen et al. (1999) colocam quatro fatores básicos como condições ótimas de regularidade, tais como: máxima frequência de curto-circuito; mínimo desvio do período de curto; mínima quantidade de massa transferida por curto-circuito e mínima perda por respingo. Shinoda et al. (1989) avaliaram a regularidade do processo GMAW na transferência pelo modo curto-circuito baseando-se no tempo de arco aberto, tempo de curto-circuito e oscilogramas de tensão e corrente. Gomes (2006) em sua pesquisa com arame tubular também verificou que a regularidade do arco é influenciada pela formação dos curtos-circuitos e a transferência regular proporciona melhor qualidade no arco e reduz a formação de respingos. Para Dutra e Baixo (1990), o desvio padrão de transferência está relacionado com a regularidade do processo e quanto menor for o desvio mais estabilidade é conferida ao arco de soldagem. Garcia (2010) comparando os processos de soldagem GMAW e FCAW na soldagem por transferência metálica por curto-circuito utilizou como parâmetro de avaliação de regularidade do arco o Índice Vilarinho de Regularidade em Transferência por Curto-circuito.

As “diretrizes estabelecidas para análise” adotadas foram:

a) Condições de regularidade do arco de soldagem:

Os parâmetros abaixo relacionados, os quais foram usados para comparação da regularidade do arco, tais como frequência de curto-circuito (f_{cc}), período de curto-circuito (P_{cc}) e seu desvio padrão (σ_{cc}), tempos médios de curto-circuito (t_{mcc}) e tempos médios de

arco aberto (t_{mab}) e Índice Vilarinho de Regularidade em Transferência por Curto-circuito (IV_{cc}), todos foram calculados por um programa desenvolvido pelo grupo de pesquisadores do Laprosolda no ambiente MATLAB, visto no Capítulo II.

- A maior frequência de curto-circuito (f_{cc}) foi considerada melhor, pois tende a aumentar o rendimento da soldagem e apresentar um arco com maior regularidade relativa;
- Os menores períodos de curto-circuito (P_{cc}) e uma mínima variação no período de curto (σ_{pcc}) foram considerados melhores, pois formam gotas de menor volume e contribui para melhorar a regularidade do arco ($P_{cc} = t_{mab} + t_{mcc}$);
- Índice do desvio padrão do período de curto-circuito, que é a relação do desvio padrão do período de curto-circuito dividido pelo período de curto-circuito (σ_{pcc} / P_{cc}), isto implica que quanto menor, melhor a regularidade relativa da transferência metálica com ocorrência de curto-circuito.
- O menor Índice Vilarinho (IV_{cc}) ajuda na representação de regularidade do arco, pois quanto menor for esse índice, mas regular tenderá ser o arco;

b) Fatores econômicos:

- A maior taxa de deposição (T_d) foi considerada melhor, pois aumenta a produtividade;
- O maior rendimento de deposição (N_D) foi considerado melhor, pois também aumentar a produtividade.

3.3 Procedimentos para cálculo dos parâmetros dos processos GMAW e FCAW

Os parâmetros dos processos a serem calculados foram: velocidades de soldagem e constante de depósito; taxa de fusão; taxa de depósito e rendimento de depósito.

a) Velocidade de soldagem (V_s) e constante de deposição (K_d).

- Processo GMAW -

Para a soldagem com o processo GMAW foi adotado um cordão com dimensões teóricas e cuja aparência e geometria (profundidade, largura e reforço) se encaixassem no perfil de um cordão padrão com área de 17,12 mm², apresentado na Figura 3.1, e então com os parâmetros teóricos responsáveis pela formação desse cordão (velocidade de alimentação e de soldagem) obteve-se a constante de deposição (K_d), a qual foi utilizada nos cálculos das demais velocidades de soldagem (V_s) desse processo.

Abaixo esta demonstrada a sequência de passos adotados para o cálculo da constante de deposição (Kd) do arame maciço:

1º Passo

Decompor a seção transversal da junta teórica em figuras geométricas, conforme a Figura 3.3, que permitiram o cálculo das áreas destas figuras separadamente.

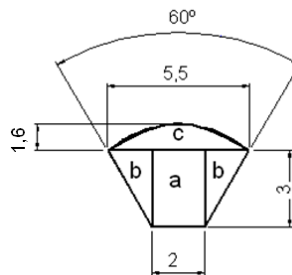


Figura 3.3 – Dimensões (mm) e divisão da área do cordão teórico adotado.

2º Passo:

Calculado a área de cada figura e feito a somatória:

$$\text{Área da figura a} = 2 \times 3 = 6 \text{ mm}^2$$

$$\text{Área da figura b} = 2 \left(1,75 \times 3 / 2 \right) = 5,25 \text{ mm}^2$$

$$\text{Área da figura c} = 2/3 \times 5,5 \times 1,6 = 5,87 \text{ mm}^2$$

$$\text{Área total} = 6 + 5,25 + 5,87 = 17,12 \text{ mm}^2$$

3º Passo:

Calculado a constante de deposição (Kd), pela Equação 3.1.

$$Kd = \frac{v_a}{v_s} = \frac{A}{\left(\frac{\pi \phi^2}{4} \right)} \tag{3.1}$$

Onde:

= velocidade de alimentação [mm / s];

= velocidade de soldagem [mm / s];

A = área do cordão [mm²];

= diâmetro do arame eletrodo [mm]

$$Kd = \frac{A}{\left(\frac{\pi \varnothing^2}{4}\right)} = 15,14 \quad \text{então:} \quad Kd = \frac{v_a}{v_s} = 15,14$$

- Processo FCAW -

Para a soldagem com arame tubular foram feitos testes exploratórios até a obtenção de um cordão com geometria semelhante ao cordão padrão teórico, visto acima, e os seus parâmetros obtidos, tais como velocidade de alimentação e velocidade de soldagem, foram utilizados para o cálculo da constante de deposição (Kd) deste processo, mais detalhes no Capítulo IV.

- Processo GMAW e Processo FCAW -

Para ambos os processos, nos cálculos das velocidades de soldagem (Equação 3.2) foi adotada a constante de deposição (Kd) correspondente a cada processo e as velocidades de alimentação (Va) foram conhecidas através de testes exploratórios.

$$V_s = \frac{V_a}{K_d} [\text{mm} / \text{s}] \quad (3.2)$$

b) Taxa de fusão:

Para o cálculo da taxa de fusão (T_f) foi utilizado a Equação 3.3.

$$T_f = \left(\frac{\pi \varnothing^2}{4}\right) v_a \cdot \rho [\text{g}/\text{min}] \quad (3.3)$$

Onde:

\varnothing – diâmetro do arame [cm];

V_a – velocidade de alimentação do arame [cm/min];

ρ – densidade do arame [g/cm³].

A densidade do arame (ρ) foi calculada da seguinte forma:

Pesou-se um metro do arame na balança com resolução de 0,01g e mediu o seu diâmetro em varias seções, com micrômetro de resolução 0,01mm, e depois com os dados médio adquiridos foi calculada a densidade do arame. Utilizou-se a Equação 3.4.

$$\rho = \frac{m}{\left(\frac{\pi\phi^2}{4}\right)l} \text{ [g/cm}^3\text{]} \quad (3.4)$$

Onde:

m – massa de um metro de arame [g];

l - comprimento de um metro do arame [cm];

Ø – diâmetro do arame [cm].

Os valores calculados da densidade (ρ) do arame maciço e arame tubular foram de 7,52 g/cm³ e 6,32 g/cm³, respectivamente. Estes valores estão conforme os encontrados por Garcia (2010), em estudo de processos semelhantes, com os mesmos arames.

c) Taxa de deposição:

Para o cálculo da taxa de deposição (T_d) foi utilizado a Equação 3.5.

$$T_d = \left(\frac{M_f - M_i}{T_{ab}}\right) \text{ [g/min]} \quad (3.5)$$

Onde:

M_f – massa final [g];

M_i – massa inicial [g];

T_{ab} – tempo de arco aberto (durante a soldagem do cordão) [min].

d) Rendimento de deposição:

Para o cálculo do rendimento de deposição (η_D) foi utilizado a Equação 3.6.

$$\eta_D = \left(\frac{T_d}{T_f}\right) 100 \text{ [%]} \quad (3.6)$$

Onde:

T_d – taxa de deposição [g/min];

T_f – taxa de fusão [g/min].

3.4 Consumíveis utilizados nos processos

3.4.1 Gases

Para o processo GMAW e FCAW em estudo foram usados dois tipos de gás de proteção, gás com 100%CO₂ e gás Ar+25%CO₂. Esses gases foram utilizados, por serem muito usados na soldagem de aço carbono, segundo fabricantes e pesquisadores.

3.4.2 Metal de adição utilizado nos processos

O metal de adição para o processo GMAW foi utilizado arame maciço de aço carbono da classe AW ER70S-6 com diâmetro igual a 1,2 mm. Para as soldas realizadas com o processo FCAW, foi utilizado metal de adição AWS E71T-1M do tipo rutílico com diâmetro igual a 1,2 mm.

A composição química e propriedades mecânicas nominais destes arames, de acordo com dados fornecidos pelos fabricantes, estão apresentadas na Tabela 3.1. A seleção do tipo e diâmetro desses eletrodos está relacionada com o fato de que eles são comercialmente mais utilizados no mercado, cada qual dentro do seu seguimento de atuação.

Tabela 3.1 – Composição química e propriedades mecânicas nominais dos arames utilizados para o desenvolvimento do trabalho (informações fornecidas pelos fabricantes), adaptado de Garcia (2010).

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

3.4.3 Metal de base

O material das barras utilizadas para a realização da soldagem dos testes exploratórios e também para a confecção das placas de teste definitivas foi de aço carbono ABNT 1020. Esta barra é geralmente fabricada por laminação a quente e comercializada nas dimensões 6,3 x 50,8 x 6000 mm. Este material por ser laminado a quente, devido a sua espessura, apresenta uma camada de óxido (carepa) e pode ser comercializado também com uma camada de óleo protetivo.

3.5 Placas de teste utilizadas nos processos

As placas de testes para soldagem definitiva foram confeccionadas em chapas de aço carbono ABNT 1020 com dimensões de 6,3 x 50,8 x 250 mm e com um chanfro central, conforme Figura 3.4. Este chanfro central foi usinado em plaina limadora.

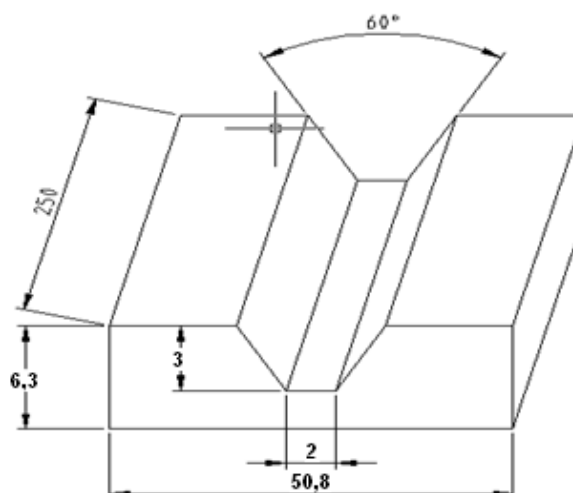


Figura 3.4 – Desenho esquemático e dimensões (mm) da placa de teste

Antes de cada soldagem as placas de testes foram lavadas com água e sabão (para a retirada de óleo protetivo), secada com jato de ar comprimido e escovada mecanicamente (com escova de aço) para a retirada de camada de óxido e carepa resultante do processo de laminação. Após a limpeza e antes da soldagem todas as peças foram pesadas em balança eletrônica digital.

3.6 Preparação do corpo de prova para análise macrográfica

O corpo de prova para análise macrográfica, apresentado na Figura 3.5, foi obtido através da retirada de uma parte central do cordão de solda, na placa de teste, utilizando uma máquina de corte, com disco abrasivo, e após, uma de suas faces (perfil do cordão) foi lixada e atacada com agentes químicos (solução de nital 6%). O lixamento final desta face foi na granulação de 800 mesh e o ataque químico com duração de aproximadamente um minuto, para cada perfil a ser preparado.

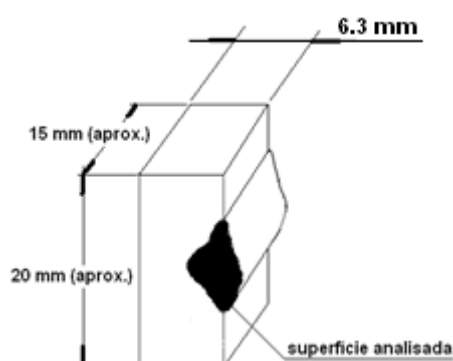


Figura 3.5 – Dimensões aproximadas do corpo de prova.

Depois de preparado o corpo de prova, este foi submetido a um sistema de aquisição e tratamentos de imagens para ser fotografado e digitalizado. Só após esta adequação é que houve a possibilidade de obtenção das dimensões relacionadas aos aspectos geométricos do cordão, tais como: altura, largura, e penetração. O tratamento das imagens também permitiu a visualização das descontinuidades, delimitação das regiões compreendidas pelo metal de solda, zona termicamente afetada e metal de base.

3.7 Componentes utilizados na realização do processo

3.7.1 Fonte de soldagem

Para a realização dos testes foi utilizada uma fonte de soldagem eletrônica multiprocessado, com capacidade de operação nos processos MIG/MAG. Esta fonte de soldagem (modelo MTE DIGITEC 300), apresentada na Figura 3.6, tem um sistema de comando que é composto por teclados e display de cristal líquido, onde é feita a seleção dos processos e o ajuste das variáveis, de forma simples e prática. Para a realização dos testes a fonte foi ajustada para trabalhar com processo MIG/MAG convencional e operando no

modo tensão constante, e as variáveis foram reguladas conforme os valores exigidos pelo trabalho de pesquisa.



Figura 3.6 - Fonte de soldagem modelo MTE DIGITEC 300.

3.7.2 Tocha de soldagem

Foi utilizada uma tocha reta automática refrigerada a água, apresentada na Figura 3.7, equipada com guia espiral (conduíte) de aço, própria para arame eletrodo de aço. A posição do tubo de contato foi 2 mm para fora do bocal. Machado (1996) recomenda de 0 a 3 mm na soldagem pelo modo de transferência metálica por curto-circuito.

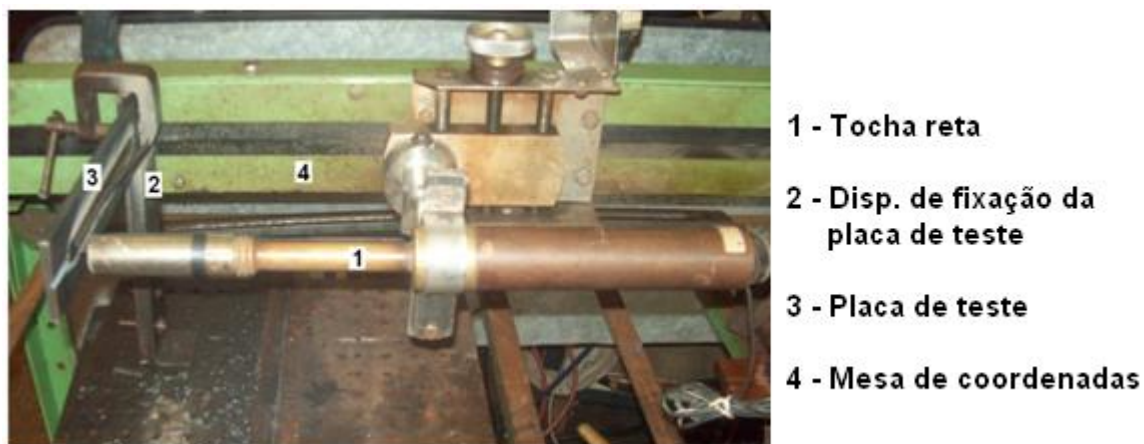


Figura 3.7 – Conjunto: tocha reta, dispositivo de fixação, placa de teste e mesa coordenada.

3.7.3 Mesa de coordenadas para soldagem

A mesa coordenada, SOLDAMATIC XY-T, desenvolvido por uma equipe de pesquisadores da LAPROSOLDA/UFU, foi projetada e construída para movimentar-se em três eixos: eixo X, eixo Y e eixo T. Nos testes propostos por este trabalho só foram usados os eixos X e Y, pois o eixo T é o responsável pelo movimento de tecimento, movimento este não contemplado neste estudo. Esta mesa, apresentada na Figura 3.8, e seus componentes são controlados por um microcomputador, através de um programa de controle com simples interface homem – máquina.

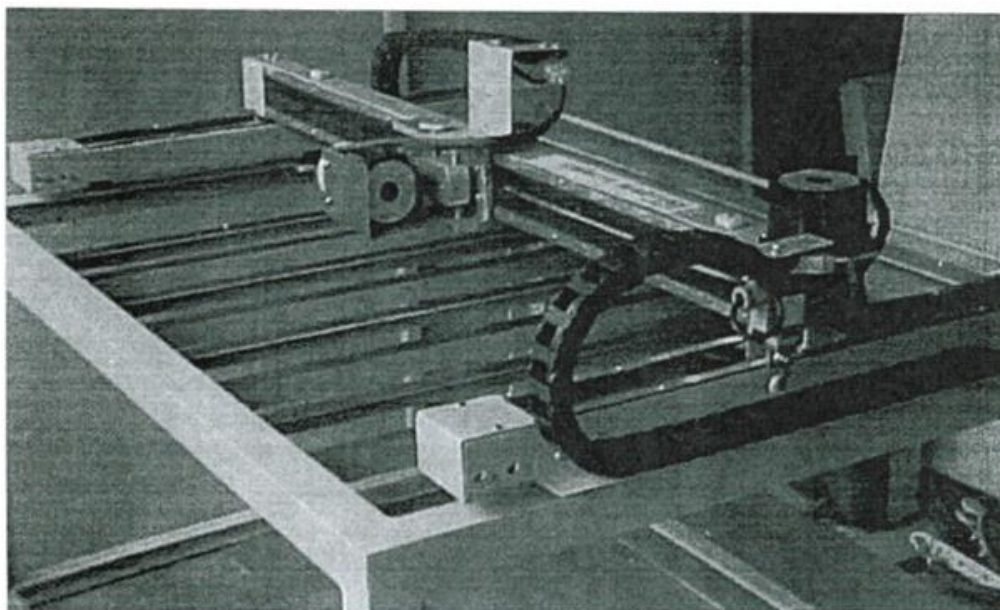


Figura 3.8 – Mesa de coordenadas.

3.7.4 Dispositivo para fixação da placa de teste

O dispositivo de fixação, Figura 3.9, tem a função de posicionar a placa de teste, na mesa coordenada, para que esta placa possa ser soldada na posição horizontal. Este dispositivo foi fabricado de aço com baixo carbono e contém uma chapa dobrada em forma de cantoneira (“L”) com um furo central na aba inferior, onde foi fixada à mesa que compõem o sistema de soldagem, por parafuso com porca e arruela, e na parte superior tem uma base onde a placa de teste foi fixada por grampo. Esse dispositivo mantém a placa de teste fixada com rigidez durante a soldagem e na movimentação da mesa coordenada.

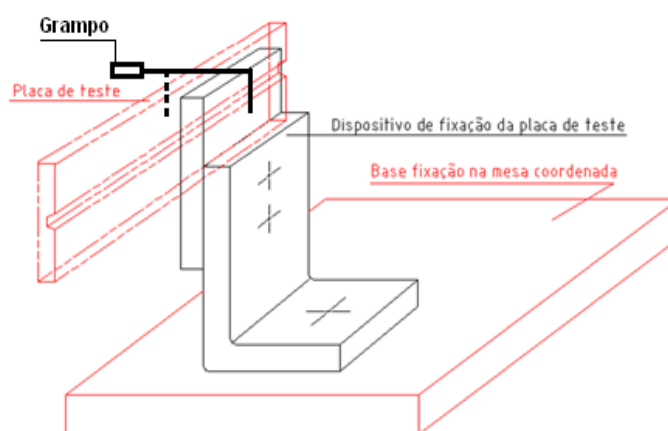


Figura 3.9 – Desenho esquematizado do dispositivo para fixação da placa de teste.

3.7.5 Sistema de aquisição dos sinais elétricos

O monitoramento dos parâmetros, tais como, corrente e tensão de soldagem, junto com seus respectivos valores médios e seus devidos de tempo de atuação, foram adquiridos para que fossem minuciosamente analisados. Este monitoramento é essencial porque durante a execução do processo há a possibilidade de erros tanto procedentes de falha de equipamento como de caráter humano. Estas aquisições puderam demonstrar o modo de transferência ocorrido e também facilitaram as análises estatística, as quais foram úteis ao conhecimento do arco de soldagem e a sua regularidade.

Por essas razões supracitadas, através de um sistema de aquisição de sinais elétricos, foi possível monitorar os valores dos parâmetros regulados durante a execução de teste e, desse modo, detectar possíveis oscilações dos parâmetros e justificativas para ocorrência das mesmas. O sistema de aquisição de sinais usado está esquematizado pela Figura 3.10. É composto por um sensor Hall para monitoramento da corrente, com uma faixa de medição de ± 600 A, um divisor de tensão (DTS) para monitoramento da tensão, com uma faixa de medição de ± 100 V, um encoder para monitoramento da velocidade de alimentação e uma placa de aquisição de sinais elétricos da National Instruments NI USB 6009, com frequência de aquisição de 5 kHz.

A visualização, o tratamento preliminar e o arquivamento dos sinais elétricos oriundos da placa ocorrem por meio de um programa implementado no ambiente Labview, onde são coletados e armazenados os sinais de corrente, tensão e velocidade. Para tanto, os sinais de tensão foram adquiridos entre a região equivalente ao final da tocha (região de contato) e a mesa de soldagem. O tratamento estatístico dos dados coletados durante a realização dos testes foi realizado por meio do software OriginPro 7.5, que permitiu avaliar, manipular

(selecionar faixas de tempo que se deseja trabalhar) e calcular os valores médios de tensão, corrente e velocidade de alimentação, bem como construir gráficos dos sinais monitorados.

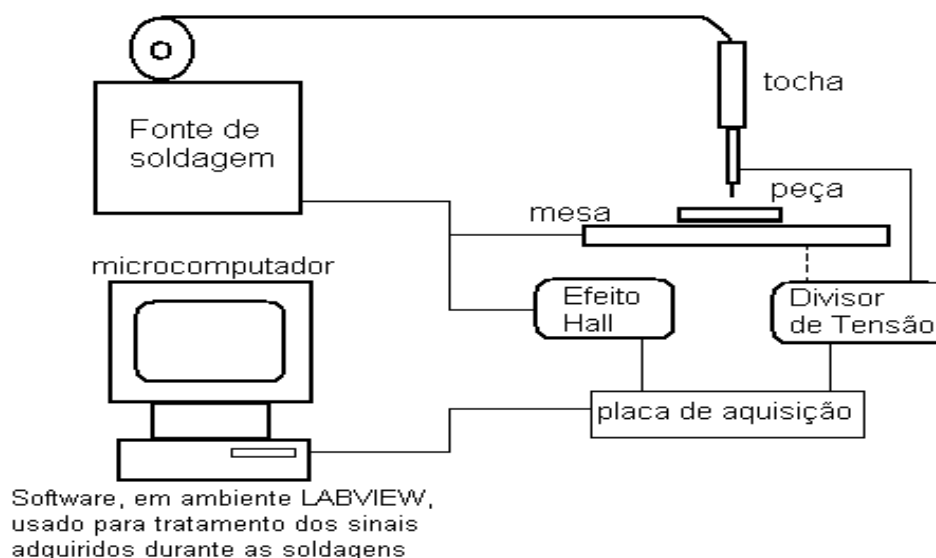


Figura 3.10 – Desenho esquematizado da montagem do sistema de aquisição de dado.

3.7.6 Balança eletrônica digital

Para a pesagem das placas de teste antes e depois da soldagem do cordão foi utilizada uma balança eletrônica digital, marca e modelo UNIBLOC SHIMADZU UX6200H, com resolução de 0,01g e fundo de escala de 6,2 kg.

3.7.7 Sistema de aquisição e tratamentos de imagens

Depois de formado o cordão de solda, foi extraído um corpo de prova de sua seção central, visto na Figura 3.5. O perfil transversal do corpo de prova foi tratado e analisado com o objetivo de caracterizar a situação macroestrutural desta seção, com o auxílio de um sistema de aquisição e tratamento de imagens, Figura 3.11.

Este sistema de aquisição e tratamento de imagens foi utilizado para a medição das características geométricas dos cordões, tais como área fundida, altura do reforço, largura, e profundidade. O sistema é composto por um microcomputador com processador AMD K6 450 MHz, uma placa de aquisição Vizion-EZ DT-55 e dois software para a aquisição e a tratamento das imagens, o GLOBAL LAB Acquire e o GLOBAL LAB Image, respectivamente. A placa de aquisição foi conectada a uma câmera de vídeo Hitachi CCD, modelo KP-110, através da qual as imagens foram adquiridas.

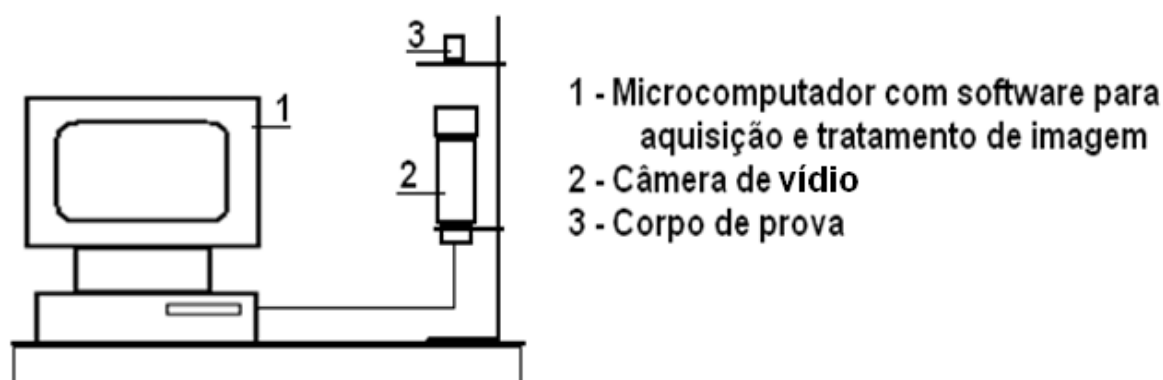


Figura 3.11 – Desenho esquematizado do sistema de aquisição e tratamentos de imagens.

3.7.8 Medição do escorrimento do cordão

Para a medição do escorrimento do cordão foi usado um paquímetro tipo universal, de inox, com escala fixa de 150 mm de comprimento e resolução de 0,01 mm.

Traçou-se uma linha reta no canto inferior do rasgo da placa de teste, com o cordão já soldado, linha esta que ligou os dois extremos da placa de teste, e com o paquímetro fez-se a medição desta linha até o ponto mais alto do escorrimento, onde obteve a cota y (exposto na Figura 3.12). A distância do escorrimento ao centro do chanfro é 2,75 mm menos a cota y ($E = 2,75 - y$). Deve-se informar que o cordão de solda foi feito no centro das placas, e deixando um espaço, aproximado de 40 mm, em cada extremo sem soldagem.

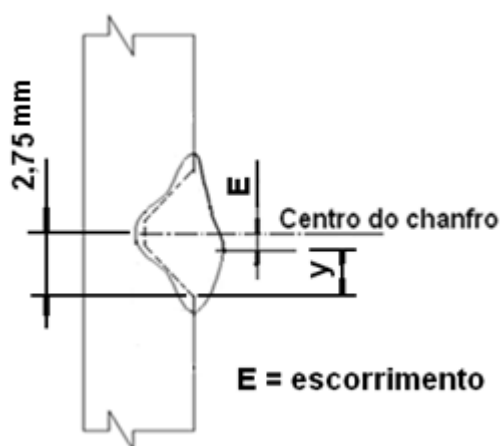


Figura 3.12 – Escorrimento do reforço.

CAPÍTULO IV

TESTES PRELIMINARES

Neste capítulo são apresentados testes exploratórios para confirmação dos parâmetros operacionais adotados nos processos GMAW e FCAW com ambos os gases de proteção e que correspondam com os valores e metodologia anteriormente adotada. Após testes exploratórios foram realizadas as soldagens, as quais proporcionaram cordões de solda que permitiram a relação entre ambos os processos, propostos nesse estudo.

Como visto anteriormente, os parâmetros adotados para a realização dos testes foram faixas de corrente de 120 e 160 A com tensão nas faixas de 18, 20, 22 e 24 V, para o processo GMAW e para o processo FCAW.

4.1 Definição das faixas operacionais

4.1.1 Introdução

Para a definição das faixas operacionais de soldagem que fossem capazes de garantir parâmetros previamente adotados, os quais pudessem realizar os cordões de solda anteriormente propostos, iniciou-se a realização dos estudos exploratórios. Os testes exploratórios tiveram duas fases. Na primeira fase foram realizados pré-testes, em chapas lisas (sem chanfro) e na posição horizontal de soldagem, para iniciar a determinação das velocidades de alimentação e verificação as faixas de tensão adotadas; Na segunda fase os testes foram realizados em chapas usinadas (com chanfro central) e na posição horizontal, para ajustes dos parâmetros já determinados nos pré-testes da primeira fase.

Em resumo, os objetivos dos testes exploratórios foram: determinação das velocidades de alimentação que correspondessem às correntes desejadas; verificação das faixas de tensões adotadas que, juntamente com as correntes desejadas, correspondessem a uma maior regularidade no arco e proporcionasse cordões com geometria aceitável e determinação das velocidades de soldagem que aproximassem de um volume semelhante para todos os cordões. As etapas adotadas dos estudos exploratórios foram comuns para os dois tipos de gás de proteção.

4.1.2 Definição das velocidades de alimentação (V_a)

Para a obtenção das correntes predeterminadas em projeto, partiu-se para a definição dos correspondentes valores das velocidades de alimentação do arame através de pré-testes exploratório. Estes pré-testes foram realizados em chapas de aço carbono ABNT 1020 com dimensões de 6,3 mm x 50,8 mm x 250 mm, com soldagem por deposição sobre a chapa e na posição horizontal. Como estes pré-testes foram realizados em superfície lisa (sem chanfro), então se adotou a DBCP de 12 mm, na tentativa de ter as velocidades de alimentação o mais próximos possível das faixas de corrente desejadas. Os pré-testes foram feitos com aquisição de dados e seus valores utilizados como referência para posterior soldagem exploratória, já com as placas de testes (com chanfro central).

Os valores das velocidades de alimentação, determinadas nos pré-testes exploratórios, que mais se aproximaram das faixas de corrente adotadas estão apresentados na Tabela 4.1. As iniciais “pm” e “pt” expostos nesta tabela indicam os pré-testes com arame maciço e pré-testes com arame tubular, respectivamente.

Baseando nos valores medidos das velocidades de alimentação do arame e nos correspondentes valores adquiridos das correntes nos pré-testes, iniciou-se a segunda fase dos testes exploratórios, já utilizando as placas teste. Estes testes exploratórios, onde as soldagens foram feitas sobre o chanfro, tiveram como objetivo o ajuste final da velocidade de alimentação, antes da realização dos testes definitivos, apresentados no próximo capítulo.

Destes testes exploratórios, os valores ajustados de velocidades de alimentação que mais se aproximaram das faixas de corrente desejadas, estão apresentados na Tabela 4.2.

As iniciais “em” e “et” exposto nesta tabela indicam os testes exploratórios com arame maciço e testes exploratórios com arame tubular, respectivamente.

Tabela 4.1 – Valores dos parâmetros medidos e regulados para obtenção das faixas de corrente desejadas.

Arame	Ar+25% CO ₂					100% CO ₂				
	Va (m/min)	Teste	I (A)	Ur (V)	U (V)	Teste	Va (m/min)	I (A)	Ur (V)	U (V)
Maciço	3,1	pm01	124	18	18,2	pm15	3,3	121	18	18,1
	3,0	pm02	120	20	17,9	pm16	3,1	119	20	18,8
	3,1	pm03	121	20	19,2	pm17	3,3	122	20	19,6
	3,1	pm04	123	22	21,6	pm18	3,2	118	22	20,4
	3,0	pm05	119	22	19,8	pm19	3,3	121	22	22,3
	3,0	pm06	119	24	21,8	pm20	3,3	123	24	22,8
	3,1	pm07	117	24	23,6	pm21	3,2	118	24	24,1
	4,3	pm08	162	18	17,9	pm22	4,3	155	18	18,1
	4,2	pm09	159	20	17,8	pm23	4,5	159	18	17,8
	4,2	pm10	165	22	20,4	pm24	4,5	158	20	18,5
	4,1	pm11	157	22	19,5	pm25	4,5	163	22	22,1
	4,2	pm12	163	24	23,3	pm26	4,4	162	22	20,9
	4,0	pm13	162	24	22,3	pm27	4,3	163	24	21,9
	4,2	pm14	163	24	24,1	pm28	4,5	164	24	23,9
Tubular	3,5	pt01	114	18	18,0	pt15	4,2	122	18	18,3
	3,6	pt02	117	18	18,3	pt16	3,8	119	18	18,1
	3,9	pt03	119	20	20,2	pt17	3,8	118	20	20,2
	3,6	pt04	122	22	22,3	pt18	3,8	124	20	20,2
	3,6	pt05	123	22	21,9	pt19	4,2	125	22	22,3
	3,4	pt06	122	24	23,4	pt20	3,8	123	22	21,8
	3,6	pt07	122	24	24,3	pt21	4,2	120	24	24,1
	4,9	pt08	155	18	18,0	pt22	5,2	157	18	18,1
	5,2	pt09	157	18	17,8	pt23	5,6	159	18	18,2
	5,1	pt10	154	20	19,2	pt24	5,2	154	20	20,0
	5,2	pt11	163	20	20,4	pt25	5,6	157	20	20,0
	5,2	pt12	165	22	22,1	pt26	5,2	158	22	19,7
	5,5	pt13	170	22	22,1	pt27	5,6	162	22	22,2
	5,2	pt14	162	24	23,5	pt28	5,6	164	24	22,2

Sendo: velocidade de alimentação medida (Va); Corrente média adquirida (I); Tensão regulada (Ur) e tensão média adquirida (U).

Tabela 4.2 – Valores dos parâmetros regulados e adquiridos, na segunda fase dos testes exploratórios.

Arame	Ar+25% CO ₂					100% CO ₂				
	Teste	Va (m/min)	I (A)	Ur (V)	U (V)	Teste	Va (m/min)	I (A)	Ur (V)	U (V)
Maciço	em01	3,1	120	18	17,9	em09	3,3	121	18	18,2
	em02	3,1	119	20	19,8	em10	3,3	120	20	20,1
	em03	3,1	119	22	21,8	em11	3,3	122	22	22,7
	em04	3,1	119	24	24,0	em12	3,3	123	24	24,4
	em05	4,2	159	18	17,5	em13	4,5	157	18	18,7
	em06	4,2	157	20	19,4	em14	4,5	162	20	20,8
	em07	4,2	162	22	22,1	em15	4,5	163	22	23,3
	em08	4,2	158	24	23,4	em16	4,5	161	24	23,8
Tubular	et01	3,6	117	18	18,7	et09	3,8	122	18	18,3
	et02	3,6	120	20	20,3	et10	3,8	123	20	20,1
	et03	3,6	122	22	22,3	et11	3,8	123	22	22,4
	et04	3,6	123	24	24,6	et12	3,8	120	24	24,4
	et05	5,2	156	18	17,9	et13	5,6	157	18	18,2
	et06	5,2	162	20	20,6	et14	5,6	162	20	22,4
	et07	5,2	163	22	22,3	et15	5,6	164	22	22,3
	et08	5,2	164	24	24,1	et16	5,6	165	24	24,1

Sendo: velocidade de alimentação (Va); corrente média adquirida (I); tensão de soldagem regulada (Ur) e tensão média adquirida (U).

Os valores das velocidades de alimentação do arame que mais se aproximaram das faixas de corrente desejadas, e que foram adotadas para a realização dos testes definitivos, estão apresentados na Tabela 4.3. Lembrando que no capítulo anterior, para os valores médios das faixas de corrente foi considerada uma tolerância de ± 5 A.

Tabela 4.3 – Valores de velocidades de alimentação e faixas de corrente desejada, na soldagem dos testes definitivos.

		Gás Ar+25% CO ₂	Gás 100% CO ₂
Arame	I (A)	Va (m/min)	Va (m/min)
Maciço	120	3,1	3,3
	160	4,2	4,5
Tubular	120	3,6	3,8
	160	5,2	5,6

Sendo: Corrente desejada (I) e velocidade de alimentação medida (Va)

Fazendo uma simples análise dos parâmetros apresentado na Tabela 4.3, pode-se dizer que, pelos valores superiores das velocidades de alimentação requerida na soldagem do arame tubular, este processo possui uma maior taxa de fusão em relação ao arame maciço.

4.1.3 Verificação das faixas de tensão de soldagem (U_r)

As faixas de tensão de trabalho de 18, 20, 22 e 24 V, adotadas para as duas faixas de correntes, na soldagem com arame maciço e arame tubular, foram selecionadas com base em trabalhos de pesquisas e literaturas de fabricantes de arames eletrodo, cujas justificativas se encontram expostas no Capítulo III. Estas faixas de tensão foram usadas para os dois gases de proteção e também foram observados os seus comportamentos, nos testes exploratórios, antes de serem utilizados nas soldagens definitivas dos cordões em estudo.

Nos pré-testes exploratórios, para ambos os arames, também foram testadas as faixas de tensão de 16 e 26 V. Sendo que para o processo GMAW e na corrente de 120 A, principalmente com o gás de proteção $Ar+25\%CO_2$, a faixa de 26 V provocou grande instabilidade no arco, com apagamento e muito salpicos, tornando muito difícil a transferência das gotas para a poça de fusão. Para o processo FCAW com a faixa de 16 V, para ambos os gases de proteção e principalmente na corrente de 120 A, ficou difícil a permanência do arco aberto e a colagem do arame à peça era constante.

Na soldagem exploratória, com as placas de teste em posição horizontal de soldagem, houve alguns desvios dos valores da tensão regulada na fonte e nos seus valores médios adquiridos e também pequenas alterações nos valores médios adquiridos das faixas das correntes, mas dentro da tolerância adotada.

4.1.4 Definição das velocidades de soldagem (V_s)

Para o cálculo das velocidades de soldagem do arame maciço, foi utilizada uma constante de deposição de valor igual a $K_d = 15,14$ em conjunto com os valores das velocidades de alimentação, correspondente a cada faixa de corrente utilizada, apresentada na Tabela 4.3, e cujas fórmulas e cálculos se encontram no Capítulo III.

Na definição da constante de deposição para o arame tubular foram realizadas algumas soldagens na placa de teste, com este arame, até conseguir um cordão com geometria semelhante (largura e reforço), o mais próximo possível da geometria do cordão padrão do arame maciço (Figura 3.1).

Então com a velocidade de alimentação ($V_a = 3,6$ m/min) e a velocidade de soldagem ($V_s = 194$ mm/min) deste cordão semelhante, apresentado na Figura 4.1, foi calculada a constante de deposição de valor igual a $K_d = 18,60$. Com esta constante e com os valores das velocidades de alimentação, apresentado na Tabela 4.3, foram calculadas as demais velocidades de depósito para o arame tubular. A constante de deposição do arame tubular é maior que a constante de deposição do arame maciço, devido a massa depositada por unidade de comprimento daquele arame ser relativamente menor.



Figura 4.1 – Cordão padrão do processo FCAW.

A Tabela 4.4 apresenta os valores das velocidades de soldagem calculadas e as velocidades de alimentação medidas na saída do bico de contato, utilizados nos testes definitivos de ambos os processos, apresentados no próximo capítulo.

Tabela 4.4 – Velocidade de soldagem calculada e velocidade de alimentação, correspondente.

Arame	I (A)	Ar+25%CO ₂		100%CO ₂	
		V _a (m/min)	V _s (mm/min)	V _a (m/min)	V _s (mm/min)
Maciço	120	3,1	205	3,3	218
	160	4,2	277	4,5	297
Tubular	120	3,6	194	3,8	204
	160	5,2	280	5,6	301

Sendo: Corrente desejada (I); velocidade de alimentação medida (V_a) e velocidade de soldagem calculada (V_s).

CAPÍTULO V

RESULTADOS E ANÁLISES DOS PROCESSOS

5.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados dos testes de ambos os processos, GMAW e FCAW, os quais foram executados e analisados dentro de uma metodologia, já estipulada e apresentada no Capítulo III. As respostas resultantes destes testes, com a soldagem combinando arames e gases de proteção e nas faixas de corrente e tensão preestabelecidas, serviram para avaliar os efeitos das condições operacionais dos processos sobre regularidade de transferência metálica e as características do cordão, tais como rendimento de deposição, morfologia e presença de descontinuidades. O conhecimento das características dos rendimentos de deposição é importante para o embasamento da análise comparativa da capacidade produtiva e econômica entre os dois processos de soldagem. O objetivo desta análise é tão somente a demonstração das potencialidades de cada processo e a sua aplicação na posição horizontal de soldagem.

5.2 Condições de Soldagem

Para a determinação das características como taxa de fusão (T_f) e taxa de deposição (T_d), as quais serviriam como base de cálculo para os rendimentos de deposição (η_D) de ambos os processos estudados, foram realizados oito testes para cada nível de corrente, conforme procedimentos predeterminados e vistos no Capítulo III. Foi considerada a mesma taxa de metal fundido a ser depositado pelo comprimento do cordão de solda em todos os ensaios realizados. Com isto, as constantes de deposição (relação entre a velocidade de alimentação do eletrodo dividido pela velocidade de soldagem) utilizadas foram $K_d = 15,14$ para o processo GMAW e $K_d = 18,60$ para o processo FCAW. Os valores dos parâmetros

utilizados, para a realização destes testes estão expostos na Tabela 5.1. Estes parâmetros foram obtidos a partir de ensaios preliminares realizados no Capítulo IV.

Tabela 5.1 – Parâmetros de soldagem

Arame			Ar + 25% CO ₂		100%CO ₂	
	I (A)	Ur (V)	Va (m/min)	Vs (mm/min)	Va (m/min)	Vs (mm/min)
	Desejada	Regulada	Regulada	Calculada	Regulada	Calculada
Maciço	120	18	3,1	205	3,3	218
		20				
		22				
		24				
	160	18	4,2	277	4,5	297
		20				
		22				
		24				
Tubular	120	18	3,6	194	3,8	204
		20				
		22				
		24				
	160	18	5,2	280	5,6	301
		20				
		22				
		24				

Sendo: (I) – Valores desejados de corrente; (Ur) – tensão de referência regulada na fonte; (Va) – velocidade de alimentação; (Vs) – velocidade de soldagem.

Na Tabela 5.1, pode-se observar a influência do gás de proteção sobre a velocidade de alimentação para ambos os processos, por consequência também sobre as suas taxas de fusão. O gás 100%CO₂, em relação ao gás Ar+25%CO₂, necessitou de maior velocidade de alimentação para manter o mesmo nível de corrente desejada.

Após limpeza, procedimento estabelecido no Capítulo III, as placas de testes foram pesadas e liberadas para a soldagem. Na sequência, após a soldagem, todas elas receberam posterior limpeza e pesagem.

5.3 Resultados dos ensaios

Na Tabela 5.2 estão apresentados os valores médios adquiridos dos parâmetros de soldagem. Em uma prévia análise, observa-se que os valores médios adquiridos das faixas de corrente de soldagem se encontram dentro das faixas operacionais de trabalho, cuja tolerância estabelecida foi de ± 5 A.

Tabela 5.2 – Valores médios dos parâmetros de soldagem.

Gás	Arame Maciço					Arame Tubular				
	Teste	Ur (V)	Vs (mm/min)	U (V)	I (A)	Teste	Ur (V)	Vs (mm/min)	U (V)	I (A)
Ar+25% CO ₂	Tm 01	18	205	17,7	119	Tt 01	18	194	18,1	119
	Tm 02	20	205	19,8	119	Tt 02	20	194	20,2	119
	Tm 03	22	205	21,6	121	Tt 03	22	194	22,3	123
	Tm 04	24	205	24,8	122	Tt 04	24	194	24,3	123
	Tm 05	18	277	18,1	159	Tt 05	18	280	17,9	158
	Tm 06	20	277	19,5	160	Tt 06	20	280	20,1	160
	Tm 07	22	277	22,3	161	Tt 07	22	280	22,1	163
	Tm 08	24	277	23,4	162	Tt 08	24	280	24,0	164
100% CO ₂	Tm 09	18	218	18,3	121	Tt 09	18	204	18,5	121
	Tm 10	20	218	20,4	119	Tt 10	20	204	20,2	123
	Tm 11	22	218	22,5	123	Tt 11	22	204	22,4	123
	Tm 12	24	218	24,4	123	Tt 12	24	204	24,3	123
	Tm 13	18	297	18,2	158	Tt 13	18	301	18,9	158
	Tm 14	20	297	20,5	162	Tt 14	20	301	22,2	162
	Tm 15	22	297	21,9	162	Tt 15	22	301	22,2	163
	Tm 16	24	297	23,9	163	Tt 16	24	301	24,1	164

Sendo: Tensão regulada na fonte (Ur); tensão média adquirida (U); corrente média adquirida (I) e velocidade de soldagem regulada (Vs).

Para estudar os resultados das respostas relacionados com as condições de regularidade do arco e modo de transferência metálica, cujos parâmetros de comparação preestabelecidos se encontram nas “diretrizes estabelecidas para análise” apresentadas no Capítulo III, os valores dos testes considerados como respostas foram calculados, pelo programa desenvolvido pelo LAPROSOLDA no ambiente MATLAB e também visto no Capítulo III, e seus resultados apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Valores médios dos parâmetros de cálculo dos índices de regularidade.

Arame	Gás	Teste	I (A)	Ur (V)	t_{mcc} (s)	$\sigma_{t_{cc}}$	t_{mab} (s)	$\sigma_{t_{ab}}$	P_{cc} (s)	$\sigma_{p_{cc}}$	f_{cc} (Hz)
Maciço	Ar+25%CO ₂	Tm 01	120	18	0,003	0,0012	0,023	0,0120	0,026	0,0116	38,0
		Tm 02		20	0,004	0,0008	0,047	0,0231	0,05	0,0418	19,8
		Tm 03		22	0,002	0,0019	0,255	0,2377	0,257	0,2614	3,8
		Tm 04		24	0,002	0,0016	1,381	1,0900	1,382	0,5594	3,0
		Tm 05	160	18	0,003	0,0005	0,016	0,0039	0,019	0,0035	51,2
		Tm 06		20	0,003	0,0011	0,023	0,0099	0,026	0,0096	37,6
		Tm 07		22	0,002	0,0012	0,037	0,0465	0,038	0,0404	25,8
		Tm 08		24	0,001	0,0008	0,065	0,1022	0,066	0,1149	15,2
	100%CO ₂	Tm 09	120	18	0,003	0,0012	0,009	0,0057	0,013	0,0068	79,4
		Tm 10		20	0,002	0,0007	0,011	0,0068	0,013	0,0067	74,0
		Tm 11		22	0,003	0,0012	0,02	0,0139	0,023	0,0153	44,0
		Tm 12		24	0,003	0,0013	0,039	0,024	0,042	0,0226	24,0
		Tm 13	160	18	0,004	0,0024	0,011	0,0065	0,015	0,0075	69,0
		Tm 14		20	0,003	0,0013	0,008	0,0051	0,011	0,0061	65,0
		Tm 15		22	0,003	0,0013	0,014	0,0084	0,016	0,0100	60,8
		Tm 16		24	0,003	0,0013	0,024	0,0146	0,027	0,0131	36,4
Tubular	Ar+25%CO ₂	Tt 01	120	18	0,003	0,0012	0,028	0,0226	0,030	0,0232	32,8
		Tt 02		20	0,002	0,0010	0,103	0,0962	0,105	0,0965	9,5
		Tt 03		22	0,001	0,0009	0,517	0,3039	0,518	0,304	1,8
		Tt 04		24	0,627	1,0843	1,799	2,4600	2,426	2,049	0,2
		Tt 05	160	18	0,003	0,0015	0,019	0,0144	0,022	0,0153	45,8
		Tt 06		20	0,002	0,0010	0,034	0,0316	0,037	0,0317	27,3
		Tt 07		22	0,001	0,0005	0,090	0,0746	0,091	0,0746	11,0
		Tt 08		24	0,001	0,0003	0,826	0,4095	0,827	0,4093	1,0
	100%CO ₂	Tt 09	120	18	0,003	0,0014	0,018	0,0135	0,020	0,0141	48,5
		Tt 10		20	0,002	0,0010	0,040	0,0364	0,042	0,0365	23,8
		Tt 11		22	0,001	0,0006	0,155	0,1398	0,155	0,1397	6,3
		Tt 12		24	0,001	0,0005	0,626	0,839	0,629	0,8387	1,0
		Tt 13	160	18	0,003	0,0014	0,015	0,0117	0,018	0,0124	55,5
		Tt 14		20	0,001	0,0006	0,043	0,0341	0,044	0,0342	22,8
		Tt 15		22	0,001	0,0007	0,051	0,0367	0,052	0,0368	20,0
		Tt 16		24	0,001	0,0005	0,171	0,1526	0,171	0,1526	5,3

Sendo: Valores definidos de Corrente (I) e Tensão de soldagem (Ur) e valores calculados de: tempo médio de curto-circuito (t_{mcc}); desvio padrão do tempo de curto-circuito ($\sigma_{t_{cc}}$); tempo médio de arco aberto (t_{mab}); desvio padrão do tempo de arco aberto ($\sigma_{t_{ab}}$); período de curto-circuito (P_{cc}); desvio padrão do período de curto-circuito ($\sigma_{p_{cc}}$); frequência de curto-circuito (f_{cc}).

A frequência de curto-circuito (f_{cc}) foi calculada para todos os ensaios realizados, como apresentado na Tabela 5.3, porém ele só foi analisado para os ensaios que tiveram a predominância da transferência metálica por curto-circuito.

Em uma prévia análise, pode-se observar a redução dos valores das frequências de curto-circuito com o aumento da faixa de tensão, fato esse comum aos dois processos em ambas as faixas de corrente e para os dois gases de proteção utilizados.

5.4 Análise dos resultados baseado na transferência metálica

Para analisar a regularidade de transferência metálica dos processos, foram utilizados os índices da Tabela 5.3 em conjunto com os oscilogramas correspondentes a cada processo com a sua faixa de corrente e tipo de gás utilizado.

Os valores da Tabela 5.3 representam um segmento de cinco segundos adquiridos próximo ao centro do comprimento do cordão de solda e os oscilogramas representam dois segundos adquiridos no centro desse segmento. Não foram usados segmentos maiores que dois segundos, pois isso tornaria o oscilogramas com linhas muito juntas e de difícil compreensão visual.

Foi considerada transferência metálica pelo modo curto-circuito quando a frequência de curto-circuito (f_{cc}) ficou no intervalo de 20 a 200 Hz

5.4.1 Transferência metálica do processo GMAW

a) Análise dos resultados com 120 A e gás de proteção Ar+25%CO₂

A Figura 5.1 apresenta os oscilogramas dos ensaios realizados com o processo GMAW, 120 A e gás Ar+25%CO₂.

As Figuras 5.1(a) e (b), com os valores correspondentes da frequência de transferência por curto-circuito de 38 e 19,8 Hz, respectivamente (Tabela 5.3, ensaios Tm 01 e Tm 02), indicaram a soldagem com transferência pelo modo curto-circuito. Nas faixas de 22 e 24 V, apresentadas nas Figuras 5.1(c) e (d) (ensaio Tm 03 e Tm 04 da Tabela 5.3) e respectivas frequências de curto-circuito de 4 e 3 Hz, mostraram que o aumento do comprimento do arco (maiores tensões) o modo de transferência passou a ser misto, região de transição de curto-circuito para o globular. Desta forma, foi considerada para análise de regularidade de transferência metálica no modo curto-circuito somente os ensaios Tm 01 e Tm 02 da Tabela 5.3.

Pelos resultados obtidos, pode-se afirmar que a elevação da tensão contribuiu para a alteração no modo de transferência metálica, passando a ocorrer também a transferência globular (região de transição curto-circuito/globular), tendo como consequência a redução da frequência de curto-circuito.

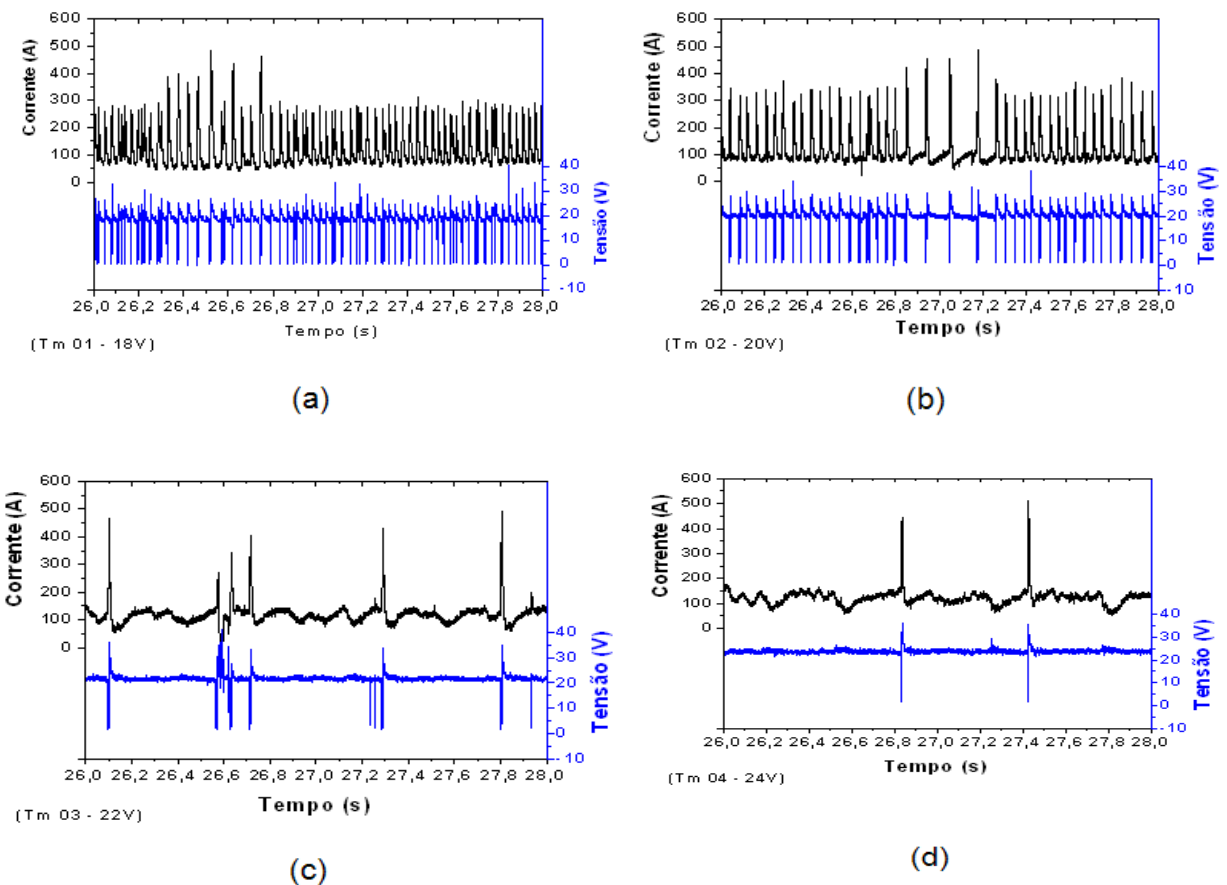


Figura 5.1 – Oscilogramas de corrente e tensão, GMAW, 120 A, gás Ar+25%CO₂ e tensão de referência: (a) 18 V; (b) 20 V; (c) 22 V e (d) 24 V.

b) Análise dos resultados com 160 A e gás de proteção Ar+25%CO₂.

A Figura 5.2 apresenta os oscilogramas dos ensaios realizados com o processo GMAW, 160 A e gás Ar+25%CO₂. As Figuras 5.2(a) e (b), para a tensão de soldagem de 18 e 20 V, respectivamente (Tabela 5.3, ensaio Tm 05 e Tm 06) indicam que a transferência metálica ocorreu no modo curto-circuito com as respectivas frequências de transferência de 51 e 38 Hz.

Para a tensão de 22 V, Figura 5.2(c), frequência de transferência de curto-circuito de 26 Hz (Tabela 5.3, ensaio Tm 07), houve uma diminuição da frequência de curto-circuito com acréscimo no valor médio do período de curto-circuito. Foi possível observar também a ocorrências de transferência sem curto-circuito, provavelmente no modo globular.

Entretanto, devido à grande incidência de transferência por curto-circuito, a regularidade deste ensaio também foi analisada pelo modo curto-circuito.

Com a tensão de 24 V, Figura 5.2(d), (ensaio Tm 08 da Tabela 5.3), a frequência de curto-circuito caiu próxima a 15 Hz e houve uma redução da transferência pelo modo curto-circuito e aumento nas transferências no modo globular.

Pelos resultados obtidos para este gás e corrente de 160 A, pode-se dizer que a elevação da tensão contribuiu para mudança no modo de transferência metálica, conseqüentemente a redução da frequência de curto-circuito, para as condições de soldagem deste trabalho.

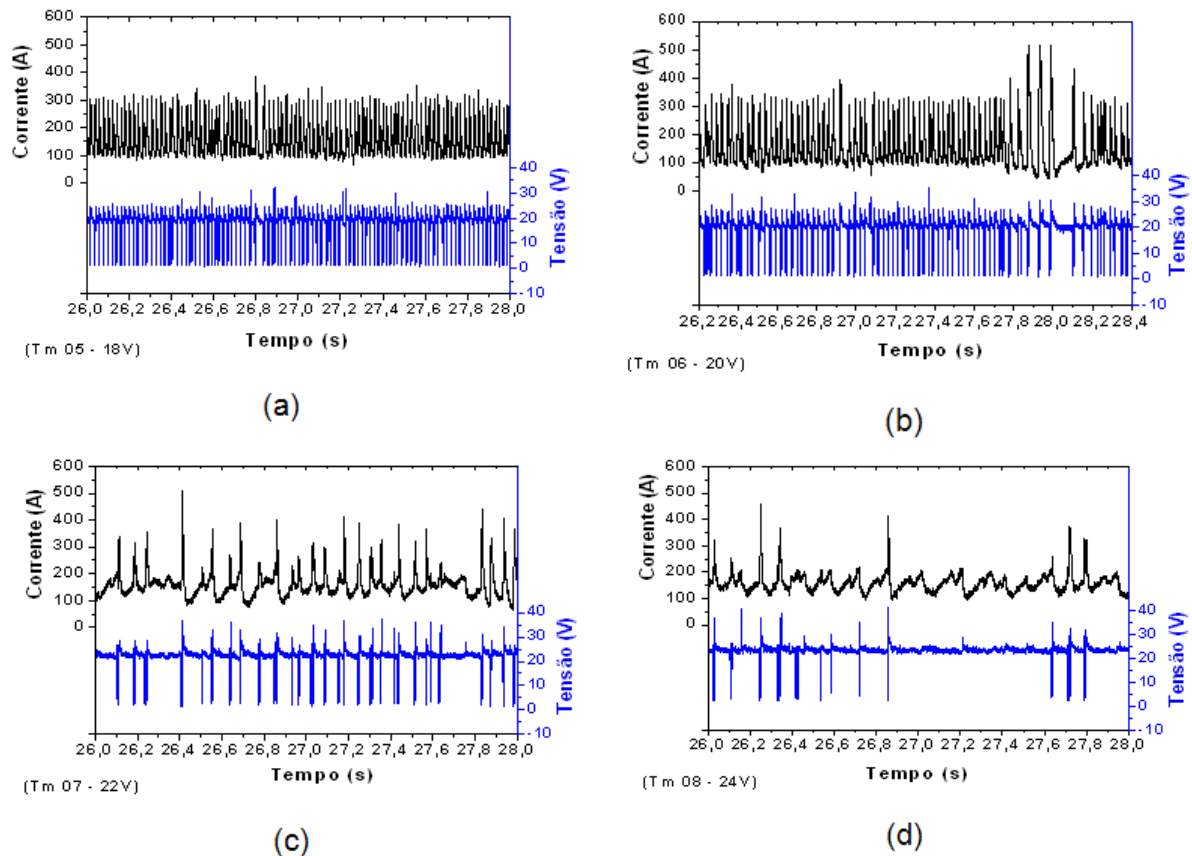


Figura 5.2 – Oscilogramas de corrente e tensão, GMAW, 160 A, gás Ar+25%CO₂ e tensão de referência: (a) 18 V; (b) 20 V; (c) 22 V e (d) 24 V.

c) Análise dos ensaios com 120 A, gás de proteção 100%CO₂.

A Figura 5.3 apresenta os oscilogramas dos ensaios realizados com o processo GMAW, 120 A e gás 100%CO₂. O gás de proteção 100%CO₂, nas faixas de tensão de 18, 20, 22 e 24 V, proporcionou transferência metálica pelo modo curto-circuito com as respectivas frequências de transferência nos valores de 79, 74, 44 e 24 Hz, conforme se

observa nas Figuras 5.3(a), (b), (c) e (d) e ensaios correspondentes da Tabela 5.3 são: Tm 09; Tm 10; Tm 11 e Tm 12.

Embora o gás de proteção 100%CO₂ tenha maior capacidade relativa de manter a transferência metálica pelo modo curto-circuito em faixas de tensão mais elevadas, isto não impediu a redução da frequência de transferência com o aumento da tensão. Este gás de proteção proporcionou mais transferência pelo modo curto-circuito em relação ao gás de proteção Ar+25%CO₂ (maiores frequências de curto-circuito).

Scotti e Ponomarev (2008) expõem que o gás rico em CO₂ tende a apresentar um arco muito curto favorecendo a transferência por curto-circuito. Seu potencial de oxidação favorece a estabilidade da raiz do arco, mas de forma antagônica parece aumentar a tensão superficial metal líquido/meio ambiente, fato este que pode ter contribuído para a ocorrência de transferência por curto-circuito com maiores valores de tensões.

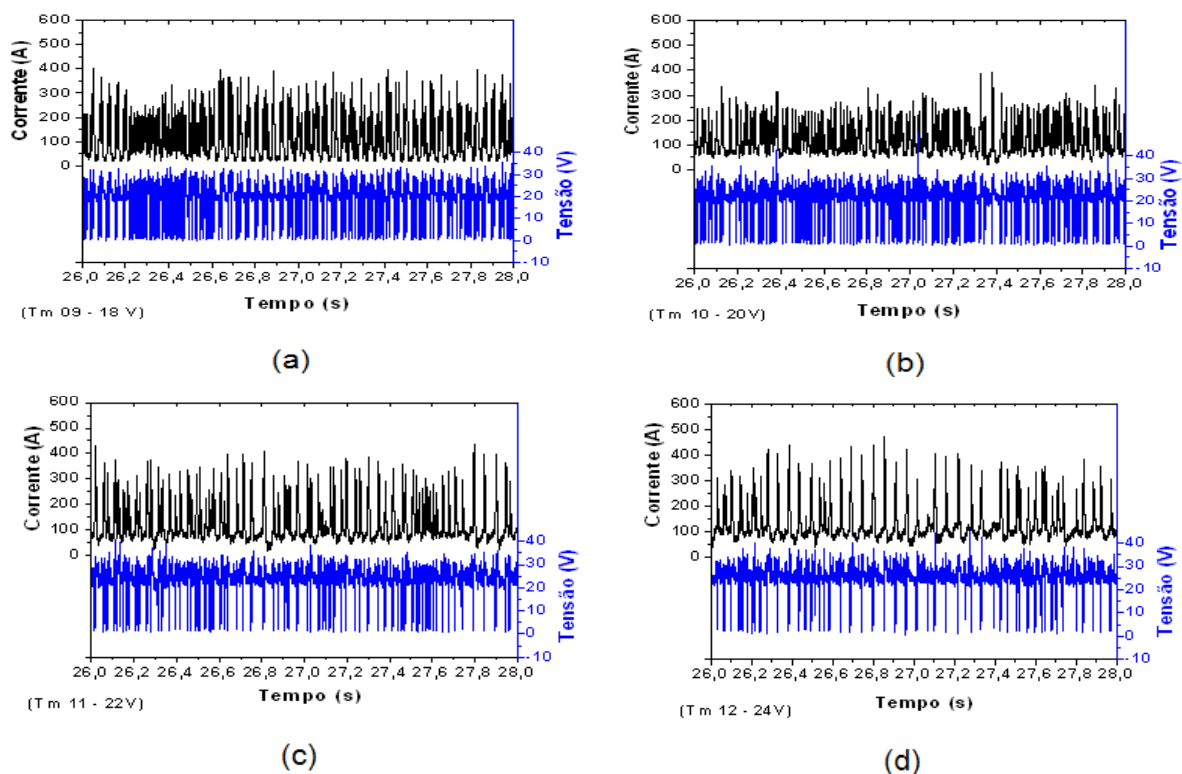


Figura 5.3 – Oscilogramas de corrente e tensão, GMAW, 120 A, gás 100%CO₂ e tensão de referência: (a) 18 V; (b) 20 V; (c) 22 V e (d) 24 V.

d) Análise dos ensaios realizados com 160 A e gás de proteção 100%CO₂.

A Figura 5.4 apresenta os oscilogramas dos ensaios realizados com o processo GMAW, 160 A e gás 100%CO₂.

As Figuras 5.4(a), (b), (c) e (d), que correspondem aos ensaios Tm 13, Tm 14, Tm 15 e Tm 16 da Tabela 5.3, indicam transferência metálica pelo modo curto-circuito com a respectiva frequência de curto-circuito de 69, 65, 61 e 36 Hz (Tabela 5.3). Como visto, também para esta faixa de corrente o gás 100%CO₂ proporcionou a transferência no modo curto-circuito com o aumento da tensão de soldagem.

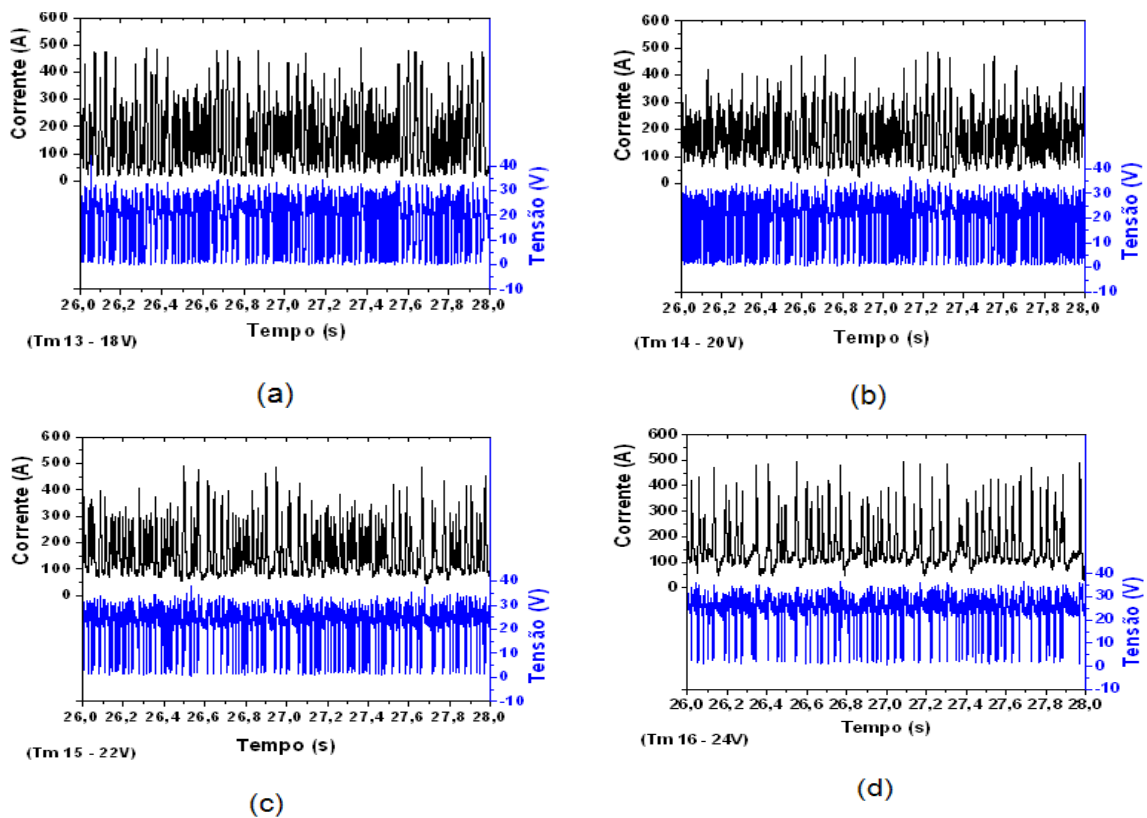


Figura 5.4 – Oscilogramas de corrente e tensão, GMAW, 160 A, gás 100%CO₂ e tensão de referência: (a) 18 V; (b) 20 V; (c) 22 V e (d) 24 V.

Os ensaios de regularidade de transferência metálica no modo curto-circuito a serem analisados foram os que apresentaram a predominância de curto-circuito, conforme apresentado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Valores médios dos parâmetros de soldagem com predominância de transferência por curto-circuito (Processo GMAW).

Arame	Gás	Teste	I (A)	Ur (V)	Vs (mm/min)	f _{cc} (Hz)
Maciço	Ar+25% CO ₂	Tm 01	120	18	205	38
		Tm 02	120	20	205	20
		Tm 05	160	18	277	51
		Tm 06	160	20	277	38
		Tm 07	160	22	277	26
	100% CO ₂	Tm 09	120	18	218	79
		Tm 10	120	20	218	74
		Tm 11	120	22	218	44
		Tm 12	120	24	218	24
		Tm 13	160	18	297	69
		Tm 14	160	20	297	65
		Tm 15	160	22	297	61
		Tm 16	160	24	297	36

Sendo: Valores regulados da tensão (Ur); valores da corrente (I); valores regulados das velocidades de soldagem (Vs) e frequência de curto-circuito (f_{cc}).

5.4.2 Transferência metálica do processo FCAW

Devido à presença do fluxo, a transferência metálica no processo FCAW é diferente do processo GMAW. A gota forma-se na ponta do arame e é conduzida pelo fluxo até a poça de fusão e dependendo, do tipo de gás de proteção e nível de tensão, pode ou não ocorrer curto-circuito. Para Fortes (2004), quando é usado o dióxido de carbono (CO₂) ou uma mistura Ar+ CO₂, o arame se aquecerá demasiadamente e formar-se-ão grandes gotas de metal fundido, maior que o diâmetro do arame, que será transferido através do arco em glóbulos impulsionados pela força do arco. Estas gotas, maiores em tamanho, podem causar curtos-circuitos, sendo esse modo conhecido como modo de transferência por falso aerossol ou quase globular. Para comprovar este fato filmagens de alta velocidade deverão ser realizadas, conforme proposto no Capítulo VI de trabalhos futuros. Desta forma, para diferenciar do modo de transferência convencional (processo GMAW) foi utilizada neste trabalho a seguinte terminologia para o processo FCAW:

- transferência metálica conduzida pelo fluxo com curto-circuito - quando se verifica nos oscilogramas a predominância de curto-circuito;
- transferência metálica conduzida pelo fluxo sem curto-circuito – quando não se verifica nos oscilogramas a presença de curto-circuito.

a) Análise dos resultados com 120 A e gás de proteção Ar+25%CO₂.

A Figura 5.5 apresenta os oscilogramas dos ensaios realizados com o processo FCAW, 120 A e gás Ar+25%CO₂.

A Figura 5.5(a) (ensaio Tt 01 da Tabela 5.3) apresenta os oscilogramas da soldagem do arame tubular na tensão de 18 V. A frequência de curto-circuito foi de 33 Hz indicando uma transferência metálica conduzida pelo fluxo com predominância de curto-circuito.

A Figura 5.5(b) (ensaio Tt 02 da Tabela 5.3) representa a soldagem realizada na tensão de 20 V e cuja frequência média de curto-circuito foi de 9,5 Hz. Isso indica que a transferência das gotas conduzida pelo fluxo com poucas ocorrências de curto-circuito.

Para a tensão de 22 V o modo predominante foi o de transferência metálica conduzida pelo fluxo sem curto-circuito (Figura 5.5(c), ensaio Tt 03 da Tabela 5.3). O mesmo fato ocorreu na tensão de 24 V no ensaio Tt 04 da Tabela 5.3 (Figura 5.5(d)).

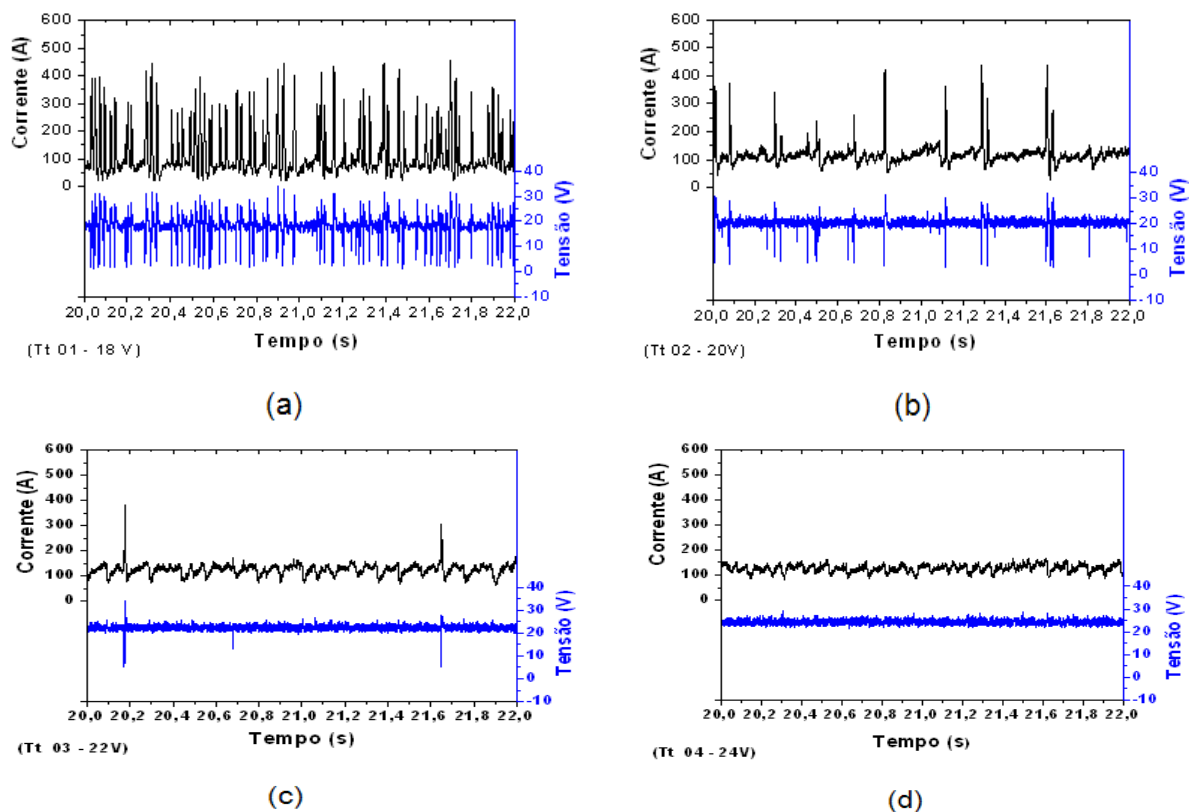


Figura 5.5 – Oscilogramas de corrente e tensão, FCAW, 120 A, gás Ar+25%CO₂ e tensão de referência: (a) 18 V; (b) 20 V; (c) 22 V e (d) 24 V.

b) Análise dos resultados com 160 A e gás de proteção Ar+25%CO₂.

A Figura 5.6 apresenta os oscilogramas dos ensaios realizados com o processo FCAW, 160 A e gás Ar+25%CO₂. As soldagens realizadas nas faixas de 18 e 20 V, Figuras 5.6(a) e (b), tiveram as transferências com predominância de curto-circuito conduzida pelo

fluxo com as respectivas frequências de transferência de 46 e 27 Hz (ensaios Tt 05 e Tt 06 da Tabela 5.3).

Na soldagem realizada na faixa de 22 V, ensaio Tt 07 da Tabela 5.3, a frequência de curto-circuito foi de 11 Hz. Analisando o correspondente oscilogramas na Figura 5.6(c) pode-se concluir que houve um modo misto de transferência das gotas conduzidas pelo fluxo, ou seja, com e sem a ocorrência de curto-circuito.

A Figura 5.6(d) (ensaio Tt 08 da Tabela 5.3) apresenta a soldagem utilizando a tensão de 24 V, onde a transferência foi predominantemente conduzida pelo fluxo sem curto-circuito.

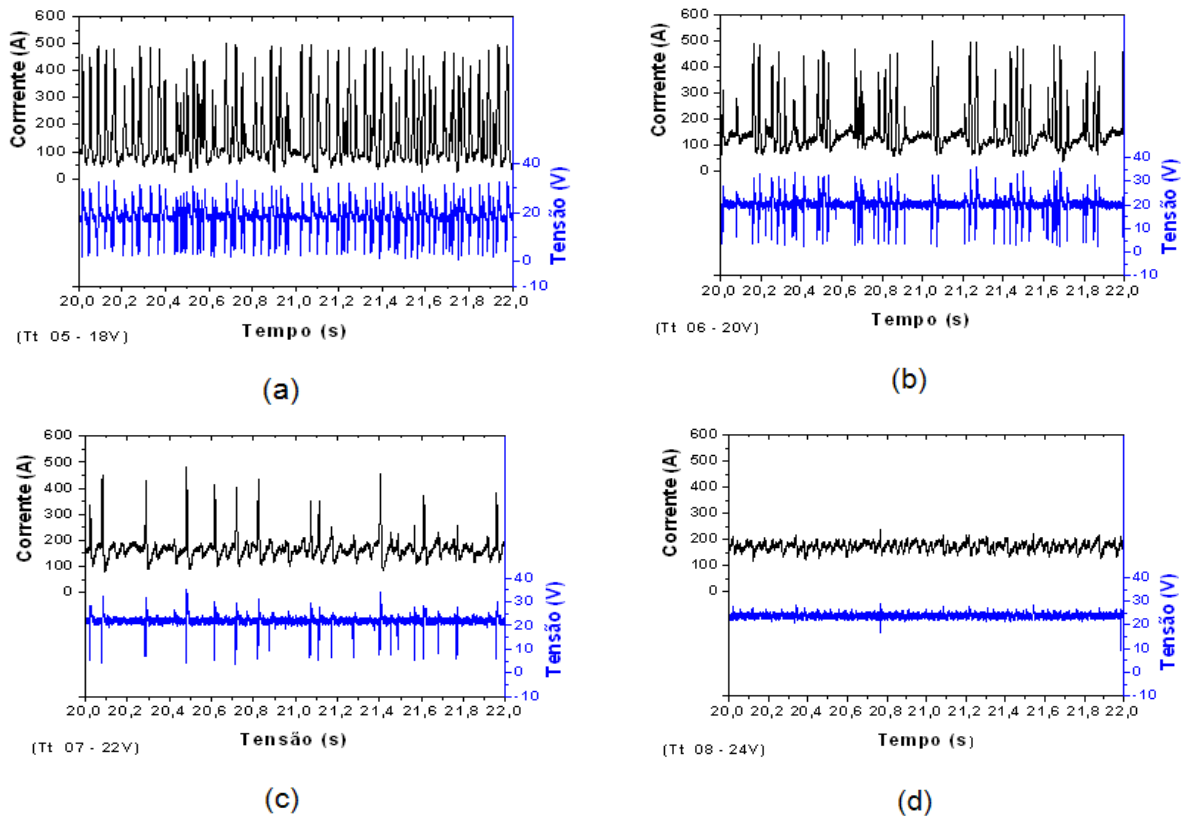


Figura 5.6 – Oscilogramas de corrente e tensão, FCAW, 160 A, gás Ar+25%CO₂ e tensão de referência: (a) 18 V; (b) 20 V; (c) 22 V e (d) 24 V.

c) Análise dos resultados com 120 A e gás de proteção 100%CO₂.

A Figura 5.7 apresenta os oscilogramas dos ensaios realizados com o processo FCAW, 120 A e gás 100%CO₂.

Utilizando a corrente de 120 A e gás 100%CO₂, as soldagens realizadas com tensões de 18 e 20 V tiveram as transferências com as respectivas frequências de curto-circuito de 48 e 24 Hz, ver Figura 5.7(a) e (b) (ensaios Tt 09 e Tt 10 da Tabela 5.3). Analisando e

comparando a soldagem nessas duas tensões, percebeu-se que o aumento da tensão acarretou no aparecimento de regiões com possíveis transferências também no modo conduzido pelo fluxo sem curto-circuito

Na soldagem realizada com tensão de 22 V, cuja frequência de transferência foi de 6 Hz (ensaio Tt 11 da Tabela 5.3) houve um modo misto de transferência conduzida pelo fluxo com e sem curto-circuito, o qual pode ser visto na Figura 5.7(c).

A soldagem utilizando tensão de 24 V, Figura 5.7(d), apresentou frequência de curto-circuito de 1 Hz (ensaio Tt 12 da Tabela 5.3) e as transferências metálicas apresentada nesse segmento podem ser consideradas predominantemente conduzida pelo fluxo sem curto-circuito.

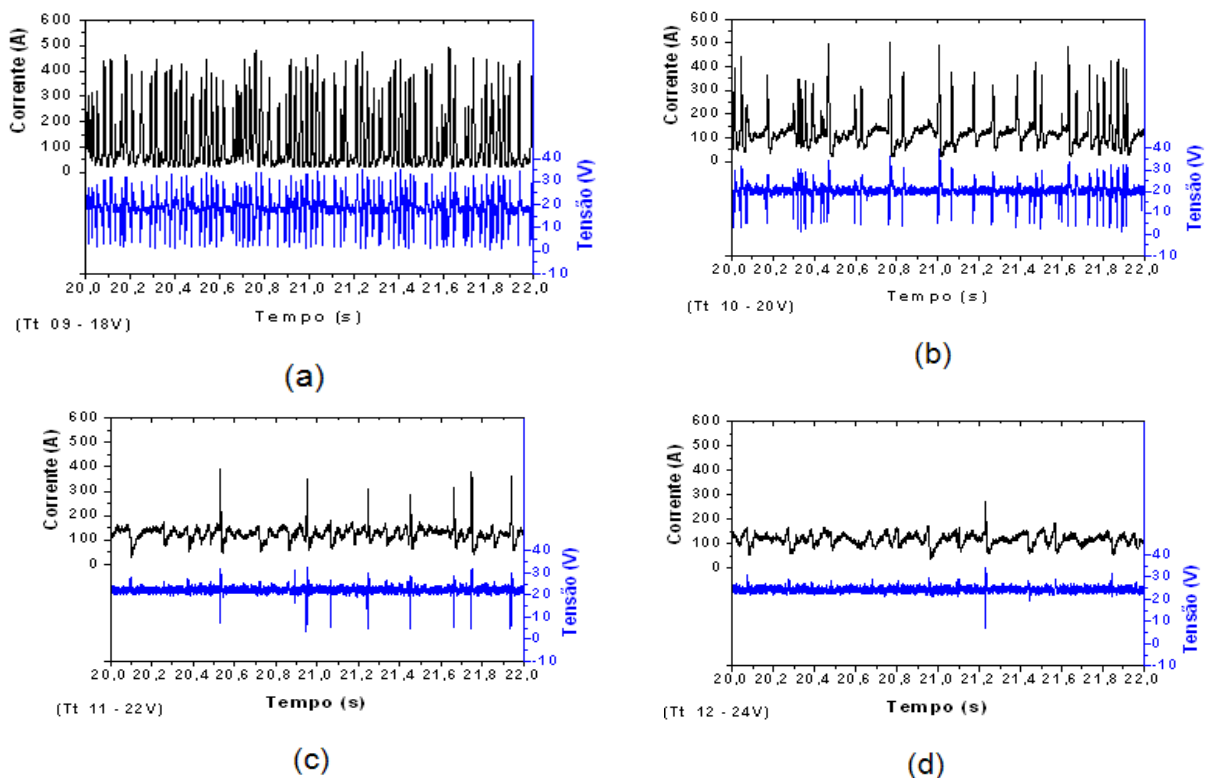


Figura 5.7 – Oscilogramas de corrente e tensão, FCAW, 120 A, gás 100%CO₂ e tensão de referência: (a) 18 V; (b) 20 V; (c) 22 V e (d) 24 V.

d) Análise dos resultados com 160 A e gás de proteção 100%CO₂.

A Figura 5.8 apresenta os oscilogramas dos ensaios realizados com o processo FCAW, 160 A e gás 100%CO₂.

Nesta faixa de corrente e com este gás de proteção, as soldagens realizadas nas faixas de 18, 20 e 22 V, apresentadas nas correspondentes Figuras 5.8 (a), (b) e (c), tiveram as transferências conduzida pelo fluxo com curto-circuito com as respectivas frequências de

curto-circuito de 55, 23 e 20 Hz, valores esses que representam os ensaios Tt 13, Tt 14 e Tt 15 da Tabela 5.3.

Com a elevação da faixa de tensão para 24 V, Figura 5.8 (d), a frequência de curto-circuito ficou próxima de 5 Hz, ensaio Tt 16 da Tabela 5.3. Nessa soldagem a transferência foi predominantemente conduzida pelo fluxo com pouca ocorrência de curto-circuito.

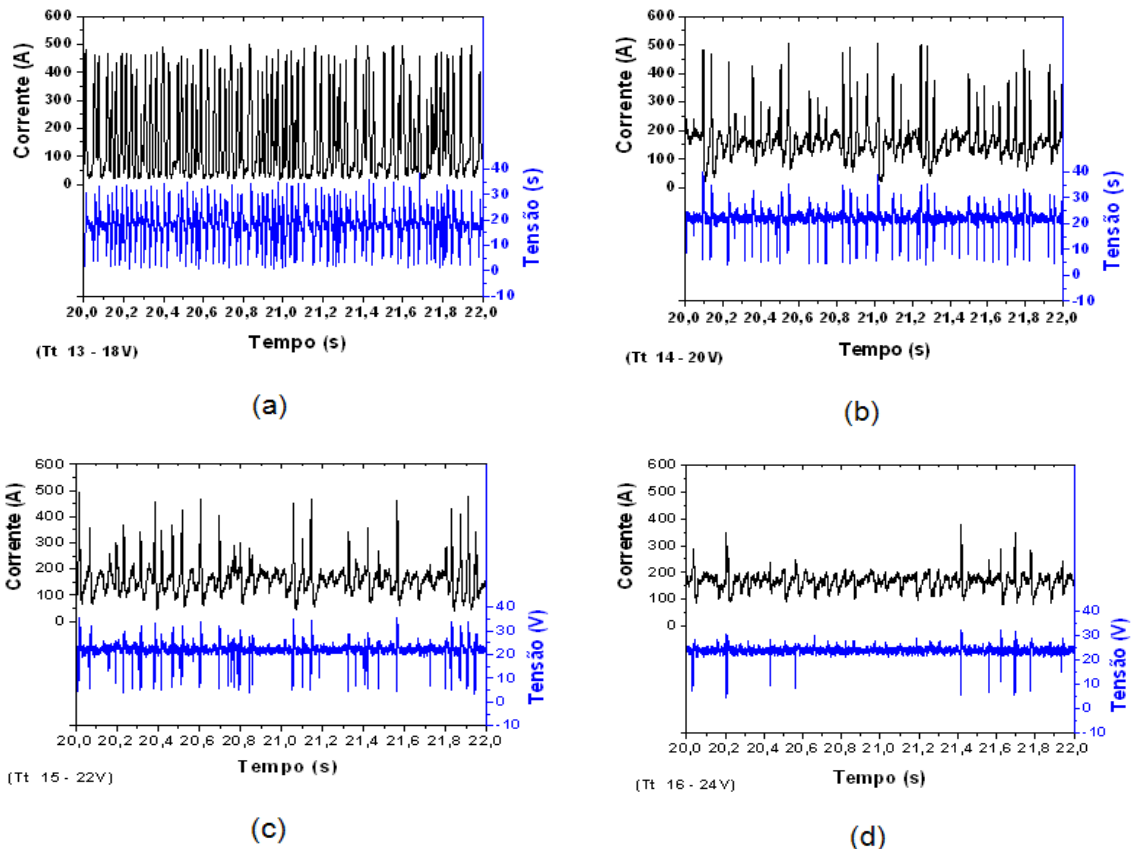


Figura 5.8 – Oscilogramas de corrente e tensão, FCAW, 160 A, gás 100%CO₂ e tensão de referência: (a) 18 V; (b) 20 V; (c) 22 V e (d) 24 V.

Os ensaios analisados, de regularidade de transferência metálica conduzida pelo fluxo com curto-circuito, foram os quais apresentaram a predominância de curto-circuito, expostos na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Valores médios dos parâmetros de soldagem por transferência metálica conduzida pelo fluxo e com predominância de curto-circuito (Processo FCAW).

Arame	Gás	Teste	I (A)	Ur (V)	Vs (mm/min)	f _{cc} (Hz)
Tubular	Ar+25% CO ₂	Tt 01	120	18	194	33
		Tt 05	160	18	280	46
		Tt 06	160	20	280	27
	100% CO ₂	Tt 09	120	18	204	48
		Tt 10	120	20	204	24
		Tt 13	160	18	301	55
		Tt 14	160	20	301	23
		Tt 15	160	22	301	20

Sendo: Valores regulados da tensão (Ur); valores da corrente (I); valores regulados das velocidades de soldagem (Vs) e frequência de curto-circuito (f_{cc}).

5.5 Regularidade de transferência metálica

As análises dos resultados dos processos foram feitas comparando as respostas calculadas e as adquiridas, das soldagens realizadas, com fatores pré-estabelecidos e somente na transferência metálica em que ocorreu o curto-circuito.

Como apresentado no Capítulo III, uma transferência metálica pode ser considerada com regularidade relativa, conforme “diretrizes estabelecidas para análise”, quando apresentar uma transferência periódica e um tempo de apagamento o menor possível. Segundo Silva (2006), em um menor período de curto circuito e menor desvio deste período, menor tempo de transferência de gotas e de arco aberto, com a transferência de gotas menores em uma maior frequência, maior regularidade deve ser obtida. A irregularidade no período de curto influencia diretamente no nível de pico da corrente de curto e nos ciclos de transferência. Mantendo constante o valor da indutância, período mais prolongado faz com que a corrente atinja valores de picos mais elevados e aumentando os respingos.

Para Baixo e Dutra (1990), o desvio do período de transferência está relacionado diretamente com a regularidade do processo e, portanto, com a uniformidade de deposição.

A seguir são apresentadas as análises da regularidade relativa de transferência para os dois processos utilizados. Essas análises foram feitas utilizando como base na frequência de curto-circuito (f_{cc}), nos gráficos dos períodos de curto-circuito (P_{cc}) e seu desvio padrão dos períodos de curto-circuito (σ_{pcc}); índice do desvio padrão do período de curto-circuito

(σ_{pcc}/P_{cc}); e dos Índices Vilarinho de Regularidade por Transferência por curto-circuito (IV_{cc}). Estes valores foram calculados com base em procedimentos apresentadas no Capítulo III.

Os parâmetros de regularidade, citados acima, foram desenvolvidos para obter a regularidade de transferência metálica no modo de curto-circuito com arame maciço. Estes parâmetros foram também utilizados neste trabalho para a análise de regularidade de transferência conduzida pelo fluxo com curto-circuito. Entretanto, devido às diferenças nas características de transferência metálica, entre os processos, a análise não foi comparativa, isto é, a análise só pôde ser realizada dentro de cada processo.

A Tabela 5.6 apresenta os índices de regularidade de transferência metálica com base nos dados da Tabela 5.3, para os dois processos utilizados, considerando para o GMAW as condições de transferência metálica com predominância no modo curto-circuito e para o processo FCAW a predominância na transferência conduzida pelo fluxo com curto-circuito.

Tabela 5.6 – Valores médios dos índices de regularidade.

Arame	Gás	Teste	I (A)	Ur (V)	σ_{pcc}/P_{cc}	f_{cc} (Hz)	IV_{cc}	
Maciço	Ar+25%CO ₂	Tm 01	120	18	0,446	38,0	0,92	
		Tm 02		20	0,836	19,8	0,69	
		Tm 05	160	18	0,184	51,2	0,41	
		Tm 06		20	0,369	37,6	0,80	
		Tm 07		22	1,063	25,8	1,86	
	100%CO ₂	Tm 09	120	18	0,523	79,4	1,03	
		Tm 10		20	0,515	74,0	0,97	
		Tm 11		22	0,665	44,0	1,10	
		Tm 12		24	0,538	24,0	1,05	
		Tm 13	160	18	0,530	69,0	1,19	
		Tm 14		20	0,554	65,0	1,07	
		Tm 15		22	0,625	60,8	1,03	
		Tm 16		24	0,585	36,4	1,04	
		Tubular	Ar+25%CO ₂	Tt 01	120	18	0,773	32,8
	Tt 05			160	18	0,695	45,8	1,26
	Tt 06				20	0,857	27,3	1,43
100%CO ₂	Tt 09		120	18	0,705	48,5	1,22	
	Tt 10			20	0,869	23,8	1,41	
	Tt 13		160	18	0,689	55,5	1,25	
	Tt 14			20	0,777	22,8	1,39	
	Tt 15			22	0,707	20,0	1,42	

Sendo: Valores definidos de Corrente (I); Tensão de referência (Ur); valores calculados: índice do desvio padrão do período de curto-circuito (σ_{pcc}/P_{cc}); frequência de curto circuito (f_{cc}) e Índice Vilarinho de Regularidade por Transferência por curto-circuito (IV_{cc}).

5.5.1 Análise de regularidade de transferência baseada na frequência de curto-circuito

a) Transferência metálica do processo GMAW.

Considerando a frequência de curto-circuito e os oscilogramas dos ensaios realizados com o processo GMAW, tendo como base a maior frequência como sendo a de melhor regularidade relativa de transferência, tem-se que as seguintes condições:

- Para o gás de proteção Ar+25%CO₂ com 120 A foi o ensaio Tm 01 da Tabela 5.3 ($f_{cc} = 38$ Hz) e para 160 A foi o ensaio Tm 05 da Tabela 5.3 ($f_{cc} = 51$ Hz). Os dois testes foram realizados com tensão de referência de 18 V;

- Para o gás de proteção 100%CO₂ com 120 A foram os ensaios Tm 09 (18 V e $f_{cc} = 79$ Hz) e Tm10 (20V e $f_{cc} = 74$ Hz). E para 160 A foram os ensaios Tm 13 (18 V e $f_{cc} = 69$ Hz), Tm14 (20 V e $f_{cc} = 65$ Hz) e o Tm 15 (22 V e $f_{cc} = 61$ Hz).

Com isso, pode-se afirmar de forma geral, com base apenas na frequência de curto-circuito, que as melhores condições de regularidade relativa de transferência estão na faixa de 18 a 22 V, correntes de 160 A com o gás de proteção 100%CO₂.

b) Transferência metálica do processo FCAW.

Apesar da transferência metálica do processo FCAW ser diferente do GMAW, foi considerando também a maior frequência de curto-circuito como sendo a de melhor regularidade relativa de transferência, tem-se para isso as seguintes condições:

- Para o gás de proteção Ar+25%CO₂ com 120 A foi o ensaio Tt 01 da Tabela 5.3 ($f_{cc} = 33$ Hz) e para 160 A foi o ensaio Tt 05 da Tabela 5.3 ($f_{cc} = 46$ Hz). Os dois testes foram realizados com tensão de referência de 18 V;

- Para o gás de proteção 100%CO₂ com 120 A foram os ensaios Tt 09 (18 V e $f_{cc} = 48$ Hz) e para 160 A foi o ensaio Tt 13 (18 V e $f_{cc} = 55$ Hz).

Com isso, pode-se afirma de forma geral, com base apenas na frequência de curto-circuito, que a melhor condição de regularidade relativa de transferência foi com 18 V, corrente de 160 A com o gás de proteção 100CO₂.

5.5.2 Análise de regularidade de transferência metálica através do período e seu desvio padrão

a) Análise de regularidade de transferência no processo GMAW.

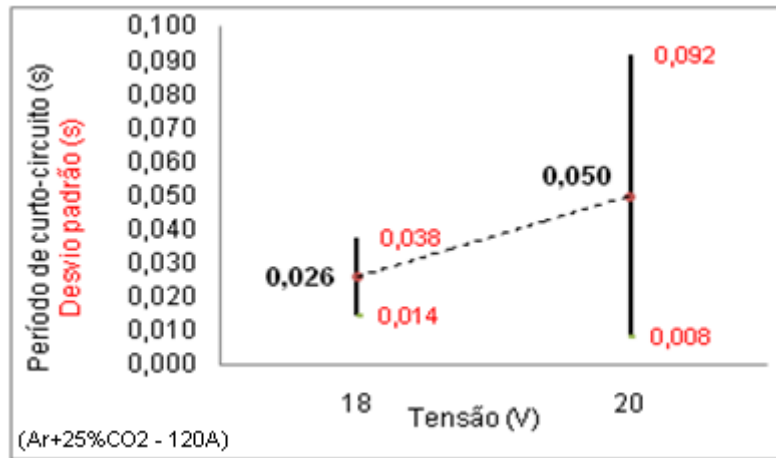
As Figuras 5.9(a) e (b) apresentam as soldagens com o gás Ar+25%CO₂ e as Figuras 5.10(a) e (b) apresentam as soldagens com o gás 100%CO₂. Os resultados mostram que em ambas as correntes o aumento da tensão contribuiu para aumentar o período de curto-circuito (P_{cc}) e de seu desvio padrão (σ_{pcc}). Isto mostra que o aumento da tensão, de modo geral, acarreta em diminuição da regularidade relativa de transferência metálica por curto-circuito.

Dos fatores que compõem o período de curto-circuito ($P_{cc} = t_{mcc} + t_{mab}$), o tempo médio de arco aberto (t_{mab}) foi o que mais sofreu influência da elevação da tensão, valores correspondentes expostos na Tabela 5.3. O aumento deste tempo favorece o crescimento das gotas, antes de seu destacamento.

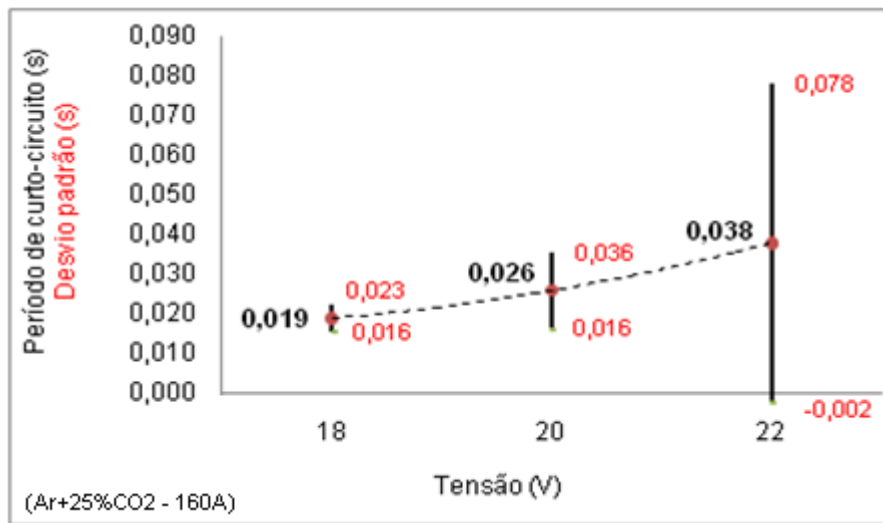
Verifica-se pela Tabela 5.6 que o menor índice do período de curto-circuito ocorreu com o ensaio de Ar+25%CO₂ com 160 A e 18 V ($Tm\ 05 - \sigma_{pcc}/P_{cc} = 0,184$). Para o gás de proteção 100%CO₂, apesar de apresentar índice com valores superiores à condição acima, esse gás manteve pouca variação em seus valores tanto com o aumento das faixas de corrente (120 e 160 A) ou com a variação das faixas de tensão utilizadas (18 a 24 V), obtendo praticamente valores próximos dos índices de período de curto-circuito.

É importante observar que os menores índices do período de curto-circuito ocorrem para as condições de soldagem que obtiveram as maiores freqüências de curto-circuito para o processo GMAW (Tabela 5.6)

Pelos valores dos períodos de curtos-circuitos e de seus desvios padrão (Tabela 5.3), de modo geral, comparando-se a influência dos gases nas mesmas faixas de corrente e tensão de soldagem o gás 100%CO₂ proporcionou melhor regularidade relativa de transferência metálica por curto-circuito no processo GMAW. Este fato também pode ser visto na Figura 5.9 e Figura 5.10, onde os valores obtidos com o gás 100%CO₂ apresentaram poucas variações em relação aos obtidos com o gás Ar+25%CO₂.

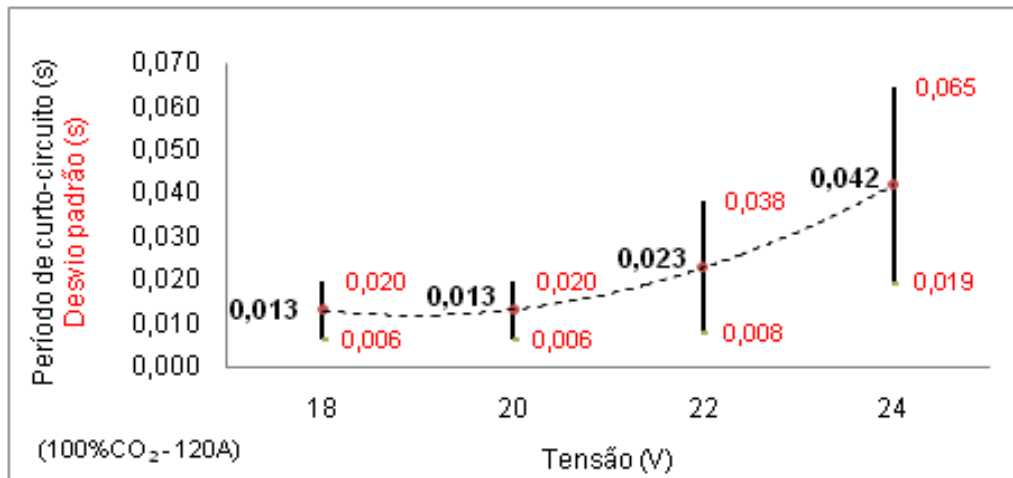


(a)

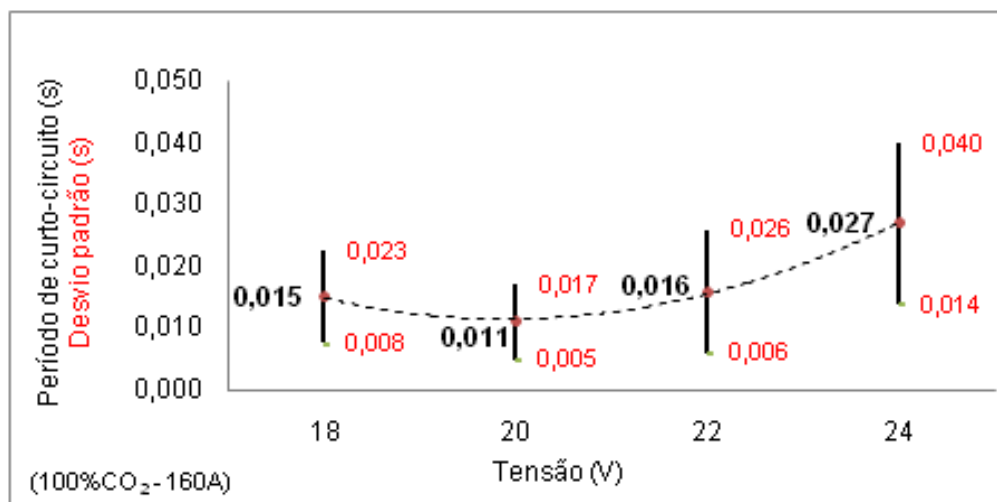


(b)

Figura 5.9 – Período e Desvio Padrão do processo GMAW, transferência por curto-circuito: (a) 120 A e gás Ar+25%CO₂; (b) 160 A e gás Ar+25%CO₂.



(a)



(b)

Figura 5.10 – Período e Desvio Padrão do processo GMAW, transferência por curto-circuito: (a) 120 A e gás 100%CO₂; (b) 160 A e gás 100%CO₂.

b) Análise de regularidade de transferência no processo FCAW através do período e desvio padrão do período de curto-circuito.

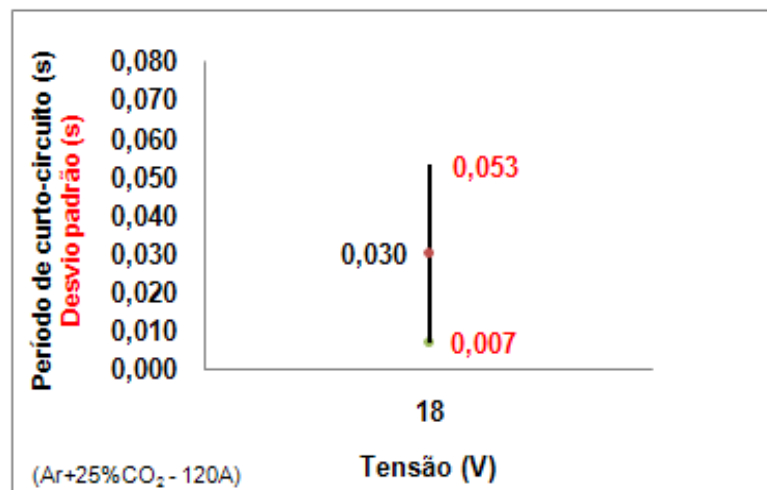
Também para esse processo, com a elevação das faixas de tensão houve o aumento do período e do desvio padrão de curto-circuito e, por conseguinte redução da regularidade relativa de transferência metálica (Tabela 5.6).

As Figuras 5.11 e 5.12 indicam que a elevação da tensão aumentou o período e seu desvio padrão, reduzindo com isso a regularidade relativa de transferência metálica conduzida pelo fluxo com curto-circuito. Desta forma, a melhor regularidade relativa de

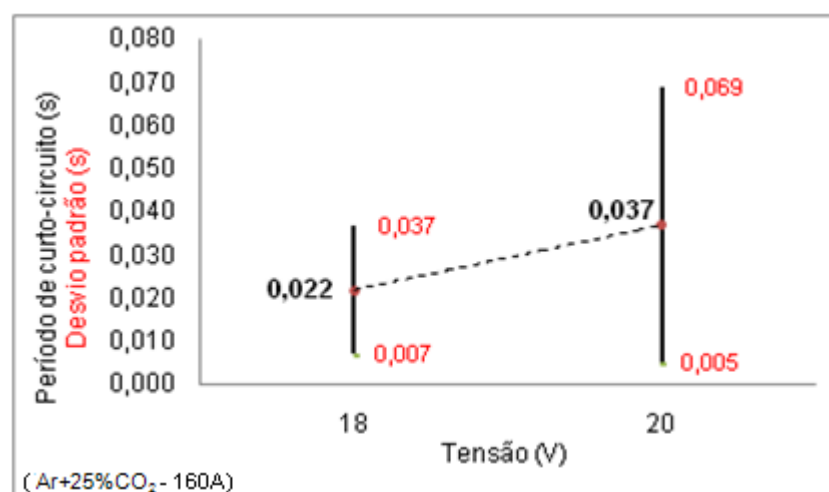
transferência, considerando o período e seu desvio, ocorreu para menores valores de tensão de soldagem.

Entre os gases de proteção, o gás 100%CO₂, 160 A e tensão de 18 V (Tt 13 da Tabela 5.6) foi o que apresentou o melhor resultado. Isto também pode ser confirmado com o menor valor índice do período de curto-circuito e maior frequência de curto-circuito.

Como informado anteriormente, não é possível comparar os índices de regularidade do processo GMAW com o FCAW, pois as características de transferência metálicas são diferentes entre os processos.

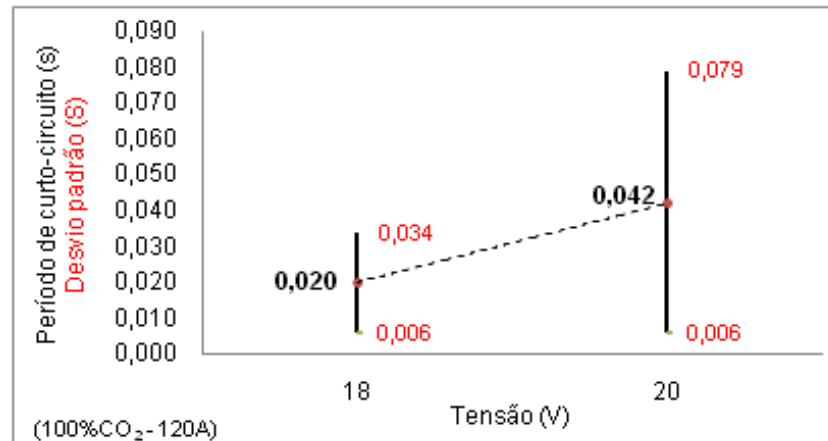


(a)

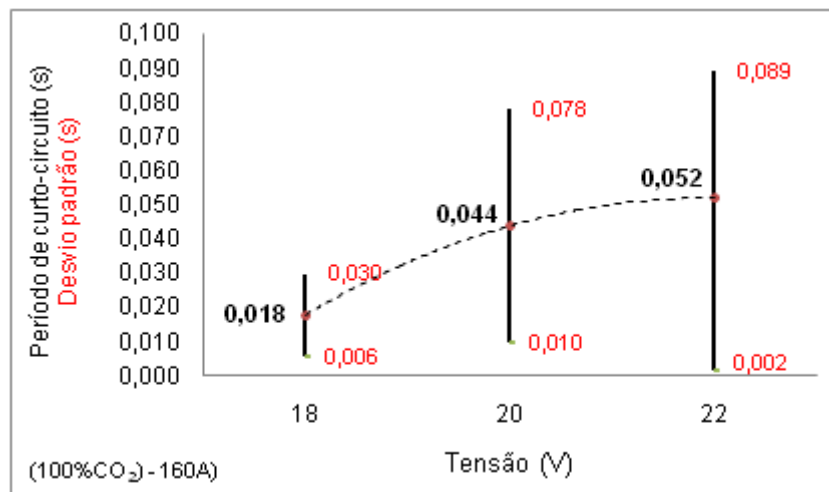


(b)

Figura 5.11 – Período e Desvio Padrão do processo FCAW, transferência por curto-circuito: (a) 120 A e gás Ar+25%CO₂; (b) 160 A e gás Ar+25%CO₂.



(a)



(b)

Figura 5.12 – Período e Desvio Padrão do processo FCAW, transferência por curto-circuito: (a) 120 A e gás 100%CO₂; (b) 160 A e gás 100%CO₂.

5.5.3 Análise de regularidade de transferência através do Índice Vilarinho de Regularidade por Transferência por curto-circuito.

O índice de regularidade de transferência metálica por curto-circuito é indicado para o modo curto-circuito do processo GMAW (arame maciço). Entretanto, neste trabalho este índice será também analisado no processo FCAW com transferência metálica conduzida pelo fluxo com curto-circuito.

a) Análise de regularidade de transferência no processo GMAW

Como visto no Capítulo III, a transferência metálica com maior regularidade é considerada a que apresenta o menor valor do Índice de Vilarinho. Desta forma, os valores

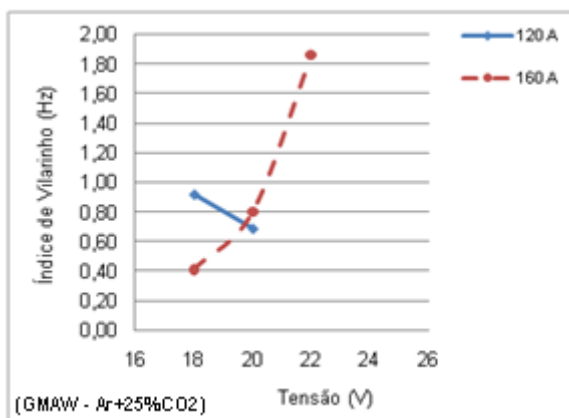
do Índice de Vilarinho (IV_{cc}) apresentado na Figura 5.13(a) indicam que na corrente de 120 A e gás Ar+25%CO₂ a soldagem com maior regularidade aconteceu na tensão de 20 V (ensaio Tm 02 da Tabela 5.6), onde esse índice foi menor ($IV_{cc} = 0,69$).

Na corrente de 160 A e gás Ar+25%CO₂, a soldagem com maior regularidade de transferência aconteceu na faixa de tensão de 18 V (ensaio Tm 05 da Tabela 5.6) com o menor índice ($IV_{cc} = 0,41$).

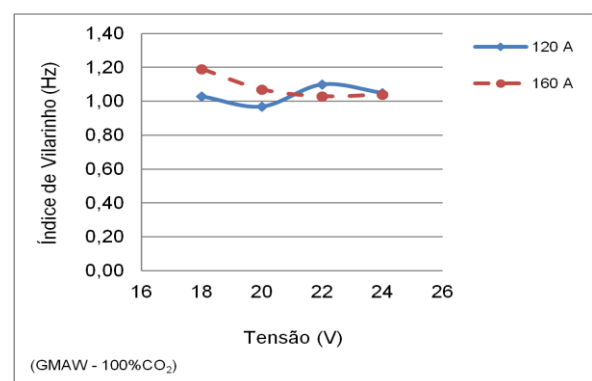
Para o gás de proteção 100%CO₂ na faixa de 120 A, Figura 5.13(b), a soldagem na tensão 20 V (ensaio Tm 10 da Tabela 5.6) apresentou o melhor índice de regularidade ($IV_{cc} = 0,97$).

Na faixa de 160 A e gás de proteção 100%CO₂, Figura 5.14 (b) (ensaio Tm 13, Tm 14, Tm 15 e Tm 16 da Tabela 5.6), mesmo com o aumento da tensão de soldagem os Índices de Vilarinho permaneceram próximos (valores de IV_{cc} próximos a 1,0), indicando que a regularidade de transferência foram praticamente semelhantes.

Então, para o gás Ar+25%CO₂, o melhor IV_{cc} aconteceu com a corrente de 160 A e tensão de 18 V (Tm 05 da Tabela 5.6), onde se verifica também a maior frequência de curto-circuito e menor índice do período. Para o gás 100%CO₂, o melhor IV_{cc} aconteceu com a corrente de 120 A e tensão de 20 V (Tm 10 da Tabela 5.6). Este ensaio apresentou também bons índices de regularidades em relação a frequência e do índice do período de curto-circuito.



(a)



(b)

Figura 5.13 – Índice Vilarinho de Regulagem por Transferência por curto-circuito (IV_{cc}), tensão de soldagem (U), corrente de 120 A e 160 A e processo GMAW: (a) gás Ar+25%CO₂ e (b) gás 100%CO₂.

b) Análise de regularidade de transferência no processo FCAW

Na soldagem do arame tubular com transferência metálica conduzida pelo fluxo com curto-circuito os Índices Vilarinho tiveram valores próximos (vide Tabela 5.6 e Figura 5.14). A transferência com melhor regularidade relativa ($IV_{cc} = 1,21$) aconteceu com o gás Ar+25%CO₂, corrente de 120 A e tensão de 18 V, Figura 5.14(a) (ensaio Tt 01, Tabela 5.6).

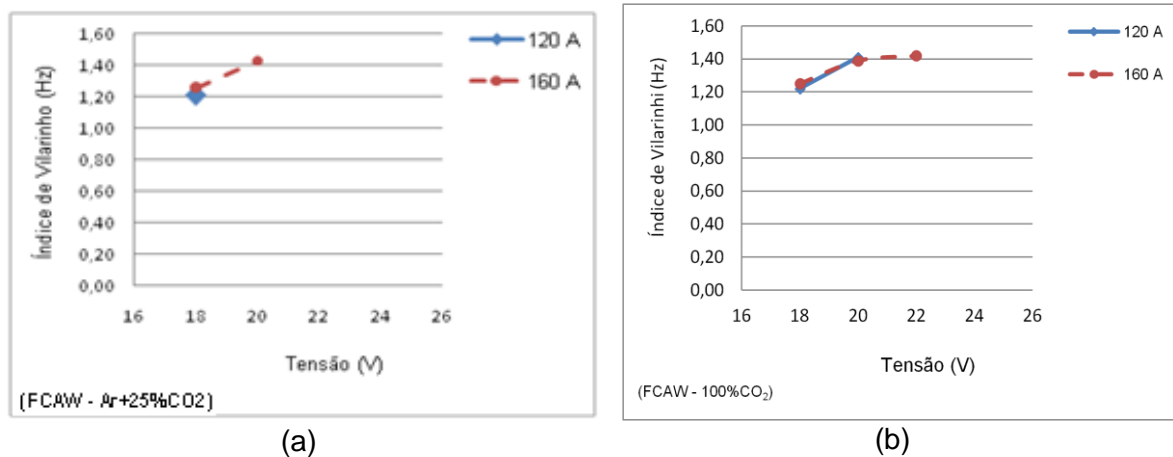


Figura 5.14 – Índice Vilarinho de Regulagem por Transferência por curto-circuito (IV_{cc}), tensão de soldagem (U), faixas de 120 A e 160 A e processo FCAW: (a) gás Ar+25%CO₂ e (b) gás 100%CO₂.

5.5.4 Análise comparativa de regularidade de transferência metálica para cada processo estudado.

A Tabela 5.7 apresenta de forma comparativa os melhores resultados com base nos índices de regularidade apresentado e discutido acima e baseado no ensaio indicado na Tabela 5.6.

Tabela 5.7 – Indicação da melhor regularidade de transferência baseado nos ensaios em que ocorreu transferência metálica com predominância de curtos-circuitos por tipo de gás de proteção.

Índice	f_{cc}	σ_{pcc}/P_{cc}	IV_{cc}
GMAW (Ar+25%CO ₂)	Tm 05	Tm 05	Tm 05
GMAW (100%CO ₂)	Tm 09	Tm 10	Tm 10
FCAW (Ar+25%CO ₂)	Tt 05	Tt 05	Tt 01
FCAW (100%CO ₂)	Tt 13	Tt 13	Tt 09

Com base nas tabelas 5.6 e 5.7 pode-se afirmar que:

- A melhor condição de regularidade de transferência metálica por curto-circuito do processo GMAW com o gás de proteção Ar+25%CO₂ foi o ensaio Tm 05 (18 V e 160 A);
- Ainda para o processo GMAW com gás de proteção de 100%CO₂ os melhores valores dos índices de regularidade de transferência metálica ocorreram para tensões de 18 e 20 V para a corrente de 120 A (ensaios Tm 09 e Tm 10 da Tabela 5.6);
- Para o processo FCAW com o gás de proteção Ar+25%CO₂ a melhor condição de regularidade de transferência metálica conduzida pelo fluxo com curto-circuito ocorreu para 18 V, tanto para a corrente de 120 A como para a corrente de 160 A (ensaios Tt 05 e Tt 01 da tabela 5.6);
- Ainda para o processo FCAW e gás de proteção 100%CO₂ a melhor condição de regularidade ocorreu para 18 V tanto para a corrente de 120 A como para a corrente de 160 A (ensaios Tt 09 e Tt 13 da tabela 5.6).

5.6 Análises dos fatores econômicos

O rendimento de deposição (η_D) é uma característica importante na análise de um processo de soldagem, pois influencia diretamente nos custos de soldagem e esta relacionada com a regularidade de transferência metálica. Um arco com regularidade proporciona bom rendimento de deposição, ou seja, rendimentos com valores altos. Saito (2001), em seus estudos, menciona que os fatores que levam ao decréscimo no rendimento são normalmente as perdas por formação de respingos.

O valor do rendimento é obtido pela divisão da taxa de deposição pela taxa de fusão ($\eta_D = T_d/T_f$), ou seja, para uma mesma taxa de fusão, quanto maior for a taxa de deposição maior será o rendimento e, por conseguinte para uma mesma taxa de deposição quanto maior for a taxa de fusão menor será o rendimento.

Os dados apresentados na Tabela 5.8 representam os parâmetros de soldagem e os valores das taxas de fusão, taxas de deposição e os correspondentes rendimentos de deposição. Os valores dessas taxas foram usados para calcular os rendimentos de deposição, cujo procedimento e cálculo foram abordados no Capítulo III.

Tabela 5.8 – Parâmetros médios de soldagem e rendimento de deposição

Arame	Gás	Teste	I (A)	Ur (V)	Tf (g/min)	Td (g/min)	η_D (%)
Maciço	Ar+25% CO ₂	Tm 01	120	18	26,28	23,58	89,7
		Tm 02		20	26,28	23,22	88,4
		Tm 03		22	26,28	19,26	73,3
		Tm 04		24	26,28	13,29	50,6
		Tm 05	160	18	35,61	32,00	89,9
		Tm 06		20	35,61	32,25	90,6
		Tm 07		22	35,61	26,99	75,8
		Tm 08		24	35,61	24,07	67,6
	100% CO ₂	Tm 09	120	18	27,98	25,06	90
		Tm 10		20	27,98	25,33	91
		Tm 11		22	27,98	23,74	84,9
		Tm 12		24	27,98	22,35	79,9
		Tm 13	160	18	38,15	32,53	85,3
		Tm 14		20	38,15	31,73	83,2
		Tm 15		22	38,15	31,58	82,8
		Tm 16		24	38,15	31,54	82,7
Tubular	Ar+25% CO ₂	Tt 01	120	18	26,94	22,04	81,8
		Tt 02		20	26,94	22,39	83,1
		Tt 03		22	26,94	23,28	86,4
		Tt 04		24	26,94	22,74	84,4
		Tt 05	160	18	38,91	30,82	79,2
		Tt 06		20	38,91	30,51	78,4
		Tt 07		22	38,91	31,75	81,6
		Tt 08		24	38,91	32,53	83,6
	100% CO ₂	Tt 09	120	18	28,44	23,35	82,1
		Tt 10		20	28,44	23,26	81,8
		Tt 11		22	28,44	24,4	85,8
		Tt 12		24	28,44	24,65	86,7
		Tt 13	160	18	41,91	33,69	80,4
		Tt 14		20	41,91	33,44	79,8
		Tt 15		22	41,91	34,87	83,2
		Tt 16		24	41,91	35,49	84,7

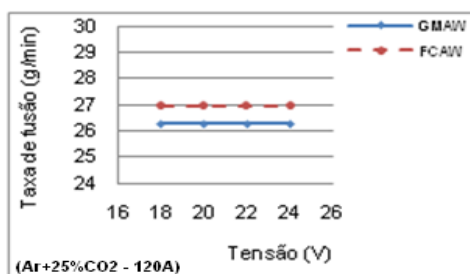
Sendo: valores definidos de corrente (I); valores regulados de tensão (Ur); valores calculados de taxa de fusão (T_f); valores calculados de taxa de deposição (T_d) e valores calculados de rendimento de deposição (η_D).

a) Taxa de fusão (T_f)

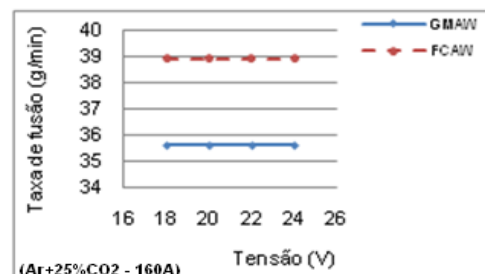
A taxa de fusão está relacionada diretamente com a velocidade de alimentação do arame e, por conseguinte com a corrente de soldagem.

Para manter a mesma faixa de corrente desejada, o arame tubular precisou de maior velocidade de alimentação, em relação ao arame maciço, e com isso proporcionou uma maior taxa de fusão (Figura 5.15 e valores na Tabela 5.8). Estes fatos estão conforme Fortes (2004), que expõem em sua literatura que na soldagem com arame maciço, toda a seção transversal conduz a corrente e no arame tubular, com fluxo não metálico, toda a corrente é conduzida pelo invólucro tubular metálico e isso aumenta a densidade de corrente e o efeito Joule ($R \times I^2$), garantindo a este arame maior taxa de fusão.

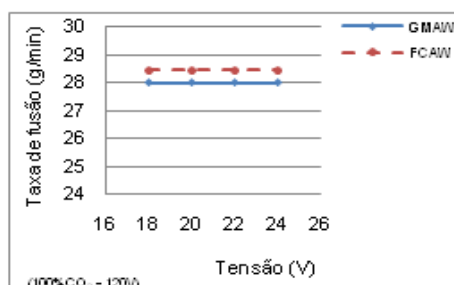
Em relação ao gás de proteção, para manter a mesma faixa de corrente o gás 100%CO₂ necessitou de maior velocidade de alimentação e isso contribuiu para maior taxa de fusão, em relação ao gás Ar+25%CO₂, Figura 5.15. Também em pesquisa semelhante, para os dois processos, Garcia (2010) observou uma ligeira superioridade da taxa de fusão causada pelo gás 100%CO₂ em relação ao gás 25%CO₂, e esse fato esta autora atribuiu como provável causa ao maior aquecimento na região anódica (ponta do arame) para a proteção gasosa 100%CO₂.



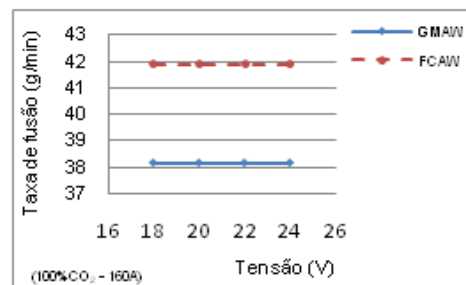
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.15 – Taxa de fusão (T_f) para os processos GMAW e FCAW: (a) 120 A e gás Ar+25%CO₂; (b) 160 A e gás Ar+25%CO₂; (c) 120 A e gás 100%CO₂ e (d) 160 A e gás 100%CO₂.

b) Taxa de deposição (T_d)

A taxa de deposição, que é a massa depositada em determinado tempo, pode sofrer alteração com o aumento da tensão de soldagem (maior comprimento do arco). Quando essa alteração provoca irregularidade no arco, isso pode causar aumento de respingos e redução da taxa de deposição. O processo GMAW, gás de proteção Ar+25%CO₂ e correntes de 120 A, Figura 5.16(a), teve semelhantes taxas de deposição com o aumento da tensão de 18 V para 20 V (ensaio Tm 01, Tm 02 da Tabela 5.8). Com o aumento da faixa de tensão para 22 V e 24 V (ensaio Tm 03 e Tm 04 da Tabela 5.8) houve redução acentuada da taxa de deposição. Estas duas faixas de tensão apresentaram o modo misto de transferência, com pouco curto-circuito e mais globular, ocasionando aumento de respingos e redução da regularidade de transferência na posição de soldagem utilizada neste trabalho.

Com a corrente de 160 A (Ar+25%CO₂) os valores das taxas de deposição ficaram semelhantes nas faixas de 18 V e 20 V, Figura 5.16(c) (ensaio Tm 05 e Tm 06 da Tabela 5.8). Na tensão de 22 V e 24 V, Figura 5.16(c) (ensaio Tm 07 e Tm 08 da Tabela 5.8), houve redução da taxa de deposição, e essa redução foi causada também pela mudança de transferência metálica de curto-circuito para o modo misto de curto-circuito e globular, com redução da regularidade e aumento de respingos.

Para o gás 100%CO₂ (GMAW) e na corrente de 120 A, Figura 5.16(b) o processo manteve praticamente constante os valores da taxa de deposição na tensão de 18 V e 20 V (ensaio Tm 09 e Tm 10 da Tabela 5.8) e com tendência de redução dessa taxa com a elevação de tensão para 22 V e 24 V (ensaio Tm 11 e Tm 12 da Tabela 5.8). Na corrente de 160 A esse processo manteve as taxas de deposição praticamente constantes, Figura 5.16(d) (ensaios Tt 13, Tm 14, Tm 15 e Tm 15 da Tabela 5.8). Esses valores próximos da taxa de deposição podem ser atribuídos ao mesmo modo de transferência metálica e pouca variação da regularidade com a elevação da faixa de tensão.

No processo FCAW com gás de proteção Ar+25%CO₂ e corrente de 120 A o gráfico correspondente da Figura 5.16(a) (ensaios Tt 01, Tt 02, Tt 03 e Tt 04 da Tabela 5.8) não apresentou alteração significativa de valores das taxas de deposição, com o aumento da faixa de tensão. Na corrente de 160 A, Figura 5.16(c) (ensaios Tt 05, Tt 06, Tt 07 e Tt 08 da Tabela 5.8), houve uma leve tendência de crescimento da taxa de deposição quando a faixa de tensão passou para 22 V e 24 V. Esses fatos indicam que, para esse processo, mesmo com a mudança de transferência conduzida pelo fluxo com curto-circuito para sem curto-circuito não houve mudança de regularidade e as gotas, como já comentado, continuaram a atingir a poça de fusão.

Já com o gás de proteção 100%CO₂ (FCAW) e corrente de 120 A, gráfico correspondente de Figura 5.16(b) (ensaios Tt 09, Tt 10, Tt 11 e Tt 12 da Tabela 5.8), os valores apresentados da taxa de deposição foram praticamente semelhantes em todas as faixas de tensão utilizados. Na corrente de 160 A, Figura 5.16(d) (ensaios Tt 13, Tt 14, Tt 15 e Tt 16 da Tabela 5.8), o processo FCAW apresentou uma leve tendência de crescimento da taxa de deposição, após a faixa de 20 V, embora mantendo esses valores próximos.

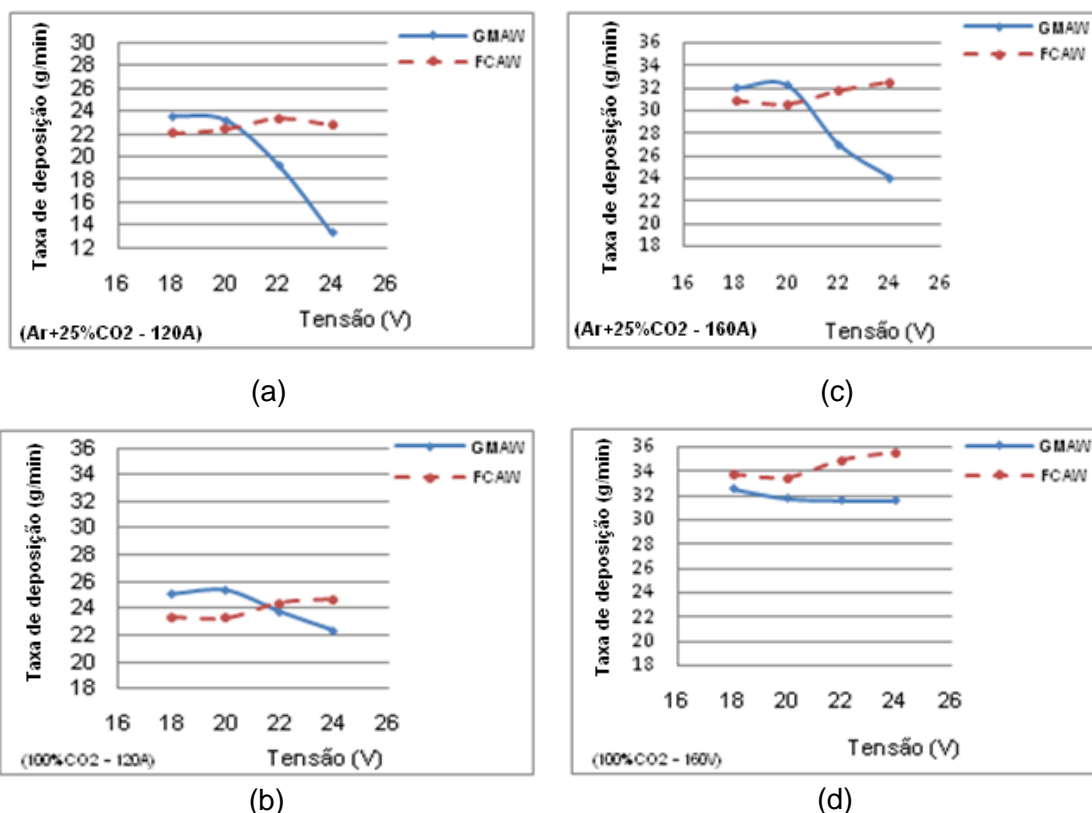


Figura 5.16 – Taxa de deposição (T_d) para os processos GMAW e FCAW: (a) 120 A e gás Ar+25%CO₂; (b) 120 A e gás 100%CO₂; (c) 160 A e gás Ar25%CO₂ e (d) 160 A e gás 100%CO₂.

Com base no exposto acima e Figura 5.16(a), (b) e (c) a taxa de deposição é maior para o processo GMAW em relação ao processo FCAW na faixa de regularidade de transferência metálica por curto-circuito, tensões de 18 e 20 V. Para valores de tensões maiores o valor da taxa de deposição se inverte, e isto ocorre em função da característica de transferência metálica. No processo GMAW ocorreu o modo de transição de transferência metálica de curto-circuito para globular, dificultando a chegada da gota na poça de fusão na posição horizontal. Já no processo FCAW a transferência metálica ocorreu através do fluxo com e sem curto-circuito, facilitando a chegada da gota na poça de fusão,

chegando praticamente ao mesmo nível de taxa de deposição na condição de 18 e 20 V do processo GMAW.

Na condição de 160 A e gás de proteção de 100%CO₂ (Figura 5.16(d)), o processo FCAW foi melhor para todas as condições analisadas. Este fato se deve provavelmente a melhor condição de soldagem para o tipo de transferência metálica obtida por esse processo.

c) Rendimento de deposição (η_D)

Os resultados obtidos nos ensaios com o rendimento de deposição estão apresentados na Tabela 5.8 e Figura 5.17.

No processo GMAW, gás Ar+25%CO₂ e corrente de 120 A e 160 A, os maiores rendimentos de deposição ocorreram nas faixas de tensão de 18 V e 20 V, Figura 5.17(a) (ensaio Tm 01 e Tm 02 da Tabela 5.8) e Figura 5.17(c) (ensaio Tm 05 e Tm 06 da Tabela 5.8). Para as mesmas correntes com maiores tensões 22 e 24 V (Figuras 5.17(a) e (c)) houve redução do rendimento de deposição. Esta redução do rendimento de deposição é devida provavelmente a mudança de transferência metálica do modo curto-circuito para o globular, dificultando a chegada da gota na poça de fusão na posição horizontal.

Para o processo GMAW, gás 100%CO₂ e corrente de 120 A, os maiores rendimentos de deposição ocorreram também nas tensões de 18 V e 20 V, Figura 5.17(b) (ensaio Tm 09 e Tm 10 da Tabela 5.8) e com o aumento da faixa de tensão para 22 V e 24 V (ensaio Tm 11 e Tm 12 da Tabela 5.8) houve redução do rendimento de deposição. Entretanto, essa redução foi menor que nos ensaios com gás Ar+25%CO₂, pois o gás 100%CO₂ altera o perfil do arco melhorando a transferência da gota para a poça de fusão.

Para a corrente de 160 A, 100%CO₂ e processo GMAW, os valores dos rendimentos de deposição da Figura 5.17(d) (ensaio Tm 13, Tm 14, Tm 15 e Tm 16 da Tabela 5.8) permaneceram com valores próximos com o aumento das faixas de tensão. Isto comprova o que foi citado acima, isto é, o tipo de gás altera o perfil do arco (menor comprimento) facilitando a transferência da gota para a poça de fusão.

No processo FCAW, gás Ar+25%CO₂ e corrente de 120 A houve uma leve tendência de crescimento dos rendimentos de deposição com o aumento da tensão de 18 V, 20 V e 22 V, Figura 5.17(a) (ensaio Tt 01, Tt 02 e Tt 03 da Tabela 5.8), e uma redução na tensão de 24 V, Figura 5.17(a) (ensaio Tt 04 da Tabela 5.5). Na corrente de 160 A, Figura 5.17(c) (ensaio Tt 05, Tt 06, Tt 07 e Tt 08 da Tabela 5.8), houve também uma leve tendência de crescimento do rendimento quando a faixa de tensão passou para 22 V e 24 V. Este fato está provavelmente relacionado com a característica de transferência metálica desse

processo, isto é, transferência metálica conduzida pelo fluxo com ou sem curto circuito, facilitando a transferência da gota para a poça de fusão.

No processo FCAW, gás 100%CO₂, corrente de 120 A e tensão de 18 V e 20 V da Figura 5.17(b) (ensaio Tt 09 e Tt 10 da Tabela 5.8) os rendimentos tiveram valores próximos e só houve um pequeno aumento quando a tensão foi para 22 V e 24 V, Figura 5.17(b) (ensaio Tt 11 e Tt 12 da Tabela 5.8). Na corrente de 160 A e tensão de 18 V e 20 V, Figura 5.17(d) (ensaio Tt 13 e Tt 14 da Tabela 5.8), os rendimentos tiveram valores semelhantes e só houve uma leve tendência de crescimento quando na faixa de 22 V e 24 V, Figura 5.17(d) (ensaio Tt 15 e Tt 16 da Tabela 5.8).

De um modo geral, pode-se afirmar que a soldagem no processo GMAW, em ambas as correntes e para os dois gases de proteção, a condição de transferência metálica por curto-circuito com regularidade relativa (tensão de 18 e 20 V) apresentou as melhores taxas de rendimento de deposição (valores médios próximo de 90%) que o processo FCAW, na posição horizontal.

Para o processo FCAW os melhores rendimentos de deposição foram obtidos com tensões maiores (taxas de deposição com valores médios próximos a 85%), este fato está relacionado com a característica de transferência metálica deste processo, onde o fluxo contido dentro do arame eletrodo contribui para a transferência da gota para a poça de fusão. Estes resultados estão próximos ao encontrado por Garcia (2010), em soldagem semelhante com ambos os gases em posição plana, que nas faixas aproximadas de 150 A e 20 V o arame maciço teve o valor médio do rendimento de deposição de 92% e para essa mesma faixa de corrente e na faixa de 25 V o arame tubular teve o valor médio do rendimento de deposição igual a 85%. As pequenas diferenças dos resultados destes dois estudos nos fazem pensar que a posição horizontal contribui para o menor valor do rendimento de deposição, pois a posição plana favorece a transferência das gotas para a poça de fusão.

É interessante observar também que os índices de regularidade de transferência metálica do processo FCAW indicam que a melhor regularidade é para menores tensões (18 V, Tabela 5.7). Entretanto, os melhores rendimentos de deposição ocorreram para valores maiores de tensões (22 e 24 V). Isto demonstra que a melhor condição de soldagem, baseado no rendimento de deposição, é para maiores valores de tensão (transferência metálica conduzida pelo fluxo sem curto-circuito). Provavelmente, o curto-circuito deste processo na posição horizontal gera uma grande quantidade respingos.

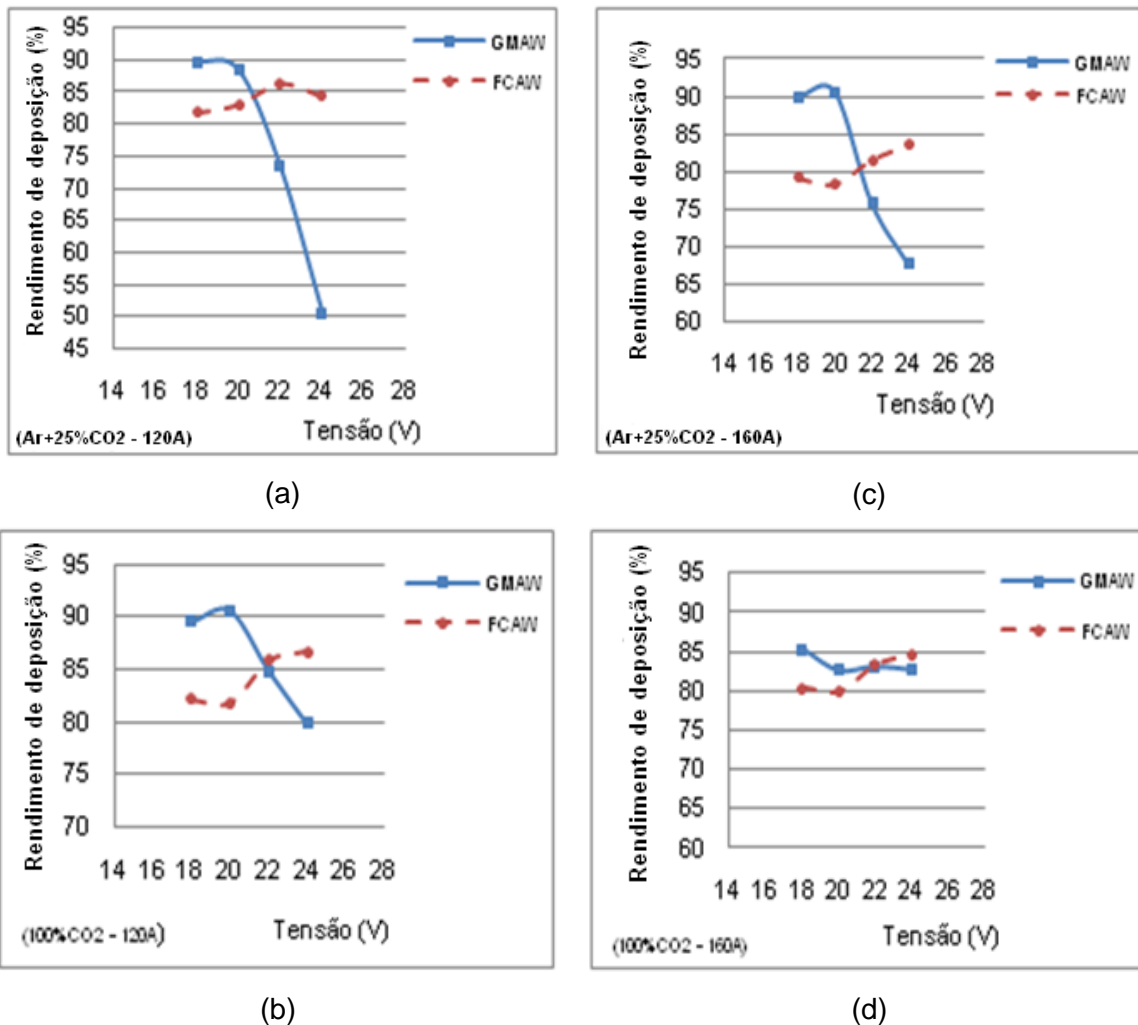


Figura 5.17 – Rendimento de deposição (η_D) para os processos GMAW e FCAW: (a) 120 A e gás Ar+25%CO₂; (b) 120 A e gás 100%CO₂; (c) 160 A e gás Ar+25%CO₂ e (d) 160 A e gás 100%CO₂.

5.7 Análise da geometria e descontinuidade do cordão de solda

Os valores dimensionais dos cordões de solda estão apresentados na Tabela 5.9 e suas geometrias esquematizadas se encontram na Figura 5. 18. Nesta etapa foram também analisados a geometria de todos os cordões, inclusive os que apresentaram transferência diferente do modo curto-circuito. O objetivo é obter uma visão global de todos os ensaios realizados com relação a sua geometria.

Tabela 5.9 – Parâmetros definidos de soldagem e mensurados da geometria do cordão

Arame	Gás	Teste	I (A)	Ur (V)	L (mm)	p (mm)	R (mm)	E (mm)
Maciço	Ar+25% CO2	Tm 01	120	18	8,0	0,2	1,4	0,3
		Tm 02		20	8,5	0,2	1,3	0,6
		Tm 03		22	8,2	0,1	0,8	1,7
		Tm 04		24	7,4	0,1	0,3	2,6
		Tm 05	160	18	8,1	0,4	1,7	0,4
		Tm 06		20	8,2	0,4	1,6	0,7
		Tm 07		22	8,6	0,3	1,4	1,4
		Tm 08		24	8,7	0,2	1,3	2,2
	100% CO2	Tm 09	120	18	7,8	0,5	1,5	0,5
		Tm 10		20	8,1	0,5	1,5	0,9
		Tm 11		22	8,3	0,4	1,4	1,7
		Tm 12		24	8,5	0,2	1,2	2,0
		Tm 13	160	18	7,8	0,9	1,8	0,5
		Tm 14		20	8,2	0,9	1,8	1,0
		Tm 15		22	8,5	0,7	1,6	1,8
		Tm 16		24	8,6	0,5	1,6	1,8
Tubular	Ar+25% CO2	Tt 01	120	18	8,1	0,0	1,2	0,8
		Tt 02		20	8,6	0,0	1,2	1,2
		Tt 03		22	9,0	0,0	1,1	1,3
		Tt 04		24	9,6	0,0	1,1	1,4
		Tt 05	160	18	8,2	0,0	1,4	0,9
		Tt 06		20	8,4	0,0	1,3	1,0
		Tt 07		22	8,9	0,2	1,1	1,0
		Tt 08		24	9,4	0,2	1,0	1,2
	100% CO2	Tt 09	120	18	8,0	0,0	1,3	0,8
		Tt 10		20	8,3	0,0	1,2	0,8
		Tt 11		22	8,5	0,3	1,1	1,1
		Tt 12		24	9,5	0,3	1,0	1,2
		Tt 13	160	18	8,0	0,0	1,3	0,8
		Tt 14		20	8,4	0,3	1,3	0,8
		Tt 15		22	8,7	0,3	1,0	0,9
		Tt 16		24	9,3	0,2	0,8	1,0

Sendo: valores definidos de corrente (I); valores regulados de tensão (Ur); valores mensurados da largura (L); penetração (p); reforço (R) e escorrimento do cordão (E).

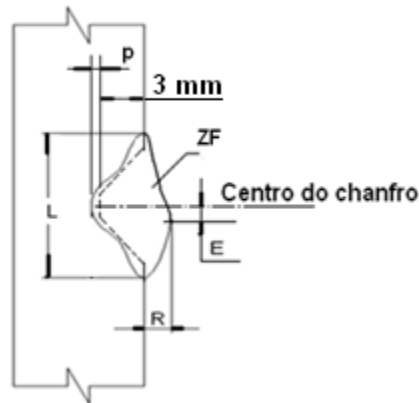


Figura 5.18 – Desenho esquemático da geometria do perfil do cordão de solda: Zona fundida (ZF); largura (L); reforço (R); penetração (p) e escorrimento (E).

5.7.1 Análise da Largura dos cordões de solda

A Figura 5.19 mostra os valores de largura do cordão de solda em função da tensão de soldagem e processo utilizado. Verifica-se que a largura aumentou, processo GMAW, para os ensaios que tiveram a predominância da transferência por curto-circuito, independente do tipo de gás de proteção utilizado. Na transferência com predominância do modo globular a largura do cordão diminuiu. Este fato ficou mais acentuado com a soldagem na tensão de 22 e 24 V, corrente de 120 A e gás Ar+25%CO₂, Figura 5.19(a) (ensaio Tm 03 e 04 da Tabela 5.9).

Com a elevação da tensão de soldagem o arco tende a aumentar de comprimento e, por consequência também aumentando a área de conexão arco-peça, contribuindo para o aumento da largura do cordão de solda. Esse fato é citado por Machado (1996), em que a tensão de soldagem pode ser usada para controlar a forma do cordão de solda, ou seja, quando a tensão do arco (ou o comprimento do arco) aumenta, a altura do cordão de solda diminui e sua largura aumenta.

Para o processo GMAW a transferência pelo modo globular, além da redução da regularidade de transferência e geração de respingos, não apresentou compatibilidade com a posição horizontal de soldagem dificultando a transferência das gotas, relativamente maiores, para a poça de fusão. Esta dificuldade de transferência reduz o rendimento de deposição e proporciona menores larguras. A não compatibilidade das gotas transferida pelo modo globular, na soldagem de posição horizontal, está no fato de ser a força de gravidade o fator dominante nesse modo de transferência. Conforme Bracarense (2003), a transferência globular é caracterizada por gotas de diâmetro maior que seu eletrodo, e com o aumento de seu tamanho também aumenta o seu peso e a sua transferência para a poça de fusão se dá pela ação da gravidade.

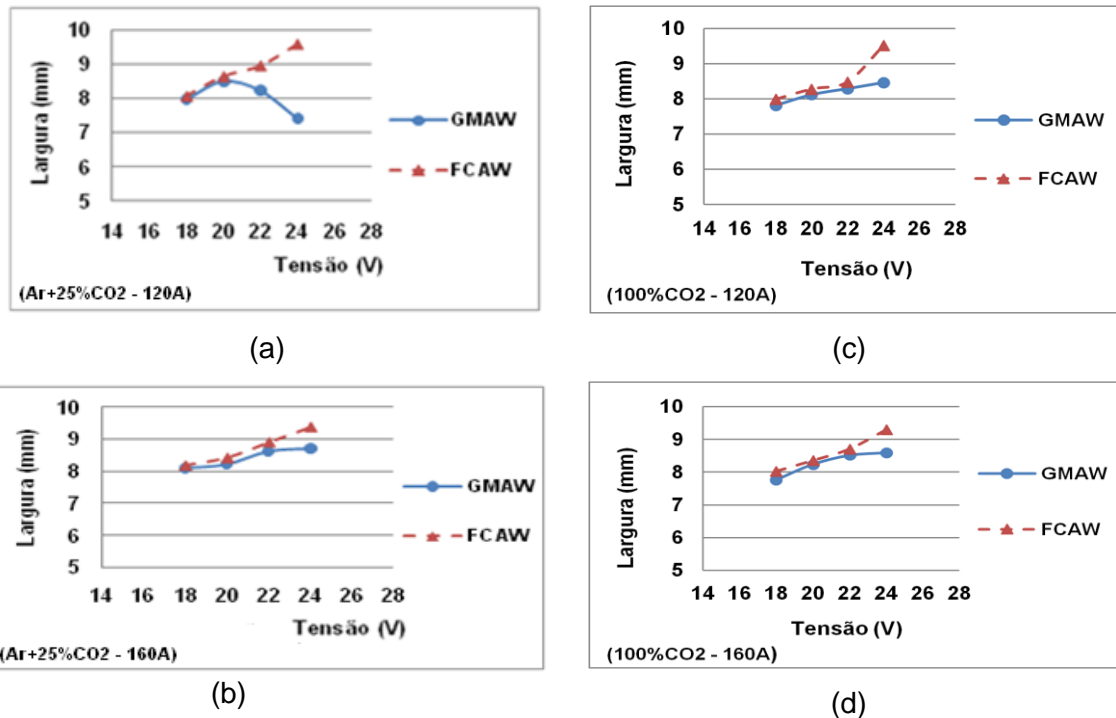


Figura 5.19 – Largura dos cordões de solda para os processos GMAW e FCAW: (a) 120 A e gás Ar+25%CO₂; (b) 160 A e gás Ar+25%CO₂; (c) 120 A e gás 100%CO₂ e (d) 160 A e gás 100%CO₂.

Na soldagem com o processo FCAW, com ambos os gases de proteção e nas duas faixas de corrente, a largura dos cordões de solda tiveram tendência de crescimento com o aumento das faixas de tensão, Figura 5.19. Essa tendência ocorreu em todas as faixas de tensão estudadas. Rodrigues (2005), analisando a geometria do cordão de solda, formado com arame tubular, percebeu que com o aumento do valor da tensão, tem-se uma diminuição da convexidade do cordão, devido a um maior espalhamento do arco, resultando em maior largura e menor reforço do cordão.

Ao contrário do arame maciço, mesmo com a transferência metálica conduzida pelo fluxo sem curto-circuito e na posição horizontal de soldagem, o arame tubular rutilico manteve a chegada das gotas à poça de fusão. O seu fluxo interno parece ter auxiliado na condução das gotas para a poça de fusão e também, através de sua composição química da escória, manteve fixado o material fundido nessa posição. Em pesquisa utilizando o eletrodo tubular rutilico, Widgery (1988) verificou transferência com regularidade numa extensa gama de correntes e com a capacidade de soldar em todas as posições, conseguidas através da composição da escória, que começa a se solidificar a temperaturas altas o bastante para promover o apoio à poça de fusão.

5.7.2 Análise do Reforço dos cordões de solda

Como visto anteriormente, tanto para o processo GMAW como para o processo FCAW, aumentando-se a tensão de soldagem e mantendo-se outras variáveis constantes, de maneira direta também aumenta o comprimento do arco e a área de conexão arco-peça.

Com o aumento dessa área de conexão a energia imposta fica menos concentrada, o que contribui para formação de cordões de solda com maior largura e menor reforço, ou seja, cordões com menor convexidade. Fato verificado na Figura 5.20, onde é mostrada a variação do reforço em função da tensão para os dois processo e tipos de gás de proteção utilizados.

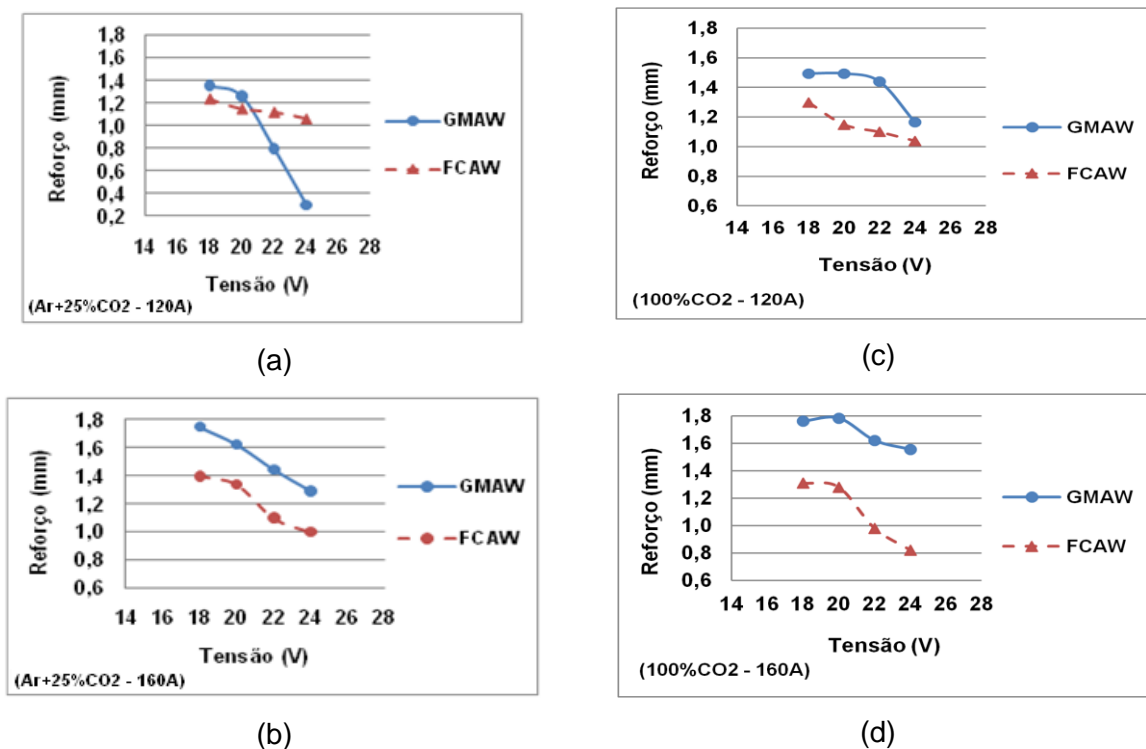


Figura 5.20 – Reforço dos cordões de solda para os processos GMAW e FCAW: (a) 120 A e gás Ar+25%CO₂; (b) 160 A e gás Ar+25%CO₂ (c) 120 A e gás 100%CO₂; e (d) 160 A e gás 100%CO₂

A redução do reforço no processo GMAW ficou mais acentuada quando o modo de transferência passou de curto-circuito para curto-circuito/globular. A transferência globular não é compatível com a posição de soldagem adotadas, causando brusca alteração na geometria do cordão. Esse modo de transferência foi mais acentuado na soldagem com gás Ar+25%CO₂, corrente de 120 A e nas faixas de tensão de 22 e 24 V, Figura 5.20(a) (ensaios Tm 03 e Tm 04 da Tabela 5.9).

O processo FCAW, em todos os modos de transferência apresentados, manteve a tendência decrescente da altura do reforço com a elevação da faixa de tensão de soldagem para as variáveis adotadas nesse projeto, Figura 5.20. A mudança de modo de transferência metálica (conduzida pelo fluxo com curto-circuito para sem curto-circuito) tem também influencia na tendência decrescente de altura do reforço. Para Fortes (2004), o arame tubular rutílico produz arco mais largo e plano (diminuindo o reforço) onde as gotas se espalham e criam uma área de projeção maior, distribuindo, portanto, toda a energia de soldagem mais uniformemente. Também como mencionado anteriormente, Rodrigues (2005), em suas pesquisas com arame tubular, verificou que com a elevação da tensão de soldagem houve um aumento da largura e uma redução no reforço do cordão, tornando o cordão menos convexo.

5.7.3 Análise da penetração dos cordões de solda

A Figura 5.21 mostra a penetração do cordão em função da tensão de soldagem para os dois processos e tipos de gás de proteção.

De maneira geral, há um relacionamento da largura com a altura do reforço e também com a penetração do cordão. Como já comentado, para os dois processos em estudo, aumentando-se a tensão de soldagem e mantendo-se outras variáveis constantes, de maneira direta também aumenta o comprimento do arco e a área de conexão arco-peça. Com o aumento dessa área de conexão a energia imposta fica menos concentrada, o que contribui para formação de cordões de solda com maior largura, menor reforço (cordão com menor convexidade) e menor penetração. Este fato foi mais acentuado no processo GMAW para a posição de soldagem utilizada neste trabalho.

Na soldagem com o processo FCAW na corrente de 120 A e com o gás Ar+25%CO₂, Figura 5.21(a), os cordões formados não apresentaram penetração na raiz do chanfro (fundo do chanfro), ficando com inclusões de escória, como mostrado mais adiante. Este fato pode estar relacionado com a posição de soldagem e tipo de chanfro para o arame tubular adotado neste trabalho.

Para este mesmo gás e com a corrente de 160 A, Figura 5.21(b), e somente nas faixas de tensão de 22 e 24 V, ensaios Tt 07 e Tt 08 da Tabela 5.6, é que a energia imposta produziu penetração na raiz do cordão. Fato idêntico pode ser visto na soldagem com o gás 100%CO₂ e corrente de 120 A, Figura 5.21(c), onde a penetração só passou a existir a partir das faixas de 22 e 24 V (ensaios Tt 11 e Tt 12 da Tabela 5.6).

De maneira geral, a tendência de redução de penetração com a elevação do comprimento do arco só pode ser visto quando a soldagem com esse arame atingiu as

faixas de tensão de 20, 22 e 24 V, Figura 5.21(d) (ensaios Tt 14, Tt 15 e Tt 01 da Tabela 5.6), na corrente de 160 A e gás 100%CO₂.

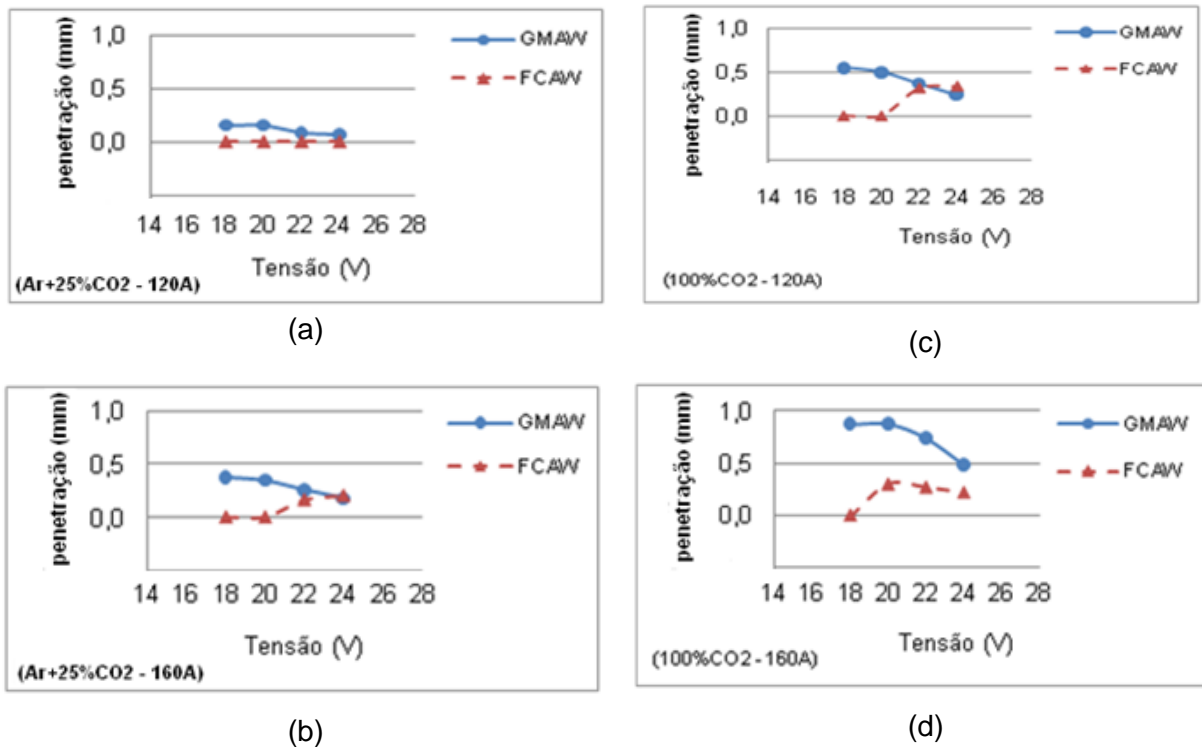


Figura 5.21 – Penetração dos cordões de solda para os processos GMAW e FCAW: (a) 120 A e gás Ar+25%CO₂; (b) 160 A e gás Ar+25%CO₂; (c) 120 A e gás 100%CO₂; e (d) 160 A e gás 100%CO₂.

Tanto para o processo GMAW como para o processo FCAW, há leve tendência de superioridade na penetração causada pelo gás 100%CO₂ em relação à mistura Ar +25% CO₂ nas duas faixas de corrente em estudo. Esse fato está conforme o relato de Mechev (1997), o gás CO₂ puro comparativamente à mistura Ar + 25% CO₂ apresenta uma maior velocidade do plasma e um grande fluxo de calor à peça, o que promove um aumento da movimentação de massa e elevadas pressões na poça de fusão, o qual contribui para aumento da penetração do cordão. Para Fortes (2004), a adição de dióxido de carbono (CO₂) aumenta a penetração, sendo que a maior penetração ocorrerá com 100% CO₂.

5.7.4 Análise do Escorrimento dos cordões de solda

Para analisar o escorrimento e as discontinuidades dos cordões de solda, serão utilizadas as figuras que representam os perfis dos cordões, Figura 5.22, Figura 5.23, Figura 5.24 e Figura 5.25. As fotografias dos perfis dos cordões mostram que na posição horizontal

de soldagem, de maneira geral, a parte mais alta do reforço tende a se localizar no lado inferior da largura e afastando-se do centro do chanfro do cordão, detalhes na Figura 5.18.

O escorrimento tende a aumentar com a elevação da faixa da tensão de trabalho, e isso esta relacionada com a posição horizontal de soldagem, volume e fluidez de material depositado e modo de transferência metálica. O comportamento destes escorrimentos está apresentado na Figura 5.26. Ocorreram escorrimentos para os dois processos, GMAW e FCAW, com ambos os gases e em todas as correntes e tensões utilizadas.

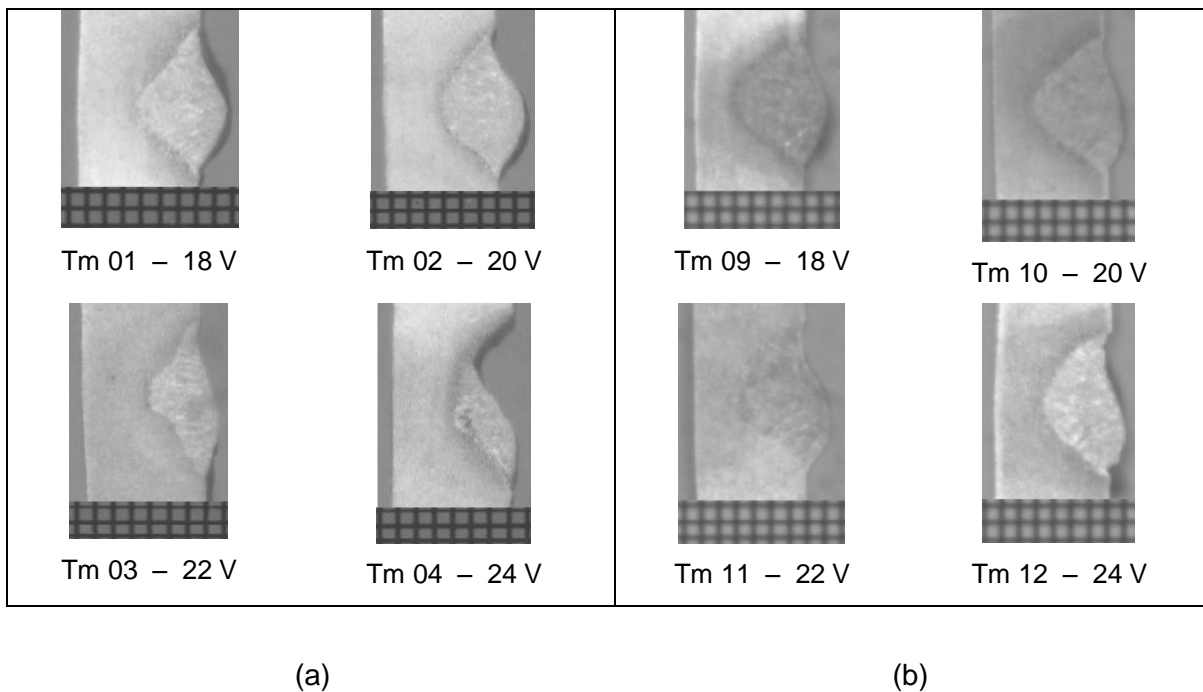
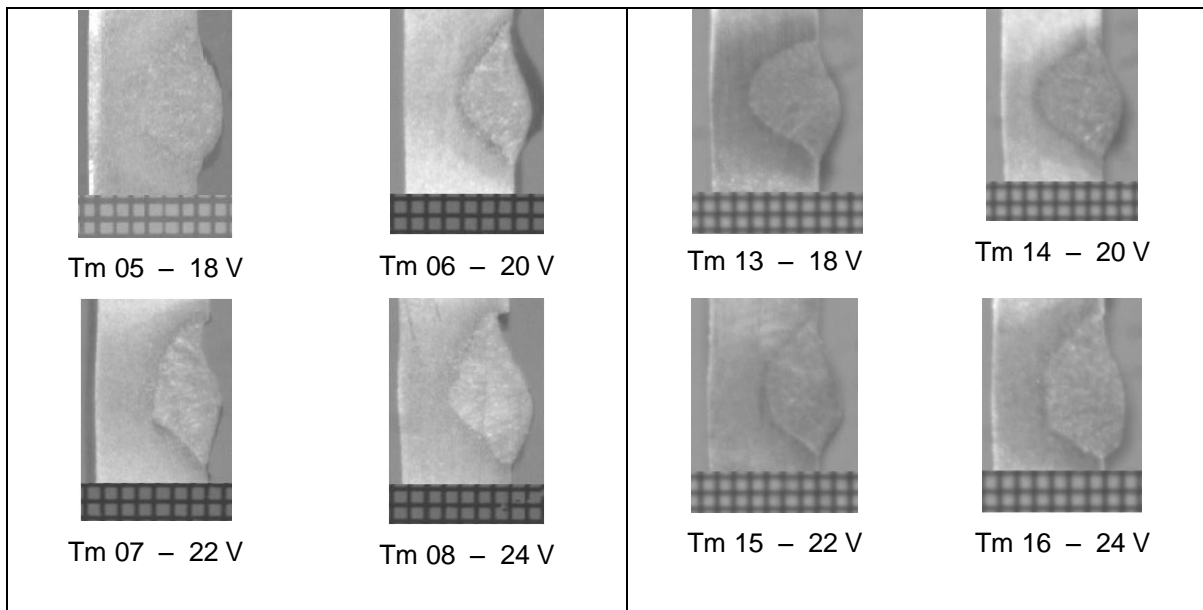


Figura 5.22 - Perfis dos cordões soldados com arame maciço e corrente de 120 A: (a) com proteção do gás Ar + 25%CO₂ e (b) com proteção do gás 100%CO₂. (escala em mm)

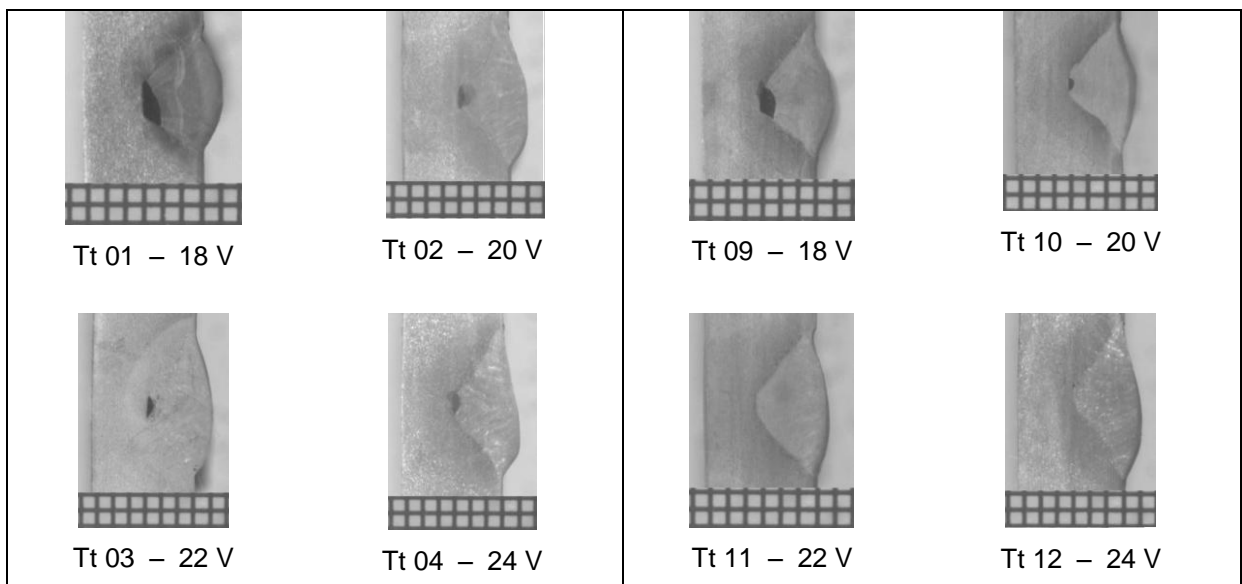
Obs. Todas as fotos dos perfis estão sobre uma tela de malha quadrada de 1 mm x 1 mm, a qual servirá como escala e referência visual das dimensões dos cordões.



(a)

(b)

Figura 5.23 – Perfis dos cordões soldados com arame maciço e corrente de 160 A: (a) com proteção do gás Ar + 25%CO₂ e (b) com proteção do gás 100%CO₂. (escala em mm)



(a)

(b)

Figura 5.24 - Perfis dos cordões soldados com arame tubular e corrente de 120 A: (a) com proteção do gás Ar + 25%CO₂ e (b) com proteção do gás 100%CO₂. (escala em mm)

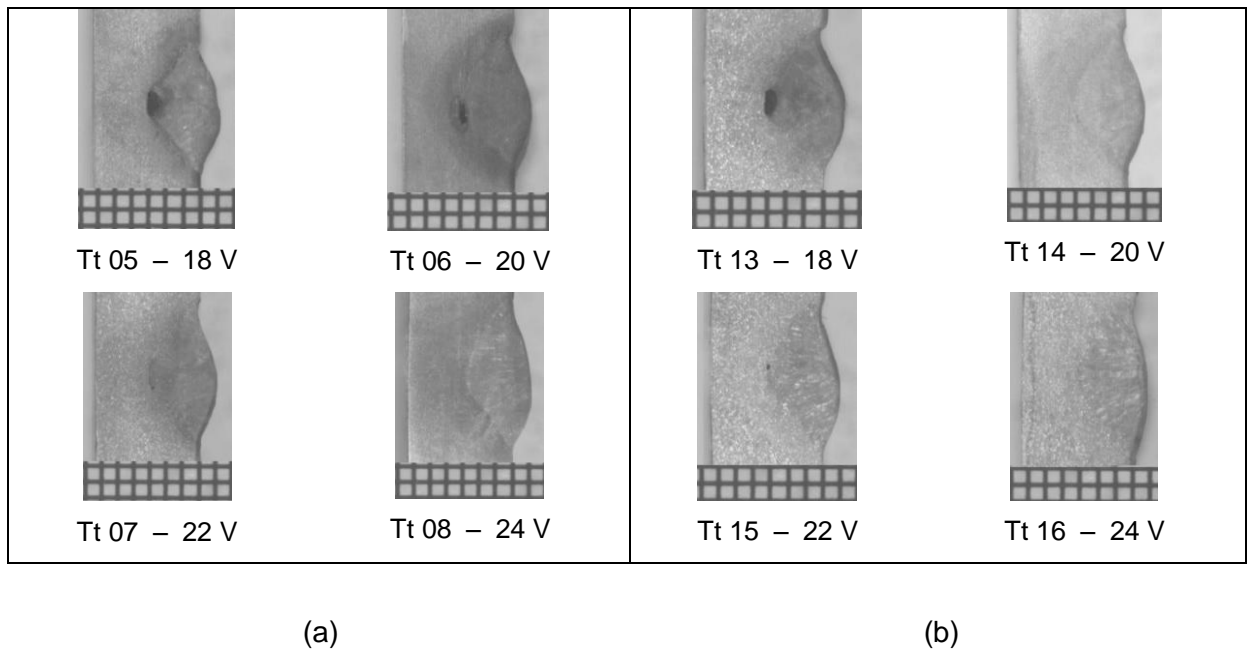


Figura 5.25 - Perfis dos cordões soldados com arame tubular e corrente de 160 A: (a) com proteção do gás Ar + 25%CO₂ e (b) com proteção do gás 100%CO₂. (escala em mm)

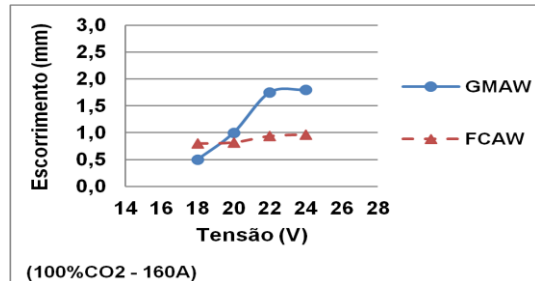
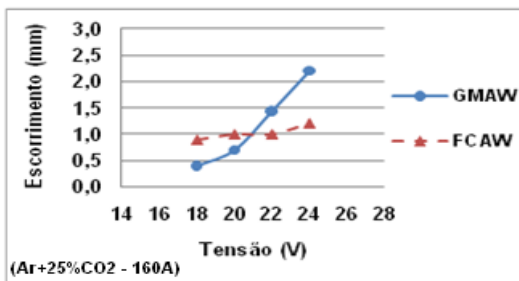
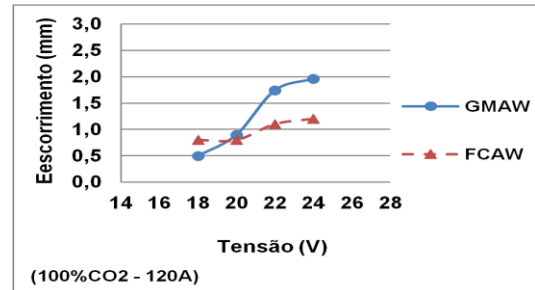
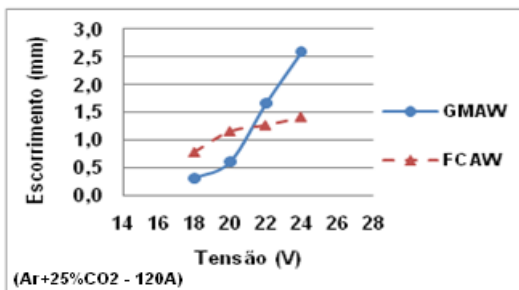


Figura 5.26 – Escorrimento dos cordões de solda para os processos GMAW e FCAW: (a) 120 A e gás Ar+25%CO₂; (b) 160 A e gás Ar+25%CO₂; (c) 120 A e gás 100%CO₂; (d) 160 A e gás 100%CO₂. (escala em mm)

A soldagem com o processo GMAW apresentou escorrimento para todos os modos de transferência, e principalmente no modo globular onde as gotas fundidas com maiores volumes e fluidez, tiveram dificuldades para chegar à poça de fusão e atingiram área fora da poça ou nem atingiram a placa de teste, se alojando na mesa coordenada, em forma de respingos. Fatos semelhantes foram verificados no trabalho de Campos (2005) em que na transferência pelo modo globular as gotas formadas com maior energia (altas correntes e tensões) são bastante fluidas e podem produzir poças de fusão que não são suportadas pela tensão superficial, quando na soldagem fora de posição.

Para as duas correntes e com ambos os gases de proteção (processo GMAW), o escorrimento dos cordões processados na faixa de 24 V foi mais acentuado e esse fato pode ser confirmado através das fotos dos perfis correspondentes, o que confirma as recomendações de alguns pesquisadores em que essa faixa de tensão não é adequada para a soldagem com arame maciço. Como visto no Capítulo III, Machado (1996) sugere as faixas de tensão de 15 a 22 V, para esse processo.

Na soldagem com o processo FCAW a tendência de crescimento do escorrimento com o aumento da faixa de tensão foi menos acentuado em relação ao processo GMAW, ou seja, os valores tiveram leve aumento e alguns tiveram seus valores constantes com o aumento do comprimento do arco. O arame tubular manteve a chegada das gotas à poça de fusão mesmo com as mudanças de modo de transferência. Este fato, como citado anteriormente está relacionado a característica de transferência metálica do arame tubular. Este arame com seu fluxo tipo rutilico, com maior ponto de fusão, produziram arco relativamente mais largo e manteve ancorado o material fundido na poça de fusão, reduzindo assim o escorrimento. Conforme Fortes (2004), arames tubulares possuem um arco mais largo e as gotas espalham-se e criam uma área de projeção maior, distribuindo, portanto, toda a energia de soldagem mais uniformemente e gerando cordões de solda de aspecto liso e com boa molhabilidade, e a escória, de rápida solidificação, ajudam a suportar a poça de fusão na soldagem fora de posição e melhorar o perfil do cordão de solda.

Comparando-se os processos (GMAW com o FCAW) em relação ao escorrimento, pode-se afirmar que na região de transferência pelo modo curto-circuito do processo GMAW (tensões de 18 e 20 V) este processo apresenta menor valor de escorrimento, provavelmente devido ser a região de melhor regularidade de transferência metálica.

Quanto à presença de discontinuidades, para os dois processos em estudo, analisando-se as fotos correspondentes dos perfis dos cordões pode-se verificar que todos os cordões formados com o processo GMAW apresentaram falta de preenchimento na parte superior de sua largura. Este fato é mais acentuado com gás Ar+25%CO₂ e tensão de 24 V,

na corrente de 120 A, Figura 5.22(a) (ensaio Tm 04), e na corrente de 160 A, Figura 5.23(a) (ensaio Tm 08). Esta falta de preenchimento na lateral do cordão foi aumentando com a elevação das faixas de tensão de soldagem, devido ao maior escorrimento do cordão de solda.

Para o cordão do processo GMAW com gás 100%CO₂ e nas faixas de 120 A e 24 V, Figura 5.22(b) (ensaio Tm 12). as discontinuidades apresentadas foram: falta de preenchimento na parte superior da largura do cordão e mordeduras na parte inferior da largura do cordão. Essa mordedura pode ser atribuída à maior fluidez da massa fundida quando utiliza esse gás de proteção.

Para o processo FCAW a energia imposta com o gás Ar+25%CO₂ e corrente de 120 A não foi suficiente e apresentou falta de fusão no fundo do chanfro (raiz do chanfro) e isso aconteceu para todos os cordões processados em todas as faixas de tensão adotadas, Figura 5.24(a) (ensaios Tt 01, Tt 02, Tt 03 e Tt 04). Para essa mesma corrente e com o gás 100% CO₂, o cordão de solda só apresentou fusão na raiz do chanfro na faixa de 22 e 24 V, Figura 5.24(b) (ensaio Tt 11 e Tt 12), o que indica a maior energia relativa imposta com o gás 100%CO₂ nessas duas tensões de trabalho.

O gás de proteção 100%CO₂, foi o que apresentou os melhores cordões de solda processados com arame tubular e isso aconteceu na faixa de corrente de 160 A e com as faixas de tensão de 20, 22 e 24 A, Figura 5.25(b) (ensaios Tt 14, Tt 15 e Tt 16), embora também, como todos os cordões, apresentassem uma leve falta de preenchimento na parte superior da largura, mas nada que viesse a comprometer as suas qualidades.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

As análises dos resultados obtidos a partir dos procedimentos experimentais utilizados neste trabalho tornaram possível chegar às seguintes conclusões:

1) Conclusões relacionadas à regularidade de transferência metálica:

- A melhor condição de regularidade de transferência metálica por curto-circuito do processo GMAW com o gás de proteção $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ foi a condição de soldagem com 18 V e 160 A. Para o gás de proteção de $100\%\text{CO}_2$ os melhores valores dos índices de regularidades de transferência metálica ocorreram para tensões de 18 e 20 V para a corrente de 120 V;

- Para o processo FCAW com o gás de proteção $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ a melhor condição de estabilidade de transferência metálica conduzida pelo fluxo com curto-circuito ocorreu para 18 V, tanto para a corrente de 120 A, como para a corrente de 160 A. Fato semelhante ocorreu para o gás de proteção $100\%\text{CO}_2$.

2) Conclusões relacionadas a rendimento de deposição:

- Para a soldagem do processo GMAW, em ambas as correntes e para os dois gases de proteção, na condição de transferência metálica por curto-circuito, região de maior regularidade de transferência (tensão de 18 e 20 V) apresenta maior rendimento na posição horizontal em relação ao processo FCAW;

- Os melhores rendimentos de depósito do processo FCAW ocorreram para valores maiores de tensões (22 e 24 V) para os dois valores de correntes utilizados, região de predominância de transferência metálica conduzida pelo fluxo sem curto-circuito.

3) Com relação às características geométricas do cordão de solda:

- A largura do cordão de solda para os dois processos aumentou com o aumento da tensão de soldagem, tendo como consequência a diminuição do reforço. Para o processo GMAW ocorreu uma redução na penetração com o aumento da tensão de soldagem. Entretanto, para o processo FCAW este fato não foi observado, pois ocorreu falta de penetração com inclusões de escórias na raiz do cordão para as maiorias das condições utilizadas neste trabalho. A exceção ocorreu para maiores tensões nos ensaios com 100%CO₂;

- Os melhores resultados (menor escorrimento) ocorreram com o processo GMAW na condição de 20 V (região de maior estabilidade na transferência por curto-circuito). Para o processo FCAW os valores do escorrimento tiveram valores próximos, tendo uma condição melhor que o GMAW para maiores valores de tensão de soldagem (região de predominância de transferência metálica conduzida pelo fluxo sem curto-circuito).

CAPÍTULO VII

TRABALHOS FUTUROS

A realização deste trabalho permite sugerir algumas propostas para a realização de trabalhos posteriores que busquem responder questões não abordadas neste trabalho, tais como:

1 – Realizar ensaios de soldagem na posição horizontal com filmadora de alta velocidade para levantar o mapa de transferência metálica de forma a determinar as regiões de transferência conduzida pelo fluxo com curto-circuito.

2 – Realizar ensaios na região de regularidade de transferência metálica com curto-circuito variando os valores de indutância de subida e de descida, de forma a verificar o real efeito desse parâmetro na região de regularidade de transferência com curto-circuito, tanto para o processo GMAW como para o FCAW.

3 – Realizar ensaios com mudança na posição da tocha em relação a placa de ensaio, de forma a obter resultados com menor escorrimento do cordão de solda.

4 – Realizar ensaios de forma comparativa entre os dois processos (FCAW e GMAW) na posição vertical ascendente e descendente.

5 – Realizar ensaios variando a porcentagem do gás 100%CO₂ na mistura com o gás Ar, na posição fora do plano, de forma a comparar a viabilidade e capacidade produtiva dos processos analisados neste trabalho.

6 - Realizar ensaios mecânicos, como de tração, dobramento e Charpy, em juntas soldadas, tanto com arame maciço como com arame tubular, e promover uma análise comparativa entre os processos.

7 - Avaliar os processos de soldagem (FCAW e GMAW) na soldagem fora de posição para diferentes DBCP e tipos de juntas.

CAPÍTULO VIII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADOLFSSON, S.; BAHRAMI, A.; BOLMSJO, G. CLAESSON, I. On-line Quality Monitoring in Short-Circuit Gas Metal Arc Welding. **Welding Journal**, p. 59s-73s, February. 1999.

ALVES, J. V. **Desenvolvimento de Envelopes Operacionais para Processo MIG/MAG Robotizado com diferentes Gases de Proteção**. Porto Alegre, p. 17, 2009.

ASM, **ASM Handbook**. ASM International, Welding, Brazing and Soldering, USA, 1993, v. 6, 1229 p.

AWS, Welding Handbook. Welding Processes. 8th ed. Miami-USA, **American Welding Society**, 1991, v. 2, p. 955.26Cm.

AWS A5.18, Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding. **American Welding Society**, Miami-USA. 2001.

AWS A5.20, Specification for Carbon Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding. **American Welding Society**, Miami-USA. 1995.

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

BRACARENSE, A. Q. **Processo de Soldagem por Arame Tubular**. UFMG, Belo Horizonte, p. 88-104, Maio, 2000.

BRACARENSE, A. Q. Gás Metal Arc Welding. Disponível no site: <http://www.infosolda.com.br/artigos/prosol18.pdf>, 2003, 27 p. Acesso em novembro de 2010.

BRACARENSE, A. Q. et al. A soldagem GMAW (ou MIG-MAG). **Revista da Soldagem ABS**, p.6 -19, 2004.

CAMPOS, P. T. **Caracterização mecânica e microestrutural de juntas soldadas pelos processos MIG/MAG e Arame Tubular**. Agosto de 2005. 61 p. Dissertação de mestrado. PUC do Paraná, Curitiba.

CORTINA, P. Solid Wire vs. Metal Cored Wire: Which Should Be Used to Optimize the Robotic Process? **Welding Journal**, v. 84, n. 5, p. 30-32, May. 2005.

COSTA, M. C. M. S; STARLING, C. M. D.; MODENESI, P. J. Instabilidade na soldagem GMAW com gases de baixo potencial de oxidação. **Soldagem & Inspeção**, v. 12, n. 1, p. 182-187, Jan./Mar. 2007.

DOBIGNIES, A. A. **Estudo do rendimento de deposição de material na soldagem MIG/MAG em condições de transferência metálica por Curto-Circuito Forçado**. Fevereiro de 2008. 148 p. Dissertação de Mestrado. UFPR, Curitiba.

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

FERREIRA FILHO, D. **Influência do gás de proteção na soldagem MIG/MAG do aço inoxidável ferrítico com arames ferríticos**. 2007. 110 p. Dissertação de Mestrado, Universidade de Uberlândia, Uberlândia.

FORTES, C. Arames Tubulares, **Literatura ESAB BR**, Contagem, 101 p. Maio, 2004.

FORTES, C. Soldagem MIG/MAG, **Literatura ESAB BR**, Contagem, 133 p. Janeiro, 2005.

FRENCH, I.E. & BOSWORTH, M.R. "A Comparison of Pulsed and Conventional Welding with Basic Flux Cored and Metal Cored Welding Wires", **Welding Journal**, vol.74, nº6, p.197s-205s, 1995.

GARCIA, R. P. **Uma avaliação dos processos MIG/MAG e Eletrodo Tubular em termos de capacidade produtiva, geração de fumos e de respingos, usando consumível para aço estrutural**, 2010. 133 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

GIMENES JR, L.; RAMALHO, J. P. **Conceitos de Soldagem MIG/MAG**. Disponível no site: www.infosolda.Com.br/download/61dpe.Pdf - 2005. Acesso em setembro de 2010

GOMES, E. B. **Análise do comportamento da soldagem por Curto-Circuito aplicado ao processo Eletrodo Tubular através da Metodologia Taguchi**, 2006. 119 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

HERMANS, M. J. M.; DEN OUDEN, G. Process Behavior and Stability in Short Circuiting Gas Metal Arc Welding. **Welding Journal**, p. 137s-141s, April, 1999.

IRVING, B. Trying to Make Some Sense Out of Shielding Gases. **Welding Journal**, Miami, v. 73, n. 5, p. 65-70, May. 1994.

JOAQUIM, R. Processo de Soldagem Arame Tubular. Manual de Tecnologia de Fabricação e Soldagem: Módulo II. **Centro de Tecnologia de Soldagem**, SP, 2001.

KVASOV, F. V. Special Features of Mechanized Welding with Controlled Electrode Metal Transfer. **Welding International**, v. 14, n. 2, p. 158-161, 2000.

LYTTLE, K. A.; STAPON, W. F. G. Select the best shielding gas blend for the application. **Welding Journal**, v.69, n.11, p.21-27, Nov. 1990.

LUZ, T. S; et all. **Análise do Teor de Oxigênio no Mapa de Transferência Metálica do Arame Tubular**. LAPROSOLDA, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia MG. 2005.

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

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

MACHADO, I. G. Economia da Soldagem, **Anais do XXI Encontro Nacional de Tecnologia de Soldagem**, vol. II, Caxias do Sul, pp. 909-1013, 1995.

MECHEV, V. S. Calculation of the welding arc characteristics in consumable electrode welding. **Welding Production**, Cambridge, n. 7, p. 24-27, 1997.

MIRANDA, H. C. **Influência da Indutância na soldagem MIG/MAG na posição Sobre-Cabeça**. Fevereiro de 1999. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. **Introdução aos Processos de Soldagem**. UFMG, Belo Horizonte, p. 18-19, 2006.

MODENESI, P. J. **Introdução à Física do Arco Elétrico e sua aplicação na Soldagem dos Metais**. UFMG, Belo Horizonte, 153 p. 2009.

MOREIRA, A. F. **Influência da atmosfera protetora no cordão de solda obtido dos processos de soldagem GMAW e FCAW**. 2008. 146 p. Dissertação. UNESP, Ilha Solteira.

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

OLIVEIRA, L. M. **Uma investigação da influência dos parâmetros de pulso em soldagem com eletrodo tubular com proteção gasosa**. 2005. 103 p. Dissertação de Mestrado. UNIFEI, Itajubá.

QUITES, A. M.; DUTRA, J. C. **Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico**. Florianópolis, EDEME, 248 p. 1979.

QUITES, A. M. **Introdução à Soldagem a Arco Voltaico**. Florianópolis, 2002.

RODRIGUES L. O. Soldagem Inspeção São Paulo, Vol. 13, No. 2, p.118-127, Abr/Jun 2008 - et all - **Otimização do Processo de Soldagem com Eletrodo Tubular através da Análise da Geometria do Cordão de Solda**, Itajubá, Setembro 2005.

SAITO, S. M. **Análise da influencia dos parâmetros de pulso sobre a geometria do cordão de solda e rendimento de depósito, obtidos pelo processo de soldagem com arame tubular utilizando arco pulsado.** 2001. 146 p. Dissertação, UNESP, Bauru.

SALES, J. C. Estudo da Geometria do Cordão de Solda usando CO₂ e uma Mistura de Ar e CO₂ na Soldagem com Arame Tubular AWS E71T-1. **Congresso Internacional de Engenharia Mecânica - COBEM**, 2001, Uberlândia-MG, v. 4, ref. 172, p.543-551.

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

SHINODA, T.; KANEDA, H.; TAKEUCHI, Y. An Evaluation of Short Circuiting Arc Phenomena in GMA Welding. **Welding & Metal Fabrication**, p. 522-525, December, 1989.

SILVA, R. H. G. **Soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito controlado aplicado ao passe de raiz.** Fevereiro de 2005. 128 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SILVA, E. M. **Comparação de Características Operacionais no Processo com Eletrodo Tubular Utilizando as Transferências por Curto-Circuito e Pulsado na Posição Vertical Descendente,** 2006, 90p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá.

STARLING, C. M. D.; MODENESI, P. J. Avaliação da Transferência de Metal de Arames Tubulares, **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v.11, n.3, p.147-155, 2006.

STENBAKCA, N.; PERSSON, K. Shielding gases for Gas Metal Arc Welding. **Welding Journal**, Miami, v. 8, n. 11, p. 41-47, Nov. 1989.

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

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

WANG, W.; LIU, S.; JONES, J.E. Flux Arc Welding: Arc Signals, Processing and Metal Transfer Characterization, **Welding Journal**, v82, n°3, pp.369s-377s, 1995.

WIDGERY, D.J. Flux Cored Wire: An Update. **Welding and Metal Fabrication**, April, pp. 88-94, 1988.