

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Tese de Doutorado

**"Fenômenos de Instabilidade do Arco na
Soldagem GMAW com Gases de Baixo
Potencial de Oxidação"**

Autora: Maria Celeste Monteiro de Souza Costa

Orientador: Prof. Paulo José Modenesi

Co-orientador: Cícero Murta Diniz Starling

Junho /2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Maria Celeste Monteiro de Souza Costa

**"FENÔMENOS DE INSTABILIDADE DO ARCO NA
SOLDAGEM GMAW COM GASES DE BAIXO
POTENCIAL DE OXIDAÇÃO"**

Tese de doutorado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em
Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de
Minas Gerais

Área de concentração: Metalurgia de Transformação/Soldagem

Orientador: Prof. Paulo José Modenesi

Co-orientador: Cícero Murta D. Starling

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
Junho de 2006

À Deus

À minha família tão maravilhosa da qual eu tenho orgulho de fazer parte, e que incondicionalmente me dispensaram todo apoio e carinho.

Ezequiel e Maria José (meus pais).

Ezequiel Jr., Eugênio, Clara, Fernando, Ângela, Cristina e Hermes (meus irmãos).

Gustavo e Giovana (sobrinhos)

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas estiveram envolvidas nas diferentes etapas de elaboração deste trabalho. Gostaria de agradecer especialmente:

Ao Professor e orientador Paulo José Modenesi pela orientação dedicada, segura e sobretudo por sua amizade revelada em todos os instantes de nosso convívio.

Ao Professor e Co-orientador Cícero Murta Diniz Starling pela sua colaboração contínua na elaboração deste trabalho.

Ao Américo Scotti e Louriel Vilarinho, professores da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Uberlândia, por disponibilizar o laboratório desta instituição para a realização das filmagens sincronizada e pela cooperação técnica e científica, marcada pelo elevado padrão de seu grupo de pesquisa, que viabilizou esta parte do trabalho.

Ao aluno de iniciação científica Marcus Vinicius Laudares Mendonça, do curso de Engenharia Metalúrgica da UFMG e a aluna Bruna Juliane de Oliveira, do projeto Bic-Júnior do CEFET-MG, pela cooperação na realização dos testes neste trabalho.

Aos professores, funcionários e alunos do CPGEM pelo companheirismo e encorajamento, em particular a Elaine, Marta, Wagner, Ana Figueiredo, Eustáquio, João, Ilda, Nelson, Cida, Dona Efigênia e Sr. Urias.

A todos os professores e funcionários do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Em particular desejo agradecer a professora Ivete, aos professores Ezequiel, Wanderley, Joel Romano, Edson, Leonardo e aos funcionários Geraldo e Rafael pela colaboração técnica e apoio no desenvolvimento desta tese.

AGRADECIMENTOS

A empresa Acesita SA, pela doação do aço inoxidável utilizado neste trabalho, em particular ao Engº. Paulo Sérgio de Sairre Bálamo.

Aos Professores Alexandre Queiroz Bracarense, Américo Scotti e Sadek Crisóstomo Absi Alfaro, por terem aceito examinar este trabalho.

RESUMO

O processo de soldagem a arco com arame contínuo e proteção gasosa (GMAW) é atualmente uma dos mais importantes processos de soldagem de metais. Este processo tem passado por uma evolução constante com a introdução de equipamentos com controle eletrônico, com a utilização de técnicas de controle da transferência de metal, da sua estabilidade operacional e da sua formação do cordão de solda. Além disto, variações no processo de soldagem GMAW, visando, em geral, uma maior produtividade, tem sido desenvolvidos ao longo dos últimos anos. Este processo de soldagem, contudo, é caracterizado por uma forte interdependência de seus parâmetros operacionais e uma grande sensibilidade a pequenas variações em suas condições operacionais. Estas características tendem a dificultar a reprodução das condições de soldagem e podem levar, em algumas situações, ao aparecimento de condições de instabilidade e de difícil controle do processo. Estas condições são fatores que limitam a aplicação e a confiabilidade deste processo e aumentam o custo da fabricação por levarem a resultados que exigem a adoção de medidas corretivas. O gás de proteção desempenha diversas funções na soldagem GMAW, além da de evitar a contaminação do metal líquido pelo ar atmosférico. Em particular, o gás de proteção afeta as propriedades físicas do arco e do metal líquido, influenciando, de forma importante, a transferência deste metal através do arco, a estabilidade do processo, o aspecto do cordão e as características de fusão deste. Embora estes efeitos já tenham sido muito estudados e sejam bem conhecidos, existem evidências de que fenômenos muito menos explorados e conhecidos ocorrem, na soldagem de aços, quando o teor de oxigênio no gás de proteção não suficientemente elevado. Estes efeitos parecem estar associados com as condições de emissão de elétrons para o arco e levam a fortes alterações nas condições de operação do arco, causando uma forte perturbação nas condições operacionais. Neste trabalho é apresentado um estudo que envolve a caracterização da ocorrência de instabilidade na soldagem GMAW de aços carbono comum, inoxidável austenítico e alumínio puro com gases de proteção com baixo potencial de oxidação e a avaliação dos efeitos deste fenômeno nas características operacionais do processo. Para isto, os seguintes aspectos gerais foram estudados: características gerais do fenômeno de instabilidade nos três materiais listados acima; características da transferência metálica com auxílio de filmagem de alta velocidade sincronizada com os sinais de tensão e corrente de soldagem, características do aspecto e formato do cordão de solda feitos sobre chapas e em chanfro estreito. Dentre os resultados, verificou-se que a instabilidade associada com o potencial de oxidação no gás de proteção e observada na soldagem de aço carbono com transferência por spray, também ocorre em outros materiais, em particular em aço inoxidável e alumínio.

ABSTRACT

The arc welding process with continuous wire and gas protection (GMAW) is currently one of the most important metal joining process. This process has passed through a constant evolution with the introduction of power supplies with electronic control, and the use of techniques to control metal transfer, its operational stability and weld bead formation. Moreover, processes derived from GMA welding, aiming generally to a higher productivity, have been developed in the last years. This welding process, however, is characterized by a strong interdependence of its operational parameters and a great sensitivity the small variations in its operational conditions. These characteristics tend to make it more difficult to reproduce welding conditions and can lead, in some instances, to conditions of instability and inadequate control of the process. These conditions can limit the application and reliability of this process and can increase the cost of the manufacture. The shielding gas plays different roles in GMA welding, beyond preventing the contamination of the liquid metal by the atmospheric air. In particular, the shielding gas affects the physical properties of the arc and the liquid metal, strongly influencing the transference of this metal through the arc, the stability of the process, bead formation and its fusion characteristics. Although these effects have already been extensively studied and many of their aspects are well known, lesser explored phenomena are observed in this process when the content of oxygen in the shielding gas is low. These seem to be associated with the conditions of electron emission in the arc and can cause strong alterations in the arc behavior, causing strong disturbances in operational conditions. In this work it is presented a study that involves the characterization of the instability in GMA welding in carbon and austenitic stainless steels, and pure aluminum with shielding gases of low potential of oxidation. The effect of these phenomena in operational characteristics of the process and bead fusion characteristics were also evaluated. The following general aspects were studied: characteristics of the instability in the three listed materials; metal transfer characterization by high speed filming synchronized with voltage and current signals of the process, weld bead shape in bead-on-plate welds and in narrow-gap grooves. It was observed that this instability associated to low oxidation potential of the shielding gas occurs in the three base metals although presenting some different characteristics.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	Xii
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	Xiv
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 – OBJETIVO DA PESQUISA	3
CAPÍTULO 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 - Processo de soldagem MIG/MAG ou GMAW	4
3.2 - Gases de proteção	5
3.2.1 - Características básicas dos gases de proteção	6
a) <i>Argônio</i>	7
b) <i>Hélio</i>	8
c) <i>Dióxido de Carbono</i>	9
d) <i>Oxigênio</i>	10
e) <i>Hidrogênio</i>	10
f) <i>Nitrogênio</i>	12
3.3 - Arco elétrico	12
3.4 - Mecanismos de emissão de elétrons	15
3.4.1 - Emissão termiônica	16
3.4.2 - Emissão não termiônica	17
3.5 - Limpeza catódica	18
3.6 - Transferência metálica	19
3.6.1 - Teoria do equilíbrio das forças estáticas	20
3.6.2 - Classificação dos modos de transferência metálica	24
3.6.3 - Métodos de identificação dos modos de transferência metálica	25

3.6.4 - Tipos de transferência de metal no processo GMAW	28
a) <i>Transferência Globular</i>	28
b) <i>Transferência por curto-circuito</i>	30
c) <i>Transferência spray ou aerossol ou goticular</i>	31
3.7 - Estabilidade	32
3.7.1 - Estabilidade Operacional do Processo	32
3.7.2 - Estabilidade operacional no processo GMAW	33
3.8 - Instabilidade no processo GMAW com gases de baixo potencial de oxidação	34
CAPÍTULO 4 – EQUIPAMENTOS E MATERIAIS	41
4.1 - Equipamentos	41
4.1.1 - Fontes de soldagem	41
a) <i>Fonte de energia VI – 400</i>	41
b) <i>Fonte de energia MTE DIGITEC 600</i>	41
4.1.2 - Bocal de proteção extra	43
4.1.3 - Sistema de soldagem mecanizado	43
4.1.4 - Sistema de aquisição de dados	44
4.1.5 - Equipamentos auxiliares	45
4.2 - Materiais	46
4.2.1 - Metais de base (placa de teste)	46
4.2.2 - Metais de adição	46
4.2.3 - Gases de proteção	47
4.2.4 - Materiais metalográficos	47
CAPÍTULO 5 – METODOLOGIA	48
5.1 – Introdução	48
5.2 - Fluxograma experimental	49
5.3 - Procedimento experimental	51
5.3.1 - Preparação dos corpos de prova	51
a) <i>Aço Carbono</i>	52
b) <i>Aço inoxidável</i>	52
c) <i>Alumínio</i>	52

5.3.2 - Testes preliminares de soldagem	53
5.3.2.1 - Avaliação das fontes de soldagem	53
5.3.2.2 - Testes iniciais de soldagem	54
a) <i>Caracterização inicial do fenômeno de instabilidade</i>	54
b) <i>Avaliação do efeito do diâmetro do bocal de proteção</i>	56
c) <i>Testes iniciais com a fonte operando no modo tensão constante</i>	57
d) <i>Testes iniciais com a fonte operando no modo corrente constante</i>	58
5.3.3 - Testes principais	59
a) <i>Testes com a fonte operando em tensão constante</i>	59
b) <i>Testes com a fonte operando em corrente constante</i>	61
c) <i>Testes em “chanfro estreito” com a fonte operando em corrente constante</i>	62
5.3.4 – <i>Análise dos parâmetros geométricos dos cordões em aço carbono com a fonte operando em CI</i>	64
5.3.5 - Testes com filmagem	65
a) <i>Filmagem com câmera convencional</i>	65
b) <i>Filmagem de alta velocidade com “Shadowgrafia” laser sincronizada</i>	65
CAPÍTULO 6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
6.1- Introdução	68
6.2 - Características gerais do fenômeno de instabilidade de mecanismos catódicos	69
6.3 - Testes preliminares	72
6.3.1 - Avaliação das fontes de soldagem	72
6.3.2 - Testes iniciais de soldagem	76
a) <i>Caracterização inicial da instabilidade de mecanismos catódicos</i>	76
b) <i>Bocal extra de proteção</i>	78
c) <i>Características da instabilidade observadas nos testes iniciais</i>	81
6.4 - Testes principais	91
6.4.1 - Testes com a fonte operando em tensão constante	91
6.4.2 - Testes com a fonte operando em corrente constante	101
6.5 - Filmagem sincronizada	106

6.5.1 - Filmagem Sincronizada dos testes com a fonte operando em CV	107
6.5.2 - Filmagem Sincronizada dos testes com a fonte operando em CI	111
6.6 - Aspecto e formato do cordão	114
6.6.1 - Cordão sobre chapa em testes realizados com a fonte operando em CV	114
6.6.2 - Cordão sobre chapa em testes realizados com a fonte operando em CI	117
6.6.2.1 – Formato de cordões sobre chapa com a fonte operando em corrente constante	118
6.6.2.2 – Cordões em chanfro estreito com a fonte operando em corrente constante	123
6.7 - Considerações finais	130
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES	136
CAPÍTULO 8 – CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS E RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS	139
CAPÍTULO 9 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	140
PUBLICAÇÕES RELACIONADAS COM O TRABALHO	141
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	142
ANEXO A – PROGRAMA SINAL	149

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1	Processo de soldagem GMAW	04
FIGURA 3.2	Perfis de penetração e de transferência típicos em soldagem GMAW com alguns gases de proteção.	08
FIGURA 3.3	Variação da tensão do arco GTAW com corrente de 100 A e comprimento de arco de 1,6 mm para as misturas gasosas: Ar-He, Ar-H ₂ e He-H ₂	09
FIGURA 3.4	Condutividade térmica dos gases em função da temperatura.	11
FIGURA 3.5	Entalpia dos gases em função da temperatura.	12
FIGURA 3.6	Representação esquemática da queda de tensão ao longo de um arco.	13
FIGURA 3.7	Balanço estático das forças atuantes na gota.	21
FIGURA 3.8	Modos de transferência de acordo com a classificação do IIV.	25
FIGURA 3.9	Representação esquemática do princípio da Shadowgrafia aplicado na soldagem.	26
FIGURA 3.10	Sinais de tensão, corrente e som sincronizados com o sinal da câmera.	27
FIGURA 3.11	Seqüência de quadros da filmagem de alta velocidade em sincronismo com os oscilogramas de corrente e tensão de regulagem, obtidos com o processo MIG - MAG com transferência do tipo globular.	27
FIGURA 3.12	Condições de corrente e tensão para as diferentes forma de transferência para a soldagem GMAW com um gás de proteção a base de argônio.	28
FIGURA 3.13	Oscilogramas de tensão e corrente de um processo com transferência globular. Arame ER70S6 de 1,2 mm de diâmetro, Gás CO ₂	29
FIGURA 3.14	Transferência por curto-circuito.	31
FIGURA 3.15	Resultado típico de testes usando tensão constante: t_0 – instante de início do teste, t_1 – transição de modo de operação.	36
FIGURA 3.16	Valores de tensão para diferentes CTWD (h) obtidos nos testes com corrente constante (Argônio puro e Corrente de 260A).	37
FIGURA 3.17	Representação esquemática da região do arco no processo MIG.	38
FIGURA 3.18	Aumento anormal na tensão do arco após a mudança de polaridade do positivo para o negativo na soldagem MIG com inversão de polaridade.	40

FIGURA 4.1	Bocal extra de proteção.....	43
FIGURA 4.2	Mesa de soldagem mecanizada com sistema de deslocamento do corpo de prova.....	43
FIGURA 5.1	Fluxograma experimental.....	49
FIGURA 5.2	Representação esquemática da montagem experimental.....	50
FIGURA 5.3	Montagem experimental esquemática do teste para verificar o tempo de resposta da fonte DIGITEC/600 à variações bruscas de corrente e tensão.....	54
FIGURA 5.4	Montagem do bocal extra de proteção com diâmetro de 52 mm no bocal comum da tocha de diâmetro de 16 mm (b).....	56
FIGURA 5.5	Representação esquemática do corpo de prova para as soldas em chanfro estreito.....	63
FIGURA 5.6	Representação esquemática dos parâmetros geométricos considerados para a análise dos cordões de solda sobre chapa com a fonte operando em corrente constante.....	64
FIGURA 5.7	Representação esquemática dos parâmetros geométricos considerados para a análise dos cordões de solda em chanfro estreito com a fonte operando em corrente constante.....	64
FIGURA 5.8	Esquema geral da bancada experimental para “Shadowgrafia”.....	66
FIGURA 6.1	Diagrama esquemático apresentando a relação entre a característica da fonte e a transição da operação instável (1) para a estável (4). $L =$ comprimento do arco, $L_1 < L_2$	71
FIGURA 6.2	Oscilogramas e espectro de corrente obtidos durante o teste da fonte VI 400. Modo de operação tensão constante, aço carbono, velocidade de alimentação do arame 8 m/min, proteção: Ar + 4%CO ₂	73
FIGURA 6.3	Oscilogramas e espectro de corrente obtidos durante o teste da fonte DIGITEC/600. Modo de operação tensão constante, aço carbono, velocidade de alimentação do arame 8 m/min, proteção: Ar + 4%CO ₂	74
FIGURA 6.4	Oscilograma obtido no teste da DIGITEC/600 para verificar o tempo de resposta da fonte quando há variação brusca da tensão durante a soldagem.....	75
FIGURA 6.5	Oscilogramas obtido durante o teste com a fonte DIGITEC/600. Modo de operação tensão constante, aço carbono, velocidade de alimentação 10 m/min, proteção por argônio puro. Frequência de aquisição 4 kHz.....	75
FIGURA 6.6	Resultado típico de testes utilizando fonte a fonte DIGITEC operando em tensão constante. Transição do modo de operação instável (I_{inst}) para estável (I_{est}). Aço Carbono; Proteção: argônio puro, velocidade de alimentação do arame: 9 m/min.....	77

FIGURA 6.7	Resultado típico de testes utilizando fonte a fonte DIGITEC operando em corrente constante. Transição do modo de operação instável (V_{inst}) para estável (V_{est}). Aço carbono; Proteção: argônio puro, Corrente regulada: 255 A.	77
FIGURA 6.8	Influência do diâmetro do bocal no fenômeno de instabilidade de mecanismos catódicos. Fonte operando em CV, proteção por argônio puro.....	78
FIGURA 6.9	Influência do diâmetro do bocal no fenômeno de instabilidade de mecanismos catódicos. Fonte operando em corrente constante, proteção por argônio puro. (*) Teste utilizando apenas o bocal de proteção da tocha.	79
FIGURA 6.10	Oscilogramas de corrente obtidos nos testes com a fonte operando em tensão constante. Aço carbono. (a) Proteção por Ar puro. (b) Proteção por Ar + 1%O ₂	82
FIGURA 6.11	Foto da região próxima ao arco durante a soldagem com operação em CV (velocidade de alimentação: 7 m/min). Condição (a) instável e (b) estável.....	82
FIGURA 6.12	Histogramas obtidos nos testes com a fonte operando em tensão constante. (a) Proteção por Ar puro. (b) Proteção por Ar + 1%O ₂	83
FIGURA 6.13	Oscilogramas de tensão obtidos nos testes com a fonte operando em corrente constante. Aço carbono. Proteção por Ar puro.	85
FIGURA 6.14	Oscilogramas de tensão obtidos nos testes com a fonte operando em corrente constante. Aço carbono. Proteção por Ar + 1%O ₂	85
FIGURA 6.15	Oscilogramas de tensão de soldagem e de luz e gráfico de tensão x luz obtidos nos testes com a fonte operando em corrente constante. Aço carbono. Proteção por argônio puro.....	86
FIGURA 6.16	Histogramas obtidos nos testes com a fonte operando em corrente constante com proteção por Ar puro. (a) CTWD = 22 mm (b) CTDW = 26 mm.	86
FIGURA 6.17	Histogramas obtidos nos testes com a fonte operando em corrente constante com proteção por Ar + 1%O ₂ . (a) CTWD = 22 mm (b) CTDW = 26 mm.	87
FIGURA 6.18	Oscilogramas de testes com transferência por curto-circuito e diferentes gases de proteção. Material: Aço carbono, Velocidade de alimentação do arame: 6 m/min, Tensão de regulação 25V, CTWD = 20 mm.....	89
FIGURA 6.19	Oscilograma de tensão e corrente obtidos durante um teste com transferência do tipo globular. Aço carbono, Velocidade de alimentação de arame: 6 m/min, Proteção: Ar + 2%O ₂ , Tensão: 30V, CTWD = 20mm.....	90

FIGURA 6.20	Oscilogramas e histogramas de corrente dos testes realizados com a fonte operando em CV. Aço carbono, proteção: Ar puro, velocidade de soldagem: 7 m/min, tensão de regulagem: 35 V, CTWD = 22 mm.	92
FIGURA 6.21	Oscilogramas e histogramas de corrente dos testes realizados com a fonte operando em CV. Aço carbono, proteção: Ar puro, velocidade de soldagem: 7 m/min, tensão de regulagem: 33 V, CTWD = 22 mm.	92
FIGURA 6.22	Oscilogramas e histogramas de corrente dos testes realizados com a fonte operando em CV. Aço carbono, proteção: Ar puro, velocidade de soldagem: 9 m/min, tensão de regulagem: 35 V, CTWD = 22 mm.	93
FIGURA 6.23	Oscilogramas e histogramas de corrente dos testes realizados com a fonte operando em CV. Aço carbono, proteção: Ar puro, velocidade de soldagem 9 m/min, tensão de regulagem: 33 V, CTWD = 22 mm.	93
FIGURA 6.24	Oscilogramas e histogramas de corrente dos testes realizados com a fonte operando em CV. Aço inoxidável, proteção: Ar puro, velocidade de soldagem 7 m/min, tensão de regulagem: 35 V, CTWD = 22 mm.....	94
FIGURA 6.25	Oscilogramas e histogramas de corrente dos testes realizados com a fonte operando em CV. Aço inoxidável, proteção: Ar puro, velocidade de soldagem 7 m/min, tensão de regulagem: 33 V, CTWD = 22 mm.....	94
FIGURA 6.26	Oscilogramas e histogramas de corrente dos testes realizados com a fonte operando em CV. Aço inoxidável, proteção: Ar puro, velocidade de soldagem: 9 m/min, tensão de regulagem 35 V, CTWD = 22mm.....	95
FIGURA 6.27	Oscilogramas de corrente dos testes realizados com a fonte operando em CV. Alumínio, proteção: Ar puro, velocidade de soldagem 6 m/min, tensão de regulagem: 23,5V, CTWD = 24 mm.....	95
FIGURA 6.28	Seqüência da filmagem convencional dos testes com a fonte operando em CV durante os períodos de operação estável e instável. Proteção por argônio puro. As condições de soldagem são as mesmas das figuras 6.20; 6.24 e 6.27.	96
FIGURA 6.29	Oscilogramas e histogramas de corrente dos testes realizados com a fonte operando em CV. Aço carbono, proteção: Ar + 1%O ₂ , velocidade de soldagem: 7 m/min, tensão de regulagem: 33 V, CTWD = 22 mm.....	97
FIGURA 6.30	Oscilogramas e histogramas de corrente dos testes realizados com a fonte operando em CV. Aço carbono, proteção: Ar + 1%O ₂ , velocidade de soldagem 9 m/min, tensão de regulagem: 33 V, CTWD = 22 mm.....	98

FIGURA 6.31	Oscilogramas e histogramas de corrente dos testes realizados com a fonte operando em CV. Aço inoxidável, proteção: Ar + 1%O ₂ , velocidade de soldagem 7 m/min, tensão de regulagem: 33 V, CTWD = 22 mm.....	98
FIGURA 6.32	Valores médios da corrente referentes aos períodos instáveis e estáveis dos testes realizados com a fonte operando em CV com diferentes gases de proteção e metais de base.....	100
FIGURA 6.33	Valores médios do ΔI referentes aos períodos estáveis e instáveis dos testes realizados com a fonte operando em tensão constante com diferentes gases de proteção e metais de base.....	101
FIGURA 6.34	Oscilogramas e histogramas de tensão obtidos em testes com a fonte operando em CI para diferentes valores de CTWD. Aço carbono e aço inoxidável (255 A), alumínio (175 A). Proteção por argônio puro.....	102
FIGURA 6.35	Oscilogramas e histogramas de tensão obtidos em testes com a fonte operando em CI para diferentes valores de CTWD. Aço carbono e aço inoxidável. Corrente: 255 A. Proteção por Ar + 1%O ₂	103
FIGURA 6.36	Valores médios das tensões nos períodos instáveis e estáveis para vários CTWD, resultantes dos testes feitos com a fonte operando em CI. Proteção: Argônio puro. Corrente de regulagem: 255 A.....	104
FIGURA 6.37	Valores médios globais da tensão referente aos períodos estáveis e instáveis para os testes apresentados na FIG. 6.36 e para o alumínio. Fonte operando em CI. Proteção: Argônio puro. Corrente de regulagem de 255 A para o aço carbono/inoxidável e 175 A para o alumínio.....	105
FIGURA 6.38	Valores médios dos ΔV referentes aos períodos estáveis e instáveis dos testes com a fonte operando em CI, com diferentes valores de CTWD, Proteção por argônio puro.	106
FIGURA 6.39	Mudança de operação estável para instável e de volta para estável em aço carbono. Fonte em CV. Proteção: Argônio puro; Tensão: 34 V; Velocidade de alimentação do arame: 7,0 m/min; CTWD = 22 mm. Frame rate \approx 7,5 ms.	108
FIGURA 6.40	Oscilograma e seqüência da filmagem sincronizada com o sinal de corrente com a fonte operando em CV. Material: Aço carbono; Proteção: Argônio puro; Tensão: 34 V; Velocidade de alimentação do arame: 7,0 m/min; CTWD=22 mm.....	109
FIGURA 6.41	Exemplos de transição do modo de operação estável para o instável. Fonte operando em CV, aço carbono, proteção de argônio puro. Tensão: 34 V e velocidade de alimentação do arame: 7,0 m/min. CTWD = 22 mm. Frame rate \approx 1,5 ms.	110

FIGURA 6.42	Oscilograma e seqüência da filmagem sincronizada com o sinal de corrente com a fonte operando em CV. Aço carbono; Proteção por Ar + 2%O ₂ ; Tensão: 30 V; Velocidade de alimentação do arame: 7,0 m/min; CTWD = 22 mm.....	111
FIGURA 6.43	Seqüência de quadros durante uma transição estável/instável/estável do processo com a fonte operando em CC. Material: Aço carbono; Proteção: Argônio puro; Corrente de regulagem: 245 A; CTWD = 22 mm. Frame rate ≈7,5 ms.	112
FIGURA 6.44	Oscilograma e seqüência de filmagem sincronizada com o sinal de tensão. Fonte operando em corrente constante, material: aço carbono. Proteção: Ar puro. Corrente de regulagem: 255 A. CTWD = 19 mm.....	113
FIGURA 6.45	Foto dos cordões típicos de solda obtidos com a fonte operando em CV com proteção por Ar puro. Parâmetros de soldagem para o aço carbono e aço inoxidável (35 V e w = 7 m/min), para o alumínio (23,5 V e w = 6 m/min).....	115
FIGURA 6.46	Foto dos cordões típicos de solda obtidos com a fonte operando em CI com proteção por Ar puro . Corrente de regulagem para o aço carbono e aço inoxidável: 255 A. Corrente de regulagem para o alumínio: 175 A.....	118
FIGURA 6.47	Valores médios da largura e área de penetração em função do CTWD e estabilidade. Corrente de regulagem: 255 A. Proteção: argônio puro.	121
FIGURA 6.48	Valores médios da largura e área de penetração em função do CTWD e estabilidade. Corrente de regulagem 255 A. Proteção Ar + 1%O ₂	122
FIGURA 6.49	Perfis de penetração típicos dos cordões de solda sobre chapas com a fonte operando em corrente constante.	123
FIGURA 6.50	Oscilograma de tensão, foto do cordão de solda e imagem do arco no chanfro em um teste em chanfro estreito de aço carbono com a fonte operando em CI. Proteção: Ar puro. Corrente de regulagem: 255 A. CTWD = 20mm.....	124
FIGURA 6.51	Oscilograma de tensão, foto do cordão de solda e imagem do arco no chanfro em um teste em chanfro estreito de aço carbono com a fonte operando em CI. Proteção: Ar + 2%O ₂ . Corrente de regulagem: 255 A. CTWD = 20mm.....	124
FIGURA 6.52	Perfis de penetração típicos dos testes feito em chanfro estreito (7 mm de abertura) de aço carbono. Corrente de regulagem 255 A , CTWD = 20 mm.	126
FIGURA 6.53	Valores médios dos parâmetros geométricos dos cordões de solda obtidos em chanfro estreito (7 mm de abertura) de aço carbono. Corrente de regulagem 255 A, CTWD = 20 mm.	128

FIGURA 6.54	Representação esquemática do mecanismo alternativo para a emissão de elétrons baseado na formação de vapores metálicos. (<i>C e C'</i> pontos catódicos).....	131
FIGURA 6.55	Aumento anormal na tensão do arco após um curto circuito na soldagem MIG com inversão de polaridade.	132
FIGURA 6.56	Início da instabilidade de mecanismos catódicos após um rápido curto-circuito.....	135

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1	Constantes físicas dos gases de proteção.	07
TABELA 3.2	Formas usuais de transferência metálica de acordo com o IIW.	24
TABELA 4.1	Dados técnicos da fonte VI – 400.	41
TABELA 4.2	Dados técnicos da fonte MTE – DIGITEC 600.	42
TABELA 4.3	Composição química (% em peso) dos metais de base.	46
TABELA 5.1	Configuração da placa de aquisição de dados para os testes de soldagem.	51
TABELA 5.2	Dimensões usuais dos corpos de prova.	51
TABELA 5.3	Etapas para limpeza química superficial do alumínio.	53
TABELA 5.4	Parâmetros dos testes iniciais com a fonte operando em CV.	55
TABELA 5.5	Parâmetros dos testes iniciais com a fonte operando em CI.	55
TABELA 5.6	Parâmetros dos testes para avaliação do uso de um bocal extra de proteção. Fonte operando em CV.	56
TABELA 5.7	Parâmetros dos testes para avaliação do uso de um bocal extra de proteção. Fonte operando em CI.	57
TABELA 5.8	Parâmetros dos testes iniciais. Fonte operando em CV.	57
TABELA 5.9	Parâmetros dos testes iniciais. Fonte operando em CI.	58
TABELA 5.10	Parâmetros de soldagem dos testes feitos com sensor de luz.	59
TABELA 5.11	Parâmetros de soldagem para os testes em aço carbono. Fonte em CV.	60
TABELA 5.12	Parâmetros de soldagem para testes em aço inoxidável. Fonte em CV.	60
TABELA 5.13	Parâmetros de soldagem para os testes em alumínio. Fonte em CV.	61
TABELA 5.14	Parâmetros de soldagem para testes em aço carbono. Fonte em CI.	61
TABELA 5.15	Parâmetros de soldagem para testes em aço inoxidável. Fonte em CI.	62
TABELA 5.16	Parâmetros de soldagem para testes em alumínio. Fonte em CI.	62
TABELA 5.17	Parâmetros de soldagem para testes em chanfro estreito. Fonte CI.	63
TABELA 5.18	Parâmetros de soldagem para filmagem sincronizada. Fonte em CV.	65

TABELA 5.19	Parâmetros de soldagem para filmagem sincronizada. Fonte em CI.....	66
TABELA 6.1	Corrente e tensão média nas condições de operações estável e instável (dados das FIG. 6.8 e 6.9).....	80
TABELA 6.2	Duração relativa dos períodos estáveis e instáveis nos oscilogramas obtidos nos pré testes com a fonte operando em CV. Aço carbono. Proteção: Ar puro.	80
TABELA 6.3	Duração relativa dos períodos estáveis e instáveis nos oscilogramas obtidos nos pré testes com a fonte operando em CC. Aço carbono. Proteção: Ar puro.	80
TABELA 6.4	Diferença média entre as tensões instáveis e estáveis dos testes preliminares (ΔV).....	88
TABELA 6.5	Características geométricas dos cordões sobre chapa de aço carbono (média \pm desvio padrão). Proteção: Argônio puro. Corrente de soldagem: 255 A.	119
TABELA 6.6	Características geométricas dos cordões sobre chapa de aço carbono (média \pm desvio padrão). Proteção: Ar + 1% O ₂ . Corrente de soldagem: 255 A.	119
TABELA 6.7	Características geométricas dos cordões de solda em chanfro estreito (7mm) de aço carbono – (média \pm desvio padrão).	127
TABELA 6.8	Potência média dos períodos instáveis e estáveis para as soldas realizadas em chanfro estreito de 7 mm – média \pm desvio padrão).....	129

LISTA SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A	– Ampère
A/D	– Analógico / Digital
A_d	– Área depositada
A_L	– Área de penetração lateral
A_p	– Área de penetração axial
B	– Campo elétrico
c_a	– Coeficiente de arraste
CI	– Corrente constante
CTWD	– Distância entre o bico de contato e a peça de trabalho
CV	– Tensão constante
E	– Campo elétrico na coluna do arco
e	– Carga do elétron
ESW	– Processo de soldagem por eletro-escória
F	– Função da geometria do sistema
F_γ	– Força devido a tensão superficial
F_a	– Forças de arraste de gases
FCAW	– Processo de soldagem a arco com arame tubular
F_{em}	– Força eletromagnética
F_g	– Força devido a ação da gravidade
F_v	– Força devido ao jato de vapor
G	– Aceleração da gravidade
GMAW	– Processo de soldagem a arco com arame sólido e proteção gasosa (= MIG/MAG)
GTAW	– Processo de soldagem a arco com eletrodo não consumível e proteção gasosa (= TIG)
H	– Reforço do cordão
H	– Altura do cordão
I	– Corrente elétrica
I_c	– Corrente de transição
I_{est}	– Corrente estável

I_{inst}	– Corrente instável
IIW	– International Institute of Welding
$I_{máx}$	– Corrente máxima
J	– Densidade de corrente
K	– Constante de Boltzmann
l_a	– Comprimento do arco
LABSEND	– Laboratório de Soldagem e Ensaios Não Destrutivos da Universidade Federal de Minas Gerais
LABSOLDA	– Laboratório de Soldagem da Universidade Federal de Santa Catarina
LAPROSOLDA	– Laboratório para o Desenvolvimento de Processos de Soldagem da Universidade Federal de Uberlândia
MAG	– Soldagem com eletrodo consumível e proteção gasosa ativa (= GMAW)
m_g	– Massa da gota
MIG	– Soldagem com eletrodo consumível e proteção gasosa inerte (= GMAW)
P	– Penetração
$P_{máx}$	– Penetração máxima
r_a	– Raio do arame
r_g	– Raio da gota imersa no gás
SAW	– Processo de soldagem por arco submerso
SINAL	– Programa para processar os sinais de tensão e corrente de soldagem
SMAW	– Processo de soldagem manual com eletrodo revestido
T	– Temperatura
TC-1	– Instrumento de medição de corrente e tensão
V	– Tensão
V_A	– Queda anódica
V_C	– Queda catódica
Veloc.	– Velocidade
V_{est}	– Tensão estável
V_{inst}	– Tensão instável
W	– Largura do cordão

ΔI	– Diferença entre a corrente estável e corrente instável
ΔV	– Diferença entre a tensão instável e tensão estável
Φ	– Função termiônica de trabalho do material
ρ	– Densidade do gás
μ_0	– Permeabilidade magnética do material
γ_s	– Tensão superficial

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A soldagem é considerada atualmente o método mais importante para união de metais na construção de peças e estruturas. O processo de soldagem a arco com eletrodo maciço e proteção gasosa (GMAW) atende a várias das necessidades atuais incluindo alta produtividade, boa qualidade e baixo custo. De fato, trata-se de um processo que produz soldas de qualidade adequada para diversas operações. É freqüentemente usado na forma semi-automática, mas pode ser automatizado de forma relativamente fácil.

Entretanto, este processo tende a ser mais sensível (em comparação com a soldagem com eletrodos revestidos) à variação de seus parâmetros operacionais. Em particular, o gás de proteção tem uma influência marcante tanto, na estabilidade do processo quanto em suas características operacionais. Assim, o tipo de gás de proteção usado constitui uma variável importante na determinação da qualidade da solda e da produtividade obtida no processo.

A adição de gases oxidantes (oxigênio e dióxido de carbono) é comumente usada para aumentar a estabilidade do processo em misturas de proteção para a soldagem GMAW de aços. Esta adição, contudo, deve ser limitada na soldagem de aços ligados, em particular dos aços inoxidáveis, pois tais gases podem afetar negativamente as características metalúrgicas do material. Existem evidências de que, nestas condições, fenômenos relacionados às regiões de emissão de elétrons para o arco podem mudar o seu modo de operação e gerar condições de grande instabilidade no processo.

Uma das possíveis formas de avaliar a estabilidade do processo é através do monitoramento de alguns parâmetros de soldagem, particularmente da corrente e tensão, por estarem estes relacionados à transferência do metal fundido da ponta do arame para a poça de fusão. O monitoramento destes parâmetros permite caracterizar diferentes aspectos operacionais do processo, em particular, pode fornecer indícios sobre a

ocorrência e as características da instabilidade no processo, possibilitando um melhor entendimento dessa instabilidade e auxiliar no seu controle.

O presente trabalho procura caracterizar e avaliar fenômenos de instabilidade que ocorrem no processo de soldagem GMAW, quando o teor de gases oxidantes na mistura de proteção é baixo. Observou-se fenômenos de características similares tanto em aço carbono como em aço inoxidável austenítico e alumínio. A influência no formato do cordão na soldagem sobre chapas e em chanfro estreito destes fenômenos foi também estudada. Grande parte do estudo foi baseada no monitoramento dos sinais elétricos (tensão e corrente) e através de registros fotográficos e de filmagens de alta velocidade sincronizada com os sinais de tensão e corrente de soldagem. A filmagem sincronizada objetivou uma análise qualitativa da transferência através das imagens do processo, servindo de fundamentação para as conclusões. O objetivo do trabalho é feito no Capítulo 2.

Uma revisão bibliográfica é feita no Capítulo 3, onde se apresenta conceitos técnicos sobre o processo de soldagem GMAW, gases de proteção, mecanismos de emissão de elétrons, transferência de metal e estabilidade dos processos de soldagem.

Uma descrição dos equipamentos utilizados e da metodologia experimental para o estudo é apresentada nos capítulos 4 e 5 respectivamente.

No capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos e as discussões que fornecem subsídios para a compreensão da instabilidade do processo GMAW quando o teor de gases oxidantes na mistura de proteção é baixo.

No capítulo 7 apresentam-se as principais conclusões retiradas do trabalho.

Finalmente, nos capítulos 8 e 9 são apresentados respectivamente as contribuições originais ao conhecimento e as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

OBJETIVO DA PESQUISA

Este trabalho tem por objetivo caracterizar e avaliar fenômenos de instabilidade observados no processo soldagem GMAW quando o gás de proteção é completamente inerte ou apresenta componentes oxidantes em baixa quantidade. Este estudo englobou tanto aço carbono comum como alumínio puro e aço inoxidável austenítico. Além dos aspectos operacionais do processo de soldagem, o trabalho avaliou, também, a influência da instabilidade no formato do cordão tanto em deposição sobre chapa como em chanfro estreito.

CAPÍTULO 3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 - PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG OU GMAW

A soldagem com arame maciço e proteção gasosa (Gas Metal Arc Welding - GMAW) foi desenvolvida por volta de 1940, para a soldagem de alumínio, magnésio e suas ligas, com a finalidade de substituir o uso de fluxos sólidos, que geravam problemas de corrosão no cordão de solda. Como o processo demonstrou ser muito eficiente na proteção da zona de fusão contra a contaminação atmosférica, ele foi gradativamente substituindo os outros processos e atualmente é aplicado na soldagem da maioria dos metais (AWS, 1991; Cary, 1998). A FIG. 3.1 mostra, de forma esquemática, este processo.

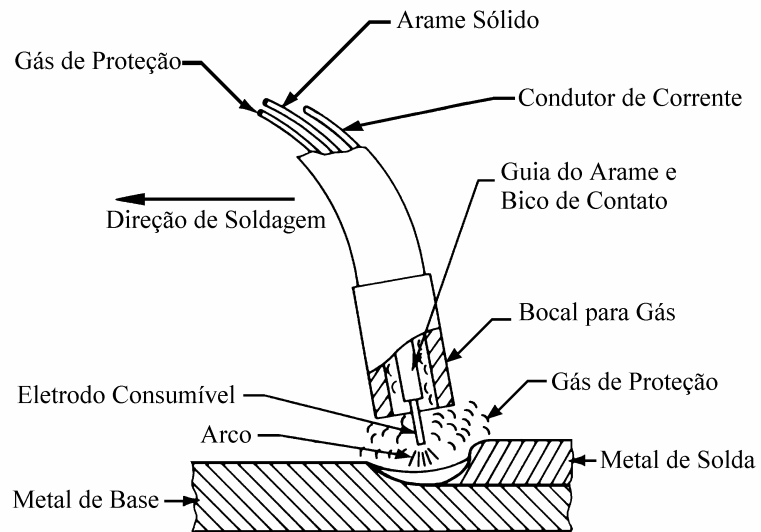


FIGURA 3.1 – Processo de soldagem GMAW (AWS, 1991).

A proteção do arco é obtida por um gás ou mistura de gases que têm por objetivo prevenir a contaminação da solda pelo oxigênio, nitrogênio e hidrogênio provenientes

da atmosfera, além de prover um arco com características relacionadas, por exemplo, com sua estabilidade, modo de transferência metálica, etc.

Se este gás é inerte (Ar/He), o processo é também chamado de MIG - **Metal Inert Gas**, pois estes gases não reagem metalurgicamente com a gota metálica ou com a poça de fusão, atuando apenas na proteção destas regiões, auxiliando na formação e manutenção do arco. Por outro lado, se o gás for ativo (CO₂ ou misturas de Ar/O₂/CO₂), o processo é chamado alternativamente de MAG - **Metal Active Gas**. Neste caso, além das funções já citadas, o gás reage metalurgicamente com a gota e com a poça de fusão. (AWS, 1991).

O processo GMAW é normalmente operado de forma semi-automática, podendo ser também mecanizado ou automatizado. Convencionalmente, é utilizada no processo GMAW uma fonte retificadora de tensão constante, regulável entre cerca de 15 e 50 V, e um alimentador de arame com velocidade regulável entre cerca de 1 e 18 m/min, que permite um auto ajuste do comprimento do arco, mantendo-o relativamente constante. Descrições mais completas do processo GMAW, abrangendo desde as técnicas operatórias às suas inovações recentes, podem ser encontradas em grande número de trabalhos, por exemplo, nas referências: Brosilow, 1978; Amin, 1983; Dutra, 1989; AWS, 1991; Machado, 1996; Sullivan, 1998; Cary, 1998; Marques, *et al.*2005.

3.2 - GASES DE PROTEÇÃO

É freqüentemente considerado que a função primária do gás de proteção é evitar a contaminação da poça de fusão pelo ar atmosférico, mas ele é uma variável importante na operação de soldagem a arco e desempenha diversas outras funções. O gás ou mistura de gases afetam, por exemplo, as características de ionização e formação do arco elétrico, o modo de transferência metálica do metal de adição, a estabilidade do arco, as propriedades do metal depositado, o volume de fumos e respingos, a geometria e o aspecto superficial do cordão, a penetração e a velocidade de soldagem (Hilton e Norrish, 1988; Tusek e Suban, 2000).

Os processos de soldagem a arco com proteção gasosa podem utilizar gases de proteção com diferentes composições químicas, em função do metal de base que será soldado, do tipo de transferência metálica desejado, do diâmetro e do tipo de eletrodo e da posição de soldagem. Porém, para diminuir o valor agregado de uma solda, é importante levar em consideração a escolha da mistura a ser utilizada, bem como a relação custo x benefício. Existe atualmente, no mercado internacional e brasileiro, uma grande variedade de gases de proteção para a soldagem de aços. Estes podem ser aplicados puros, como nos casos do argônio e do dióxido de carbono, ou mais comumente em forma de misturas. Segundo Hilton e Norrish, (1988), em geral 1 a 2% de oxigênio ou 2 a 4% de CO₂ são adicionados ao argônio para melhorar a estabilidade do arco e reduzir a formação de respingos na soldagem MIG. Holmberg e Stenbacka (1990) explicam que estes gases promovem constantemente a reconstituição da camada de óxido, facilitando assim a emissão de elétrons, diminuem a tensão superficial, facilitando a transferência metálica.

A condutividade térmica do gás também afeta de forma significativa as características da coluna do arco. Gases de alta condutividade térmica podem aumentar a resistividade do arco e exigir, para correntes e comprimentos de arco equivalentes, um aumento na tensão do arco, tendendo a prejudicar a abertura do arco. A rigidez da coluna do arco também é um indicador da sua estabilidade. Esta rigidez é representada pela força necessária para desviar o arco da sua posição original. Sabe-se que, em geral, misturas a base de hélio produzem arcos menos rígidos, o que, em alguns casos, pode ser negativo para a estabilidade, sobretudo a baixas correntes. Em correntes altas, um arco menos rígido pode ser benéfico para a prevenção de mordeduras e irregularidades no cordão (Hilton e Norrish, 1988). No Brasil, misturas com hélio são pouco utilizadas na soldagem de aços carbono, em virtude do alto custo desse gás.

3.2.1 - Características básicas dos gases de proteção

As propriedades físicas e químicas de cada gás podem ser muito diferentes e são essas diferenças que contribuem para as características operacionais que uma dada mistura de

proteção atribuí ao processo de soldagem. As características básicas dos principais gases que podem participar em misturas de proteção para soldagem são apresentadas a seguir.

a) *Argônio*

O argônio é um gás inerte que não reage com outros elementos para formar compostos e não se dissolve de forma apreciável na poça de fusão. Em função destas características, do ponto de vista metalúrgico, ele favorece soldas de alta qualidade, com poucas inclusões e boas propriedades mecânicas. Possui baixo potencial de ionização (TAB. 3.1), o que permite uma abertura de arco fácil e operação estável em baixas correntes.

O argônio é um gás incolor, inodoro, insípido e não é tóxico. Além disso, é um gás denso (TAB. 3.1), ou seja, ele é 1,78 vez mais pesado que o ar, o que facilita uma boa proteção com uma baixa vazão, criando pouca turbulência no arco (Brosilow, 1978).

TABELA 3.1 – Constantes físicas dos gases de proteção.

Elemento	1º Potencial de ionização (eV^a)	Densidade (kg/m³)
Argônio	15,75	1,784
Hélio	24,58	0,178
Hidrogênio	13,59	0,083
Nitrogênio	14,54	1,161
Oxigênio	13,61	1,326
Dióxido de carbono	–	1,977

Fonte: Lancaster, 1986.

Nota: ^a 1 eV = 1,6 x 10⁻¹⁶ J

Na soldagem GMAW, o uso do argônio favorece a transferência por spray em correntes mais baixas. Em transferência spray, este gás favorece a formação de um cordão com penetração mais estreita no centro do cordão ("finger type penetration" - penetração em dedo), como mostrado na FIG. 3.2. Na soldagem dos aços, em particular do aço carbono, este gás normalmente não é empregado puro devido principalmente ao seu custo mais elevado, menores estabilidade do arco e molhabilidade da poça de fusão em

relação a outras misturas, além de uma maior tendência à formação de mordeduras (AWS, 1991).

Um problema relacionado ao uso do argônio, que diz respeito à segurança do trabalho, refere-se ao seu elevado potencial para a geração de ozônio (Wiktorowicz e Crouch, 1994).

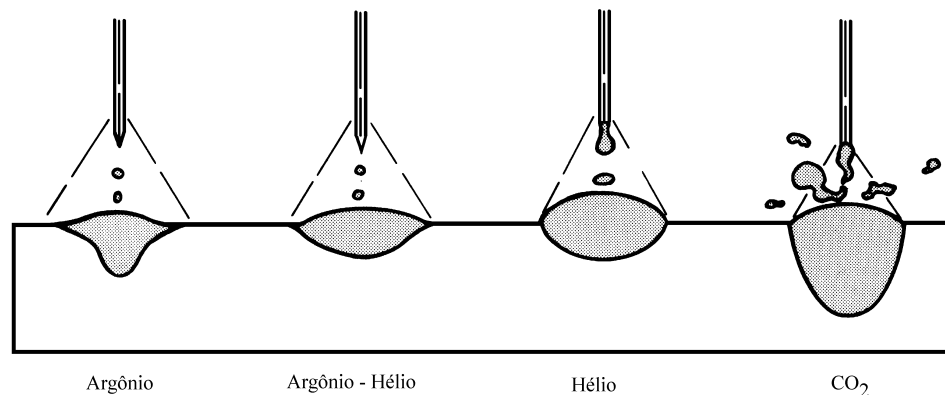


FIGURA 3.2 – Perfis de penetração e de transferência típicos em soldagem GMAW com alguns gases de proteção (AWS, 1991).

b) Hélio

O hélio é inerte como o argônio, permitindo também a obtenção de soldas de boa qualidade do ponto de vista metalúrgico. Porém, é um gás mais leve do que o ar, o que tende a prejudicar a eficiência da proteção gasosa e exigir, em relação ao argônio, uma maior vazão (2 a 3 vezes) para se obter uma proteção equivalente. Para manter um dado comprimento de arco com uma dada corrente, o hélio exige tensões mais altas que o argônio (FIG. 3.3), resultando, assim, na geração de uma maior quantidade de energia no arco, o que está associado, segundo a maioria dos autores, com o seu maior potencial de ionização (TAB. 3.1) (Helmbrecht e Oyler, 1957). Esta característica, aliada à maior condutividade térmica do hélio, implica em uma maior capacidade de fusão do metal de base (Hilton, 1982). Em geral, soldas obtidas com o uso de misturas a base de hélio tendem a apresentar um perfil mais arredondado, com maior penetração secundária

(penetração fora do “finger”) do que quando o argônio é usado, como indicado esquematicamente na FIG. 3.2.

Para condições de mesma penetração, o hélio permite em relação ao argônio, o uso de maiores velocidades de soldagem (Brosilow, 1978; Wiktorowicz e Crouch, 1994), ou seja, uma maior produtividade, o que representa um fator econômico importante, sobretudo para materiais de alta condutividade térmica. De modo similar, para penetração e velocidade de soldagem iguais, o uso do hélio permite que uma menor corrente de soldagem seja usada, diminuindo as chances de formação de mordeduras (Helmbrecht e Oyler, 1957; Kujanpaa, 1984).

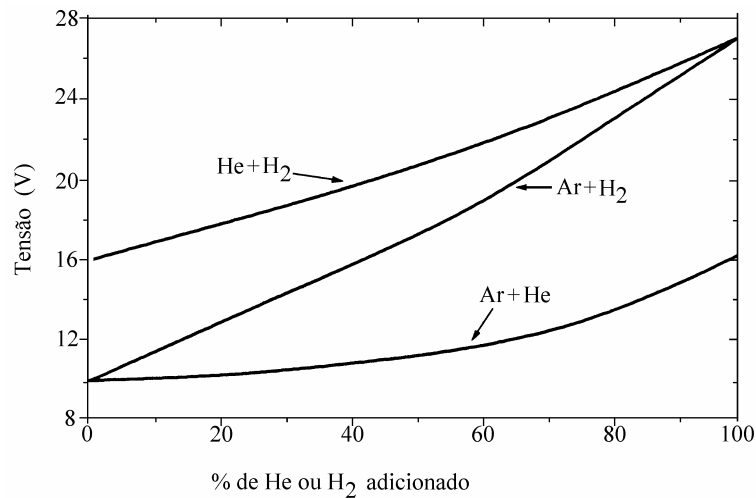


FIGURA 3.3 – Variação da tensão do arco GTAW com corrente de 100 A e comprimento de arco de 1,6 mm para as misturas gasosas: Ar-He, Ar-H₂ e He-H₂ (Helmbrecht e Oyler, 1957).

c) *Dióxido de Carbono*

O dióxido de carbono é um gás oxidante, o que favorece no processo GMAW a estabilização da raiz do arco. Este efeito é notado apenas para baixas proporções de CO₂ em mistura com argônio e eventualmente em misturas com argônio e hélio, de modo que adições maiores que 5% de CO₂ tendem a diminuir a estabilidade do processo e aumentar a quantidade de respingos produzidos (Hilton e Norrish, 1988).

Um fator que favorece a utilização do dióxido de carbono, além do seu baixo custo, é a sua alta condutividade térmica (FIG. 3.4), que promove uma maior transferência de calor para o metal base, favorecendo a formação de cordões de maior largura e maior penetração, FIG. 3.2.

Pode-se citar, como desvantagens do uso deste gás, a quantidade elevada de respingos gerados, maior oxidação de elementos de liga (Mn e Si), maior oxidação do cordão de solda, exigindo maior limpeza, além da tendência de não produzir a transferência por “spray” (AWS, 1991).

Um caminho para minimizar os efeitos negativos do CO₂ é misturá-lo com uma quantidade adequada de argônio (Brosilow, 1978).

d) *Oxigênio*

Apesar de não ser utilizado sozinho como gás de proteção, o oxigênio é um constituinte importante das misturas de gás empregadas na soldagem de aços. O oxigênio apresenta efeitos similares ao CO₂ em termos da estabilização da raiz do arco, oxidação de elementos de liga e molhabilidade do metal líquido (Hilton e Norrish, 1988).

Como regra prática, é geralmente colocado que o efeito do oxigênio é dez vezes maior que o do CO₂ no que se refere à perda por oxidação e 2 a 3 vezes superior em relação à estabilização do arco (Stenbacka, 1992). Devido a isto, esse gás não é usado como gás base em soldagem, e sim, em pequenas proporções, em geral inferiores a 5% e exclusivamente no processo GMAW.

e) *Hidrogênio*

O hidrogênio também é um gás incolor, inodoro, insípido e não tóxico e é mais leve do que o hélio. Ele é um gás redutor e esta característica é benéfica na remoção de filmes de óxidos, permitindo a obtenção de uma superfície de solda mais limpa.

Entre os gases comumente utilizados, o hidrogênio é um dos que têm maiores valores de condutividade térmica e entalpia, FIG. 3.4 e FIG. 3.5 (Tusek e Suban, 2000). Por isso, ao se adicionar hidrogênio no argônio, ele tende a elevar a tensão do arco, FIG. 3.3, o que permite um aumento de penetração e/ou área fundida do metal de base (Helmbrecht e Oyler, 1957).

Grande parte da literatura relacionada com misturas gasosas para soldagem sugere a possibilidade de adição de 0,5 a 5% de hidrogênio no argônio para as ligas metálicas que não são afetadas negativamente por este gás (Tusek e Suban, 2000). Kennedy (1970) relata que a máxima concentração de hidrogênio admissível no argônio é da ordem de 10%. Maiores teores tenderam a deteriorar a qualidade da solda devido ao maior risco de porosidade.

O hidrogênio também favorece a diminuição da emissão de ozônio, sendo citado que adições de cerca de 1,5% de H_2 ao argônio resultam na redução de 50% na quantidade de ozônio gerada (Urmston *et al.* 1994).

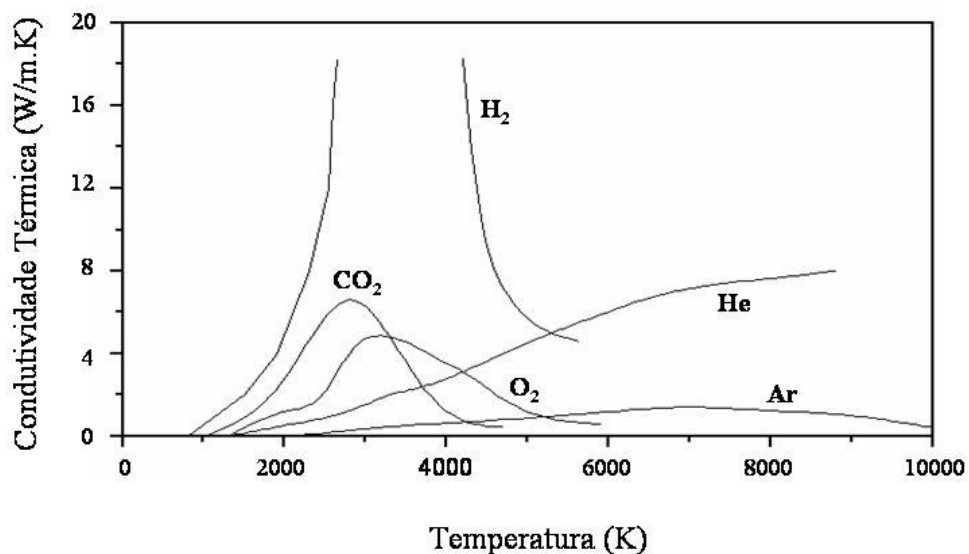


FIGURA 3.4 – Condutividade térmica dos gases em função da temperatura (Tusek e Suban, 2000).

f) Nitrogênio

O nitrogênio é reativo com a maioria dos metais, mas é virtualmente inerte com o cobre (Salter e Dye, 1971).

A tensão do arco para um dado comprimento de arco é significativamente maior com a proteção de nitrogênio do que com a proteção com argônio ou hélio. O nitrogênio, como outros gases moleculares, favorece, em relação ao argônio, a fusão de metal de base, aumentando a penetração do cordão.

Quanto à geração de ozônio durante a soldagem, o nitrogênio é citado como sendo o gás mais prejudicial, com potencial superior até mesmo do que o argônio (Wiktorowicz e Crouch, 1994).

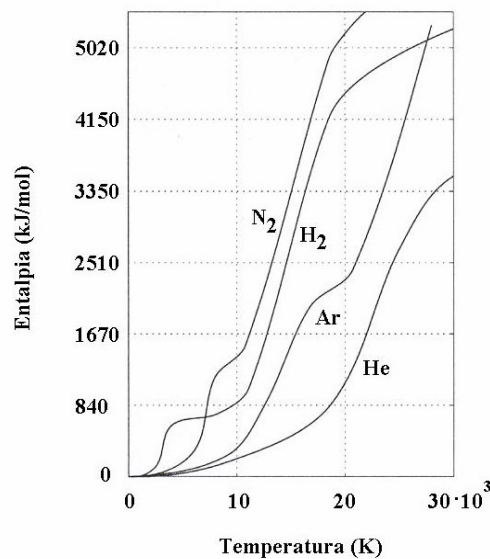


FIGURA 3.5 - Entalpia dos gases em função da temperatura (Tusek e Suban, 2000).

3.3 - ARCO ELÉTRICO

Apesar de um grande número de processos de soldagem usar o arco elétrico como fonte de calor para a fusão, os conhecimentos obtidos até o presente permitem um

entendimento apenas parcial dos fenômenos envolvidos devido a sua grande complexidade (Waszink, 1982; Marques, *et al.* 2005).

Guile (1970) define que o arco elétrico é “uma descarga de corrente elétrica entre eletrodos em um gás ou vapor (gerado a partir dos eletrodos) que tem uma queda de tensão junto ao cátodo da ordem do potencial de excitação do vapor do eletrodo (isto é, da ordem de 10 V) e na qual a corrente pode ter praticamente qualquer valor superior a um mínimo que é de cerca de 100 mA”.

Eletricamente, o arco de soldagem pode ser caracterizado pela diferença de potencial entre suas extremidades e pela corrente elétrica que circula por este. A queda de potencial ao longo do arco elétrico não é uniforme, ela se dá de forma abrupta nas regiões próximas aos eletrodos (ânodo e cátodo) e em intensidade menor na coluna do arco. Esta variação permite supor a existência de, pelo menos, três regiões distintas em um arco, FIG. 3.6.

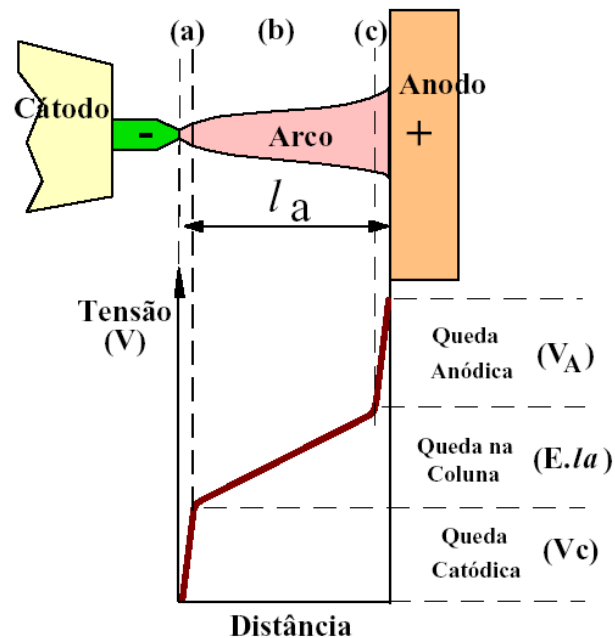


FIGURA 3.6 - Representação esquemática da queda de tensão ao longo de um arco. (a) zona de queda catódica; (b) coluna do arco e (c) zona de queda anódica. l_a – comprimento do arco (Modenesi, 2004) .

A região de queda catódica, apesar de ter pequeno volume, é de extrema importância para a manutenção do arco elétrico, pois é a partir dela que emergem os elétrons que vão fluir pelo arco e que são responsáveis em grande parte pela condução da corrente de soldagem (Lesnewich, 1958). O pequeno volume desta região e os elevados gradientes térmicos aí existentes tornam muito difícil o seu estudo. Esta região é caracterizada por um estado muito afastado do equilíbrio, sendo uma transição entre a coluna do arco e o eletrodo, não ocorrendo condições para o equilíbrio tanto térmico (mesma energia cinética média de seus diversos constituintes) como elétrico (balanço de cargas elétricas), ao contrário do que parece ocorrer na coluna do plasma a 1 atm.

Para haver emissão de elétrons nessa região, diversos mecanismos podem estar atuando, com destaque para a emissão termiônica, que ocorre em cátodos de material refratário, e para os mecanismos de emissão a frio, possivelmente associados à presença de filmes de óxidos na superfície do cátodo, em materiais de pontos de fusão e ebulição mais baixos.

A coluna do plasma é a região que se encontra entre as quedas catódica e anódica. Ela possui gradientes térmicos e elétricos bem mais baixo do que as regiões catódica e anódica, com valores da ordem de 10^3 a 10^4 °C/mm e 1 V/mm, respectivamente. A coluna do plasma é constituída de partículas neutras (átomos e moléculas), de íons e de elétrons livres, sendo os últimos os principais responsáveis pela passagem de corrente elétrica entre os eletrodos. Para que se dê a ionização do gás, este deve ser aquecido a altas temperaturas. A agitação do gás causada pela elevação da temperatura promove choques entre os seus constituintes, ocasionado a sua ionização parcial e a conseqüente formação do plasma. Uma vez que a coluna do plasma requer que se mantenha uma temperatura suficientemente elevada para sustentar o seu grau de ionização, quanto maior for o potencial de ionização dos constituintes da coluna, maior será a energia necessária para manter o nível de ionização requerido e, portanto, maior deverá ser a temperatura desse arco. A diferença de potencial nessa região varia de forma linear com o comprimento do arco. Assim, para um dado valor de corrente de soldagem, a diferença de potencial entre o eletrodo e a peça pode ser estimada, em uma primeira aproximação, pela Eq. 3.1.

$$V = (V_a + V_c) + E \cdot l_a \quad \text{Eq.3.1}$$

Onde:

V = Diferença de potencial

V_a = Queda de potencial no ânodo

V_c = Queda de potencial no cátodo

E = Campo elétrico na coluna do arco

l_a = Comprimento do arco

A região anódica não tem a mesma importância que a região catódica, por consequência é uma região menos estudada. No ânodo os elétrons podem penetrar no eletrodo livremente, pois facilmente vencem a barreira de potencial existente. Já os íons positivos, como regra geral, devem vencer uma grande barreira de potencial para emergir desde o eletrodo para o plasma. Como resultado, há acúmulo de elétrons na região adjacente ao ânodo, ou seja, se forma uma região com carga espacial envolvente negativa, com aproximadamente 10^{-1} mm.

3.4 - MECANISMOS DE EMISSÃO DE ELÉTRONS

Como foi dito anteriormente, para a existência do arco, elétrons devem ser emitidos em quantidades suficientes para manter a corrente do arco. Em um material metálico, os elétrons de valência são compartilhados por todos os átomos do material, formando uma nuvem eletrônica ligada a estes. Para retirar elétrons desta nuvem e do material, uma quantidade mínima de energia deve ser fornecida a ele. Este limite mínimo de energia que tem que ser fornecido ao material para o mesmo emitir elétrons define-se como “função de trabalho” do material (Guile, 1970 e 1971).

Para causar a emissão de elétrons no cátodo, diversos mecanismos podem entrar em operação. Na descarga luminescente, íons positivos são acelerados pela elevada tensão na região do cátodo (10^2 V), chocando-se com este com elevada energia cinética de forma a causar a emissão de elétrons pelo material. Outros mecanismos (choque de

átomos nêutrons e de fótons no cátodo) parecem auxiliar a emissão de elétrons neste tipo de descarga (Guile, 1970 e 1971).

Na soldagem a arco, outros mecanismos de emissão parecem ser mais importantes, destacando-se a emissão termiônica, em cátodos de material refratário, como tungstênio e o carbono, e os mecanismos de emissão a frio (emissão não termiônica), nos processos com eletrodo consumível. O mecanismo de emissão a frio ainda é relativamente pouco conhecido. Em condições usuais de soldagem, ele parece estar associado com a presença de filmes de óxidos na superfície do cátodo, em materiais de pontos de fusão e ebulição mais baixos do que os materiais que acontece a emissão termiônica.

3.4.1 - Emissão termiônica

A emissão termiônica é o método mais simples e mais bem conhecido para a emissão de elétrons. Pelo conceito de “função de trabalho” exposto acima, vê-se que, se o metal for aquecido suficientemente, elétrons poderão receber energia maior que um limite mínimo para liberá-los do metal. O fenômeno de elétrons saindo do metal devido ao recebimento deste de energia pelo aquecimento do material é chamado de “emissão termiônica” (Guile, 1970; Vick *et al.*2002). Quanto maior for a função de trabalho do material, maior deverá ser a temperatura necessária para a emissão de uma certa quantidade de elétrons por unidade de tempo e de área superficial do cátodo.

A densidade de corrente (J) resultante do efeito termiônico pode ser estimada pela equação de Richardson-Dushman (Eq.3.2) (Guile, 1970):

$$J = AT^2 \cdot \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right) \quad \text{Eq. 3.2}$$

Onde:

A = Constante que vale entre $6-7 \times 10^5 \text{ Am}^{-2}\text{K}^{-2}$ para a maioria dos metais.

T = Temperatura (K).

e = Carga do elétron ($1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$).

ϕ = Função termiônica de trabalho do material (V).

k = Constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$).

De acordo com a equação 3.2 pode-se verificar que a densidade de corrente para a emissão termiônica depende criticamente da temperatura da superfície do cátodo. Logo, a aplicação desta equação mostra que a emissão termiônica pode se aplicar para materiais refratários, como tungstênio e o carbono, mas que este mecanismo não deve ter uma participação importante na emissão de elétrons em cátodos dos metais mais utilizados em componentes soldados como ferro e o alumínio. (Guile, 1970; Lancaster, 1986; Jonsson, *et al.* 1995; Machado, 1996; Ushio, 1988).

3.4.2 - Emissão não termiônica

A maioria dos materiais utilizados em soldagem vaporiza em temperaturas bem menores do que as requeridas para a geração das densidades de correntes utilizadas neste processo através de emissão termiônica. Nesta condição, observa-se a formação de pontos catódicos que apresentam características diferentes das discutidas no item anterior. Eles se formam em grande número na superfície do cátodo, sendo caracteristicamente móveis, com vários pontos se formando de forma errática e de curta duração sobre o eletrodo. Contudo, os fenômenos relacionados com este tipo de cátodo são bem menos compreendidos do que a emissão termiônica.

Diversos mecanismos foram propostos para explicar a emissão não termiônica de elétrons, existindo ainda dúvidas sobre qual ou quais mecanismos operam em uma dada situação. De acordo com Guile e Juttner, (1980), Lancaster (1986) e Machado (1996), existem pelo menos três tipos de cátodos não termiônicos (também chamados “frios”), os quais são: (a) Vapor, se formando sobre metais sem filme de óxidos sobre a superfície; (b) Tunelamento, sobre camadas finas de óxidos (menor que 10 nm); (c) chaveamento (“switching”), sobre camadas mais espessas de óxidos (acima de 10 nm).

Estudos experimentais com o uso de filmagens de alta velocidade e observação por microscópica eletrônica de varredura, das marcas do arco formadas na superfície do cátodo (Jutner, 2001a e b) indicam que cátodos não termiônicos são caracterizados pela formação e decaimento muito rápido (durações da ordem de 1 a 10^2 ns) de inúmeros pontos microscópio de emissão. A densidade de corrente nestes sítios é estimada entre

2×10^{11} e 10^{14} A/m², muito superior aos valores associados com a emissão termiônica (10^6 a 10^8 A/m²). Os pontos de emissão tendem a se agrupar em manchas móveis e brilhantes na superfície do cátodo. Camadas superficiais de óxidos podem ser destruídas pela ação das manchas catódicas.

Existem fortes evidências de que, na soldagem a arco com proteção gasosa e, possivelmente, com proteção de fluxo, a presença de filmes de óxidos de espessura microscópica na superfície do cátodo desempenha um papel importante na emissão não termiônica de elétrons. Embora o mecanismo desta emissão não seja completamente conhecido, aparentemente envolve a formação de campos elétricos extremamente intensos na camada de óxido, resultante da adsorção de íons positivos, o que leva a formação de filetes condutores no óxido, emissão de elétrons, destruição da camada neste local e, conseqüentemente, do ponto de emissão (Juttner, 2001a)

Em ambientes em que a camada de óxido não pode ser regenerada (por exemplo, em vácuo) mecanismos alternativos de emissão não termiônica de elétrons parecem operar após a destruição da camada de óxido. Existem evidências de que, também na soldagem, mecanismos diferentes de emissão de elétrons podem operar, ou competir entre si, e resultar em perturbações no comportamento do arco (Modenesi, 1990, Tong *et al.* 2005).

3.5 - LIMPEZA CATÓDICA

Limpeza, desintegração ou ataque catódico é um fenômeno no qual é evidente a remoção da camada de óxido da superfície do metal pela ação de um arco incidindo nesta superfície (Pattee *et al.* 1968a). Pattee *et al.* (1968a e 1968b) observaram que o fenômeno da limpeza catódica ocorre quando um jato de gás com íons positivos incidem na superfície do metal durante a soldagem e que ela é praticamente insensível à velocidade de soldagem. Eles propuseram também que o fluxo de íons, e não a emissão de elétrons, seria responsável pela limpeza catódica. Anteriormente a eles, Gibson e Rothschild (1948) já atribuíram a ação da limpeza catódica à erosão do cátodo. Como

agente responsável pela remoção dessas partículas, eles sugeriram a emissão de elétrons do cátodo da superfície do metal. Já Herbst (1948) e Pumphrey (1955) sugeriram que a remoção de óxidos é o resultado de bombardeamento de íons positivos no cátodo. Estes autores compararam esse efeito ao jateamento de areia. Eles observaram que não existe um claro efeito da limpeza catódica quando se usa hélio como gás de proteção e, quando se usa argônio como proteção, a marca da limpeza é evidente. Isto foi associado ao tamanho das partículas que estão sendo bombardeadas na superfície do metal, uma vez que o peso atômico do argônio é 10 vezes maior do que o do hélio.

De acordo com Patte *et al.*(1968a), as características principais da limpeza catódica são resumidas da seguinte forma:

- ✓ A limpeza catódica ocorre quando a peça de trabalho está conectada ao pólo negativo da fonte.
- ✓ A limpeza catódica é fortemente evidenciada com o uso de argônio como gás de proteção e reduzida quando se usa hélio como proteção.
- ✓ A limpeza catódica durante a soldagem é mais efetiva nas superfícies expostas ao arco.
- ✓ A largura da região de limpeza catódica aumenta com o aumento da corrente e da taxa de fluxo do gás de proteção.
- ✓ A limpeza catódica é relativamente insensível à velocidade de soldagem.

Dos itens descritos acima, estes autores destacam os dois primeiros como os mais significativos para a ocorrência do mecanismo de limpeza catódica.

3.6 - TRANSFERÊNCIA METÁLICA

Uma das características mais relevantes do processo de soldagem a arco em que há o uso de um metal de adição é a forma como se dá a transferência deste metal para a peça de trabalho. O modo de transferência influi diretamente nos aspectos operacionais, em particular na eficiência de deposição, no nível de respingos e fumos, na capacidade do processo ser utilizado fora da posição plana, no formato dos cordões enfim, na

estabilidade e no desempenho operacional (Norrish e Richardson, 1988; Kim e Eagar, 1993, Heald *et al.* 1994).

Este assunto tem sido estudado desde a introdução dos processos de soldagem com eletrodos consumíveis. O fenômeno da transferência metálica em soldagem a arco e especialmente os mecanismos que a controlam receberam considerável atenção entre as décadas de 1950 e 1960, quando técnicas de filmagem de alta velocidade foram usadas para investigar o arco elétrico do processo MIG (Lancaster, 1987; Bálsamo 2000a).

Pela análise dos diversos processos de soldagem disponíveis, foi constatado que existem vários modos de transferência. Além disso, para um dado processo o modo de transferência depende das condições específicas de soldagem, ou seja, da combinação dos seguintes fatores: a) corrente e tensão de soldagem; b) polaridade do eletrodo; c) material do eletrodo; d) diâmetro do eletrodo; e) distância entre o bico de contato e a peça de trabalho (CTWD); f) tipo de gás de proteção; g) tipo de revestimento do eletrodo ou fluxo; h) característica estática das fontes; i) pressão ambiente (Lesnewich, 1958; AWS, 1991; Machado, 1996; Jones *et al.* 1998). Estes fatores não são certamente, os únicos a influírem no fenômeno em questão, o que demonstra a grande complexidade do mesmo (Scotti, 1998).

Várias teorias foram propostas para estudar a transferência metálica. As mais usadas para o estudo da transferência no processo GMAW baseiam-se no balanço estático de forças que atuam sobre a gota formada na ponta do eletrodo, e no estudo de instabilidades que podem ocorrer em cilindros líquidos percorridos por corrente elétrica, esta última conhecida como “Pinch Instability Theory” (Amson, 1962; Waszink, 1983; Lancaster, 1987).

3.6.1 - Teoria do equilíbrio das forças estáticas

Esta teoria leva em consideração a resultante das forças estáticas atuantes sobre o destacamento da gota metálica, isto é, o destacamento da gota ocorre quando as forças que o favorecem excedem as forças de retenção (FIG. 3.7). Além disso, o fenômeno de

destacamento da gota deverá ser considerado como dependente do tempo. Kim e Eagar (1993), encontraram variações menores que 10% entre os resultados teóricos e os experimentais, o que reforça o uso desta teoria.

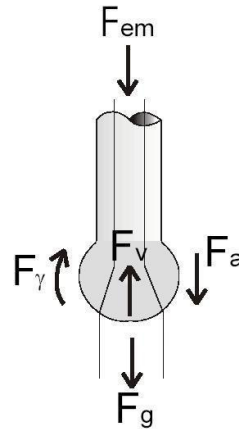


FIGURA 3.7 - Balanço estático das forças atuantes na gota (Barra, 2003)

A condição necessária para o destacamento da gota metálica da ponta do eletrodo até a poça de fusão, considerando a posição plana, pode ser dada pela equação 3.3.

$$F_{em} + F_g + F_a > F_\gamma + F_v \quad \text{Eq. 3.3}$$

Onde :

- F_{em} = Força eletromagnética
- F_g = Força devido à aceleração da gravidade
- F_a = Força de arraste de gases
- F_γ = Força devido a tensão superficial
- F_v = Força de reação devido ao jato de vapor de metal

✓ **Força devido à aceleração da gravidade (F_g)**

A influência desta força sobre o destacamento da gota, a favor ou contra, dependerá da posição de soldagem (equação 3.4).

$$F_g = m_g \times g \quad \text{Eq. 3.4}$$

Onde :

m_g = massa da gota

g = aceleração da gravidade

✓ Força eletromagnética ou de Lorentz (F_{em})

A força eletromagnética pode ser expressa pela expressão:

$$F_{em} = \vec{j} \times \vec{B} \quad \text{Eq. 3.5}$$

Onde:

J = densidade de corrente

B = Campo magnético

Integrando a equação 3.5 na superfície condutora da gota e assumindo uma densidade de corrente uniforme, Amson (1962) obteve a seguinte expressão para a força eletromagnética (Eq.3.6).

$$F_{em} = \frac{\mu_o \times I^2}{4\pi} \times f \quad \text{Eq. 3.6}$$

Onde :

F_{em} = Força eletromagnética

μ_o = Permeabilidade magnética do material

I = Corrente elétrica

f = Função da geometria do sistema

✓ Força de arraste de gases (F_a)

Esta força está ligada diretamente com a intensidade do fluxo de plasma no interior do arco. De acordo com a equação 3.7, o valor de F_a apresenta dependência com a composição do gás, com o tamanho da gota (considerada esférica) e com a velocidade do fluxo no interior do arco (Norrish *et al.* 1988; Kim *et al.* 1993).

$$F_a = \frac{\pi \times \rho \times v_g^2 \times r_g^2 \times c_a}{2} \quad \text{Eq. 3.7}$$

Onde :

ρ = Densidade do gás

v_g = Velocidade do gás

r_g = raio da gota imersa no gás

c_a = coeficiente de arraste (depende do n° de Reynolds e, em menor escala, da corrente)

✓ Força devido à tensão superficial (F_γ)

É uma das mais importantes para manter a gota em contato com o arame, qualquer que seja a posição de soldagem. De acordo com Kim e Eagar (1993), uma expressão simples para a força associada com a tensão superficial é dada pela equação 3.8.

$$F_\gamma = 2 \times \pi \times \gamma_s \times r_a \quad \text{Eq. 3.8}$$

Onde :

γ_s = Tensão superficial

r_a = Raio do arame

✓ **Força de reação devido ao jato de vapor de metal (F_v)**

Para altos valores de corrente e, particularmente, na presença de elementos de elevada pressão de vapor no consumível, a vaporização destes elementos pelo arco pode gerar um jato que exerce uma força de reação sobre a gota de metal de adição. Adicionalmente, quando a raiz do arco fica restrita a uma pequena área sob a gota de metal de adição, esta também pode gerar forças de reação na gota.

3.6.2 - Classificação dos modos de transferência metálica

Diversas formas de transferência de metal podem ser observadas nos diversos processos de soldagem. De acordo com a nomenclatura do “*International Institute of Welding*” (IIW) (Lancaster, 1986), a transferência metálica pode ser classificada em três grupos principais: “Free-flight transfer” ou transferência por voo livre, “Bridging transfer” ou transferência por contato e “Slag-protected transfer” ou transferência protegida por escória, conforme esquematizado na TAB. 3.2 e ilustrado na FIG 3.8.

TABELA 3.2 – Formas usuais de transferência metálica de acordo com o IIW.

TIPO DE TRANSFERÊNCIA	PROCESSO DE SOLDAGEM
1 – TRANSFERÊNCIA POR VÔO LIVRE	
1.1 – Globular	
1.1.1 – Gota (Drop)	GMAW – Baixa corrente
1.1.2 – Repelida (Repelled)	GMAW com proteção de CO ₂
1.2 – Spray	
1.2.1 – Projetada (Projected)	GMAW – Corrente intermediária
1.2.2 – Spray em Fluxo (Streaming)	GMAW – Corrente média
1.2.3 – Rotacional (Rotating)	GMAW – Corrente elevada
1.3 – Explosiva	SMAW
2 – TRANSFERÊNCIA POR PONTE	
2.1 – Curto-Circuito (Short-Circuiting)	GMAW – Arco “curto”
2.2 - Sem Interrupção (Without Interruption)	GTAW com alimentação contínua
3 – TRANSFERÊNCIA PROTEGIDA POR ESCÓRIA	
3.1 - Fluxo Guiado (Flux-Wall Guided)	SAW
3.2 – Outros modos	SMAW, FCAW, ESW, etc.

Fonte: Lancaster, 1986.

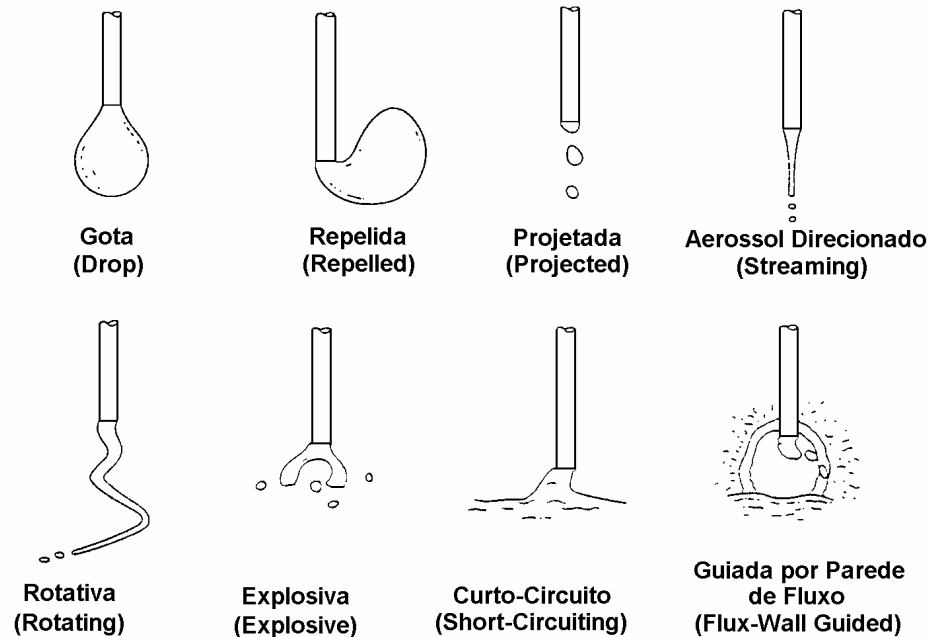


FIGURA 3.8 – Modos de transferência de acordo com a classificação do IIW (Lancaster, 1986).

3.6.3 – Métodos de identificação dos modos de transferência metálica

Como já citado anteriormente, existem diversas classificações do modo de como a gota metálica se destaca da ponta do arame até a poça de fusão. O acompanhamento destes modos de transferência pode ser feito através da análise de oscilogramas de corrente e tensão do processo, da filmagem de alta velocidade da região do arco ou através da combinação destas duas técnicas, além de diversas outras (Lancaster, 1987; Bálamo, 2000(b); Vilarinho, 2000).

De acordo com Allemand (1985), Bálamo (2000a e b) e Vilarinho (2000), para estudar a transferência metálica através da visualização das gotas transferidas se faz necessária uma instrumentação (FIG. 3.9) que permite visualizar quantidades mínimas de metal (gotas) viajando a uma velocidade muito alta, o que pode ser conseguido com uma filmagem ou fotografia de alta velocidade com a técnica “Shadowgrafia”. A utilização de filme fotográfico torna esta metodologia muito limitada devido à necessidade de

revelação do filme, o que gera uma certa demora entre o experimento e a análise dos resultados. Além disso, fornece informações somente de um instante do processo, não possibilitando a observação de sua evolução, fazendo com que muitos eventos transientes não sejam identificados. Logo, com a utilização de uma câmera de alta velocidade (1000 quadros/s ou mais), há possibilidade de se medir com precisão, tanto a taxa de transferência metálica, quanto o tamanho das gotas transferidas.

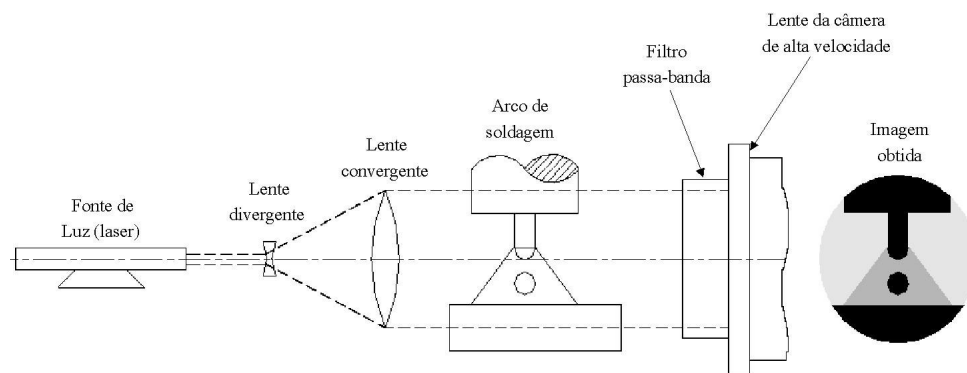


FIGURA 3.9 – Representação esquemática do princípio da Shadowgrafia aplicado na soldagem (Vilarinho, 2000).

Alguns autores sincronizam as imagens obtidas por filmagem de alta velocidade com os oscilogramas de corrente e tensão do processo, utilizando o sinal do obturador da câmera (FIG. 3.10). Assim, visualizando quadro a quadro da filmagem obtida com os sinais de tensão e corrente de soldagem, pode-se determinar o momento exato da transferência metálica. A FIG. 3.11 mostra uma seqüência de quadros da filmagem de alta velocidade em sincronismo com os oscilogramas de corrente e tensão de soldagem, obtidos com o processo MIG - MAG com transferência do tipo globular.

No entanto, esta técnica possui algumas limitações como: resolução de imagem da câmera e sistema de aquisição de sinais com alta taxa de aquisição. Uma descrição mais detalhada desta técnica pode ser obtida nas referências: Johnson *et al.* 1991; Subramaniam, 1998; Bálsamo, 2000(a); Vilarinho, 2000.

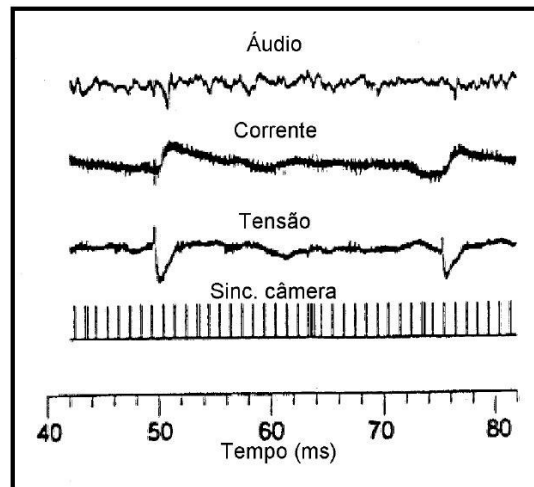


FIGURA 3.10 – Sinais de tensão, corrente e som sincronizados com o sinal da câmera (Johnson *et al.* 1991).

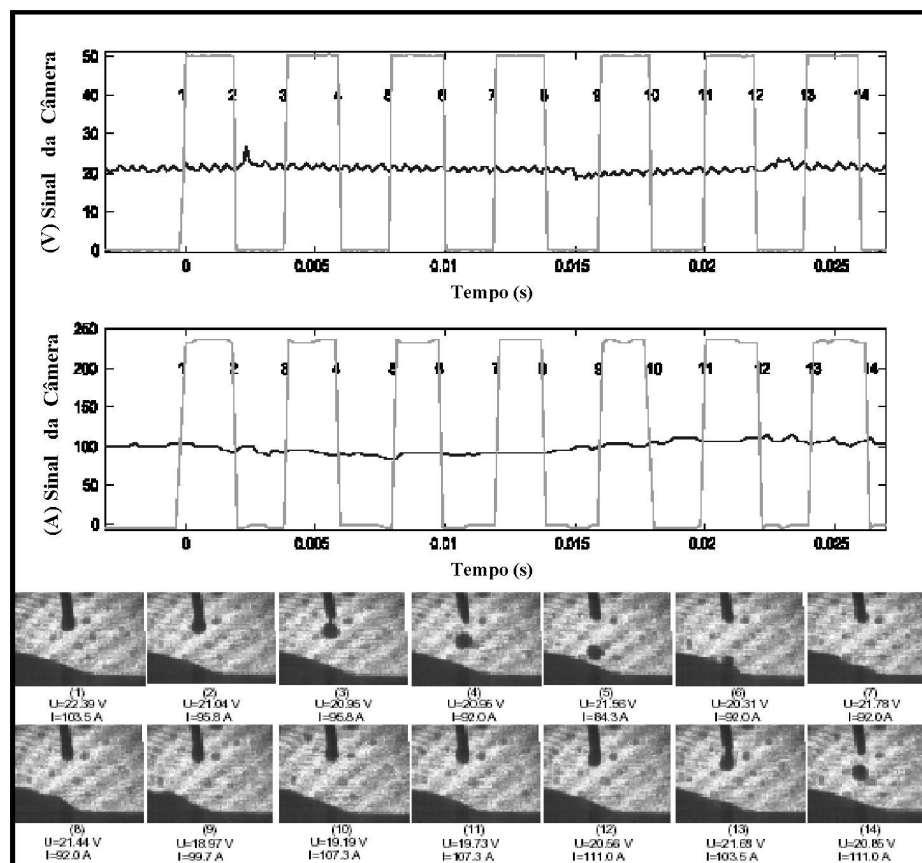


FIGURA 3.11 – Seqüência de quadros da filmagem de alta velocidade em sincronismo com os oscilogramas de corrente e tensão de soldagem, obtidos com o processo MIG - MAG com transferência do tipo globular. (Vilarinho, 2000).

3.6.4 - Tipos de transferência de metal no processo GMAW

Para o processo GMAW convencional, com eletrodo positivo e gás de proteção a base de argônio, distinguem-se três modos de transferência básicos, isto é: (a) transferência globular, (b) transferência por curto-circuito e (c) transferência por “spray” ou aerossol. A FIG. 3.12 mostra, esquematicamente, os campos operacionais dessas três modos principais de transferência em função da corrente e da tensão de soldagem.

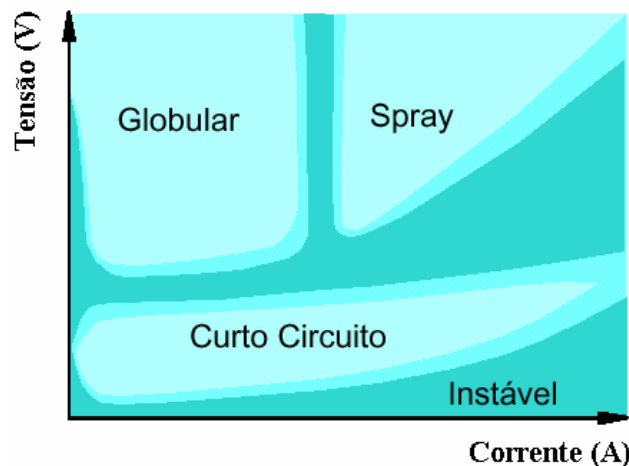


FIGURA 3. 12 – Condições de corrente e tensão para as diferentes forma de transferência na soldagem GMAW com um gás de proteção a base de argônio (desenho esquemático) (Modenesi 2004).

Na região indicada como instável, que ocorre para valores de tensão bem baixos, tipicamente inferiores a 15 Volts, um grande volume de respingos é gerado e pouco calor é transferido ao metal de base, não permitindo a fusão adequada deste e do arame.

Deve-se notar, ainda, que a transição entre alguns destes modos de transferência ocorre dentro de uma certa faixa, que pode ser relativamente grande, de tensão e corrente, ou seja, de uma forma mais ou menos gradual (Silva, 1995).

a) *Transferência Globular*

A transferência globular é caracterizada pela formação de grandes gotas de metal fundido (cujo diâmetro é tipicamente superior ao diâmetro do eletrodo) que se transferem para poça de fusão a uma baixa frequência (10^0 a 10^1 gotas/s).

Na transferência globular, o metal líquido forma-se na ponta do arame pela sua fusão e mantém-se preso a este por ação da tensão superficial. Com o aumento do volume da gota, o seu peso aumenta e acaba por ocasionar a sua separação do arame e a gota do metal líquido se transfere para a poça de fusão por ação da gravidade. Oscilogramas típicos de corrente e tensão de soldagem para a transferência globular no processo GMAW são mostrados na FIG. 3.13 (Modenesi, 2004).

Quando se utiliza argônio puro ou misturas a base deste gás, a transferência globular ocorre para valores elevados de tensão e densidade de corrente relativamente baixa, isto é, abaixo daqueles de transição globular-spray (FIG.3.12). Entretanto, quando se utiliza dióxido de carbono e hélio este tipo de transferência ocorre em toda a faixa de corrente.

Para outros gases, sobretudo misturas a base de hélio ou dióxido de carbono, este tipo de transferência é também predominantemente para níveis relativamente elevados de corrente. No caso de dióxido de carbono, a transferência globular pode ser repulsiva com grande geração de respingos. Para misturas a base de argônio, a transferência globular ocorre de forma relativamente estável.

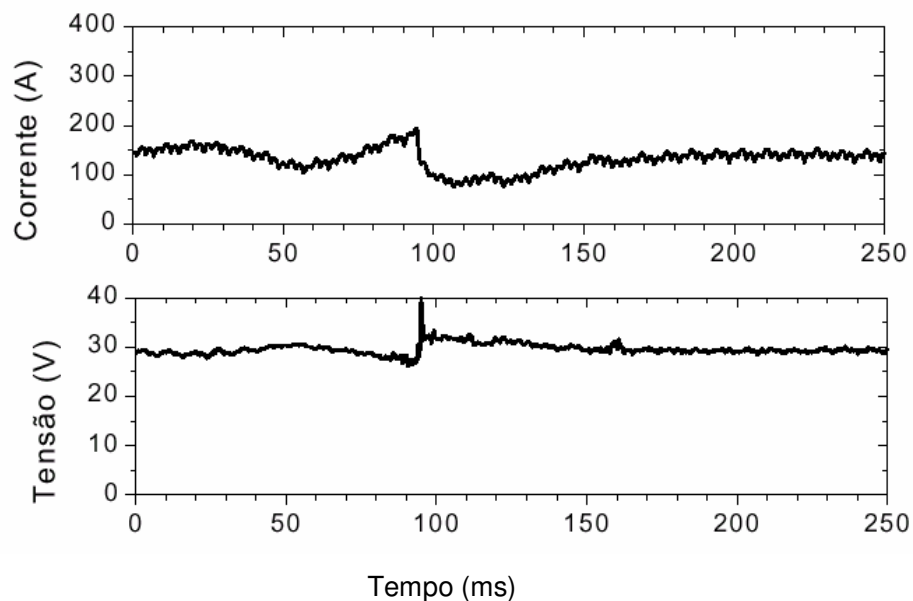


FIGURA 3.13 – Oscilogramas de tensão e corrente de um processo com transferência globular. Arame ER 70S6 de 1,2 mm de diâmetro, Gás CO₂ (Modenesi, 2004).

b) *Transferência por curto-circuito*

Na transferência por curto-circuito, o comprimento do arco é diminuído de forma que a gota formada na ponta do arame toca a poça de fusão da solda antes que seja destacada pela ação da gravidade como no modo globular. Com isto, ocorre um curto circuito elétrico e o arco é extinto. Com o curto-circuito, a corrente tende a se elevar rapidamente, aumentando a fusão do eletrodo por efeito joule e, ao mesmo tempo, o metal fundido tende a se transferir para a poça de fusão por ação da tensão superficial e de forças de origem magnética. Com isto, o curto-circuito é rompido, o arco é restabelecido e este processo é repetido ciclicamente. Em condições normais de operação deste tipo de transferência, aproximadamente 20 a 200 curtos podem ocorrer em um segundo (Smith, 1962; AWS, 1991).

Assim, neste modo de transferência, o processo alterna entre condições de arco, no qual há formação da gota na ponta do arame e fusão do metal de base (formação da poça de fusão), e condições de curto-circuito, quando a gota é efetivamente transferida do arame para a poça, FIG. 3.14.

Durante o curto-circuito, devido à alta corrente presente, o processo de transferência da gota pode se dar de forma mais ou menos explosiva, tendendo a gerar um elevado nível de respingos. Por outro lado, se a corrente é elevada de forma muito lenta, o arame sólido pode acabar por mergulhar na poça de fusão antes da ruptura da ponte líquida e o processo ser interrompido com o arame superaquecido formando um emaranhado não fundido sobre o metal de base (Modenesi, 2004).

Durante um curto-circuito, a intensidade de energia cedida à peça é relativamente baixa e, portanto, a soldagem com este tipo de transferência tende a produzir pouca fusão do metal de base. Em materiais de grande espessura ou elevada condutividade térmica, isto pode favorecer a ocorrência de falta de fusão, contudo, na soldagem de peças de pequenas espessuras, esta característica pode, por outro lado, ser vantajosa (Silva, 1995).

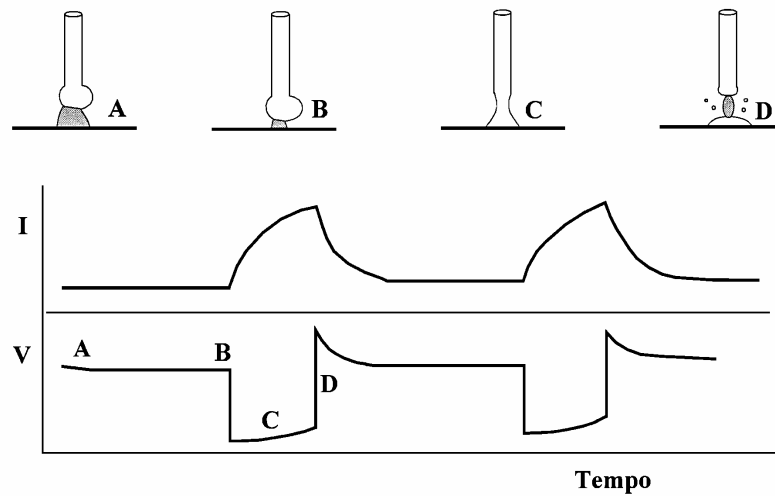


FIGURA 3.14 – Transferência por Curto-Circuito (Modenesi, 2004).

c) *Transferência spray ou aerossol ou goticular*

O modo de transferência spray ou aerossol ocorre para correntes acima da chamada corrente de transição (I_c) e tensões do mesmo nível, ou superiores, às usadas no modo globular (AWS, 1991; Cunha e Grundmann, 1995). Nestas condições, o arco elétrico envolve completamente a gota na ponta do eletrodo e há uma queda no diâmetro destas e, conseqüentemente, um aumento na frequência de transferência. Tipicamente, as gotas transferidas são de diâmetro menor que o do arame, sendo a condição de igualdade entre o diâmetro da gota e do arame usada para definir a corrente de transição (Kim e Eagar, 1993).

A corrente de transição depende de inúmeros fatores, particularmente, da composição e do diâmetro do eletrodo além do seu comprimento energizado e do tipo de gás de proteção (Lesnewich, 1958; Cary, 1998).

A transferência spray ocorre usualmente de forma muito estável, com mínimas perturbações do arco e poucos respingos. Acredita-se que a força principal responsável pela transferência spray seja magnética, de origem similar à associada com a formação do jato de plasma .

Uma característica do modo de transferência spray é a penetração em forma de dedo. Esta penetração tende a ser relativamente profunda e localizada no centro do cordão, mas ela é afetada por forças magnéticas que podem causar o seu desvio para um dos lados do cordão.

Na soldagem GMAW, a transferência spray ocorre basicamente com gases de proteção à base de argônio com eletrodo positivo. Este tipo de transferência pode ser utilizado em qualquer tipo de metal e ligas devido às características inertes da proteção de argônio. Entretanto, a aplicação do processo para peças finas pode ser difícil devido as altas correntes necessárias para produzir um arco spray. A resultante das forças e a quantidade excessiva de calor pode perfurar chapas relativamente finas em vez de soldá-las. Ainda, a alta taxa de deposição pode produzir uma poça de fusão muito larga para ser suportada pela tensão superficial na posição vertical e sobre cabeça.

Hoje em dia, essas limitações de espessura da peça e posição de soldagem podem, em princípio, ser superadas com a utilização da soldagem com corrente pulsada.

3.7 - ESTABILIDADE

3.7.1 - Estabilidade operacional do processo

Em processos de soldagem com transferência metálica, a estabilidade do próprio arco e da transferência de metal através deste é de vital importância na estabilidade geral do processo, pois estes dois fenômenos são interligados de modo que a instabilidade no comportamento de um deles provoca, em geral, a instabilidade no outro e de todo o processo.

A estabilidade, em seu significado físico, é uma propriedade geral de sistemas mecânicos, elétricos e aerodinâmicos, pela qual o sistema retorna ao estado de equilíbrio após sofrer uma perturbação (Meriam, 1999). Já o termo “estabilidade operacional” é usado na soldagem para designar genericamente condições de bom ou mal “funcionamento” da operação (Dutra, 1989).

Não existe uma metodologia única para avaliação da estabilidade de processos de soldagem, pois ela é afetada pela maioria das variáveis de soldagem (Machado, 1996; Suban e Tusek, 2003). Há algum tempo, a estabilidade era tratada apenas qualitativamente, devido principalmente à falta de recursos tecnológico para quantificá-la. Ela era determinada pelo soldador através do ruído que se gerava, ou pela quantidade de respingos, de acordo com sua experiência (Mita, 1988; Vaidya, 2002). Atualmente, com o auxílio de diferentes equipamentos e programas, a avaliação da estabilidade do processo é feita, em geral, com base nas variações dinâmicas dos sinais elétricos, sonoros e luminosos emitidos pelo arco (Lucas, 1994) e, também, por filmagens de alta velocidade da transferência metálica, a qual pode ser sincronizada com os sinais de corrente e tensão (Bálsamo *et al.* 2000a; Vilarinho, 2000)

De acordo com Suban (2003), a estabilidade do processo de soldagem é propriamente estabilidade do arco e este autor ainda afirma que uma operação de soldagem a arco só é estável se o comprimento do arco for constante, se a transferência de metal for uniforme e sem presença de respingos. Porém, o conceito de estabilidade é definido distintamente por diferentes autores, podendo ser associada, por exemplo, ao equilíbrio entre a velocidade de alimentação do arame e a sua velocidade de fusão; formato regular do cordão; grau de rigidez do arco durante a soldagem e à frequência de oscilação da poça de fusão (Amin, 1983, Scotti, 1998, Den Ouden e Hemans, 1999, Vaidya, 2002). Estas abordagens podem ser, em alguns casos, complementares, mas não traduzem o sucesso de uma solda. Após analisar todos estes conceitos, a autora deste trabalho constatou que a estabilidade de um processo de soldagem se dá quando o resultado alcançado é uma operação com regularidade na transferência metálica, independente do tipo, produzindo o mínimo de respingos.

3.7.2 - Estabilidade operacional no processo GMAW

Na soldagem com eletrodo consumível, particularmente na soldagem GMAW, o comportamento da raiz do arco tem um efeito significativo na estabilidade do processo. Na soldagem dos aços, em geral, quando pequenas adições de gases oxidantes são feitas em uma proteção gasosa inicialmente inerte, observa-se uma redução da mobilidade da

raiz do arco, o que melhora a estabilidade do processo (Hilton e Norrish, 1988). Este efeito é associado com a recomposição da camada de óxido próxima da raiz do arco que é continuamente destruída pela emissão de elétrons para o arco (Pattee *et al.* 1968b). Mas não só o comportamento da raiz do arco afeta a estabilidade, a transferência de metal de adição pode exercer uma influência importante no comportamento do arco.

Como já citado no item 3.6, dentre os modos de transferência metálica presentes no processo GMAW, nota-se que, de uma forma geral, em termos operacionais (sobretudo em relação aos níveis de respingos e fumos), para misturas de proteção a base de argônio, que a transferência spray é bastante estável e a transferência globular e por curto-circuito tende a ser mais instável, tendendo a gerar o maior nível de respingos. Sob este aspecto, portanto, a transferência spray seria a preferencialmente usada.

As diferenças de estabilidade, associadas com os diferentes modos de transferência, podem ser visualizadas nos oscilogramas de tensão e corrente típicos de cada modo. Na transferência globular ou spray, os sinais de tensão e corrente são relativamente constantes com uma pequena dispersão em torno dos valores médios. No modo de transferência globular, em função do maior tamanho das gotas, esta dispersão é geralmente maior que em spray. Já no modo curto-circuito, as ocorrências dos curtos causam variações drásticas nos sinais de tensão de soldagem. Estas diferenças de comportamento entre cada modo podem fornecer uma base para controle em tempo real do modo de transferência. Estudos com este método indireto de análise permitem avaliar a estabilidade operacional do processo e, conseqüentemente, auxiliar na determinação de condições ótimas de soldagem.

3.8 – INSTABILIDADE NO PROCESSO GMAW COM GASES DE BAIXO POTENCIAL DE OXIDAÇÃO

Existem na literatura alguns estudos relacionados com a ocorrência de instabilidade no processo GMAW, enfocando a mudança na transferência metálica durante a soldagem. Lucas e Amin (1975) verificaram a ocorrência de alterações no modo de transferência

associadas ao nível de desoxidação do arame. Em arames com maiores teores de oxigênio, os gases gerados causavam a explosão das gotas de metal durante a transferência, o que não ocorria para arames com menores teores de oxigênio. Agusa *et al.* (1981) estudaram o efeito da adição de cério no arame, visando melhorar a estabilidade do arco na soldagem de aço carbono com proteção por argônio puro. Os autores verificaram a ocorrência de transferência globular repulsiva junto com spray nas condições em que se esperava somente a ocorrência de transferência spray. Rodwell (1985) estudou, para aços carbono e inoxidáveis, a ocorrência de perturbações do arco, incluindo mudanças repentinas em seu comprimento, na corrente de soldagem e variações da geometria do cordão de solda no processo GMAW operando com transferência spray, que foram associadas com a contaminação da superfície do arame e do bico de contato. Em 1994, Modenesi e Nixon revelaram um novo fenômeno de instabilidade na soldagem GMAW de aços de baixo carbono, anteriormente não descrito de forma explícita na literatura. Este fenômeno de instabilidade ocorreria em condições que conduziriam usualmente a uma transferência de metal por spray e dependeria de vários fatores, tais como o comprimento do arco, composição do gás de proteção, características da fonte de soldagem, além da duração da soldagem. Perturbações na forma do arco e na transferência metálica foram também associadas a este processo de instabilidade.

Modenesi e Nixon (1994) relataram que, quando a soldagem era realizada com fontes de tensão constante, em condições que favoreceriam o aparecimento da instabilidade relatada, o processo tendia a se iniciar operando de forma instável, com transferência globular repulsiva e elevada formação de respingos, mas mudava para uma operação estável algum tempo após o início da soldagem. Fortes flutuações no comprimento do arco e nos níveis de corrente eram observadas durante a transição da operação instável para a estável, resultando em mudanças facilmente perceptíveis em oscilogramas de tensão e corrente do processo (FIG.3.15).

Ainda segundo Modenesi e Nixon, para os testes com fonte de corrente constante, variações no comprimento do arco devidas à instabilidade não foram observadas para uma mesma condição operacional, mas alterações no modo de transferência e na

aparência do arco ocorreram quando uma mudança neste comprimento era feita, através da variação do CTWD, havendo uma clara tendência para as condições de maior instabilidade ocorrerem para condições operacionais que favorecessem um menor comprimento do arco. A FIG. 3.16 mostra a existência de valores diferentes de tensão de operação do arco que foram associados com a operação instável (maior tensão) e estável (menor tensão). Esses autores relacionaram o aparecimento da instabilidade diretamente com o potencial de oxidação do gás de proteção, verificando-se um claro aumento da instabilidade do processo quando o teor de oxigênio no gás de proteção era menor. Aspectos adicionais das características gerais do fenômeno de instabilidade no processo GMAW encontrados na literatura, serão apresentados juntamente com a discussão dos resultados obtidos neste trabalho, no capítulo 6.

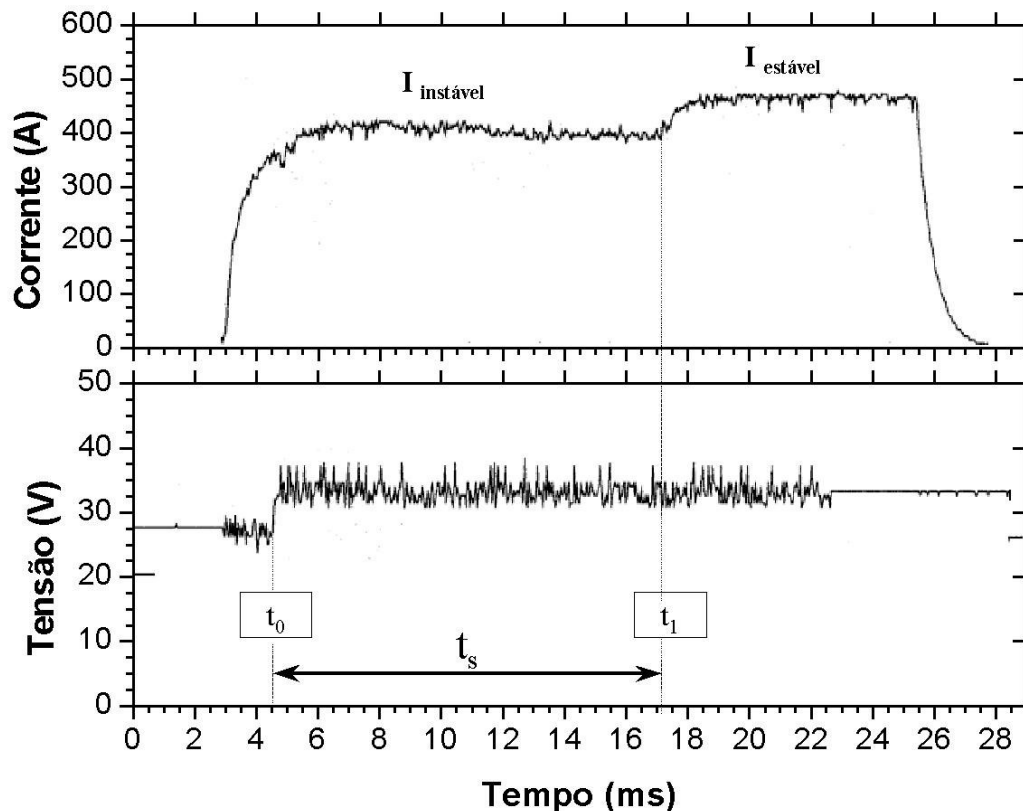


FIGURA 3.15- Resultado típico de testes usando tensão constante: t_0 – instante de início do teste, t_1 – transição de modo de operação. (Modenesi e Nixon, 1994).

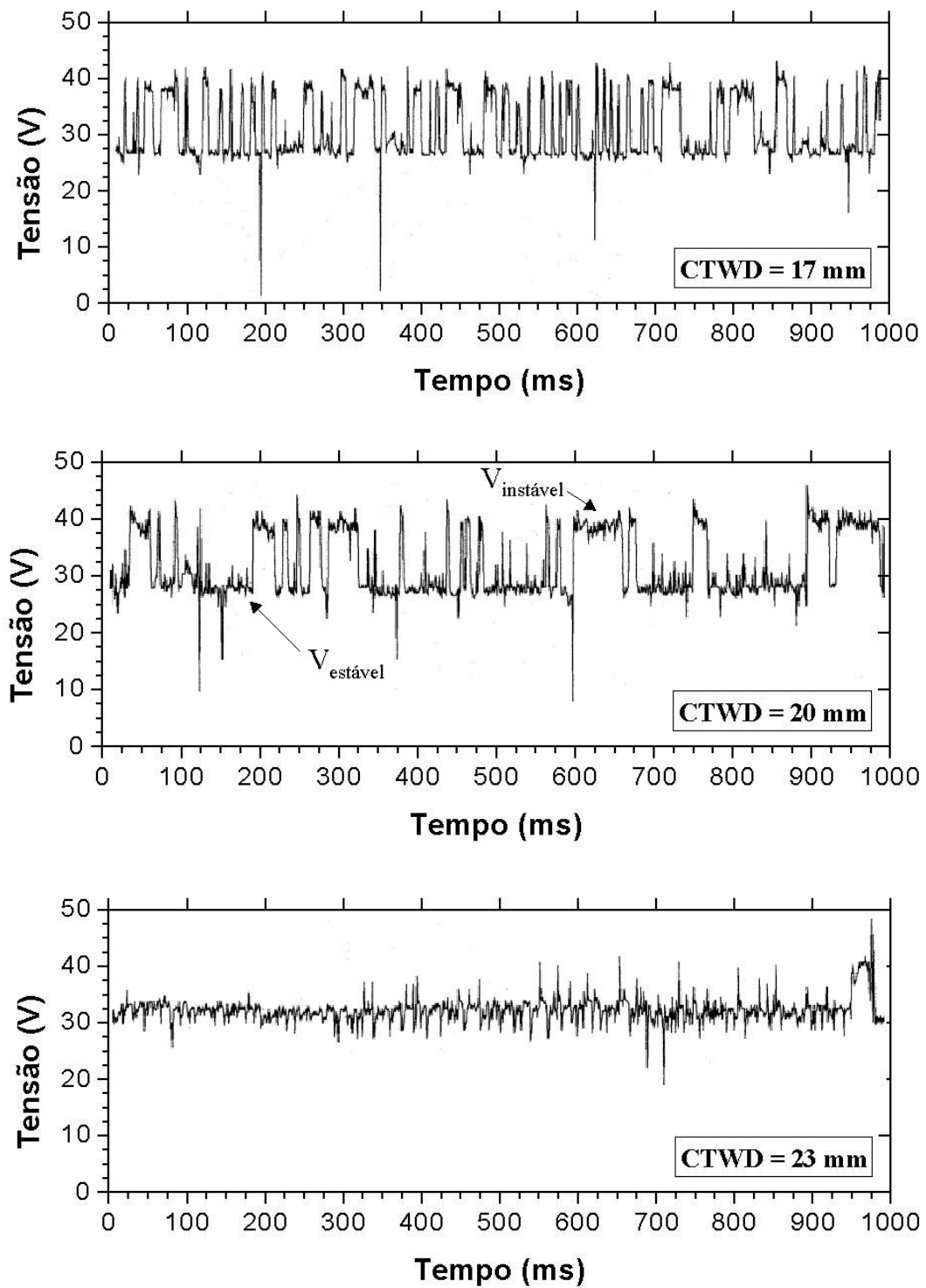


FIGURA 3.16 – Valores de tensão para diferentes CTWD (h) obtidos nos testes com corrente constante (Argônio puro e Corrente de 260A) (Modenesi e Nixon, 1994).

Para explicar estes fenômenos, Modenesi e Nixon (1994) propuseram um modelo (FIG. 3.17) que considera a competição entre mecanismos alternativos para a emissão de elétrons na região catódica do arco. Na ausência de uma quantidade suficiente de oxigênio, a recomposição da camada de óxido no metal de base seria dificultada e a destruição desta afastaria da poça de fusão dificultando a manutenção deste processo de soldagem. Nesta condição, um mecanismo alternativo de emissão de elétrons, baseado na formação de vapores metálicos, tornaria operativo. Este mecanismo concentraria a raiz do arco em um ponto da poça de fusão, mudando a forma do arco e criando um jato de plasma com sentido oposto ao usual e, desta forma, dificultando a transferência de metal.

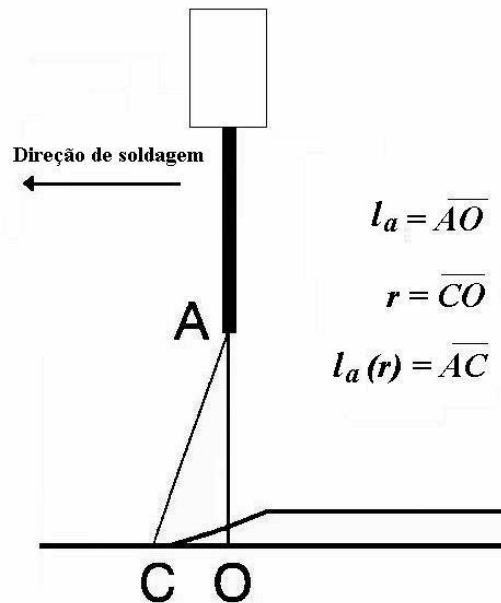


FIGURA 3.17 – Representação esquemática da região do arco no processo MIG (Modenesi e Nixon, 1994).

Na FIG. 3.17, o ponto *C* indica a localização usual da mancha catódica, sendo a distância *r* o seu deslocamento em relação ao eixo do eletrodo/arco. Quando o gás de proteção é suficientemente rico em oxigênio a mancha catódica se localiza na borda da poça de fusão e, neste caso, *r* assumirá o seu valor mínimo (*r_o*). Porém, se o teor de gases oxidantes não for suficientemente alto, a região catódica terá de se expandir para alcançar as áreas da peça ricas em óxidos e, assim, *r* será maior que o valor mínimo.

Uma estimativa de r seria obtida através da área de óxido consumida por unidade de tempo para sustentar a corrente de soldagem.

Baseado nos aspectos discutidos acima, tanto $I_a(r)$ e $\phi [\tan^{-1}(r/l_a)]$ deverão aumentar se r aumentar. Isso acontecerá se, por exemplo, diminuir o potencial de oxidação do gás de proteção. O modelo também mostra que ϕ aumentará se o comprimento do arco (l_a) diminuir. Logo, para operações com arco curto, ϕ poderá se tornar tão grande que seria impossível o arco preservar seu contato com a região catódica, tornando o processo inviável. Nesta condição, o arco poderia extinguir ou se manter a partir de um mecanismo de emissão de elétrons originários da poça de fusão.

Em 2005, Tong *et al.* observaram um aumento anormal na tensão do arco durante a soldagem GMAW de alumínio com polaridade variável. Estes autores relataram que, durante a soldagem, a tensão do arco aumentava aproximadamente 10 V após a mudança da polaridade do eletrodo do positivo para o negativo. A FIG. 3.18 mostra o oscilograma e alguns quadros da filmagem obtidos durante a soldagem de uma liga de Al-Mg, com arame de 1,2 mm de diâmetro, corrente de 100 A e tensão média de 18 V. O quadro A mostra o estado imediatamente antes da mudança da polaridade, indicando que a gota acabou de se destacar da ponta do arame, onde o metal fundido remanescente possui uma forma de ponte aguda. O quadro B mostra o estado imediatamente após a mudança da polaridade. Vê-se que a coluna de plasma é extremamente brilhante. Pode ser visto nos quadros C, D e E que a coluna do plasma gerada na ponta do eletrodo muda freqüentemente de forma enquanto varia o valor anormal da tensão do arco. Os quadros D e E mostram que o metal fundido remanescente na ponta do eletrodo move-se instavelmente como se forças estivessem sendo exercidas sobre ele. No quadro F, a ponta do eletrodo fica com uma forma esférica e pontos catódicos (pontos brilhantes) sobem para a superfície do eletrodo, onde óxidos existem. Neste momento o arco fica menos brilhante e a tensão do mesmo volta ao nível normal.

O mecanismo de geração da tensão anormal após a mudança de polaridade descrita por Tong, *et al.*(2005) é apenas uma suposição das observações relatadas acima, porém

estes autores concluíram que mudanças na tensão do arco nem sempre estão necessariamente ligadas a uma flutuação no comprimento do arco.

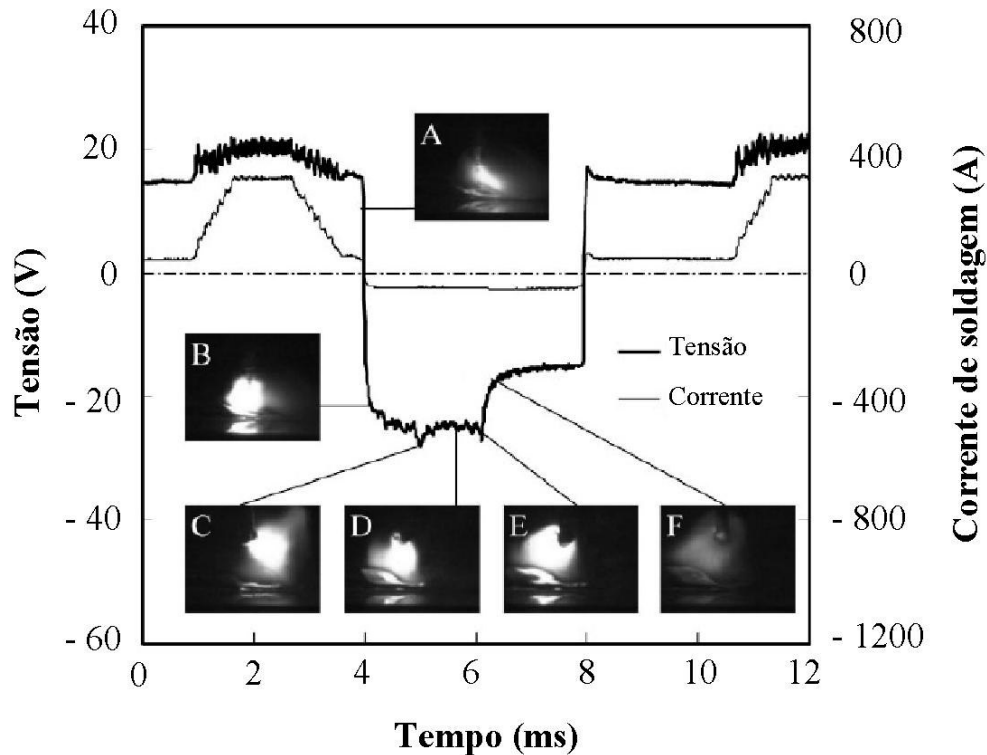


FIGURA 3.18 – Aumento anormal na tensão do arco após a mudança de polaridade do positivo para o negativo na soldagem MIG com inversão de polaridade (Tong *et al.* 2005).

A instabilidade relatada por Modenesi e Nixon (1994) e o aparecimento de uma tensão anormal após a mudança de polaridade relatada por Tong *et al.*(2005), podem ter uma importante influência nas condições operacionais na soldagem de aços ligados para os quais um baixo teor de componentes oxidantes no gás de proteção é necessário. Este fenômeno pode ter ainda um papel importante na soldagem de ligas não ferrosas, para as quais se trabalha com misturas inertes. Logo, um melhor conhecimento destes fenômenos permitirá a adoção, em equipamentos modernos de soldagem, de medidas corretivas para o seu controle. Além disso, o possível efeito destes fenômenos no formato do cordão, poderá ser utilizado, em situações controladas, para uma melhoria da produtividade do processo de soldagem GMAW.

CAPÍTULO 4

EQUIPAMENTOS E MATERIAIS

4.1 – EQUIPAMENTOS

4.1.1 – Fontes de soldagem

a) Fonte de energia VI – 400

Fonte fabricada pela White Martins, é um transformador-retificador, trifásico, com característica de tensão constante. A TAB. 4.1 apresenta os principais dados técnicos desta fonte.

TABELA 4.1 – Dados técnicos da fonte VI – 400.

Item	Valores de referência
Saída – ciclo de 100%	400 A - 34 V
Tensão em vazio	16 – 45 V
Tipo de Corrente	Contínua
Fator de potência com 400 A – 34V	98%

Fonte: Catálogo White Martins (1979)

b) Fonte de energia MTE DIGITEC 600

Na maioria dos testes realizados neste trabalho utilizou-se a fonte de energia MTE DIGITEC 600 do Instituto de Soldagem e Mecatrônica – LABSOLDA/UFSC. O fundamento desta fonte obedece, em princípio a estrutura de uma fonte transistorizada chaveada no secundário. Trata-se de uma fonte de energia para soldagem multiprocesso, que tem como objetivo reunir em uma mesma fonte, as características necessárias para possibilitar sua utilização em vários processos de soldagem. O número 600 indica o

valor em ampères da corrente máxima que o equipamento pode operar a 350 A com fator de trabalho de 100%. Um dos objetivos de utilização desta fonte foi à facilidade oferecida pela interface homem-máquina, pois o operador não necessita procurar no painel nenhum potenciômetro para ajuste das variáveis. Estas aparecem em conjuntos seqüenciais em um “display”, podendo ser selecionadas para ajuste mediante pressionamento das teclas situadas acima ou abaixo do local onde as variáveis aparecem no referido “display”.

A fonte MTE DIGITEC 600 é equipada com uma tocha refrigerada a água e um cabeçote de alimentação de arame STA-20D. Este alimentador permite que seja visualizado diretamente no painel de comando da fonte, a velocidade de alimentação do arame regulada pelo operador, numa faixa de 0,1 a 20,0 m/min. Permite ainda avançar ou retroceder o arame de alimentação com o objetivo de posicionar o mesmo na saída no bico de contato. Este cabeçote possui também um potenciômetro de aceleração que tem a finalidade de facilitar a abertura do arco e um potenciômetro de desaceleração cuja finalidade é evitar que o arame se funda junto ao bico de contato ou mergulhe na poça de fusão quando a solda é finalizada, isto é, melhora as condições de início e término dos cordões de solda.

Os principais dados técnicos referentes à fonte MTE DIGITEC 600 estão apresentados na TAB. 4.2.

TABELA 4.2 – Dados técnicos da fonte MTE - DIGITEC 600

Item	Valores de referência
Tensão em vazio	64 V
Tipo de corrente	Contínua (constante ou pulsada)
Corrente a 100% de fator de carga	350 A
Potência máxima fornecida	10 KvA

Fonte: Dutra *et al*, 2001.

Para os testes de soldagem onde se fez filmagem de alta velocidade com o sincronismo dos sinais de corrente e tensão de soldagem, utilizou-se uma fonte de soldagem similar a MTE DIGITEC 600, porém com uma capacidade menor isto é, com uma amperagem máxima de 450 A.

4.1.2 – Bocal de proteção extra

Para garantir a eficiência da proteção gasosa durante a soldagem, foi construído um acessório (FIG. 4.1) o qual foi fixado no bocal de proteção da tocha de forma a aumentar a área de proteção. Este bocal extra foi alimentado durante todo o tempo de soldagem com argônio puro.

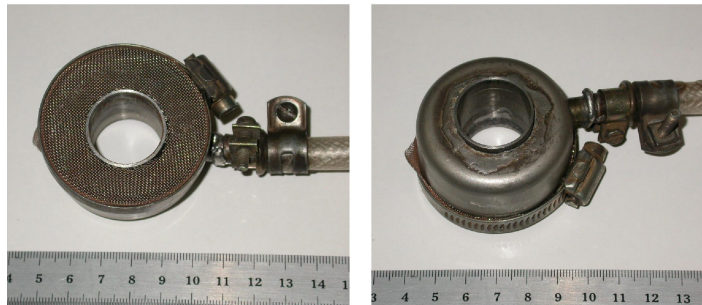


FIGURA 4.1 – Bocal extra de proteção.

4.1.3 – Sistema de soldagem mecanizado

Para a execução dos cordões de solda foi utilizada uma mesa de soldagem mecanizada, equipada com um sistema de deslocamento do corpo de prova (tartaruga). Este sistema permitiu controlar a velocidade e o sentido de deslocamento de soldagem dentro de uma faixa de operação de 5 a 60 cm/min (FIG.4.2).

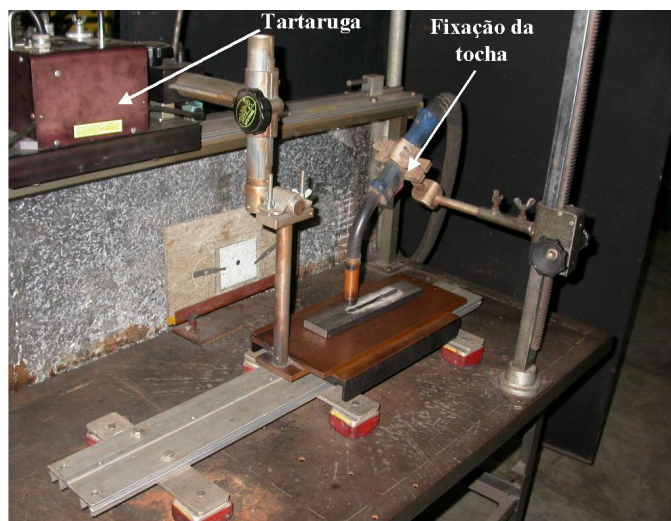


FIGURA 4.2 – Mesa de soldagem mecanizada com sistema de deslocamento do corpo de prova

4.1.4 – Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados utilizados para a maioria dos testes realizados neste trabalho é composto de um microcomputador equipado com uma placa de aquisição de dados modelo PCL-818H, a qual possui um conversor A/D de 16 canais com resolução de 12 bits, com capacidade de adquirir sinais com frequência máxima de 100 kHz; um instrumento de medição de tensão e corrente modelo TC-1 e um transdutor de corrente (efeito Hall) modelo HT 500-SBD.

O instrumento de medição modelo TC-1 foi fabricado pelo Instituto de Soldagem e Mecatrônica – LABSOLDA/UFSC. Trata-se de um instrumento desenvolvido especificamente para aplicação em medição de tensão e corrente de soldagem. Estas grandezas são mostradas em valor médio ou eficaz em dois “displays” de sete segmentos, tendo também saída de valores instantâneos, médios e eficazes disponíveis para leitura por microcomputador dotado de placa com conversor analógico digital. Estas saídas são totalmente isoladas da parte de potência, o que confere total segurança para utilização com equipamentos aterrados, como é o caso de microcomputadores. As características operacionais são apresentadas a seguir:

- Faixa de indicação para a corrente de 5 a 500 A (valores médios e eficazes)
- Faixa de indicação para a tensão de 3 a 60 V (valores médios e eficazes)
- Resolução de 1 A para a corrente e de 0,1 V para a tensão
- Incerteza máxima para a corrente 1% do valor lido
- Incerteza máxima para a tensão 0,6% do valor lido

A entrada de medição de corrente do instrumento TC-1 foi feita por um transdutor de efeito “Hall”. Este dispositivo comporta-se como um transformador de corrente com relações do tipo 1:2000, 1:1000, dependendo do modelo e da corrente. Neste trabalho foi utilizado o transdutor de corrente da marca LEM modelo HT 500-SBD. Ele mede corrente independente da forma de onda, seja contínua, alternada, pulsada, tendo

excelente resposta dinâmica o que garante uma boa reprodução da forma de ondas de corrente medidas. As características operacionais são as seguintes:

- Corrente nominal: 500 A
- Incerteza máxima: 1% da corrente nominal a 23 °C
- Faixa de frequência: 0 a 25 kHz

4.1.5 – Equipamentos auxiliares

- ✓ Misturador de gases da marca WITT GASETECHNIK modelo Km 60-6mSO, dotado de uma unidade de pressão normalizada.
- ✓ Analisador de mistura de gases Thermco, modelo 6900 com resolução de 0,1 % com precisão de $\pm 0,3$ %.
- ✓ Câmera de vídeo convencional CCD (Hitachi KP-M1), com capacidade de ajustar o obturador até 1/10000 s.
- ✓ Câmera CCD de alta velocidade, marca MEMRECAM, modelo CI de propriedade do Laboratório de Soldagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia – Minas Gerais. Esta câmera permite trabalhar em até 2000 quadros por segundo (0,5 ms entre cada quadro) a uma resolução de 252 x 188 pixels (H x V) ou 2,470 x 1,848 mm (H x V) e shutter mecânico de 1/24000 s.
- ✓ Tubo de laser vermelho de He-Ne (632,8 nm) de 20 mW que produz um feixe de 1,2 mm de diâmetro.
- ✓ Filtro de laser FSQ-ND10 - metallic ind filter 50.8 x 50.8 mm – UVFS 1.0 OD at 632.8 nm – M3V6570.
- ✓ Alimentador de arame modelo SWM 25 – série 672; 115 V; 5 A; 60 Hz - White Martins.
- ✓ Projetor de perfil digital da marca MITUTOYO modelo PJ-311 com sensibilidade de 0,001 mm.
- ✓ Máquina fotográfica digital da marca NIKON modelo coolpix 4500.

4.2 – MATERIAIS

4.2.1 - Metais de base (placa de teste)

- Aço carbono comum laminado a quente.
- Aço inoxidável austenítico (AISI 304L) laminado a frio.
- Alumínio puro (AA 1100).

Na TAB.4.3 é apresentado a composição química especificada e a composição química dos metais de base utilizados neste trabalho.

TABELA - 4.3: Composição química (% em peso) dos metais de base.

	Aço carbono ^(*) (SAE 1020)	Aço inoxidável ^(**) (AISI 304L)	Alumínio ^(**) (AA 1100)
C	0,18 – 0,23	0,062	
Si		0,490	0,032
Mn	0,30 – 0,60	1,170	0,126
P	0,040 máx.	0,026	
S	0,050 máx.	0,002	
Cr		18,08	
Ni		8,040	
Cu		0,049	0,026
Al		0,002	99,09
Mg			0,005
Fe			0,680
Zn			0,046

(*) Composição química especificada (Cary, 1989)

(**) Composição química do fabricante

4.2.2 - Metais de adição

- Arame maciço de aço carbono AWS ER70S6, com diâmetro de 1,2 mm.
- Arame maciço de aço inoxidável AWS E308, com diâmetro de 1,2 mm.
- Arame maciço de alumínio AWS ER4043, com diâmetro de 1,2 mm.

4.2.3 – Gases de proteção

- Argônio puro.
- Misturas de argônio com vários percentuais de oxigênio.
- Misturas de argônio com vários percentuais de hélio.
- Misturas de argônio com vários percentuais de CO₂.
- Misturas de argônio com vários percentuais de oxigênio e hélio.

4.2.4 – Materiais metalográficos

- Lixas d'água n.ºs. 180, 220, 320, 400 e 600.
- Reagente químico – Nital 10%.

CAPÍTULO 5

METODOLOGIA

5.1 – INTRODUÇÃO

Este trabalho envolveu um desenvolvimento experimental para caracterizar e estudar a ocorrência de fenômenos de instabilidade no processo de soldagem GMAW com gases de proteção com baixo potencial de oxidação. Para a realização do trabalho experimental foram feitos testes de soldagem com deposição de cordões de solda sobre chapas de aço carbono comum, aço inoxidável austenítico e alumínio. Foram feitos também cordões de solda em juntas com chanfro estreito em aço carbono comum com o objetivo de verificar algumas características do fenômeno de instabilidade dentro de chanfros e o efeito destes no formato do cordão de solda. Para os diferentes modos de operação da soldagem MIG/MAG e metais de adição usados, os testes foram feitos com o processo mecanizado e com fontes de soldagem com controle eletrônico. Como proteção gasosa, foram utilizadas misturas à base de argônio, com diferentes teores de oxigênio, dióxido de carbono ou hélio. As misturas de proteção gasosa não comerciais foram preparadas com o auxílio de um misturador de gases e a sua composição química foi verificada com o auxílio de um analisador de gases. A título de verificação, as misturas comerciais também foram analisadas com este mesmo equipamento.

Para cada mistura de proteção utilizada, foram feitas alterações nas variáveis do processo, como velocidade de alimentação do arame, tensão de soldagem e CTWD (distância entre o bico de contato e a peça de trabalho) para verificar a influência de cada uma delas na ocorrência da instabilidade do processo. Em todos os testes, foram coletados os sinais de tensão e corrente de soldagem através de um sistema de aquisição de dados digital. Em alguns testes, foram realizadas filmagens convencional e de alta velocidade com iluminação pela técnica de “shadowgrafia laser” para se estudar tanto o comportamento do arco como a transferência metálica. A superfície dos cordões de

solda foi fotografada para evidenciar a extensão da limpeza catódica em função da condição operacional, do metal de base e da proteção gasosa usada.

Para estudar a influência da condição operacional sobre o formato do cordão, tanto em soldas sobre chapas como em chanfro estreito, foram feitas análises das suas dimensões lineares e das áreas de metal depositado e do metal fundido.

5.2 – FLUXOGRAMA EXPERIMENTAL

O desenvolvimento experimental deste trabalho foi dividido em cinco etapas. Na FIG. 5.1 está esquematizada a seqüência metodológica utilizada para se atingir o objetivo do trabalho, correlacionando-se cada etapa com a seqüência de realização das atividades experimentais deste trabalho.

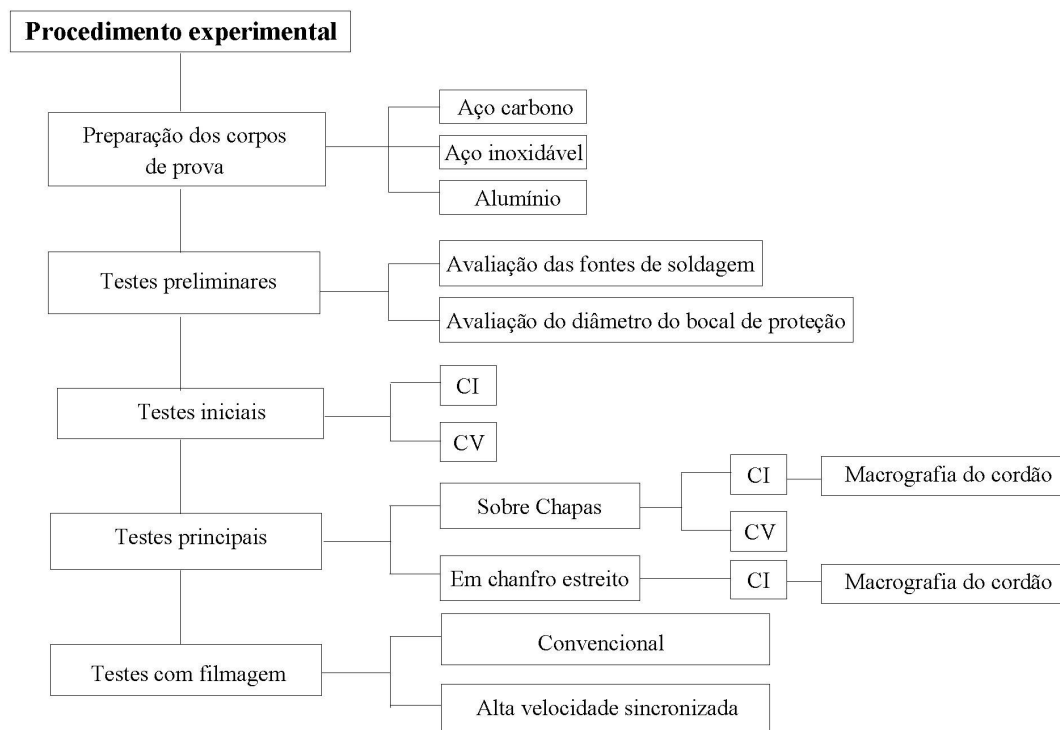


FIGURA 5.1 – Fluxograma experimental.

A FIG. 5.2 mostra esquematicamente a montagem experimental utilizada na maior parte dos testes de soldagem relatados nas seções seguintes. Também se utilizou esta montagem, eventualmente com algumas mudanças como, por exemplo, nos testes em que a fonte trabalhou em corrente constante. Neste caso, foi utilizado um alimentador de arame independente (tipo SWM 25 – White Martins) que foi modificado por Reis e Modenesi (2003) de forma a permitir um ajuste fino da velocidade de alimentação de arame e, desta forma, permitir um ajuste mais preciso do comprimento do arco.

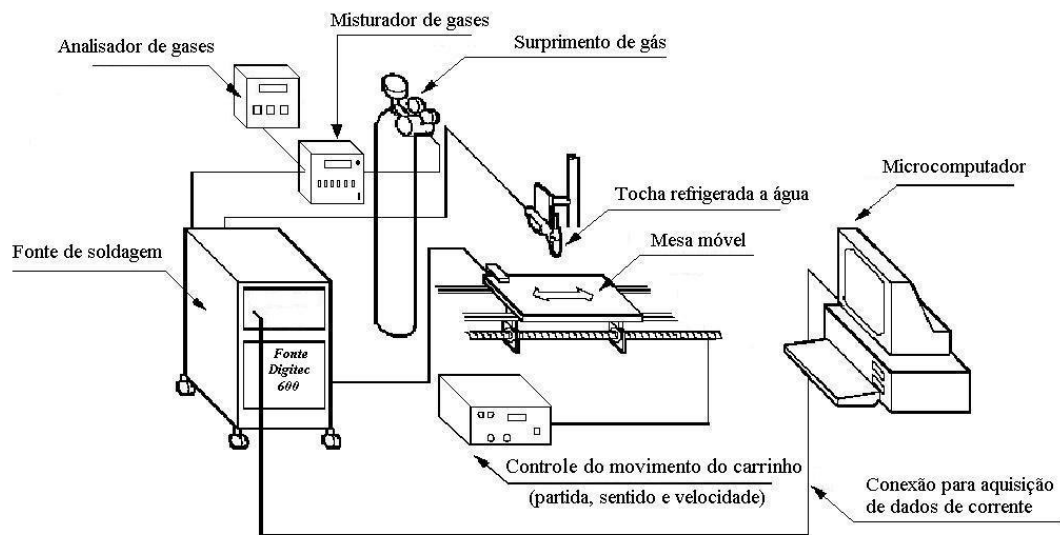


FIGURA 5.2 – Representação esquemática da montagem experimental.

Em todos os testes realizados neste trabalho, os sinais de tensão e corrente de soldagem foram registrados através de um sistema digital de aquisição de dados e processados com o auxílio de um programa de computador denominado de SINAL (ANEXO A) desenvolvido por Modenesi (2005). Este processamento envolveu, por exemplo, a determinação do valor médio e do desvio padrão dos sinais ou de parte destes, a determinação da duração da ocorrência de períodos de instabilidade e estabilidade, a preparação de gráficos em função do tempo e de histogramas. Foi feito, também, em alguns casos específicos apresentados no próximo capítulo, a representação dos sinais no domínio da frequência (espectros) através do processamento destes pela Transformada Rápida de Fourier.

Na TAB.5.1 é apresentada a configuração do sistema de aquisição de dados para a maioria dos testes realizados neste trabalho. Quando condições diferentes de aquisição de dados forem usadas, haverá indicação no texto. As diferentes taxas e tempos de aquisição usadas foram definidas em função da velocidade de mudanças e duração do fenômeno nas diferentes formas de operação .

TABELA 5.1: Configuração da placa de aquisição de dados para os testes de soldagem.

Modo de operação da fonte	Tensão Constante	Corrente Constante
Frequência de aquisição (kHz)	0,1	2,0
Número de pontos	3000	12000 a 15000
Tempo de aquisição (s)	30	6,0 a 7,5

A seguir, será descrito para cada etapa da estrutura apresentada na FIG.5.1, o procedimento experimental, os parâmetros operacionais usados nos testes de soldagem e os procedimentos adotados para a análise dos resultados destes ensaios.

5.3 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

5.3.1 – Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova de aços carbono e inoxidável foram cortados com o auxílio de uma serra elétrica e os de alumínio, em função da sua menor dureza, com uma guilhotina. Posteriormente, os resíduos de óleo, outras sujeiras e as rebarbas do corte foram removidos e os corpos de prova foram armazenados em locais com umidade reduzida. A TAB.5.2 mostra as dimensões usuais dos corpos de prova dos diferentes materiais.

TABELA 5.2: Dimensões usuais dos corpos de prova.

Material	Dimensões (mm)
Aço carbono (SAE 1020)	12,5 x 50 x 250
Aço inoxidável (AISI 304)	6,5 x 70 x 300
Alumínio (AA 1100)	6,5 x 50 x 200

Instantes antes de se iniciar a soldagem, as superfícies dos corpos de prova foram preparadas de acordo com os procedimentos descritos a seguir:

a) Aço Carbono

A carepa foi removida da superfície dos corpos de prova com auxílio de uma esmerilhadeira manual. Antes do início da soldagem, o corpo de prova foi limpo com uma escova rotativa e lavado com acetona para a remoção de eventuais contaminantes existentes.

b) Aço inoxidável

A superfície foi apenas limpa com acetona para remover alguma oleosidade existente. Este procedimento foi adotado pois o material estava laminado a frio e não possuía a carepa espessa dos corpos de prova de aço carbono.

c) Alumínio

Os corpos de prova deste material foram testados em três diferentes condições superficiais, isto é: como recebido, com limpeza mecânica e com decapagem química.

✓ *Como recebido*

A superfície foi limpa somente com uma toalha de papel embebida em acetona e, em seguida, seca com uma toalha de papel nova. Acetona foi usada porque, além de ter uma secagem rápida, ela elimina a oleosidade remanescente.

✓ *Limpeza mecânica*

A superfície foi lixada manualmente com lixas d'água com granulometria de 240 e 320#. Em seguida, a superfície foi limpa com uma toalha de papel embebida em acetona e seca com uma toalha de papel nova.

✓ *Decapagem química*

Adotou-se o procedimento recomendado por um fabricante de alumínio (ALCAN, 1993). A TAB. 5.3 mostra as etapas do procedimento usado neste trabalho.

TABELA 5.3: Etapas para limpeza química superficial do alumínio.

ETAPAS	DESCRIÇÃO
1 ^a	Os corpos de prova foram imersos em uma solução de 5% de soda cáustica (NaOH) por 120 segundos na temperatura ambiente. (solvente: água)
2 ^a	Os corpos de prova foram lavados em água corrente fria.
3 ^a	Os corpos de prova foram imersos em uma solução de 1:1 de ácido nítrico (HNO ₃)(65%), na temperatura ambiente por 30 segundos. (solvente: água)
4 ^a	Os corpos de prova foram lavados novamente em água corrente e fria.
5 ^a	Os corpos de prova foram secos com o auxílio de toalha de papel.

Fonte: ALCAN, 1993.

5.3.2 – Testes preliminares de soldagem

5.3.2.1 - Avaliação das fontes de soldagem

O fenômeno de instabilidade relatado por (Modenesi e Nixon, 1994) depende fortemente das características da fonte de soldagem e pode se manifestar por perturbações de curta duração. Logo, achou-se relevante avaliar as respostas dinâmicas das fontes disponíveis no Labsend/UFMG para verificar possíveis influências destas no fenômeno em estudo e selecionar o equipamento que garantisse condições mais adequadas (como facilidade de ajuste dos parâmetros de soldagem, sua reprodutibilidade e menor nível de ruídos elétricos). Estes testes foram feitos em uma fonte convencional (VI 400) e em uma fonte eletrônica (DIGITEC/600). Inicialmente, foi feito em cada uma das fontes selecionadas do laboratório, um teste com parâmetros operacionais similares para verificar o nível de ruído de cada uma delas. Para a fonte

que apresentou menor nível de ruído, testou-se a resposta dinâmica da mesma à variações bruscas de corrente e tensão. Para a realização deste teste a fonte DIGITEC/600 foi programada para trabalhar no modo de operação MIG-MAG convencional em 3 fases. A programação das fases para o teste foi a seguinte: primeira fase 25 V, segunda fase 20 V, terceira fase 30 V. Após a programação da fonte, mergulhou-se dois eletrodos (placas de aço inoxidável) separados por um isolante em uma solução de salmoura (água e sal), em seguida a fonte foi ligada e as variações de corrente e tensão foram medidas através de sistema digital de aquisição de dados e avaliadas com o programa SINAL. A FIG.5.3 mostra esquematicamente a montagem experimental deste teste.

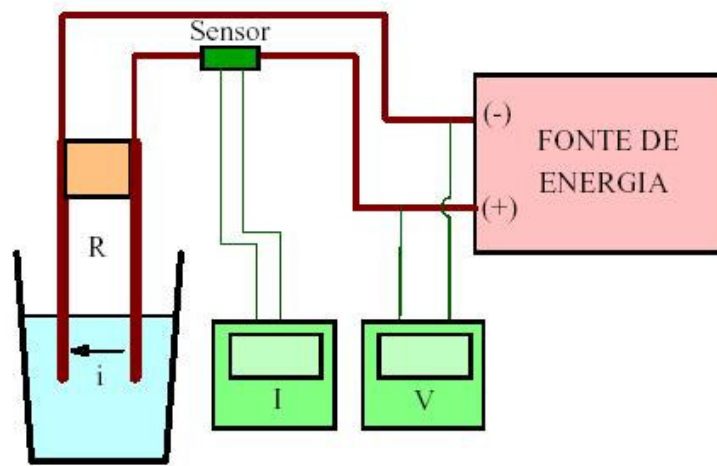


FIGURA 5.3 – Montagem experimental esquemática do teste para verificar o tempo de resposta da fonte DIGITEC/600 à variações bruscas de corrente e tensão.

5.3.2.2 - Testes iniciais de soldagem

a) Caracterização inicial do fenômeno de instabilidade

Uma série de testes foi feita para caracterizar o fenômeno de instabilidade e verificar as condições para a sua ocorrência na fonte escolhida para a maioria dos testes, isto é, na fonte DIGITEC/600.

Nestes testes, foram depositados cordões de solda sobre chapas de aço SAE 1020. As soldas foram realizadas com a fonte operando nos modos tensão constante (CV) e corrente constante (CI), visando verificar, respectivamente, o efeito da instabilidade relatada por Modenesi e Nixon (1994) nos valores de corrente e tensão de soldagem. A tensão e a corrente de soldagem foram registradas através de um sistema digital de aquisição de dados e processados com o programa SINAL desenvolvido no Labsend da UFMG (Anexo A). As TAB. 5.4 e 5.5 mostram os parâmetros operacionais utilizados para a execução destes testes.

TABELA 5.4: Parâmetros dos testes iniciais com a fonte operando em CV.

PARÂMETROS DE SOLDAGEM	
Metal de base	Aço carbono
Tensão de regulagem (V)	36
Gás de proteção	Argônio puro
Vazão do gás (L/min)	16
Velocidade de alimentação do arame	9
Velocidade de soldagem (cm/min)	25
Diâmetro do bocal (mm)	16
CTWD (mm)	22
Tipo / diâmetro do arame (mm)	AWS ER70S6 / 1,2

TABELA 5.5: Parâmetros dos testes iniciais com a fonte operando em CI.

PARÂMETROS VARIADOS	
CTWD (mm)	21; 26
OUTROS PARÂMETROS	
Metal de base: Aço carbono Tipo de gás de proteção: Argônio puro Corrente de regulagem: 255 A Veloc. de alimentação do arame: 7,8 m/min Veloc. de soldagem: 25 cm/min	Vazão do gás: 16 L/min Diâmetro do bocal: 16 mm Tipo de arame: AWS ER70S6 Diâmetro do arame: 1,2 mm

b) Avaliação do efeito do diâmetro do bocal de proteção

Para analisar uma possível influência da eficiência da proteção gasosa na ocorrência da instabilidade, foram construídos bocais extras, com diâmetros de aproximadamente 25 e 52 mm para serem colocados concêntricos e utilizados com o bocal de 16 mm da tocha de soldagem. Estes bocais extras foram alimentados com a vazão de 16 L/min durante a soldagem com argônio puro. Após a realização de cada teste (TAB. 5.6 e 5.7), calculou-se com o auxílio do programa SINAL, a média dos períodos estáveis e instáveis de cada um. Para garantir que o arco não estaria recebendo oxigênio da atmosfera, a maioria dos testes posteriores foram feitos utilizando o bocal extra de 52 mm (FIG. 5.4).

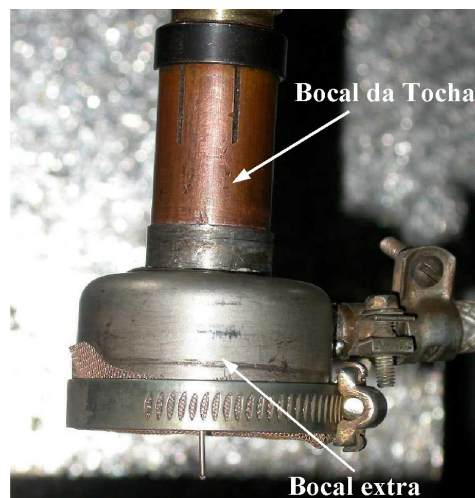


FIGURA 5.4 – Montagem do bocal extra de proteção com diâmetro de 52 mm no bocal comum da tocha de diâmetro de 16 mm.

TABELA 5.6: Parâmetros dos testes para avaliação do uso de um bocal extra de proteção. Fonte operando em CV.

PARÂMETRO VARIADOS	
Diâmetros dos bocais (mm)	16* ; 25; 52
OUTROS PARÂMETROS	
Metal de base: Aço carbono	Velocidade de soldagem: 25 cm/min
Tipo de gás de proteção: Argônio puro	CTWD: 22 mm
Tensão de abertura do arco: 25 V	Vazão do gás: 16 L/min
Tensão de regulagem: 35 V	Tipo de arame: AWS ER70S6
Veloc. de alimentação do arame: 7 m/min	Diâmetro do arame: 1,2 mm

* Bocal de proteção que acompanha a tocha

TABELA 5.7: Parâmetros dos testes para avaliação do uso de um bocal extra de proteção. Fonte operando em CI.

PARÂMETROS VARIADOS	
Diâmetros dos bocais (mm)	16* ; 52
OUTROS PARÂMETROS	
Metal de base: Aço carbono	Veloc. de soldagem: 25 cm/min
Tipo de gás de proteção: Argônio puro	CTWD: 22 mm
Corrente de regulagem: 255 A	Vazão do gás: 16 L/min
Veloc. de alimentação do arame: 7,8 m/min	Tipo de arame: AWS ER70S6
	Diâmetro do arame: 1,2 mm

* Bocal de proteção que acompanha a tocha

c) Testes iniciais com a fonte operando no modo tensão constante (CV)

Nestes testes, variou-se a composição do gás de proteção, mantendo-se fixos os demais parâmetros operacionais, incluindo as velocidades de alimentação do arame e de soldagem, a tensão de soldagem, o CTWD e o diâmetro do bocal de saída de gás da tocha.

Para forçar uma operação inicial instável, todos os testes foram iniciados com um valor de tensão menor que foi mantido por cerca de 3 s antes do ajuste da tensão de teste. Este menor valor de tensão inicial foi também uma maneira de deixar bem definido o início do experimento a ser avaliado. A fonte de soldagem DIGITEC/600 permitia executar esta mudança por um simples toque adicional no botão de disparo do equipamento. Na TAB. 5.8 estão apresentados os parâmetros operacionais usados.

TABELA 5.8: Parâmetros dos testes iniciais. Fonte operando em CV.

PARÂMETROS VARIADOS		
Gás de proteção	Argônio puro	Ar + 1%O ₂
Tensão de abertura do arco (V)	25	22
OUTROS PARÂMETROS		
Metal de base: Aço carbono	CTWD: 22 mm	
Modo de operação: Tensão constante	Vazão do gás: 16 L/min	
Tensão de regulagem: 33 V	Diâmetro do bocal*: 52 mm	
Veloc. de alimentação do arame: 7 m/min	Tipo de arame: AWS ER70S6	
Veloc. de soldagem: 25 cm/min	Diâmetro do arame: 1,2 mm	

* Bocal extra alimentado com argônio puro (ver seção 5.3.2.2 (b)).

Para completar a caracterização da instabilidade, foram tiradas fotos da região próxima do arco, dos testes da TAB.5.8. O objetivo destas fotos foi verificar a formação de fumos durante a soldagem nas condições estáveis e instáveis. Elas foram feitas utilizando-se uma máquina digital comum, sendo a mesma posicionada atrás de um anteparo cujo objetivo foi de não permitir que a luminosidade do arco incidisse diretamente na objetiva da máquina.

d) Testes iniciais com a fonte operando no modo corrente constante (CI)

Nestes testes, variou-se a composição do gás de proteção e a distância entre o bico de contato e a peça de trabalho, mantendo-se fixos os demais parâmetros operacionais (TAB.5.9).

TABELA 5.9: Parâmetros dos testes iniciais. Fonte operando em CI.

PARÂMETROS VARIADOS		
Tipo de gás de proteção	Argônio puro	Ar + 1% O ₂
CTWD (mm)	22; 26	22; 26
OUTROS PARÂMETROS		
Metal de base: Aço carbono	Vazão do gás: 16 L/min	
Modo de operação: Corrente constante	Diâmetro do bocal: 52 mm	
Corrente de regulação: 255 A	Tipo de arame: AWS ER70S6	
Veloc. de alimentação do arame: 7,8 m/min	Diâmetro do arame: 1,2 mm	
Veloc. de soldagem: 25 cm/min		

Como nos testes iniciais (item 5.3.2.2 a) com operação em CI sugeriram mudanças na luminosidade do arco com as variações de estabilidade, foi feita, ainda, uma série de testes em que a luminosidade do arco foi monitorada através de um fotodiodo juntamente com a tensão do arco. Utilizou-se para isto um sistema desenvolvido por Deiró (2005). Para a realização destes testes, direcionou-se o sensor entre o bico de contato e a peça de trabalho, a 30 cm de distância do arco de soldagem. O sistema de aquisição de dados foi programado de forma que o primeiro canal gravava o sinal de tensão e o segundo canal gravava o sinal da luz. Em seguida estes dados foram

analisados com o auxílio do programa SINAL. A TAB.5.10 mostra as condições experimentais dos testes de soldagem e a configuração do sistema de aquisição de dados.

TABELA 5.10: Parâmetros de soldagem dos testes feitos com sensor de luz.

PARÂMETROS DE SOLDAGEM	
Metal de base: Aço carbono	Vazão do gás: 16 L/min
Modo de operação: Corrente constante	Diâmetro do bocal: 52 mm
Corrente de regulagem: 255 A	Tipo de arame: AWS ER70S6
Veloc. alimentação do arame: 7,8 m/min	Diâmetro do arame: 1,2 mm
CTWD = 22 mm	Freq. de aquisição de dados: 5 kHz
Gás de proteção: Argônio puro	Número de pontos adquiridos: 15000
Veloc. de soldagem: 25 cm/min	Tempo de aquisição: 3,0 s

5.3.3 – Testes principais

Estes testes foram realizados para caracterizar o fenômeno de instabilidade em três tipos de materiais (aço carbono comum, aço inoxidável austenítico e alumínio), com várias composições de gases de proteção. Parte das misturas usadas foram feitas utilizando um misturador de gases e a sua composição verificada com por um analisador de gases. As misturas gasosas contendo CO₂ foram feitas com a utilização do gás comercial Star Gold-I40, o qual contém 4% CO₂. Logo os valores de O₂ e CO₂ apresentados nas tabelas a seguir são valores aproximados.

a) Testes com a fonte operando em tensão constante

Como na seção anterior, estes testes foram iniciados com um valor de tensão menor do que o seu valor de teste para favorecer condições iniciais de elevada instabilidade. Para os testes com alumínio, em função das características peculiares da instabilidade na soldagem deste material, as condições de aquisição dos sinais de tensão e corrente (TAB. 5.1) foram alteradas para uma frequência de 4000 Hz e uma duração de 3,75 s. Os parâmetros dos testes realizados em aço carbono, aço inoxidável e alumínio com a fonte operando em CV estão apresentados nas TAB. 5.11; 5.12 e 5.13.

TABELA 5.11: Parâmetros de soldagem para os testes em aço carbono. Fonte CV.

PARÂMETROS VARIADOS		
Proteção gasosa	Velocidade de Alimentação (m/min)	Tensões (V)
Ar puro	7	33; 34; 35; 37
Ar puro	9	33 a 39
Ar + 1%O ₂	7	27 a 34
Ar + 1%O ₂	9	33; 35

OUTROS PARÂMETROS	
Metal de base: Aço carbono	CTWD: 22 mm
Tensão de abertura do arco: 25 V	Vazão do gás: 16 L/min
Velocidade de regulagem: 25 cm/min	Diâmetro do bocal*: 52 mm
Diâmetro do arame: 1,2 mm	Tipo de arame: AWS ER70S6

* Bocal extra alimentado com argônio puro (ver seção 5.3.2.2 (b)).

TABELA 5.12: Parâmetros de soldagem para testes em aço inoxidável. Fonte CV.

PARÂMETROS VARIADOS		
Proteção gasosa	Velocidade de Alimentação (m/min)	Tensões (V)
Ar puro	7	33; 35
Ar + 0,2%O ₂	7	32; 33
Ar + 0,3%O ₂	7	32
Ar + 1%O ₂	7	27; 29; 30; 31; 32; 33
Ar + 2%O ₂	7	30; 33
Ar + 0,8%CO ₂	7	30; 32
Ar + 0,4%CO ₂	7	30; 32
Ar + 20%He	7	30; 32; 33
Ar + 25%He	7	30
Ar puro	9	23,5; 24; 25
He puro	9	28; 32
25%He + 75%Ar	9	25; 27; 28

OUTROS PARÂMETROS	
Metal de base: Aço inoxidável	CTWD: 22 mm
Modo de operação: Tensão constante	Vazão do gás: 16 L/min
Tensão de abertura do arco: 25 V	Diâmetro do bocal*: 52 mm
Velocidade de regulagem: 25 cm/min	Tipo de arame: ER 312
Diâmetro do arame: 1,2 mm	Posição de Soldagem: Plana

* Bocal extra alimentado com argônio puro (ver seção 5.3.2.2 (b)).

TABELA 5.13: Parâmetros de soldagem para os testes em alumínio. Fonte em CV.

PARÂMETROS VARIADOS	
Proteção Gasosa	Tensões reguladas(V)
Ar puro	23,5; 24; 25
He puro	28; 32
75% Ar + 25%He	25; 27; 28
OUTROS PARÂMETROS	
Metal de base: Alumínio	CTWD: 24 mm
Modo de operação: Tensão constante	Vazão do gás: 16 L/min
Tensão de abertura do arco: 25 V	Diâmetro do bocal*: 52 mm
Velocidade de alimentação: 6 m/min	Tipo de arame: E 4043
Diâmetro do arame: 1,2 mm	Velocidade de soldagem: 25 cm/min

* Bocal extra alimentado com argônio puro (ver seção 5.3.2.2 (b)).

b) Testes com a fonte operando em corrente constante

Nestes testes, variaram-se a composição do gás de proteção e a distância entre o bico de contato e a peça de trabalho, mantendo-se fixos os demais parâmetros operacionais, incluindo as velocidades de alimentação do arame e de soldagem, a corrente de soldagem e o diâmetro do bocal. Em função das características peculiares do fenômeno de instabilidade na soldagem do alumínio (particularmente, a ocorrência da instabilidade em poucos intervalos muito curtos de tempo), as condições de aquisição de dados (TAB. 5.1) foram alteradas para 4 kHz por 3,5 s nos testes com este material. As condições destes testes estão apresentadas nas TAB.5.14, 5.15 e 5.16.

TABELA 5.14: Parâmetros de soldagem para testes em aço carbono. Fonte CI.

PARÂMETROS VARIADOS	
Proteção gasosa	CTWD (mm)
Ar puro	20 a 29
Ar + 1%O ₂	20 a 26 e 28
Ar + 2%O ₂	18 a 28
Ar + 0,4%CO ₂	20 a 25
OUTROS PARÂMETROS	
Metal de base: Aço carbono	Vazão do gás: 16 L/min
Corrente de regulagem: 255 A	Diâmetro do bocal: 52 mm
Veloc.de alimentação do arame: 7,8 m/min	Tipo de arame: AWS ER70S6
Veloc. soldagem: 25 cm/min	Diâmetro do arame: 1,2 mm

TABELA 5.15: Parâmetros de soldagem para testes em aço inoxidável. Fonte CI.

PARÂMETROS VARIADOS	
Proteção gasosa	CTWD (mm)
Ar puro	14 a 26
Ar + 1%O ₂	14 a 20
Ar + 2%O ₂	14 a 20
Ar + 4%CO ₂	14 a 20
25%He + 75%Ar	14 a 19

OUTROS PARÂMETROS	
Metal de base: Aço inoxidável	Vazão do gás: 16 L/min
Corrente de regulação: 255 A	Diâmetro do bocal: 52 mm
Veloc. de alimentação do arame: 7,8 m/min	Tipo de arame: ER 312
Veloc. de soldagem: 25 cm/min	Diâmetro do arame: 1,2 mm

TABELA 5.16: Parâmetros de soldagem para testes em alumínio. Fonte CI.

PARÂMETROS VARIADOS	
Proteção gasosa	CTWD (mm)
Ar puro	24; 26; 28; 30

OUTROS PARÂMETROS	
Metal de base: Alumínio	Vazão do gás: 16 L/min
Corrente de regulação: 175 A	Diâmetro do bocal: 52 mm
Veloc. de alimentação do arame: 7,5 m/min	Tipo de arame: E 4043
Veloc. de soldagem: 25 cm/min	Diâmetro do arame: 1,2 mm

c) Testes em “chanfro estreito” com a fonte operando em corrente constante

Para verificar a influência do fenômeno de instabilidade no formato do cordão em chanfro estreito (FIG.5.5), foram depositados cordões de solda em condições que causam a instabilidade e o formato destes foram comparados com cordões obtidos em condição de transferência por spray sem instabilidade. Para conseguir essas duas condições de operação com parâmetros similares de soldagem, variou-se a composição do gás de proteção, ou seja, para a instabilidade usou-se como proteção gasosa argônio puro e para a estabilidade utilizou-se Ar + 2%O₂. Com o intuito de verificar a influência do hélio nas características geométricas do cordão de solda foram feitos alguns testes

utilizando misturas contendo este gás. Na TAB.5.17 estão apresentados todos os parâmetros operacionais utilizados para os testes feitos em chanfro estreito.

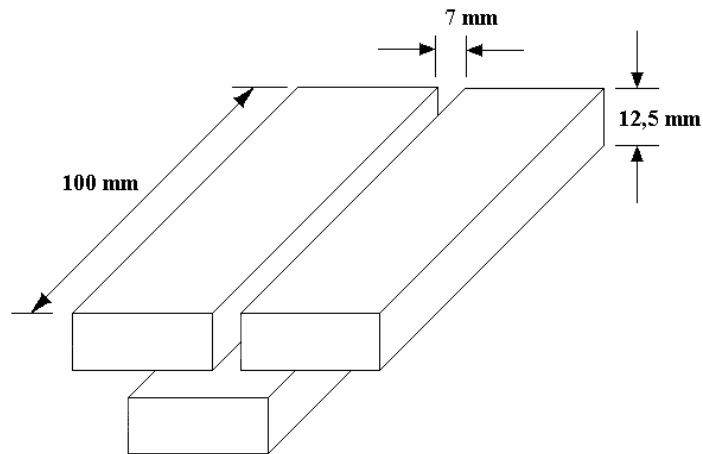


FIGURA 5.5 – Representação esquemática do corpo de prova para as soldas em chanfro estreito.

TABELA 5.17 - Parâmetros de soldagem para testes em chanfro estreito. Fonte CI.

PROTEÇÃO GASOSA	
Ar puro	
Ar + 1%O ₂	
Ar + 2%O ₂	
75%Ar + 25%He	
(Ar + 2%O ₂) + 25%He	
OUTROS PARÂMETROS	
Metal de base: Aço carbono	Vazão do gás: 16 L/min
Corrente de regulagem: 255 A	Diâmetro do bocal: 52 mm
Veloc. de alimentação do arame: 7,8 m/min	Tipo de arame: AWS ER70S6
CTWD: 20 mm	Diâmetro do arame: 1,2 mm
Veloc. de soldagem: 25 cm/min	

5.3.4 – Análise dos parâmetros geométricos dos cordões em aço carbono com a fonte operando em CI

Para analisar o formato do cordão de solda sobre chapa e em chanfro estreito nas condições de operação estável e instável, corpos de prova selecionados aleatoriamente foram cortados transversalmente (no mínimo um corte) e preparados para a análise macrográfica ou seja lixados até lixa 600# e atacados com Nital 10%. Cada corte gerou no mínimo a análise de duas macros. Com o auxílio de um projetor de perfil (ampliação de 5X), foram medidas as dimensões lineares (altura e penetração) dos cordões. Para o cálculo das áreas de penetração, depositada e penetração axial, foi utilizado um programa específico (Quantikov). A FIG.5.6 e 5.7 mostram esquematicamente os parâmetros medidos nas amostras dos testes feitos sobre chapa e em chanfro estreito respectivamente.

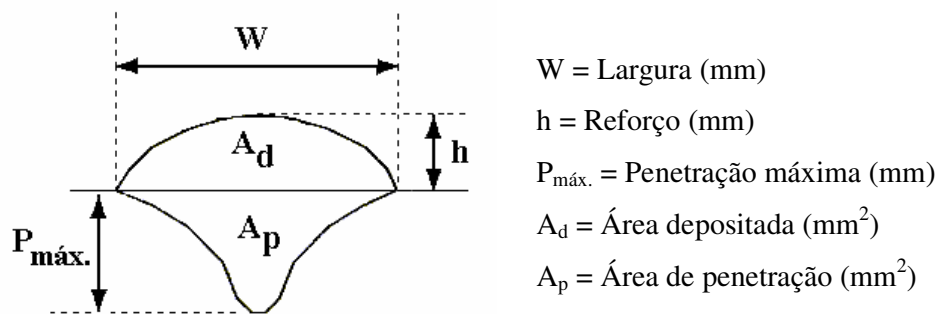


FIGURA 5.6 – Representação esquemática dos parâmetros geométricos considerados para a análise dos cordões de solda sobre chapa com a fonte operando em corrente constante.

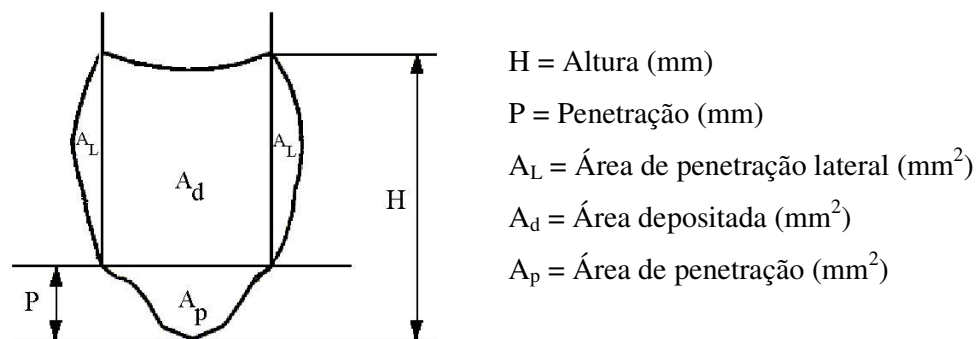


FIGURA 5.7 – Representação esquemática dos parâmetros geométricos considerados para a análise dos cordões de solda em chanfro estreito com a fonte operando em corrente constante.

5.3.5 – Testes com filmagem

a) *Filmagem com câmera convencional*

Os testes com uma câmera de vídeo (Hitachi) foram feitos no Labsend. A montagem experimental foi a anteriormente descrita (FIG.5.2) com a inclusão da câmera de vídeo acoplada a um microcomputador com placa de captura de vídeo e uma lente de proteção contra a radiação da soldagem a arco, instalada na frente da objetiva da máquina. Em todas as filmagens com a câmera convencional, o obturador da mesma foi ajustado para 1/10.000 s para garantir uma imagem nítida do arco e da ponta do eletrodo.

b) *Filmagem de alta velocidade com “Shadowgrafia” laser sincronizada*

Estes testes foram executados no laboratório de processos de soldagem (LAPROSOLDA) da Universidade Federal de Uberlândia. Para sincronizar os sinais elétricos de soldagem (tensão e corrente) com as imagens da filmagem foi necessário utilizar uma montagem, FIG.5.8, e uma metodologia, incluindo programas de computador, desenvolvidos no LAPROSOLDA por Vilarinho, 2000. Os parâmetros de soldagem dos testes com filmagens de alta velocidade com “Shadowgrafia” laser sincronizada estão apresentados nas TAB.5.18 e 5.19.

TABELA 5.18: Parâmetros de soldagem para filmagem sincronizada. Fonte CV.

PARÂMETROS VARIADOS	
Proteção Gasosa	Tensões reguladas (V)
Ar puro	33; 37; 37
Ar + 2%O ₂	33; 30
OUTROS PARÂMETROS	
Metal de base: Aço carbono	Diâmetro do bocal*: 52 mm
Modo de operação: Tensão constante	Tipo de arame: E 70S6
Veloc. de alimentação: 7 m/min	Veloc. de soldagem: 25 cm/min
Diâmetro do arame: 1,2 mm	Frequência de aquisição: 7 kHz
CTWD: 22 mm	Tempo de aquisição: 10 s
Vazão do gás: 16 L/min	Intervalo entre frames: 0,5 ms

* Bocal extra alimentado com argônio puro (ver seção 5.3.2.2 (b)).

TABELA 5.19: Parâmetros de soldagem para filmagem sincronizada. Fonte CI.

PARÂMETROS VARIADOS	
Proteção gasosa	CTWD (mm)
Ar puro	19; 22
Ar + 2%O ₂	19; 22

OUTROS PARÂMETROS	
Metal de base: Aço carbono	Tipo de arame: AWS ER70S6
Corrente de regulação: 255 A	Diâmetro do arame: 1,2 mm
Veloc. de alimentação do arame: 7,1 m/min	Frequência de aquisição: 7 kHz
Veloc. de soldagem: 25 cm/min	Tempo de aquisição: 10 s
Vazão do gás: 16 L/min	Intervalo entre frames: 0,5 ms
Diâmetro do bocal*: 52 mm	

* Bocal extra alimentado com argônio puro (ver seção 5.3.2.2 (b)).

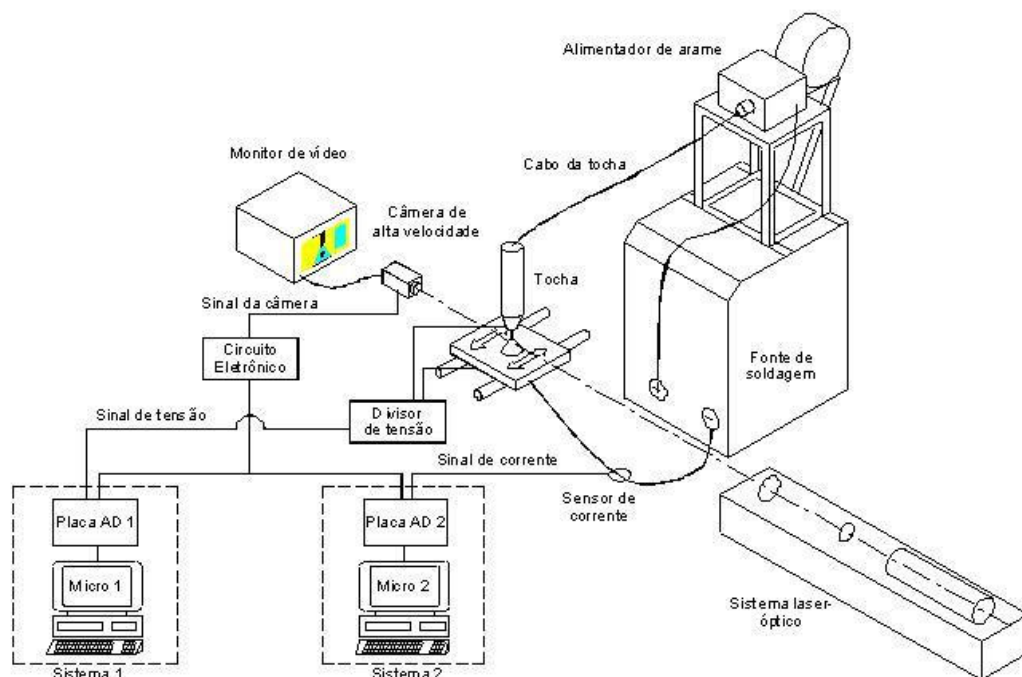


FIGURA 5.8 - Esquema geral da bancada experimental para “Shadowgrafia” (Vilarinho, 2000).

A bancada da FIG.5.8 é composta por uma fonte de soldagem DIGITEC 450, um sistema para obtenção e aquisição de imagens da região do arco com câmera de filmagem em alta velocidade (MEMRECAM, modelo CI), sistemas computacionais para a gravação das imagens, sistema de iluminação por laser e dois computadores com

placas de aquisição de dados para o registro dos sinais da corrente e tensão de soldagem e sincronização com as imagens da câmera de filmagem.

O sistema de iluminação por shadowgrafia foi usado para se obter uma imagem do eletrodo, das gotas em transferência e da poça de fusão sem o efeito de ofuscamento produzido pelo arco. Ele era constituído de um tubo de laser, lentes e de filtros montados e alinhados em uma bancada longitudinal. O feixe produzido pelo tubo de laser (He-Ne de 20 mW) tinha um diâmetro inicial de 1,2 mm e um comprimento de onda de 632,8 nm (vermelho). Este feixe passou por filtros de densidade neutra para se conseguir uma luminosidade adequada. A seguir, foi expandido por uma lente divergente (plano-côncava, diâmetro 6,35 mm e distância focal de 12,5 mm) e novamente colimado ao passar por uma lente convergente (plano-convergente, diâmetro 50,8 mm e distância focal 500 mm), ficando com um diâmetro de 48 mm. Este feixe, após atravessar o arco, chega à câmera de vídeo, passando, antes, por um filtros de densidade neutra e passa-banda (para o comprimento de onda do laser). A luminosidade do sistema pode ser ajustada, para que não supere a necessidade da câmera e do jogo de lentes, pela seleção da densidade dos filtros.

Neste trabalho, o sistema de aquisição 1 (FIG. 5.8) obteve o sinal da tensão de soldagem com o sinal de sincronismo da câmera e o sistema 2 adquire o sinal da corrente de soldagem com o mesmo sinal da câmera enviado para o sistema 1. As placas de aquisição destes sistemas possuem um conversor analógico/digital com 2 canais com faixas de medidas de tensão de ± 10 V, sendo que nos testes de trabalho a leitura das mesmas foram ajustas para ser realizada em 12 bits a uma frequência de aquisição de 7 kHz e um tempo de aquisição de 10 s. Com relação à frequência de aquisição, a limitação foi dada pela placa do sistema de aquisição, pois a mesma possui uma memória que é capaz de comportar aproximadamente 16000 pontos.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 – INTRODUÇÃO

Como já mencionado na revisão bibliográfica, caracterizar fenômenos de instabilidade na soldagem a arco pode ser uma tarefa complexa pois a instabilidade pode depender de diversos fatores interrelacionados como as características estáticas e dinâmicas da fonte, a composição do gás de proteção e dos metais de base e de adição e as suas condições superficiais. Fenômenos de instabilidade podem se manifestar de diversas formas, isto é, na transferência de metal, no volume de respingos e fumos formados, em variações no formato do arco ou do cordão, etc. A literatura reporta diversas formas de instabilidade associadas com o processo de soldagem MIG/MAG (ver item 3.8). O presente trabalho apresenta e analisa um tipo de instabilidade observada neste processo, na soldagem com gases de baixo potencial de oxidação e que, embora possa ocorrer de uma forma mais freqüente do que a que inicialmente se acreditava, não foi ainda detalhadamente estudada. Devido às suas características peculiares e possíveis mecanismos fundamentais responsáveis pela sua ocorrência, esta forma de instabilidade parece estar associada com os mecanismos de geração de elétrons na região catódica do arco e será aqui denominada como “*Instabilidade de mecanismos catódicos*”.

Inicialmente neste capítulo é feita uma revisão das características gerais do fenômeno de instabilidade de mecanismos catódicos como relatado por Modenesi e Nixon (1994). Em seguida, são apresentados os resultados obtidos nos testes preliminares, cuja finalidade foi de avaliar o desempenho das fontes disponíveis no LABSEND nas condições de ensaios pretendidas e definir qual delas seria utilizada nos testes subsequentes. Num terceiro momento são apresentados os resultados dos testes iniciais feitos para caracterizar a instabilidade de mecanismos catódicos na fonte selecionada e estudar alguns aspectos particulares do fenômeno como a geração de fumos e variações

na luminosidade do arco. Os testes envolveram o uso da fonte escolhida, operando tanto em tensão constante como em corrente constante. Num quarto momento, apresenta-se e discute-se os resultados obtidos nos testes principais onde foi estudada a instabilidade de mecanismos catódicos em três materiais diferentes (aço carbono comum, aço inoxidável austenítico e alumínio). Avaliou-se também a instabilidade de mecanismos catódicos através de filmagem de alta velocidade com o sistema de sincronismo da mesma com os sinais de tensão e corrente de soldagem; o aspecto superficial dos cordões de solda e suas características geométricas. Finalmente, tenta-se, nas considerações finais, reavaliar o modelo originalmente proposto na literatura para a mesma e propor alterações para o mesmo.

6.2 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DO FENÔMENO DE INSTABILIDADE DE MECANISMOS CATÓDICOS

Há mais de 10 anos, Modenesi e Nixon (1994) descreveram, na soldagem de aços de baixo carbono, quando o teor de oxigênio no gás de proteção não é suficientemente elevado, o aparecimento de uma condição de instabilidade com vários aspectos peculiares. Estes autores descreveram um fenômeno que tende a ocorrer em condições que estavam usualmente associadas com a transferência de metal do tipo goticular (spray), sendo caracterizado pela ocorrência de transferência globular repulsiva com elevada formação de respingos, elevada quantidade de fumos e uma aparente inversão na relação entre a tensão do arco e seu comprimento. A sua ocorrência dependeria de vários fatores, tais como o comprimento do arco, composição do gás de proteção, características da fonte de soldagem e da própria duração do processo de soldagem (foi observado que a instabilidade tendia a diminuir com o tempo de soldagem, principalmente quando uma fonte de tensão constante era usada).

Ainda foi relatado que, na soldagem com fonte de tensão constante (CV), em condições que favoreciam a ocorrência da instabilidade, o processo tendia a se iniciar de forma instável, com transferência globular repulsiva e grande formação de respingos. Algum tempo depois (que dependia das condições operacionais), o processo se estabilizava,

passando para transferência spray com um aumento significativo do comprimento do arco e do valor da corrente (de 30 a 50 A). Em testes realizados com fonte de corrente constante (CI), foi observada a ocorrência de uma alternância de períodos de operação instável e estável de curta duração (milissegundos), com uma maior ocorrência dos períodos instáveis para condições operacionais com menores comprimentos de arco. Embora nestas condições o comprimento do arco não tenha variado de forma significativa, fortes flutuações na tensão de operação (de até cerca de 10 V) foram observadas, com os picos de maior valor de tensão mais frequentemente observados nas condições operacionais mais instáveis. Esta tendência foi observada para diferentes gases de proteção sendo que a presença de períodos de operação instável era maior para menores teores de oxigênio.

Modenesi e Nixon (1994) explicaram estes resultados supondo a existência de duas formas de operação do arco elétrico que apresentavam diferentes níveis de tensão ($V_{estável}$ e $V_{instável}$) para o mesmo comprimento do arco. A FIG. 6.1 mostra esquematicamente a transição da operação instável (ponto 1) para a estável (ponto 4) para uma fonte de inclinação (slope) arbitrária $\left(\frac{dV}{dI}\right)_{fonte}$. Se o processo de soldagem operar inicialmente no ponto 1 (operação instável), quando o comportamento do arco mudar para o modo estável, a tensão que é requerida pelo processo seria reduzida de $V_{instável}$ para $V_{estável}$. Respondendo às novas condições de operação, o processo tenderia a operar no ponto 3. Porém, com o aumento da corrente, a taxa de fusão aumentaria e poderia exceder a taxa de alimentação do arame. Desta forma, o comprimento do arco tenderá a aumentar (e o comprimento do eletrodo a reduzir) até que o equilíbrio seja restabelecido no ponto 4. As mudanças tanto no comprimento do arco como na corrente dependem da inclinação da fonte e seriam mais intensas quando esta inclinação for menor. Considerando somente a queda de tensão associada com o arco, a variação da corrente seria representada por:

$$I_{est} - I_{inst} = \frac{V_{inst}(1) - V_{est}(4)}{\left(\frac{dV}{dI}\right)_{fonte}} \quad \text{Eq. 6.1}$$

Onde $V_{inst}(1)$ e $V_{est}(4)$ são respectivamente os níveis de tensão para a operação instável e estável.

Na soldagem com uma fonte de corrente constante, a transição seria restringida a uma mudança do ponto 1 para o ponto 2. Conseqüentemente, somente pequenas alterações no comprimento do arco seriam esperadas.

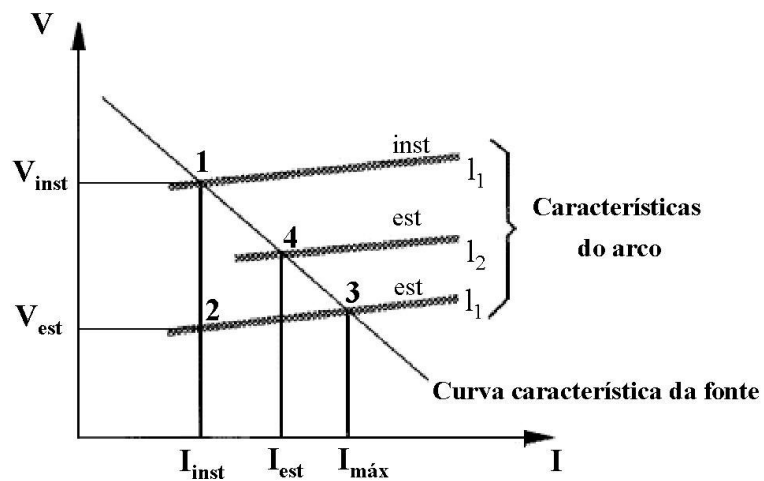


FIGURA 6.1 – Diagrama esquemático apresentando a relação entre a característica da fonte e a transição da operação instável (1) para a estável (4). L = comprimento do arco, $L_1 < L_2$. (Modenesi e Nixon, 1994)

A existência das duas formas de operação do arco foram associadas à ocorrência de diferentes mecanismos de emissão de elétrons na região catódica do arco. Um modelo que considera a competição entre estes mecanismos foi desenvolvido para explicar os resultados observados. Na condição de operação estável, a emissão de elétrons ocorreria, como usualmente aceito pela literatura (Guile, 1971), em associação com filmes de óxido na superfície do cátodo e com o consumo (isto é, a destruição) destes filmes. Na ausência de uma quantidade suficiente de oxigênio, a recomposição da camada de óxido do metal base seria dificultada e o seu consumo a afastaria da poça de fusão dificultando assim a manutenção do processo estável. Nesta condição, um mecanismo alternativo, segundo os autores, baseado na formação de vapores metálicos a partir da poça de fusão, tornaria operativo. Este mecanismo, devido ao seu efeito no

formato do arco, criaria um jato de plasma com sentido oposto ao usual e, desta forma, dificultaria a transferência de metal.

6.3 – TESTES PRELIMINARES

6.3.1 – Avaliação das fontes de soldagem

As FIG. 6.2 e 6.3 mostram os oscilogramas e os espectros da corrente obtidos em testes de soldagem MIG com as máquinas VI 400 e DIGITEC/600, respectivamente. Pode-se verificar nos espectros que a VI 400, uma fonte convencional tipo transformador-retificador, apresenta maior nível de ruídos nos sinais elétricos do que a DIGITEC/600 (fonte transistorizada chaveada no secundário). Este ruído, com frequências de 60 Hz ou de múltiplos desta, foi considerado como resultante do processo de retificação e pode dificultar a caracterização da instabilidade de mecanismos catódicos. Além de apresentar um menor nível de ruídos, a fonte DIGITEC/600 também apresenta controles que tornam relativamente simples fazer variações bruscas de sua tensão de operação, o que seria importante para caracterizar a instabilidade em operação com tensão constante. A FIG. 6.4, obtida com a metodologia detalhada na seção 5.3.2.1 do capítulo 5, ilustra a capacidade de resposta dinâmica da fonte à variações bruscas de corrente e tensão. Devido a estas características, optou-se por utilizar, em praticamente todo o trabalho, apenas a fonte DIGITEC/600.

Após esta definição, foram executados testes exploratórios, tanto em tensão constante como em corrente constante, para uma avaliação inicial das condições de ocorrência da instabilidade de mecanismos catódicos. Nos testes com operação em CV, observou-se uma elevação brusca na tensão quando o processo mudava de operação estável para instável (FIG. 6.5). Esta variação, não mencionada no trabalho de Modenesi e Nixon (1994), parece estar associada com a forma de funcionamento da fonte DIGITEC/600. Esta, quando operando em tensão constante, responde a mudanças no processo primeiro como uma fonte de corrente constante e, a seguir, o seu sistema de controle atua de forma a restabelecer a tensão de operação. Esta forma de operação dificultou

inicialmente a caracterização da instabilidade no presente trabalho nos testes com operação em CV pois tornou mais complexas as variações de corrente e a tensão durante os ensaios. Contudo, esta dificuldade não impossibilitou as análises dos oscilogramas principalmente porque este comportamento era mais evidente nos testes monitorados com altas taxas de aquisição de dados, como, por exemplo, 4 kHz. Nos testes realizados neste trabalho com operação em tensão constante, foi utilizada a taxa de aquisição de 100 Hz, muito lenta para captar esta característica da fonte.

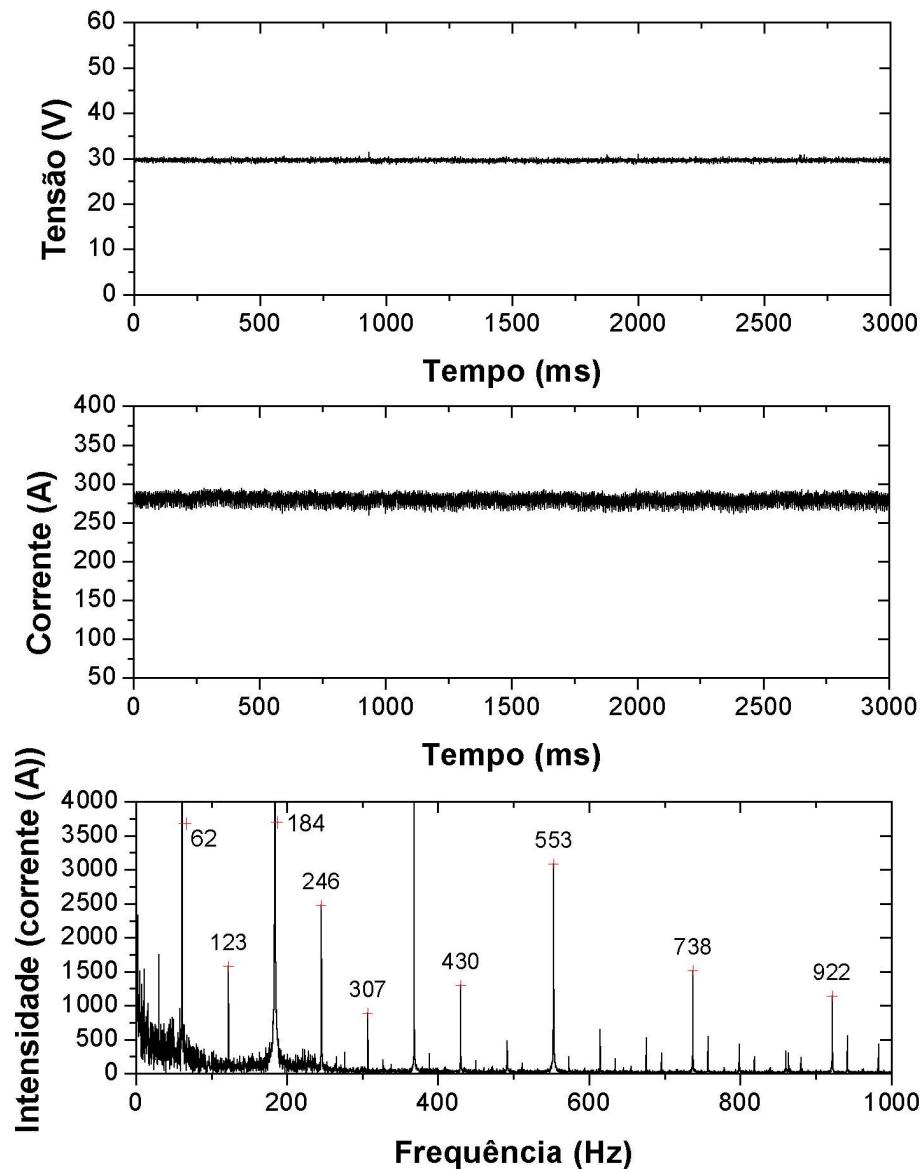


FIGURA 6.2 – Oscilogramas e espectro de corrente obtidos durante o teste da fonte VI 400. Modo de operação tensão constante, aço carbono, velocidade de alimentação do arame 8 m/min, proteção: Ar + 4% CO₂.

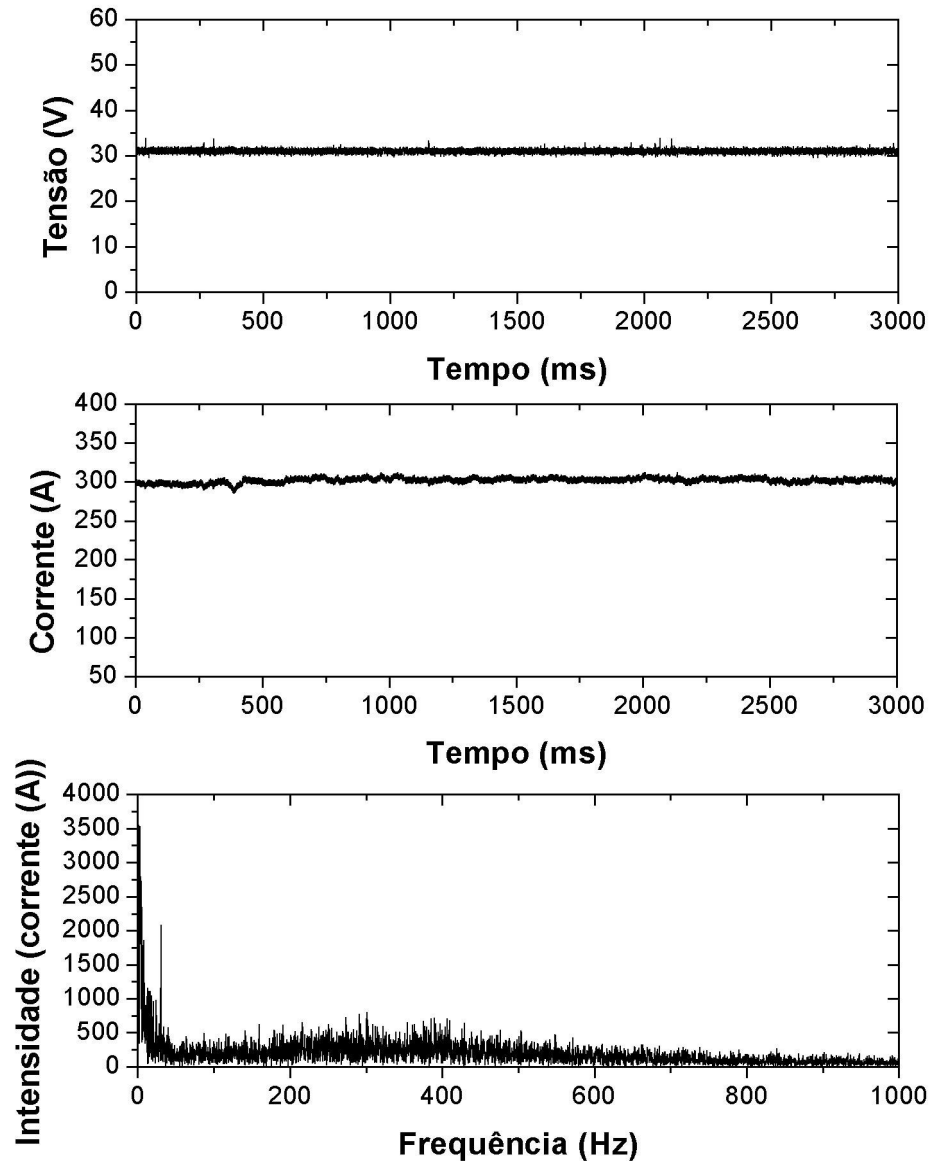


FIGURA 6.3 – Oscilogramas e espectro de corrente obtidos durante o teste da fonte DIGITEC/600. Modo de operação tensão constante, aço carbono, velocidade de alimentação do arame 8 m/min, proteção: Ar + 4% CO₂.

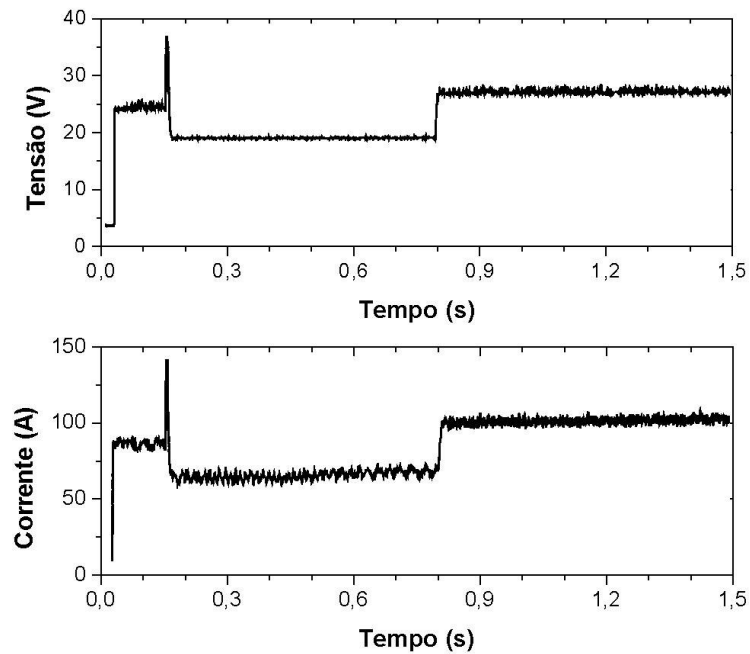


FIGURA 6.4 – Oscilograma obtido no teste da DIGITEC/600 para verificar o tempo de resposta da fonte quando há variação brusca da tensão durante a soldagem

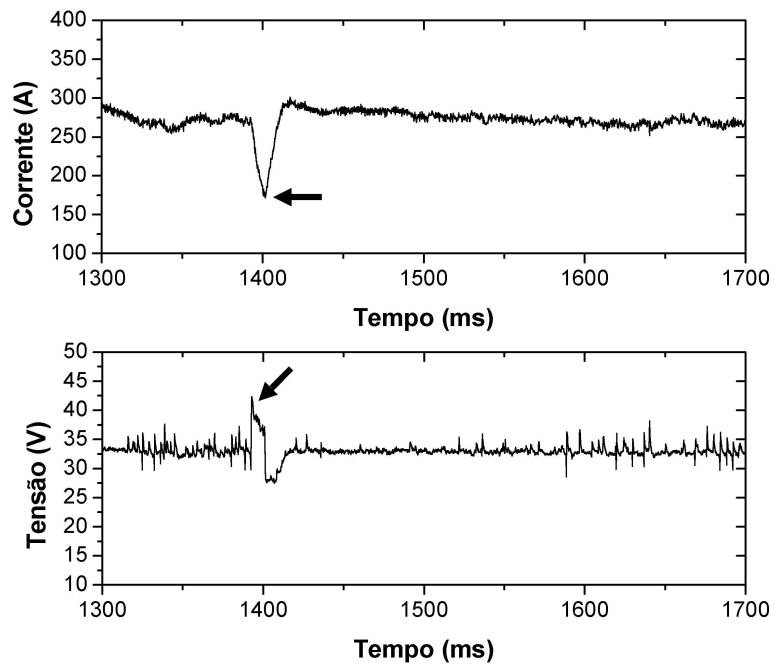


FIGURA 6.5 – Oscilogramas obtido durante o teste com a fonte DIGITEC/600. Modo de operação tensão constante, aço carbono, velocidade de alimentação 10 m/min, proteção por argônio puro. Frequência de aquisição 4 kHz.

6.3.2 – Testes iniciais de soldagem

a) Caracterização inicial da instabilidade de mecanismos catódicos

Estes testes foram feitos com a fonte operando tanto em tensão constante como em corrente constante. Após cada teste, os sinais coletados (tensão e corrente) foram analisados com a ajuda do programa SINAL (Anexo A). As FIG. 6.6 e 6.7 mostram oscilogramas de alguns dos ensaios feitos. Para os testes realizados em tensão constante, flutuações no comprimento do arco e nos níveis de corrente foram observadas durante a transição de operação instável para estável, resultando em mudanças facilmente perceptíveis no oscilograma (FIG. 6.6) e durante a execução dos testes. Já para os testes realizados em corrente constante não se observaram fortes flutuações no comprimento do arco durante o teste. Por outro lado, para as condições em que o processo apresentava uma operação instável, observou-se, nos oscilogramas, a ocorrência de períodos de maior e menor tensão, com uma maior ocorrência de períodos de maior tensão para menores valores de CTWD (FIG. 6.7).

Modenesi e Nixon (1994) relacionaram a ocorrência da instabilidade com os períodos de maior valor de tensão e a operação estável com os períodos de menores valores de tensão. Esta relação foi baseada nas informações tiradas dos oscilogramas visto que, quando o processo operava de forma estável, isto é, quando a transferência de metal era do tipo spray, o valor do CTWD era alto e os períodos com menor tensão de operação eram predominantes. Quando o processo operava de forma instável, isto é, quando a transferência de metal era predominantemente do tipo globular repulsiva, o valor do CTWD era pequeno e os períodos com maior tensão de operação eram mais comuns. Assim, estes autores inferiram que embora o comprimento do arco aparentemente não variasse de forma forte, como foi observado na soldagem com tensão constante, para um mesmo valor de CTWD na soldagem com corrente constante, os períodos instáveis estariam associados com os maiores valores de tensão e os períodos estáveis com os menores valores de tensão. Estes autores, contudo, não puderam comprovar, de forma direta, esta relação.

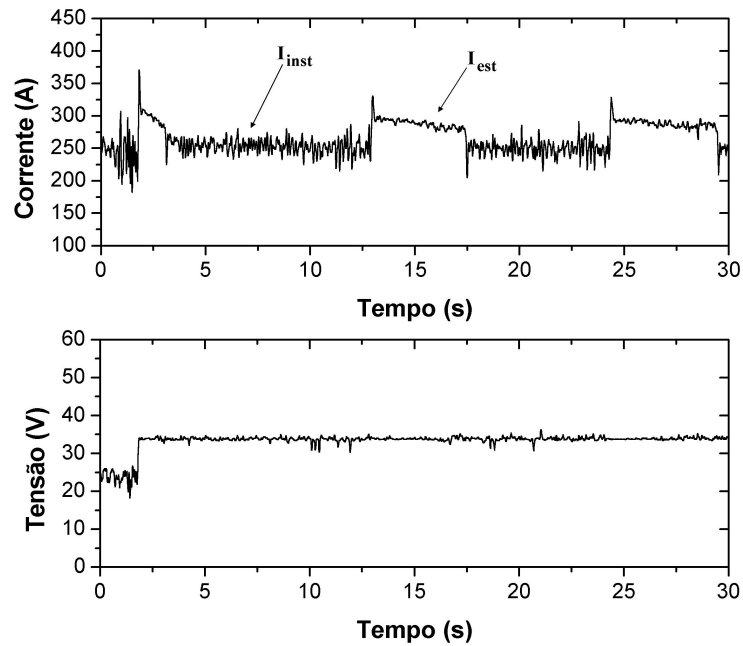


FIGURA 6.6 - Resultado típico de testes utilizando a fonte DIGITEC operando em CV. Transição do modo de operação instável (I_{inst}) para estável (I_{est}). Aço Carbono; Proteção: argônio puro, velocidade de alimentação do arame: 9 m/min.

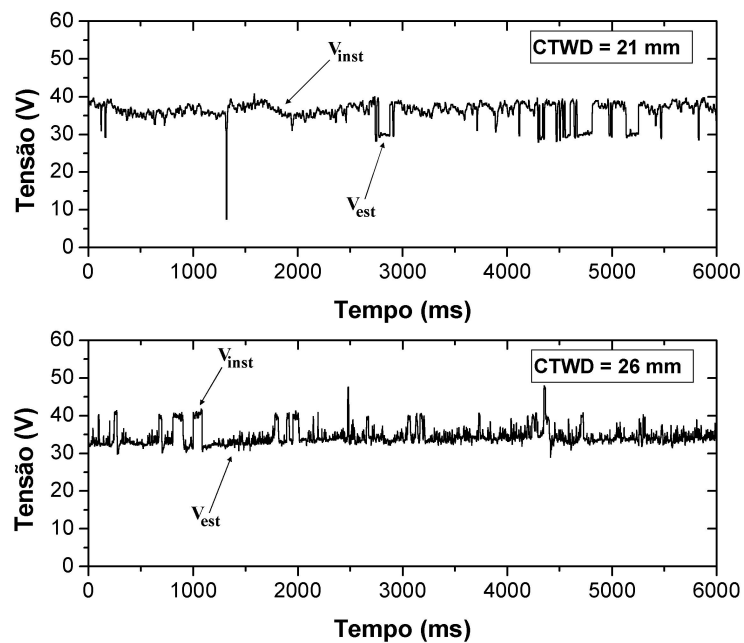


FIGURA 6.7 - Resultado típico dos testes utilizando a fonte DIGITEC operando em CI. Transição do modo de operação instável (V_{inst}) para estável (V_{est}). Aço carbono; Proteção: argônio puro, Velocidade de alimentação do arame: 7,8 m/min. Corrente regulada: 255 A.

b) Bocal extra de proteção

Como a instabilidade de mecanismos catódicos pode estar relacionada com o consumo de filmes de óxido na superfície do metal base e estes podem ser regenerados pelo oxigênio do ar atmosférico, uma série de testes foi feita para avaliar o efeito do uso de bocais extras de proteção com o objetivo de melhorar a eficiência desta (ver seção 5.3.2 (b)). As FIG. 6.8 e 6.9 mostram oscilogramas obtidos durante os testes em aço carbono sem ou com o uso destes bocais adicionais.

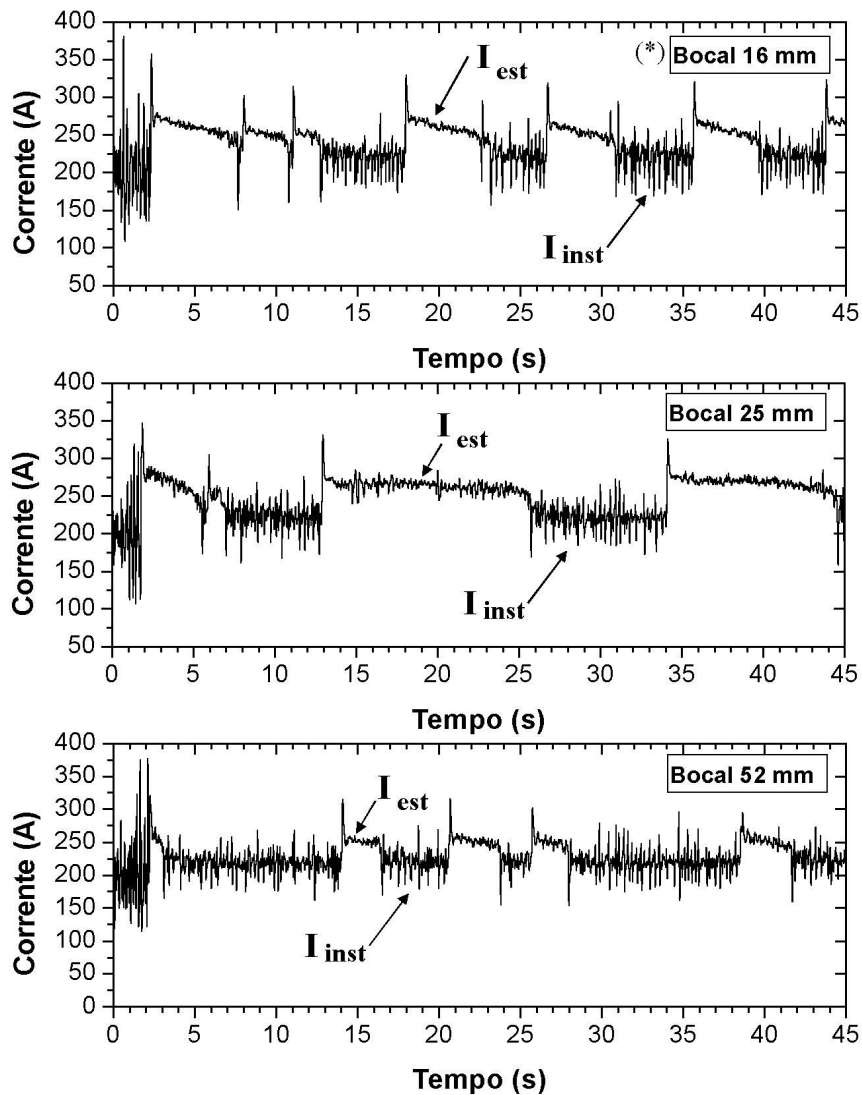


FIGURA 6.8 – Influência do diâmetro do bocal no fenômeno de instabilidade de mecanismos catódicos. Fonte operando em CV, proteção por argônio puro.

(*) Teste utilizando apenas o bocal da tocha.

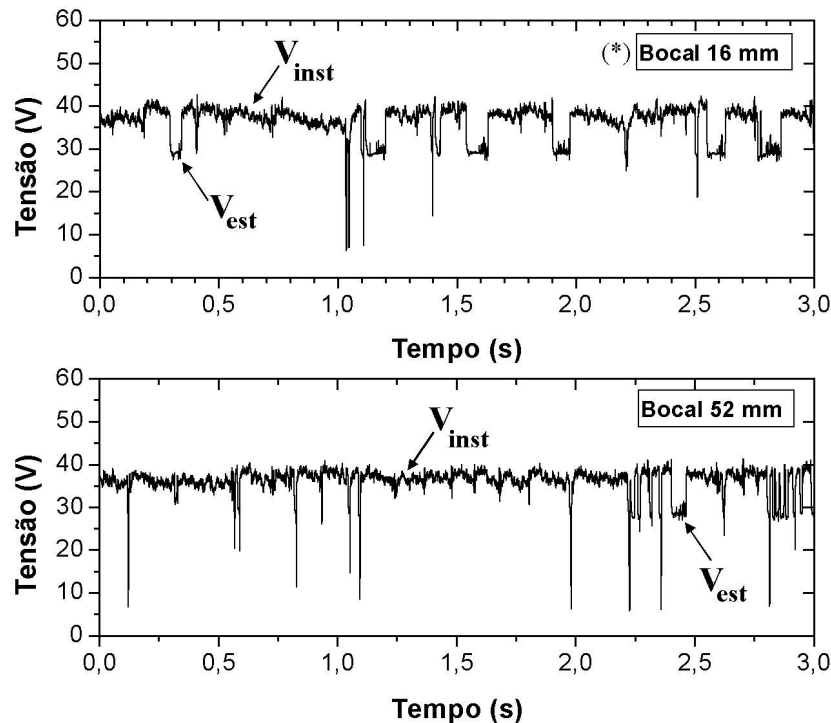


FIGURA 6.9 – Influência do diâmetro do bocal no fenômeno de instabilidade de mecanismos catódicos. Fonte operando em corrente constante, proteção por argônio puro. (*) Teste utilizando apenas o bocal de proteção da tocha.

Os resultados obtidos nas FIG. 6.8 e 6.9 indicam que independentemente do diâmetro do bocal de proteção, a instabilidade pode ocorrer, embora a sua intensidade possa, aparentemente, variar.

Para verificar se o uso do bocal extra de proteção e seu diâmetro influenciavam os valores dos patamares de corrente e tensão encontrados nos oscilogramas, foram calculados, com o auxílio do programa SINAL, os valores médios da corrente e tensão durante os períodos de operação estável e instável de cada um dos oscilogramas destas figuras (TAB 6.1). Pode-se verificar que os valores encontrados são relativamente próximos e não parecem indicar uma influência clara do diâmetro do bocal neste aspecto específico. Por outro lado, as TAB. 6.2 e 6.3 mostram as durações médias relativas dos períodos de operação estável e instável nos testes das FIG. 6.8 e 6.9, e indicam uma redução na duração ou quantidade dos períodos de operação estável para os testes com proteção gasosa adicional.

TABELA 6.1: Corrente e tensão média nas condições de operações estável e instável (dados das FIG. 6.8 e 6.9).

Diâmetro do bocal (mm)	Corrente média (Fonte operando em CV)		Tensão média (Fonte operando em CI)	
	I _{estável}	I _{instável}	V _{estável}	V _{instável}
16	254	222	30	38
25	257	221	-	-
52	250	220	29	37

TABELA 6.2: Duração relativa dos períodos estáveis e instáveis nos oscilogramas obtidos nos pré testes com a fonte operando em CV. Aço carbono. Proteção: Ar puro

Diâmetro do bocal (mm)	% estável	% instável
16	51	49
25	47	53
52	34	66

TABELA.6.3: Duração relativa dos períodos estáveis e instáveis nos oscilogramas obtidos nos pré testes com a fonte operando em CI. Aço carbono. Proteção: Ar puro

Diâmetro do bocal (mm)	% estável	% instável
16	20	80
52	10	90

Os resultados das TAB. 6.2 e 6.3 sugerem que o uso do bocal extra de proteção favorece a ocorrência da instabilidade por mecanismos catódicos. Este comportamento está de acordo com o mecanismo proposto originalmente para o fenômeno pois o uso do bocal extra de proteção dificulta a entrada de oxigênio da atmosfera e, desta forma, a regeneração por este de camadas de óxido em regiões da peça em que a emissão de elétrons para o arco esteja ocorrendo.

Neste trabalho, para reduzir a chance de que a região próxima do arco seja influenciada pelo ar atmosférico, a maioria dos testes foi realizada com o bocal extra de proteção com 52 mm de diâmetro.

c) Características da instabilidade observadas nos testes iniciais

✓ Testes com a fonte operando em tensão constante (CV)

A FIG. 6.10 mostra, para proteção com Ar puro e Ar + 1%O₂, oscilogramas de corrente de soldagem obtidos nos testes com a fonte DIGITEC/600 operando em tensão constante. Observa-se, nos dois segundos iniciais, um menor nível de corrente correspondentes à fase inicial do teste com o menor nível de tensão (25 V) (ver metodologia experimental, item 5.3.2.1). Após o ajuste da tensão para o seu valor de teste (33 V), nota-se, para os dois gases de proteção utilizados, períodos com menores e maiores níveis de corrente, cada um com vários segundos de duração. Como já descrito, os menores níveis de corrente foram associados com a operação instável. Foi observado durante esta condição, a ocorrência de muitos respingos, geração de grande quantidade de fumos (FIG. 6.11(a)) e uma maior luminosidade do arco. Por outro lado, os maiores níveis de corrente foram associados com uma operação estável, durante a qual foi observada uma menor geração de respingos e fumos, FIG. 6.11(b), e menor luminosidade. Tong *et al.* (2005), estudando manifestações da instabilidade de mecanismos catódicos em alumínio, observou uma variação similar da luminosidade.

Através das observações feitas durante a execução dos testes e da análise dos oscilogramas (FIG. 6.10 (a)), verificou-se que na soldagem com Ar puro, os períodos de operação instável e estável tendem a ocorrer de forma alternada, enquanto que, com Ar + 1%O₂, apenas uma mudança na forma de operação tende a ocorrer (FIG. 6.10(b)).

Com auxílio do programa SINAL, histogramas dos dados dos oscilogramas de corrente da FIG. 6.10 (a) e (b) foram construídos (FIG. 6.12) para mostrar a distribuição dos valores de corrente durante as condições de operação estável e instável. Nestes histogramas, a presença de mais de um pico de corrente é característica da ocorrência de mais de uma forma de operação (estável/instável).

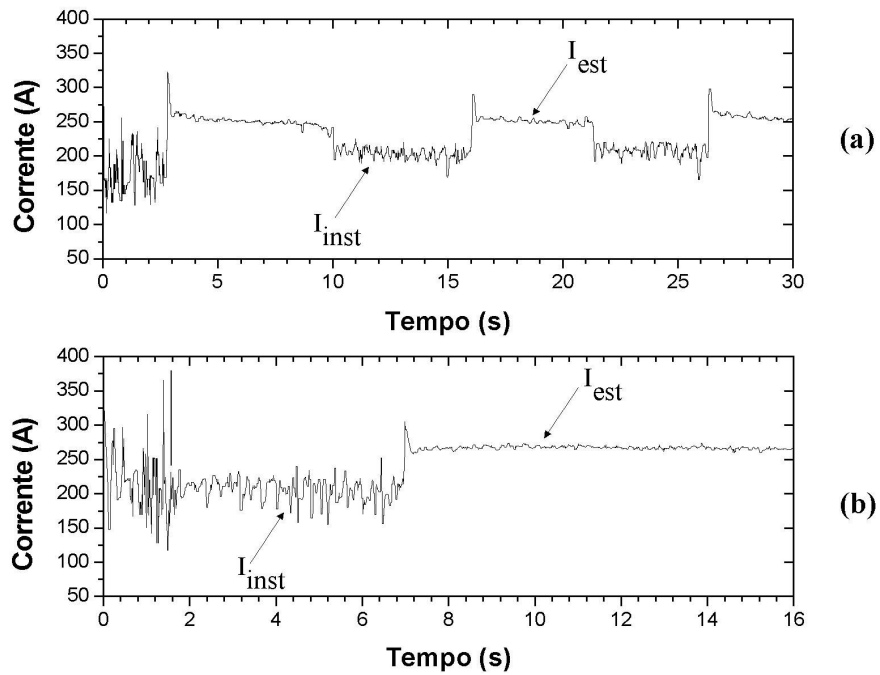


FIGURA 6.10 - Oscilogramas de corrente obtidos nos testes com a fonte operando em tensão constante. Aço carbono. (a) Proteção por Ar puro. (b) Proteção por Ar + 1% O₂. I_{inst} .(Corrente instável) – I_{est} .(Corrente estável)



FIGURA 6.11 – Foto da região próxima ao arco durante a soldagem com operação em CV (velocidade de alimentação: 7 m/min). Condição (a) instável e (b) estável. Observar a diferença da quantidade de fumos formada.

Nos testes com a fonte operando em tensão constante, para caracterizar a mudança nas condições de operação do processo, usou-se a diferença entre os valores destes picos, isto é, a diferença entre a corrente estável e instável (ΔI). Para os dois experimentos da FIG 6.10, pode-se observar que este parâmetro é maior para a proteção que contém 1%O₂ ($\Delta I \approx 60$ A). Este resultado foi associado ao valor da corrente estável para esta mistura que foi superior (265 A) ao valor da corrente estável quando se utiliza argônio puro como proteção (251 A).

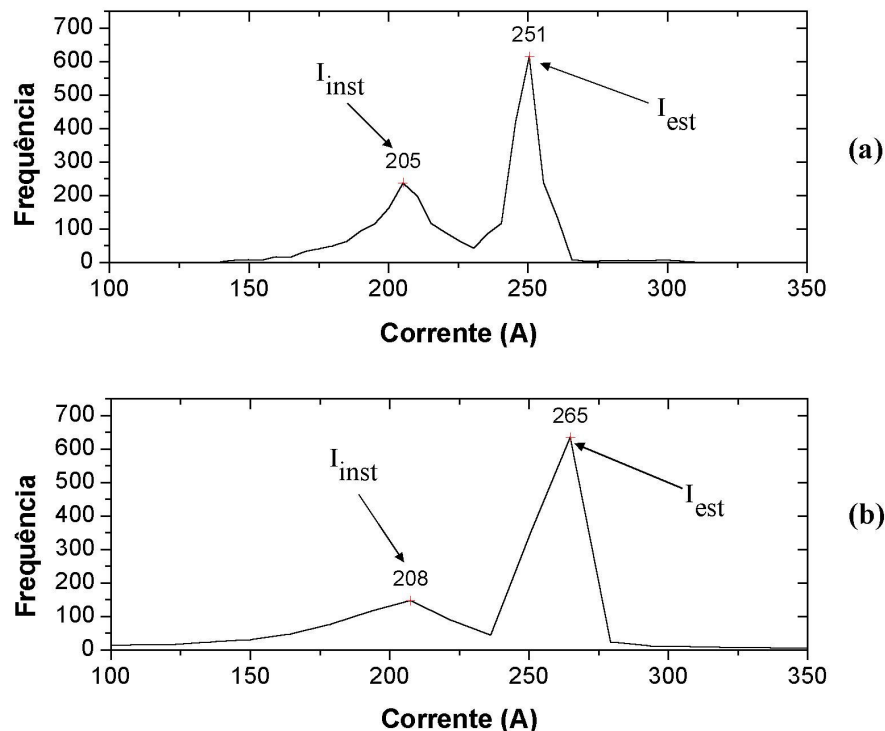


FIGURA 6.12 – Histogramas obtidos nos testes com a fonte operando em tensão constante. (a) Proteção por Ar puro. (b) Proteção por Ar + 1% O₂. I_{inst} .(Pico instável) – I_{est} .(Pico estável)

✓ *Testes com a fonte operando em corrente constante (CI)*

As FIG. 6.13 e 6.14 mostram, para dois gases de proteção (Ar puro e Ar + 1%O₂) e diferentes valores de CTWD, oscilogramas de tensão de soldagem obtidos em testes

iniciais com a fonte operando em corrente constante. De uma forma geral, observam-se, para ambos os gases de proteção, dois níveis de tensões, associados com períodos de operação estável (tensões mais baixas) e instável (tensões mais elevadas) conforme relatado por Modenesi e Nixon (1994). Da mesma forma observada por estes autores, para menores valores de CTWD (e de forma mais intensa nos testes com proteção por Ar puro), ocorre uma predominância dos períodos de tensão mais elevada e que isto correspondeu a uma operação mais instável do processo. Nestas condições e de forma similar à observada nos testes com tensão constante, ocorreu a formação de uma maior quantidade de fumos e respingos. Como os períodos de estabilidade e instabilidade nos testes com a fonte operando em corrente constante são muito curtos, fica difícil observar, como nos testes com a fonte operando em tensão constante, a oscilação de luminosidade entre os períodos estáveis e instáveis. Assim, para analisar a ocorrência destas oscilações, alguns testes foram realizados com a aquisição de dados de tensão e do sinal gerado por um sensor de luz (fotodiodo) apontado para o arco (ver item 5.3.2.2 (e) da metodologia experimental). A FIG. 6.15 mostra os resultados de um destes testes. Observa-se, no oscilograma de tensão, indícios característicos da instabilidade de mecanismos catódicos (patamares de tensão associados com períodos de operação instável). Pode-se verificar comparando-se este sinal com o obtido pelo sensor de luz que, durante os períodos instáveis (tensões mais elevadas), ocorre um aumento da luminosidade do arco em relação aos períodos de operação estável (tensões mais baixas). Isto confirma a observação feita durante os testes com a fonte operando em CV e mostra de uma forma mais segura que, durante a operação instável, ocorre uma geração mais intensa de radiação luminosa pelo arco, particularmente considerando-se que, nos testes em CI, o comprimento do arco tende a permanecer relativamente inalterado. A correlação entre a forma de operação (estável x instável) e a luminosidade do arco é realçada na FIG. 6.15(b). Observa-se, nesta figura, a existência de duas concentrações de pontos (Tensão, Luminosidade) que correspondem aos dois modos de operação.

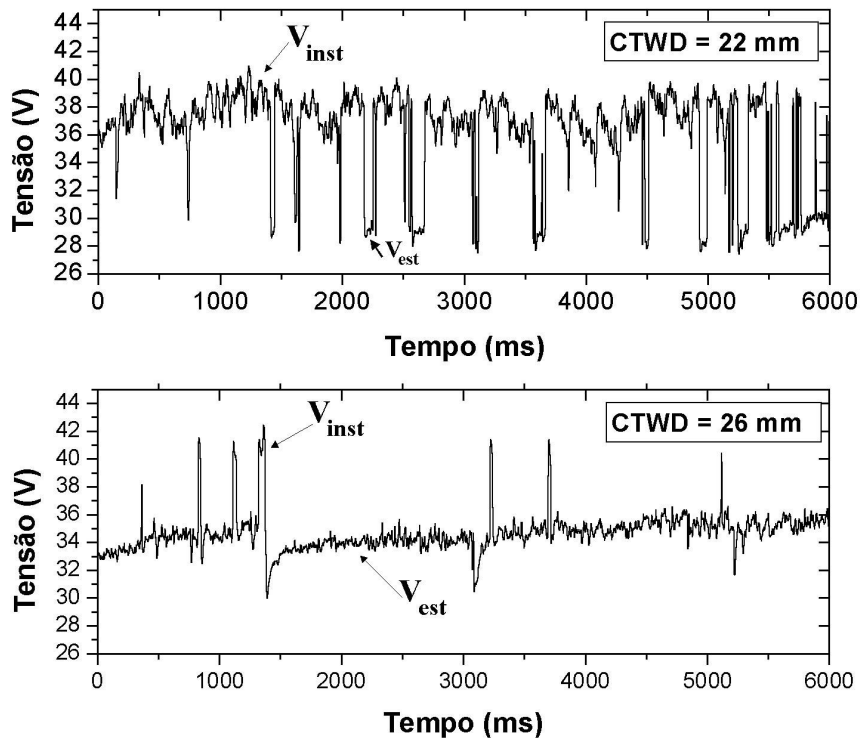


FIGURA 6.13 - Oscilogramas de tensão obtidos nos testes com a fonte operando em corrente constante. Aço carbono. Proteção por Ar puro.

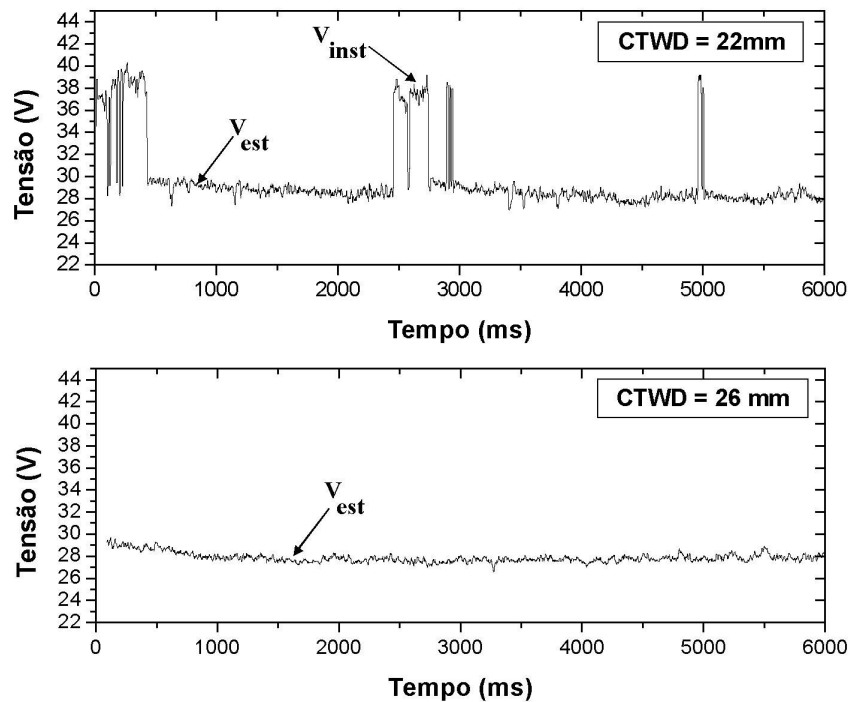


FIGURA 6.14 - Oscilogramas de tensão obtidos nos testes com a fonte operando em corrente constante. Aço carbono. Proteção por Ar + 1% O₂.

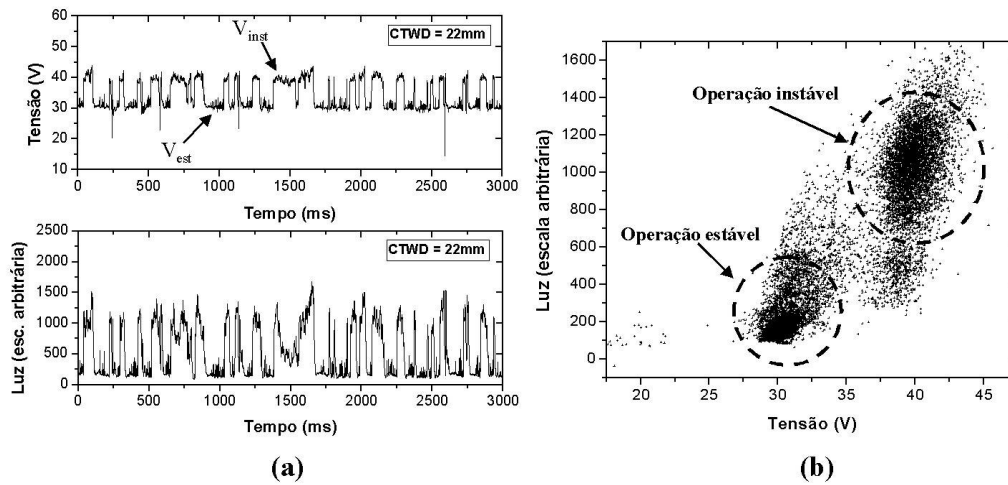


FIGURA 6.15 – Oscilogramas de tensão de soldagem e de luz e gráfico de tensão x luz obtidos nos testes com a fonte operando em corrente constante. Aço carbono. Proteção por argônio puro.

De uma forma similar à que foi feita nos testes com tensão constante, foram construídos histogramas dos dados dos oscilogramas de tensão das FIG. 6.13 e 6.14 para mostrar a distribuição dos valores de tensão durante as condições de operação estável e instável (FIG.6.16 e 6.17) nos testes em corrente constante. A presença de mais de um pico de tensão em alguns histogramas está ligada aos diferentes níveis de tensão do processo operando de forma estável e instável.

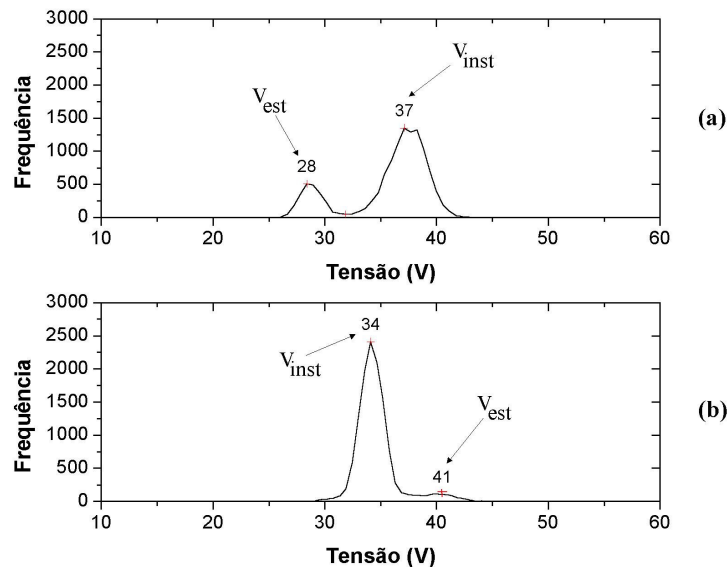


FIGURA 6.16 – Histogramas obtidos nos testes com a fonte operando em corrente constante com proteção por Ar puro. (a) CTWD = 22 mm (b) CTWD = 26 mm V_{inst} .(Pico instável) – V_{est} .(Pico estável)

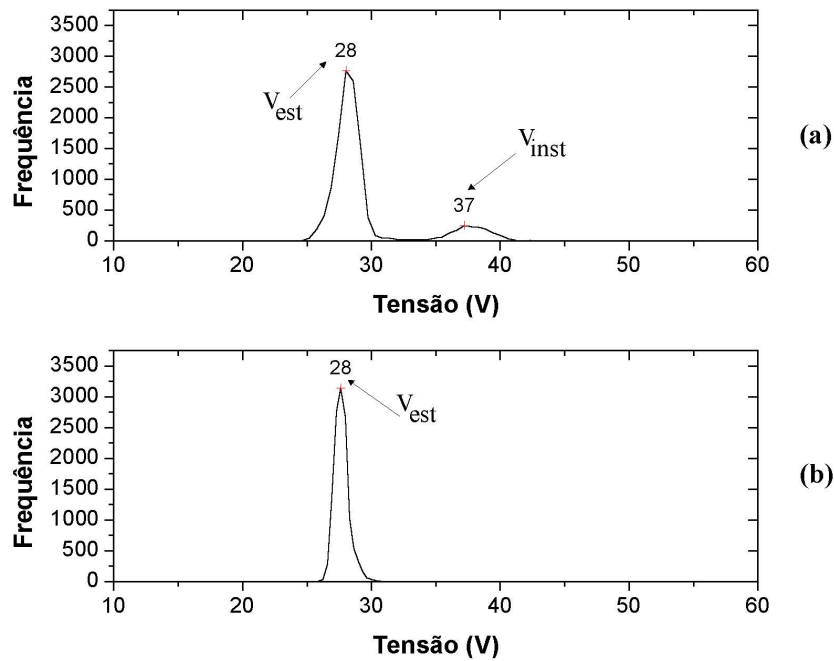


FIGURA 6.17 – Histogramas obtidos nos testes com a fonte operando em corrente constante com proteção por Ar + 1% O₂. (a) CTDW = 22 mm (b) CTDW = 26 mm V_{inst} .(Pico instável) – V_{est} .(Pico estável)

Para caracterizar a mudança nas condições de operação do processo usou-se a diferença entre os valores de tensão instável e estável (ΔV). Pode-se considerar que este parâmetro seja mais significativo do que o parâmetro (ΔI), pois ele se refere a mudanças nas condições de operação do arco com a corrente e o comprimento do arco mantidos relativamente constantes. Neste contexto, alterações no valor de (ΔV) podem ser, em uma primeira aproximação, relacionadas diretamente com mudanças nas condições de operação do arco, particularmente, como proposto por Modenesi e Nixon (1994) e, mais recentemente, por Tong *et al.* (2005) nas condições de emissão de elétrons na região catódica. Os resultados de no mínimo 3 réplicas para os dois tipos de proteção (TAB. 6.4) indicam que o valor de ΔV é maior para a proteção com Ar + 1% O₂, confirmando resultados anteriores de Modenesi e Nixon (1994). Estes autores associaram este comportamento ao valor da tensão estável que é maior quando se utiliza argônio puro como proteção

TABELA 6.4: Diferença média entre as tensões instáveis e estáveis dos testes preliminares (ΔV)

CTWD (mm)	Ar puro (ΔV)	Ar + 1%O ₂ (ΔV)
22	8,5 V	9,5
26	6,5 V	-

✓ *Ocorrência da instabilidade de mecanismos catódicos em outras condições de soldagem*

O LABSEND dispõe atualmente de um extenso banco de sinais elétricos de corrente e tensão de soldagem de testes com o processo MIG/MAG obtidos em diferentes condições operacionais. Foi feita uma busca, neste banco, de sinais que apresentassem indícios de ocorrência de instabilidade de mecanismos catódicos.

A FIG. 6.18 mostra alguns oscilogramas de tensão obtidos durante testes com transferência por curto-circuito com arame de aço carbono (1,2mm) e diferentes gases de proteção. Pode-se observar nestes a presença de patamares de tensão ocorrendo principalmente ao término de curto-circuitos que podem ser considerados como indícios da ocorrência da instabilidade de mecanismos catódicos. Pode-se notar também que a ocorrência destes picos de tensão é maior para a mistura de Ar + 4%CO₂ e menor para a mistura de Ar + 25%CO₂. Este comportamento deve estar ligado com a maior facilidade de regeneração da camada de óxido na região catódica quando se utiliza mistura com maior teor de CO₂. De acordo com Smith (1978), o percentual de oxigênio contido em uma mistura com CO₂ corresponde aproximadamente a metade do teor de CO₂ desta mistura. Desta forma, a mistura de Ar + 4%CO₂ utilizada neste trabalho teria, na região do arco, um potencial de oxidação similar a de uma mistura de argônio com 2% de oxigênio e, conseqüentemente, o comportamento destas misturas deveria ser similar. Porém, a ocorrência de picos de instabilidade no teste com a proteção de Ar + 4% CO₂ parece ser mais pronunciada do que nos testes com Ar + 2%O₂ realizados no presente trabalho. Esta diferença pode estar associada às diferenças de parâmetros de soldagem usados, mas também com a tendência do CO₂ se formar novamente nas regiões periféricas do arco, onde a temperatura é mais baixa e, desta forma, consumir parte do

oxigênio disponível na atmosfera do arco e reduzir o potencial de oxidação em regiões em que a camada de óxidos deveria ser regenerada. Finalmente, um outro aspecto importante observado nestes oscilogramas é a ocorrência da instabilidade de mecanismos catódicos mesmo para proteção com um gás com elevada capacidade de oxidação, isto é, na mistura com 25% de CO_2 , que é um teor muito superior aos previamente indicados. Este resultado sugere que, em condições de transferência por curto-circuito ou, possivelmente de uma forma mais geral, em condições após uma reabertura do arco, existe uma maior facilidade da ocorrência da instabilidade de mecanismos catódicos. Tong *et al.* (2005) sugere um comportamento similar na soldagem de alumínio.

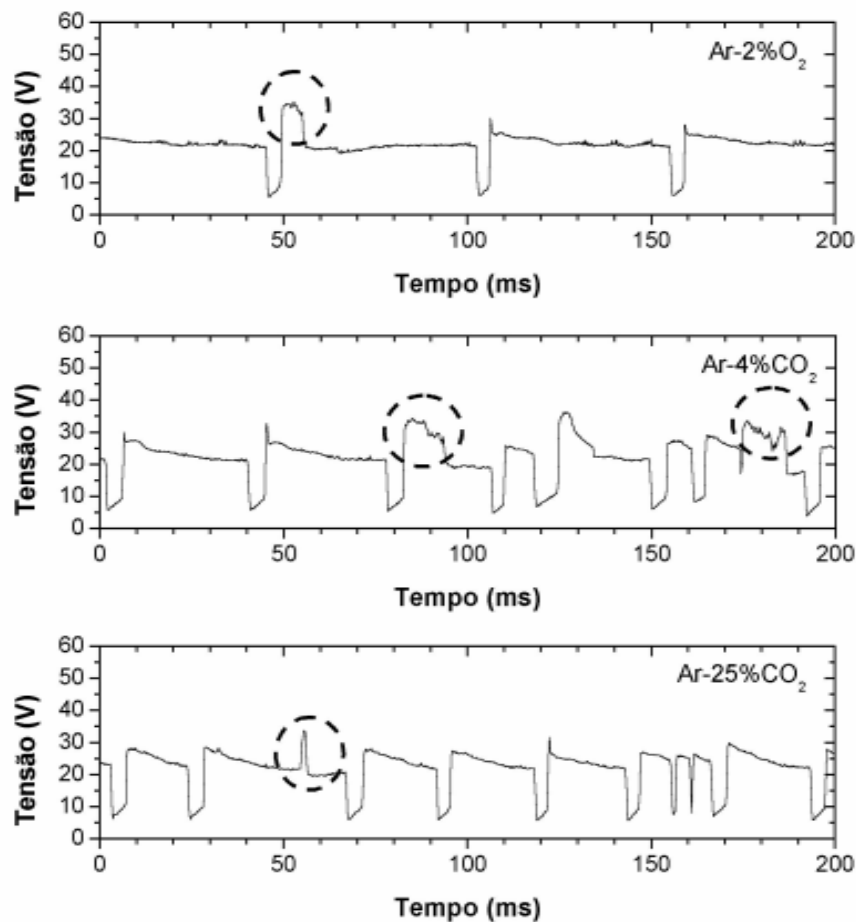


FIGURA 6.18 – Oscilogramas de testes com transferência por curto-circuito e diferentes gases de proteção. Material: Aço carbono, Velocidade de alimentação do arame: 6 m/min, Tensão de regulagem 25V, CTWD = 20 mm.

A FIG 6.19 mostra os oscilogramas de tensão e corrente obtidos durante um testes com transferência do tipo globular em aço carbono, com arame de 1,0 mm e proteção de Ar + 2%O₂. Pode-se observar no oscilograma de tensão que mesmo utilizando uma proteção razoavelmente oxidante, existe a presença de patamares com dois níveis bem distintos de tensão, com uma variação entre estes de aproximadamente 9 V. Estes podem ser considerados como indícios da instabilidade de mecanismos catódicos neste tipo de transferência. Foi observado ainda que presença deste patamar é mais freqüente após um pequeno curto.

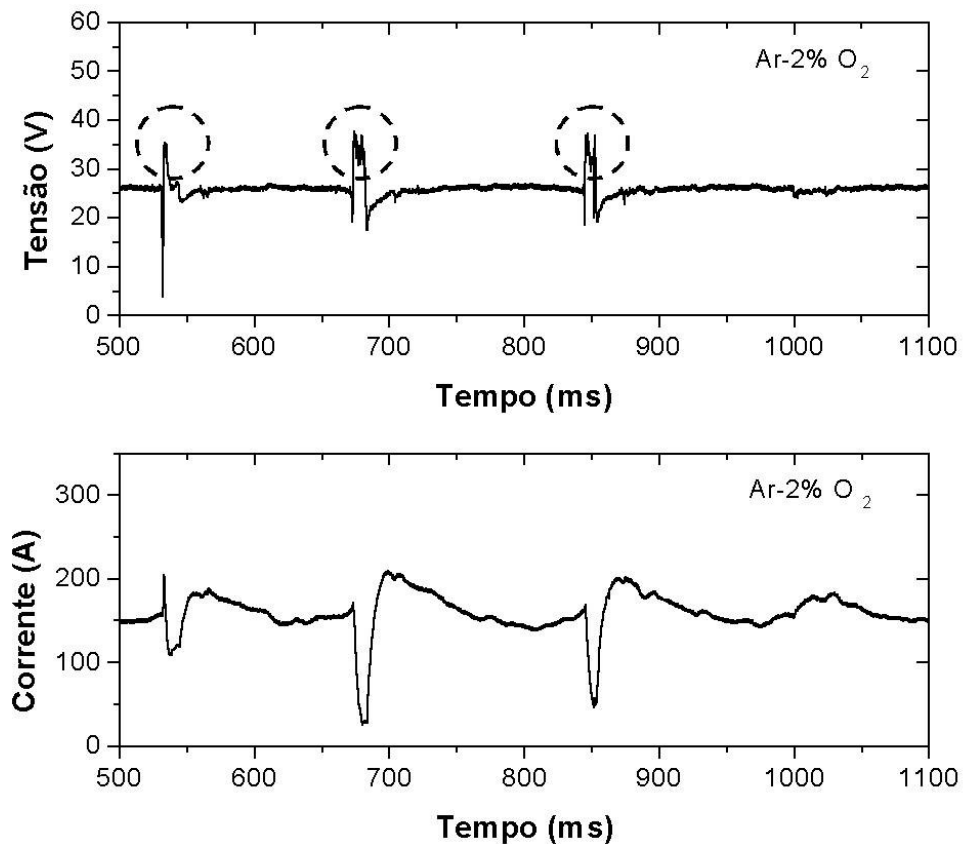


FIGURA 6.19 – Oscilograma de tensão e corrente obtidos durante um teste com transferência do tipo globular. Aço carbono, Velocidade de alimentação de arame: 6 m/min, Proteção: Ar + 2%O₂, Tensão de regulação: 30V, CTWD = 20mm.

6.4 – TESTES PRINCIPAIS

As condições experimentais utilizadas nesta etapa do trabalho foram levantadas na fase dos testes iniciais e, também, baseadas em parâmetros citados na literatura e estão mostradas no item 5.3.3 do capítulo 5. A seguir serão apresentados os resultados dos testes principais com a fonte operando em tensão constante e em corrente constante.

6.4.1 - Testes com a fonte operando em tensão constante

As FIG.6.20 a 6.27 mostram, para réplicas de testes realizados com os três metais de base utilizados neste trabalho (aço carbono, aço inoxidável e alumínio), oscilogramas e histogramas (quando oportuno) típicos da corrente de soldagem. Estes testes foram feitos com a fonte operando em CV e com proteção gasosa por argônio puro. Pode-se observar, para os três metais de base, que todos os oscilogramas apresentaram oscilações típicas na corrente de soldagem que caracterizam a ocorrência da instabilidade de mecanismos catódicos. Também, como é característico para a proteção de argônio puro, para uma mesma condição de soldagem, o processo oscila entre períodos (tempos) maiores e menores de estabilidade e instabilidade. As diferenças entre as réplicas podem estar associadas a uma série de fatores que comprometem a reprodução exata do sinal, como por exemplo, condições superficiais dos diferentes corpos de prova, ajustes dos parâmetros de soldagem se as réplicas tiverem sido feitas em dias diferentes, umidade relativa do ar etc. Uma forma de minimizar as oscilações ocorridas entre os resultados das réplicas, foi considerar sempre o comportamento médio das variações da corrente, ou seja, a média da corrente estável menos a média da corrente instável (ΔI). O ΔI médio dessas oscilações de corrente foram diferentes para cada metal de base, tendo variado entre cerca de 30 a 60 A

Foi observado durante a execução dos testes das FIG. 6.20 a 6.27 que nos períodos estáveis, isto é, nos períodos em que a corrente se manteve com o valor mais elevado, a transferência foi goticular (spray) para todos os três metais de base. Durante os períodos em que ocorreram as quedas de corrente, a transferência tendeu a mudar para globular (em geral, globular repulsiva). Durante este período, a gota de metal de adição tende a

crescer lentamente na ponta do eletrodo até atingir um diâmetro muito maior do que o diâmetro do arame, se destacando, em geral, lateralmente e normalmente gerando uma intensa agitação da poça de fusão.

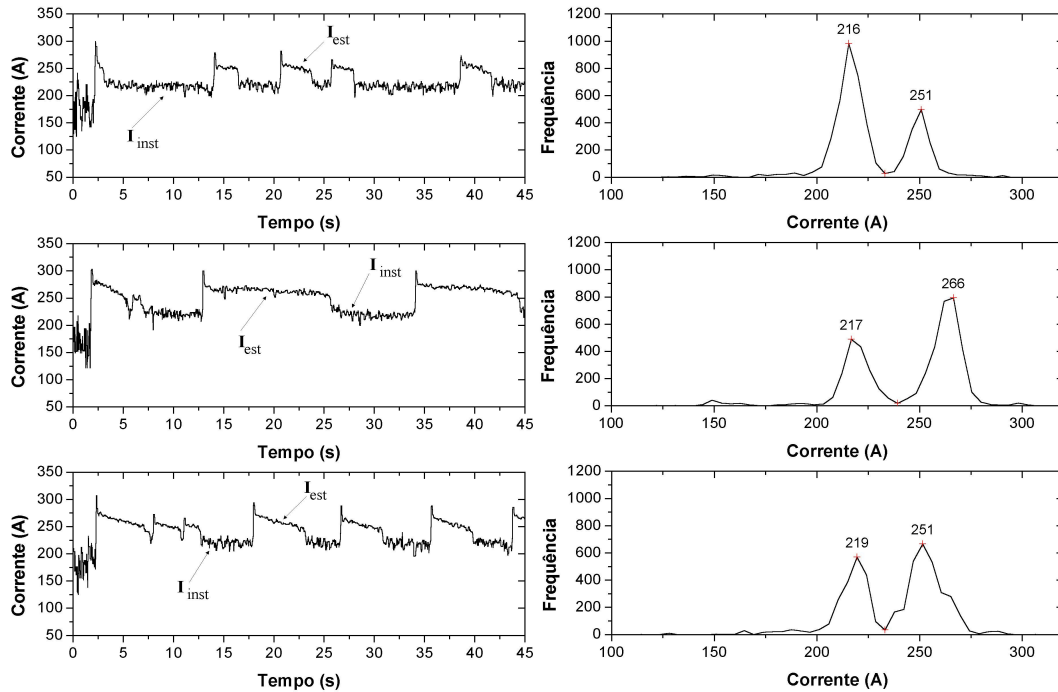


FIGURA 6.20 – Oscilogramas e histogramas de corrente dos testes realizados com a fonte operando em CV. Aço carbono, proteção: Ar puro, velocidade de alimentação do arame: 7 m/min, tensão de regulação: 35 V, CTWD = 22 mm.

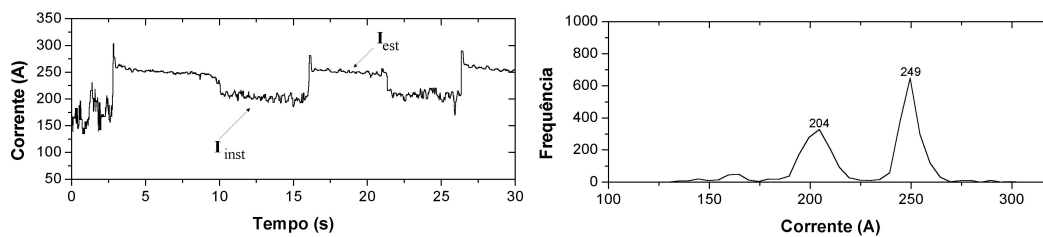


FIGURA 6.21 – Oscilogramas e histogramas de corrente dos testes realizados com a fonte operando em CV. Aço carbono, proteção: Ar puro, velocidade de alimentação do arame: 7 m/min, tensão de regulação: 33 V, CTWD = 22 mm.

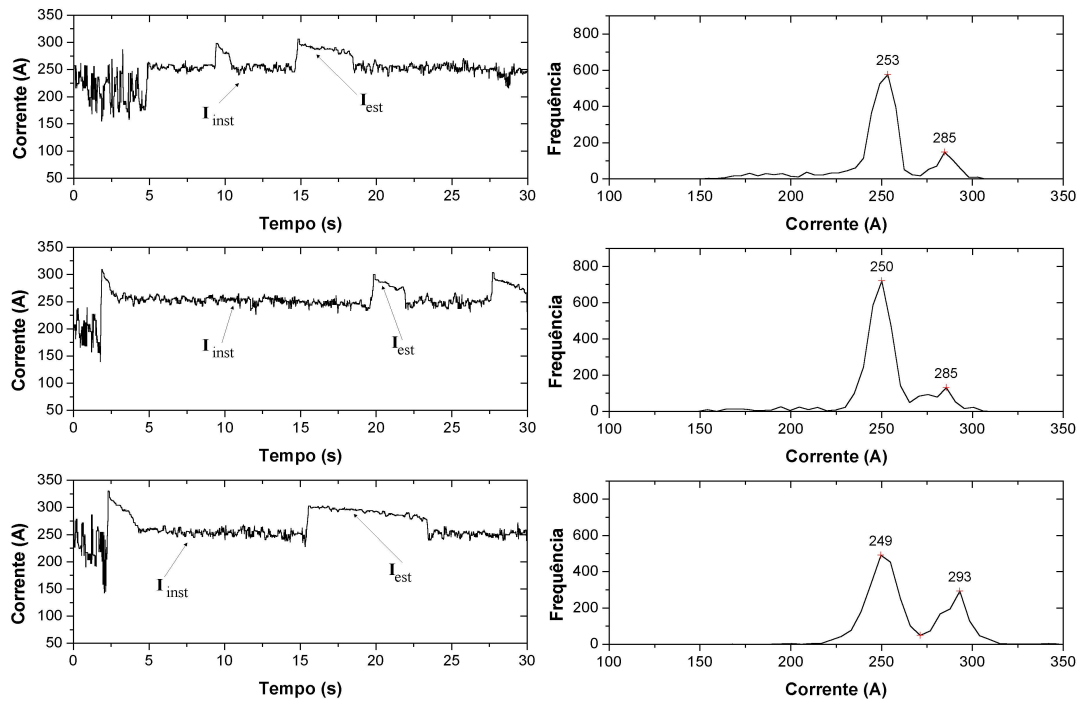


FIGURA 6.22 – Oscilogramas e histogramas de corrente dos testes realizados com a fonte operando em CV. Aço carbono, proteção: Ar puro, velocidade de alimentação do arame: 9 m/min, tensão de regulagem: 35 V, CTWD = 22 mm.

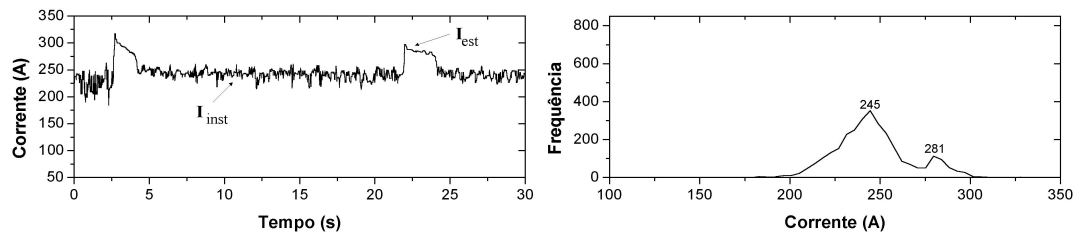


FIGURA 6.23 – Oscilogramas e histogramas de corrente dos testes realizados com a fonte operando em CV. Aço carbono, proteção: Ar puro, velocidade de alimentação do arame: 9 m/min, tensão de regulagem: 33 V, CTWD = 22 mm.

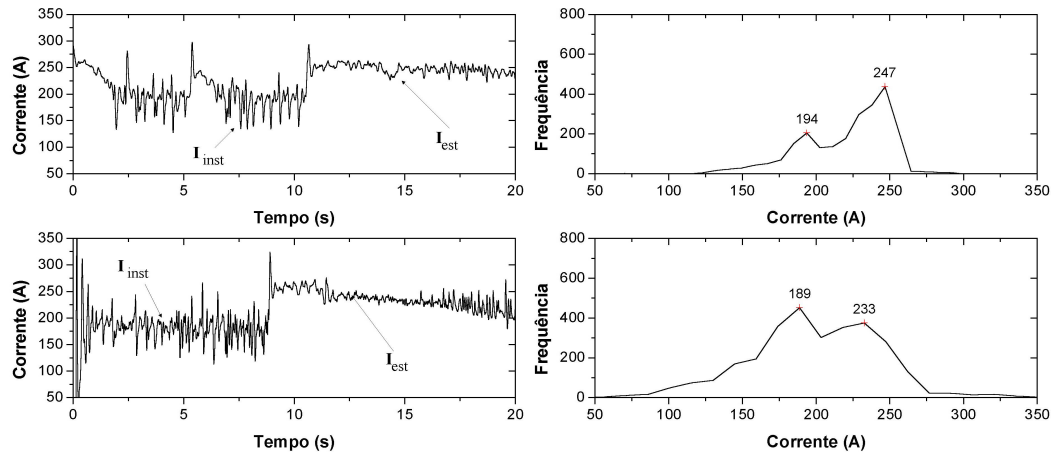


FIGURA 6.24 – Oscilogramas e histogramas de corrente dos testes realizados com a fonte operando em CV. Aço inoxidável, proteção: Ar puro, velocidade de alimentação do arame: 7 m/min, tensão de regulação: 35 V, CTWD = 22 mm.

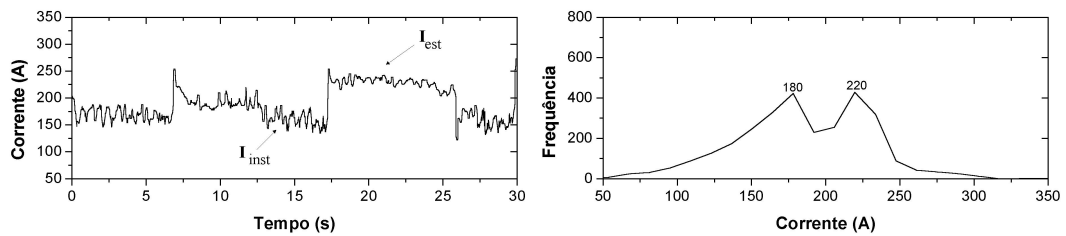


FIGURA 6.25 – Oscilogramas e histogramas de corrente dos testes realizados com a fonte operando em CV. Aço inoxidável, proteção: Ar puro, velocidade de alimentação do arame: 7 m/min, tensão de regulação: 33 V, CTWD = 22 mm.

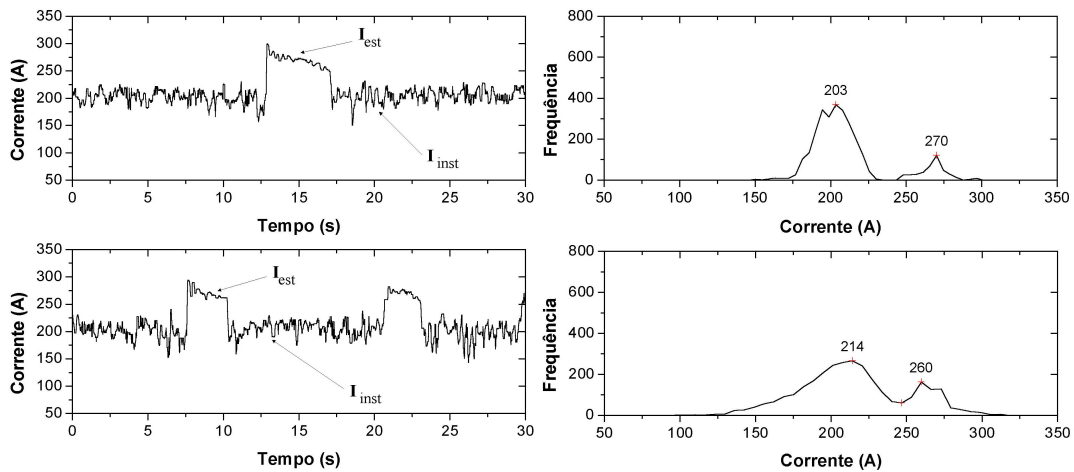


FIGURA 6.26 – Oscilogramas e histogramas de corrente dos testes realizados com a fonte operando em CV. Aço inoxidável, proteção: Ar puro, velocidade de alimentação do arame: 9 m/min, tensão de regulagem 35 V, CTWD = 22 mm.

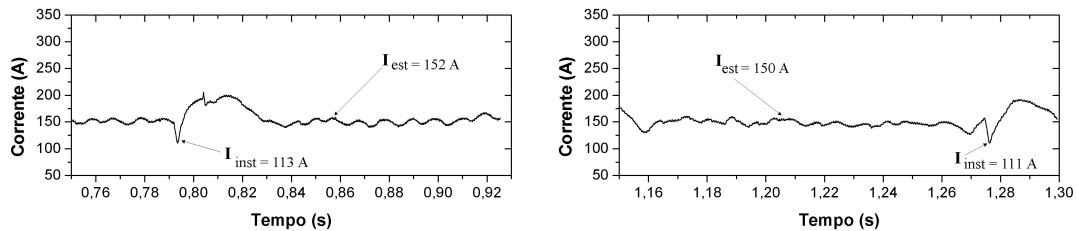


FIGURA 6.27 – Oscilogramas de corrente dos testes realizados com a fonte operando em CV. Alumínio, proteção: Ar puro, velocidade de alimentação do arame: 6 m/min, tensão de regulagem: 23,5 V, CTWD = 24 mm.

A FIG.6.28 mostra, para os três metais de base utilizados neste trabalho, alguns quadros típicos da filmagem convencional (ver metodologia no item 5.3.5 (a)) do arco, referente a mudanças de estabilidade ao longo de testes feitos com proteção por argônio puro. Estes quadros foram separados como representativos dos períodos de estabilidade e instabilidade com base nas considerações feitas anteriormente. Observa-se, para os três metais de base, que os períodos de operação instável são caracterizados por um menor comprimento do arco, sendo este extremamente brilhante e de movimentação errática, e uma transferência do tipo globular repulsiva. Por outro lado, durante os períodos com maior nível de corrente, observa-se um maior comprimento do arco e o formato de arco e da ponta do eletrodo sugerem uma transferência do tipo spray. Estes resultados estão consistentes com aqueles obtidos por Modenesi e Nixon (1994).

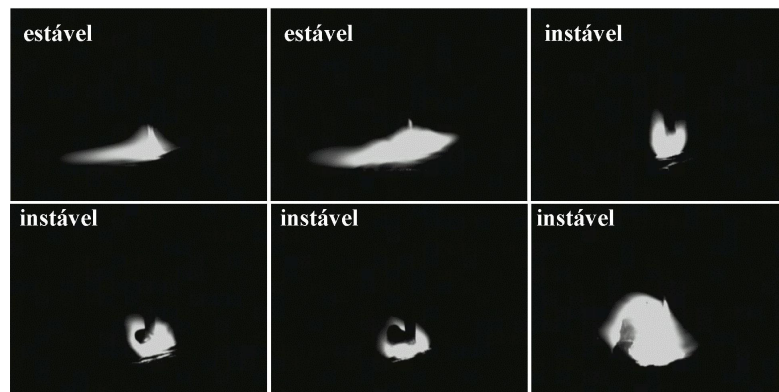
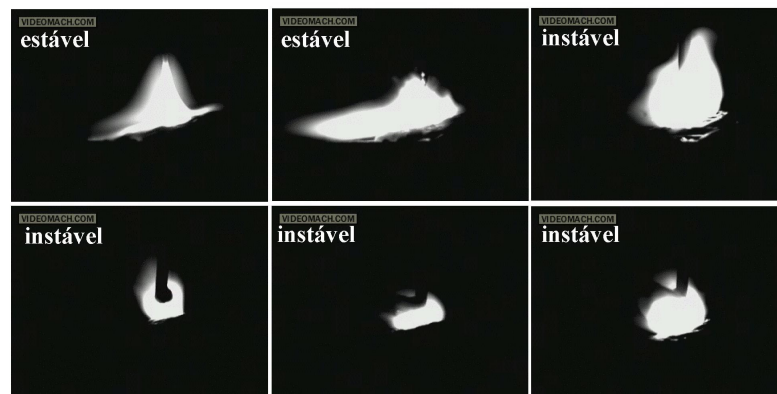
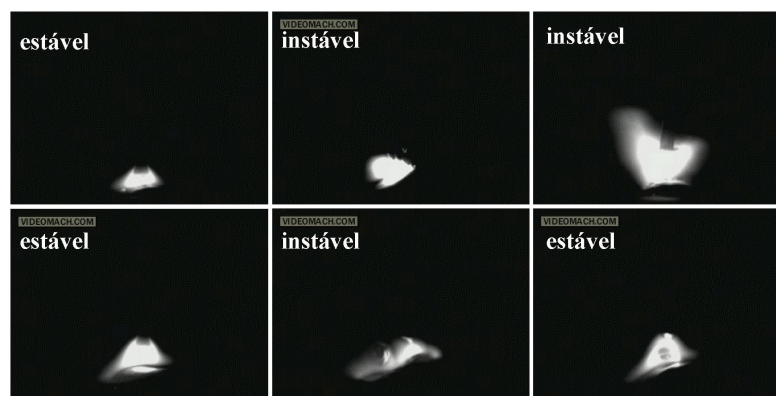
Aço Carbono**Aço Inoxidável****Alumínio**

FIG. 6.28 – Sequência da filmagem convencional dos testes com a fonte operando em CV durante os períodos de operação estável e instável. Proteção por argônio puro. As condições de soldagem são as mesmas das figuras 6.20; 6.24 e 6.27.

As FIG.6.29 a 6.31 mostram, para algumas réplicas dos testes realizados em aço carbono e aço inoxidável, oscilogramas e histogramas típicos da corrente de soldagem obtidos durante os testes feitos com proteção gasosa de Ar + 1%O₂. Pode ser observado nestes testes, como foi observado nos testes com proteção de Ar puro, que ocorre uma certa variação nos tempos dos períodos de operação estável e instável entre as réplicas de uma mesma condição de soldagem. Porém, quando a proteção é feita por Ar + 1%O₂, o processo não fica oscilando entre os períodos instáveis e estáveis como observado nos testes com proteção por argônio puro. Ou seja, quando se utiliza Ar + 1%O₂, o processo, após se estabilizar, tende a permanecer neste estado.

Como nos testes feitos com argônio puro, observou-se que os períodos de operação instável (menor corrente), estão associados com um menor comprimento do arco e transferência do tipo globular repulsiva e que os períodos de operação estável (maior corrente) estão associados com o maior comprimento do arco e transferência do tipo spray.

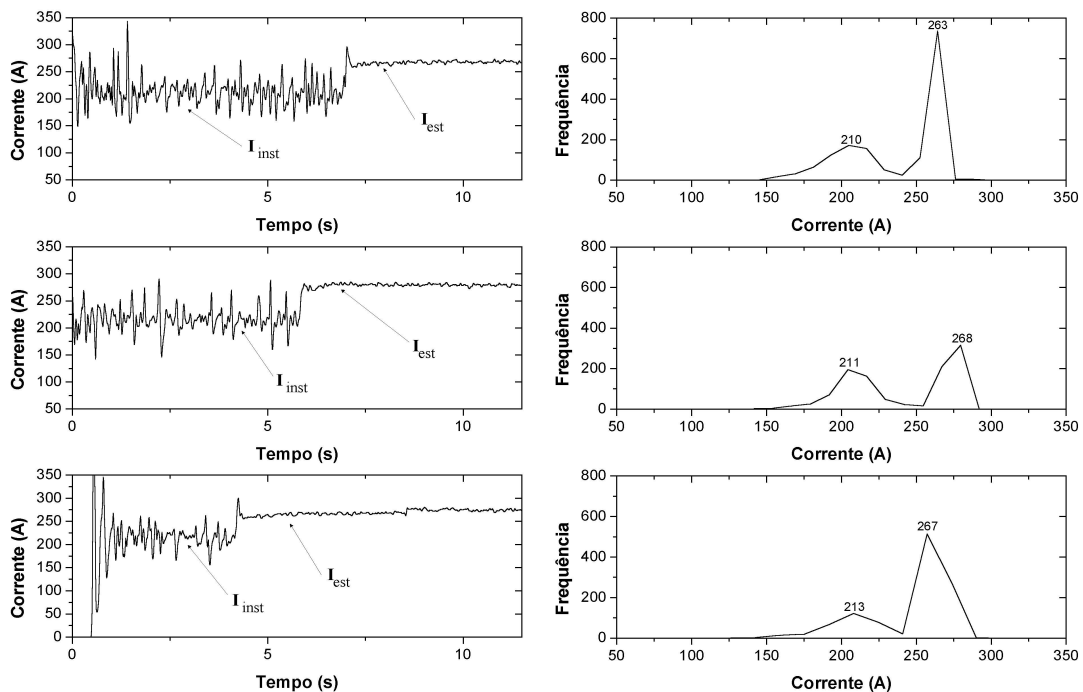


FIGURA 6.29 – Oscilogramas e histogramas de corrente dos testes realizados com a fonte operando em CV. Aço carbono, proteção: Ar + 1%O₂, velocidade de alimentação do arame: 7 m/min, tensão de regulagem: 33 V, CTWD = 22 mm.

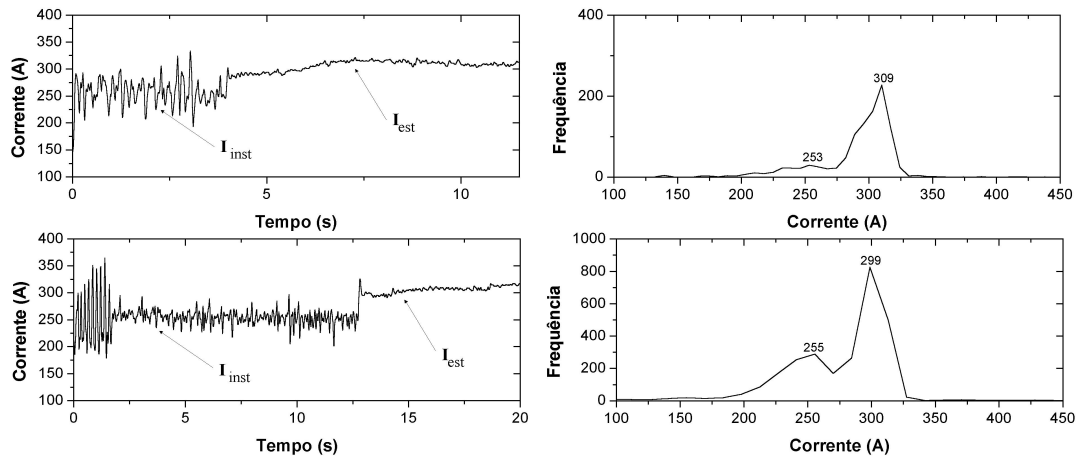


FIGURA 6.30 - Oscilogramas e histogramas de corrente dos testes realizados com a fonte operando em CV. Aço carbono, proteção: Ar + 1% O₂, velocidade de alimentação do arame: 9 m/min, tensão de regulagem: 33 V, CTWD = 22 mm.

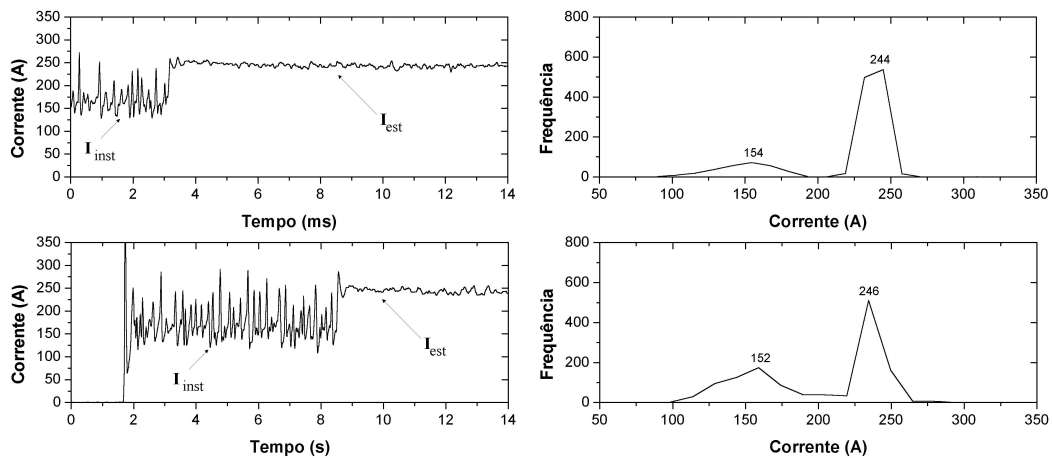


FIGURA 6.31 - Oscilogramas e histogramas de corrente dos testes realizados com a fonte operando em CV. Aço inoxidável, proteção: Ar + 1% O₂, velocidade de alimentação do arame: 7 m/min, tensão de regulagem: 33 V, CTWD = 22 mm.

Para verificar a ocorrência da instabilidade de mecanismos catódicos com outras composições de gases de proteção, foi feita uma série de testes em que se misturou, em diferentes proporções, argônio com o gás de proteção comercial I40 (Ar + 4%CO₂), hélio e oxigênio (ver item 5.3.3 da metodologia), obtendo-se assim teores de CO₂ de 0,4 e 0,8%.

A FIG. 6.32 indica, para diferentes composições de gases de proteção e metais de base, os valores médios da corrente nos períodos instáveis e estáveis em testes realizados com velocidade de alimentação do arame de 7 m/min e tensão de soldagem de 33 V (para os testes feitos em aço carbono e aço inoxidável) e velocidade de alimentação do arame de 6 m/min e tensão de soldagem de 23,5 V (para o alumínio). Estas médias foram calculadas com no máximo três réplicas para cada tipo de proteção.

Como foi feito nos testes iniciais, para caracterizar a mudança de estabilidade do processo usou-se a diferença entre os valores médios da corrente estável e instável (ΔI). A FIG. 6.33 indica para os diferentes materiais e gases de proteção, os valores médios de ΔI calculados. Pode-se observar que este parâmetro apresenta valores superiores a cerca de 40 A para as misturas de proteção sem hélio. Quando este gás participa da mistura (20-25%He), em geral, a variação de corrente foi menor, em torno de 20 a 30 A. Esta diferença ocorreu principalmente por uma redução da corrente estável.

Em geral, o valor de ΔI foi maior para os testes com aço inoxidável. Esta tendência parece ser causada por um menor valor da corrente instável para este material em comparação com o aço carbono (em média de 170 A para o primeiro contra 210 A para segundo).

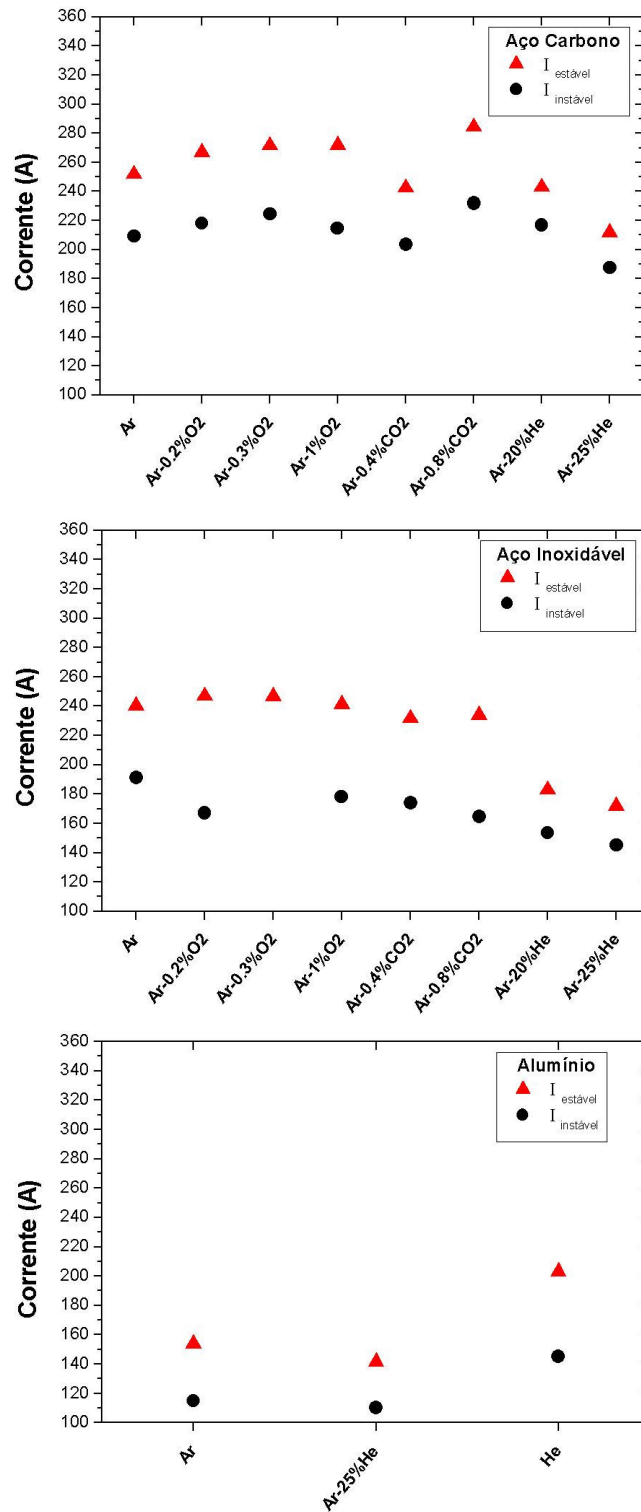


FIGURA 6.32 – Valores médios da corrente referentes aos períodos instáveis e estáveis dos testes realizados com a fonte operando em CV com diferentes gases de proteção e metais de base.

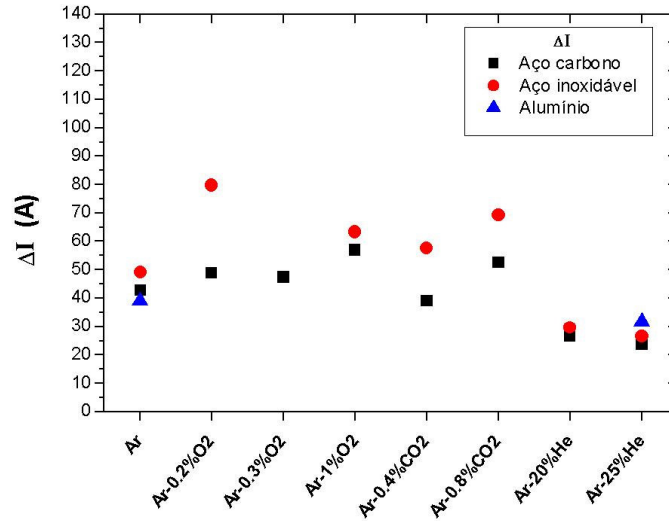


FIGURA 6.33 – Valores médios do ΔI referentes aos períodos estáveis e instáveis dos testes realizados com a fonte operando em tensão constante com diferentes gases de proteção e metais de base.

6.4.2 - Testes com a fonte operando em corrente constante

As FIG 6.34 e 6.35 mostram oscilogramas e histogramas típicos da tensão de soldagem para os testes em aço carbono, aço inoxidável e alumínio que foram realizados com dois tipos de gás de proteção (Ar puro e Ar + 1%O₂) e diferentes valores de distância entre o bico de contato e a peça de trabalho (CTWD). O objetivo principal destes testes foi analisar, para operação em corrente constante, a ocorrência de instabilidade de mecanismos catódicos no aço carbono, aço inoxidável e alumínio, a faixa de CTWD em que o fenômeno ocorre para cada material e os níveis de tensão associados com os períodos estáveis e instáveis. O aspecto dos oscilogramas aqui obtidos com aço carbono, aço inoxidável e alumínio foi similar ao dos obtidos com aço carbono apresentados nos testes iniciais deste trabalho e na literatura (Modenesi e Nixon, 1994). Isto é, quando o processo apresenta a instabilidade, tem-se a presença de maiores patamares de tensão. No presente trabalho, obteve-se, em média, uma diferença entre estes patamares de cerca de 10 V para a soldagem de aço carbono e aço inoxidável e cerca de 6 V para a soldagem em alumínio. Esta diferença pode estar associada à natureza do óxido formado em cada tipo de material.

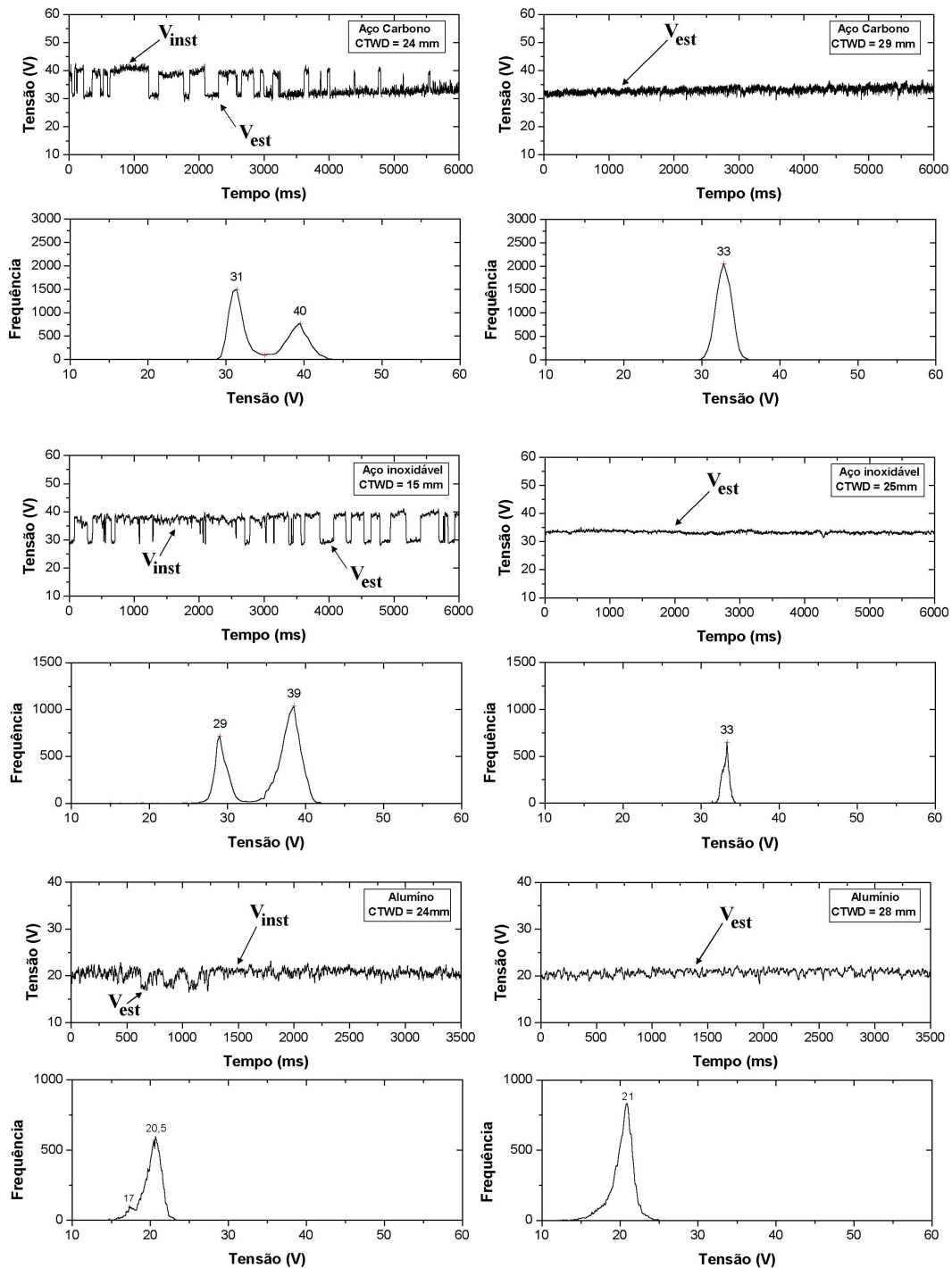


FIGURA 6.34 - Oscilogramas e histogramas de tensão obtidos em testes com a fonte operando em CI para diferentes valores de CTWD. Aço carbono e aço inoxidável (255 A), alumínio (175 A). Proteção por argônio puro.

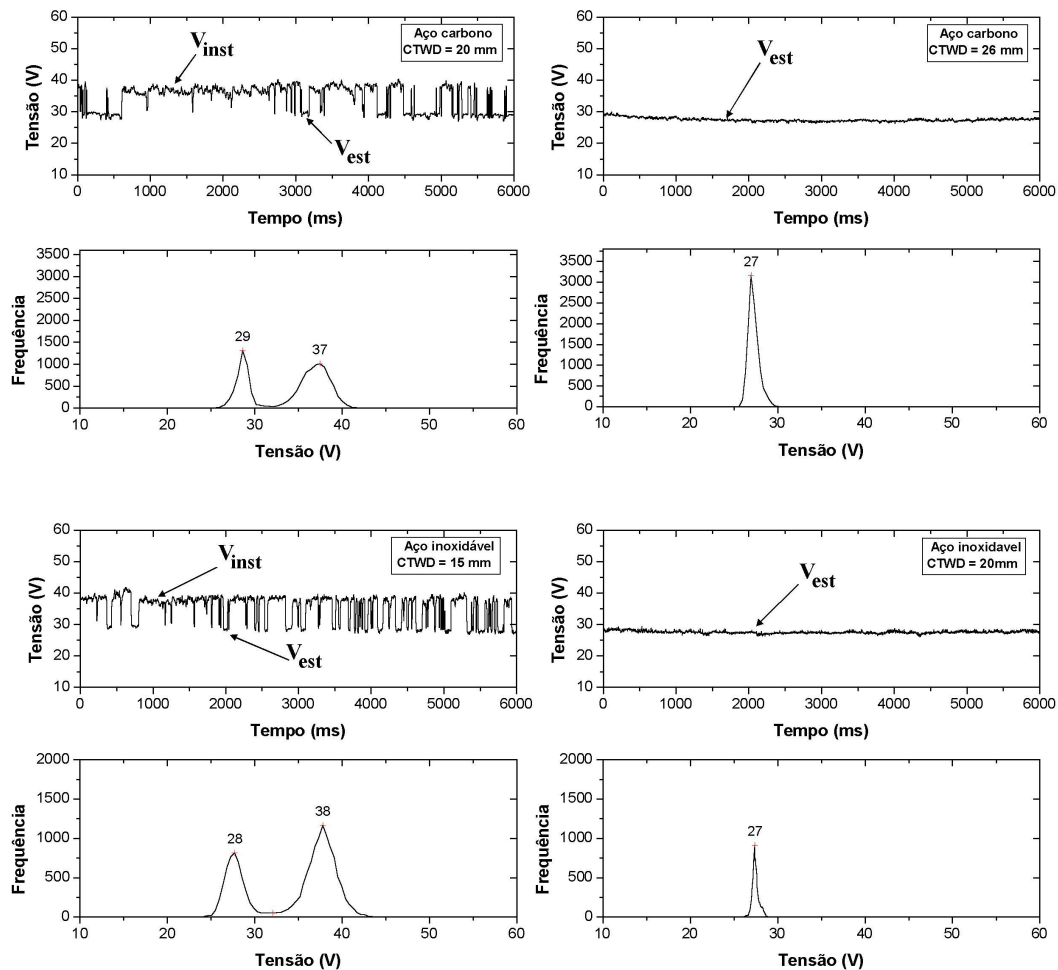


FIGURA 6.35 - Oscilogramas e histogramas de tensão obtidos em testes com a fonte operando em CI para diferentes valores de CTWD. Aço carbono e aço inoxidável. Corrente: 255 A. Proteção por Ar + 1%O₂.

A FIG. 6.36 apresenta os valores médios das tensões de operação instável ($V_{\text{instável}}$) e estável ($V_{\text{estável}}$) de testes feitos em aço carbono e aço inoxidável, proteção por argônio puro para diferentes valores de CTWD. Foram realizados pelo menos dois testes para cada uma das condições avaliadas notando-se que, embora exista alguma dispersão nos valores obtidos, esta é muito inferior à diferença das tensões de operação instável e estável.

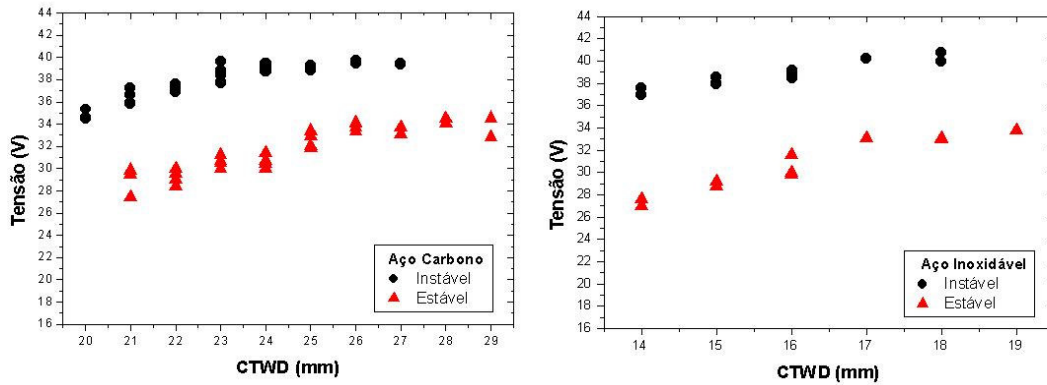


FIGURA 6.36 – Valores médios das tensões nos períodos instáveis e estáveis para vários CTWD, resultantes dos testes feitos com a fonte operando em CI. Proteção: Argônio puro. Corrente de regulação: 255 A.

A FIG. 6.37 apresenta os valores médios globais da tensão para cada CTWD, referentes aos períodos instável (V_{inst}) e estável (V_{est}) do processo apresentados na FIG. 6.36 e para o alumínio. Pode-se observar que, quando aço carbono e o aço inoxidável foram usados como metal de base, tanto a tensão instável quanto a tensão estável tendem a aumentar com o aumento do CTWD, parecendo estabilizar-se, contudo, para os valores mais altos de CTWD (acima de cerca de 25 mm). Este comportamento pode estar associado com o aumento do comprimento do arco e uma possível perda de eficiência da proteção gasosa. Neste sentido, a medida que o comprimento do arco aumenta, a proteção gasosa não seria mais tão eficiente, e desta forma facilitaria a entrada de oxigênio da atmosfera para a coluna do arco, estabilizando o processo. Nos testes com alumínio, tanto a tensão instável quanto a tensão estável, parecem permanecer praticamente inalteradas (respectivamente, cerca de 26 e 21 V) para todos os valores de CTWD. Acredita-se que este comportamento pode estar associado com a facilidade de regeneração da camada de óxido de alumínio, como já mencionado no item 6.3.2.

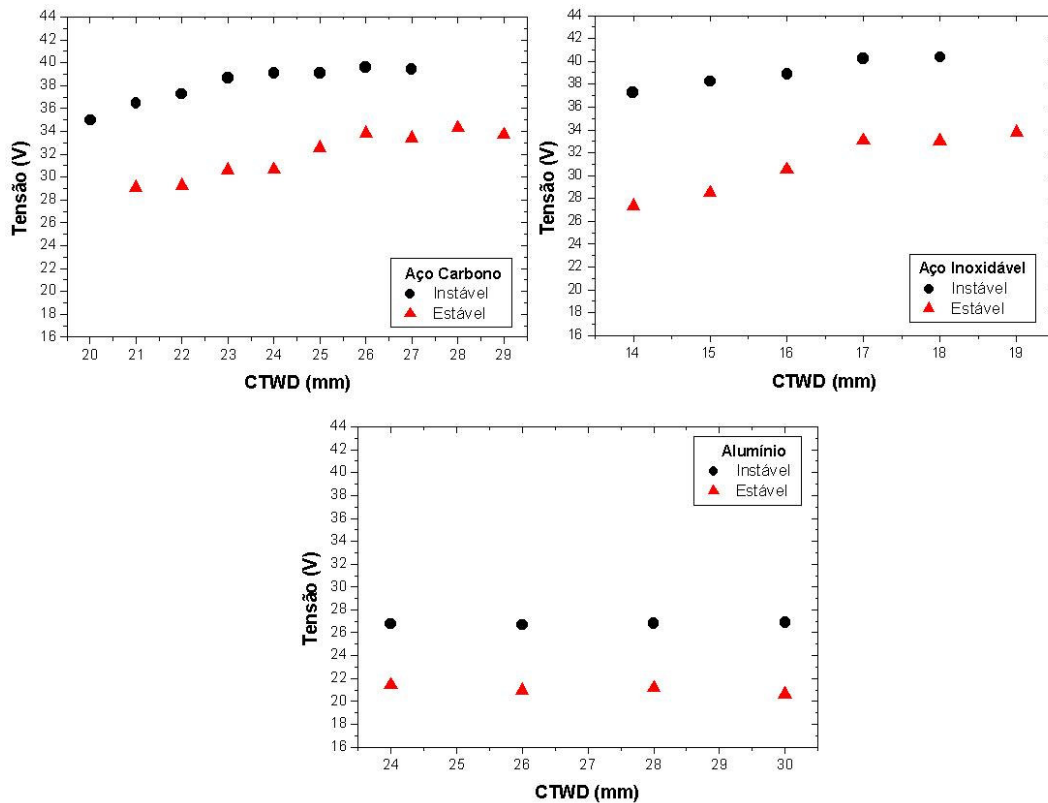


FIGURA 6.37 – Valores médios globais da tensão referente aos períodos estáveis e instáveis para os testes apresentados na FIG. 6.36 e para o alumínio. Fonte operando em CI. Proteção: Argônio puro. Corrente de regulagem 255 A para o aço carbono/inoxidável e 175 A para o alumínio.

Como foi feito nos testes iniciais, caracterizaram-se também aqui as mudanças entre as condições de operação, pela diferença entre as tensões instável e estável (ΔV). A FIG. 6.38 resume a variação das tensões (ΔV) dos testes apresentados na FIG. 6.37. Para o aço carbono, observa-se que, na faixa de CTWD em que a tensão aumenta, os valores de ΔV tendem a se maiores. Desconsiderando-se este efeito, obtêm-se os seguintes valores médios de ΔV : 8,5 V (aço inoxidável), 7,3 V (aço carbono) e 5,5 V (alumínio). Segundo Modenesi e Nixon (1994) e Tong *et al.*(2005), os valores de ΔV estariam relacionados com as diferenças nos valores das tensões de queda catódica relacionadas com os períodos de operação estável e instável. Infelizmente, devido às diferenças nas propriedades físicas dos três materiais, não foi possível trabalhar em condições operacionais idênticas, o que permitiria comparar mais facilmente os valores de ΔV de cada material. De qualquer forma, os resultados obtidos sugerem que, para o

aço inoxidável, existe uma maior diferença entre as condições de emissão de elétrons nos dois períodos. Esta característica se reflete por uma maior diferença nos valores de corrente para este material nos testes com operação em tensão constante, como observado na FIG. 6.33.

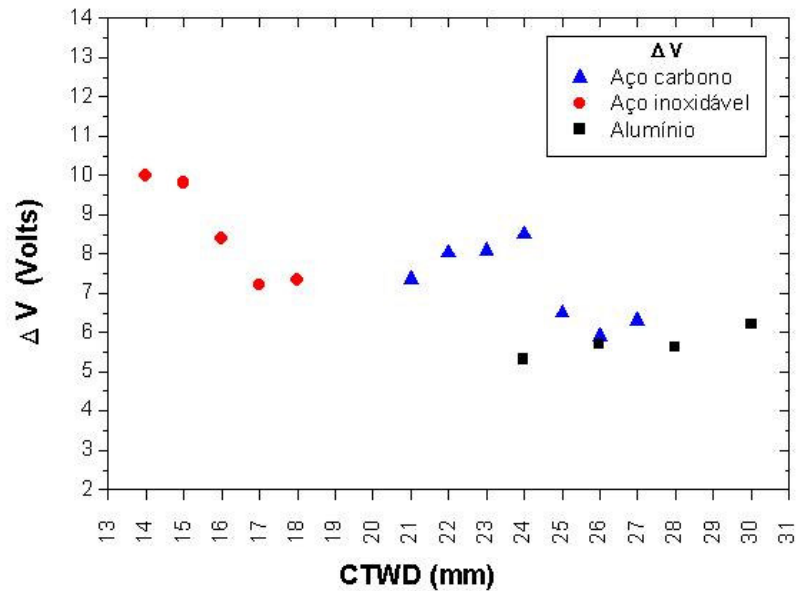


FIGURA 6.38 – Valores médios dos ΔV referentes aos períodos estáveis e instáveis dos testes com a fonte operando em CI, com diferentes valores de CTWD, Proteção por argônio puro.

6.5 - FILMAGEM SINCRONIZADA

Existem várias técnicas experimentais que auxiliam no estudo do comportamento do arco e da transferência metálica. Neste trabalho até este ponto, a detecção da instabilidade do processo e do modo de transferência metálica foi através da análise dos oscilogramas de tensão e corrente de soldagem, da interpretação do som produzido durante a execução dos testes, da medição da luminosidade do arco e por meio de filmagens com uma câmara convencional, mas com um obturador de alta velocidade. Contudo, para uma comprovação direta da relação entre as mudanças no modo transferência e nos sinais elétricos e para observar de forma mais consistente outras características da instabilidade, utilizou-se a filmagem em alta velocidade juntamente

com a técnica da “Shadowgrafia” (Subramaniam *et al*, 1998). Nesta filmagem, foi feita também a sincronização dos quadros da filmagem com os sinais de tensão e corrente utilizando uma técnica desenvolvida por Vilarinho (2000).

6.5.1 – Filmagem Sincronizada dos testes com a fonte operando em CV

A FIG.6.39 mostra, para um dos testes em aço carbono com proteção de argônio puro, uma seqüência de quadros durante uma transição de operação estável para instável e de volta para estável. Observar o crescimento e destacamento de uma grande gota durante a operação instável. Pelo uso da filmagem de alta velocidade com “shadowgrafia” pôde-se confirmar vários dos resultados apresentados anteriormente e algumas das hipóteses formuladas. Observa-se, por exemplo, com a seqüência de quadros apresentados na FIG. 6.39, que durante os períodos de operação instável há realmente uma redução no comprimento do arco (l_a), transferência do tipo globular, uma maior agitação da poça de fusão, formação de maior quantidade de fumos (pelo escurecimento dos quadros), mudança na forma do arco e um aumento da luminosidade deste, principalmente em regiões entre a poça de fusão e a base da gota de metal de adição presa à ponta do eletrodo.

Observou-se, ainda, que, nos períodos em que o processo operou de forma estável com transferência de metal do tipo goticular, em geral, a mesma ocorreu freqüentemente com algum alongamento (“streaming spray”), com uma freqüência de transferência elevada e estimada como da ordem de 10^2 gotas/s. Durante os períodos de instabilidade, a transferência foi do tipo globular, em geral, repulsiva, com freqüência estimada de transferência na ordem de 10^0 a 10^1 gotas/s. Durante estes períodos, a gota tendia a crescer lateralmente até um diâmetro várias vezes maior que o diâmetro do arame, se destacando geralmente lateralmente e normalmente gerando uma intensa agitação da poça de fusão.

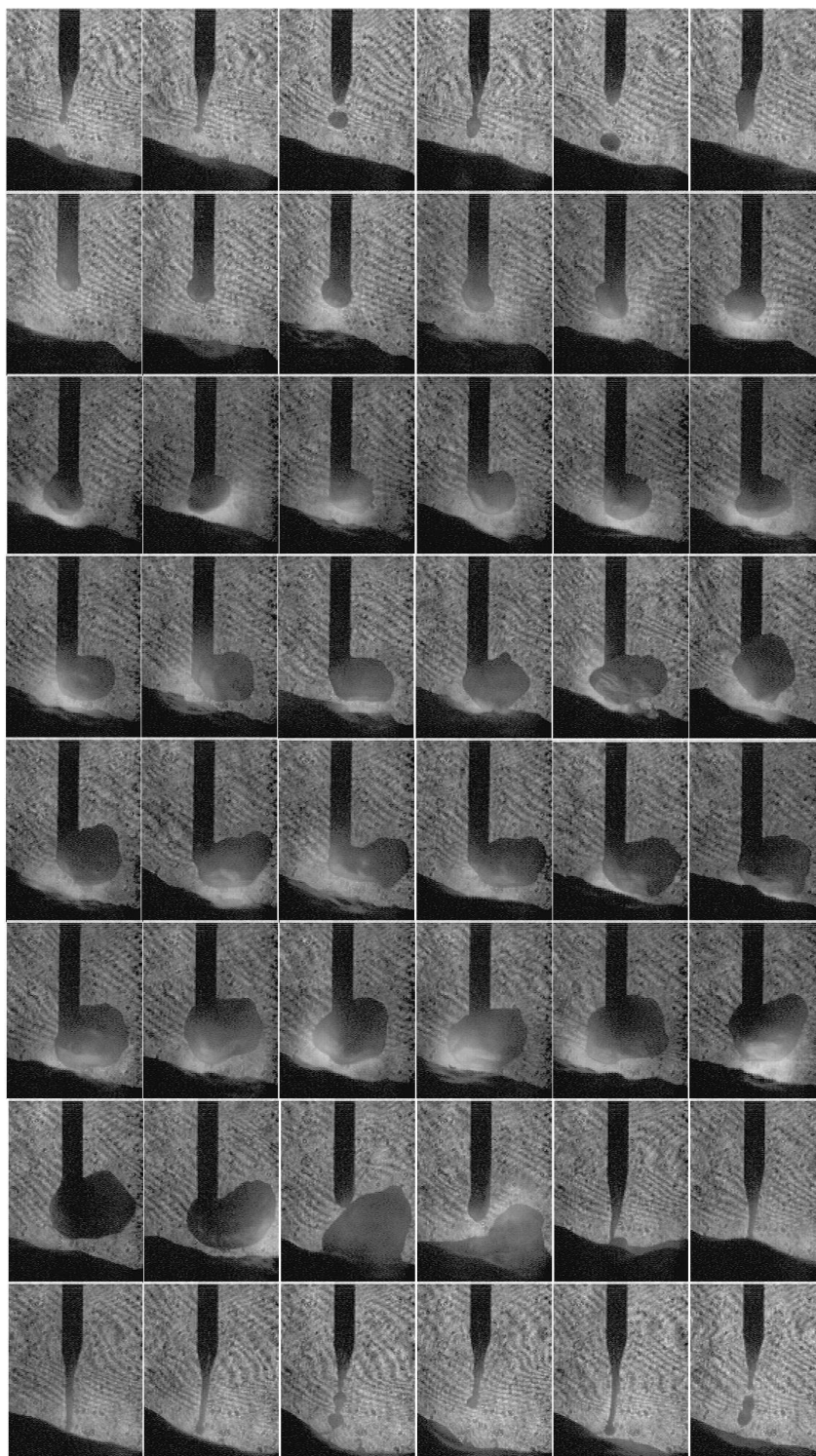


FIGURA 6.39 – Mudança de operação estável para instável e de volta para estável em aço carbono. Fonte em CV. Proteção: Argônio puro; Tensão de regulagem: 34 V; Veloc. de alimentação do arame: 7,0 m/min; CTWD = 22 mm. Frame rate \approx 7,5 ms.

A FIG.6.40 mostra parte do oscilograma de corrente de um teste realizado em aço carbono com proteção por argônio puro com a sua sincronização com imagens obtidas na filmagem de alta velocidade. Pode-se observar, no oscilograma, um período com redução da corrente, o qual coincide com as alterações no arco, na poça de fusão e no modo de transferência descritas anteriormente como características da instabilidade de mecanismos catódicos.

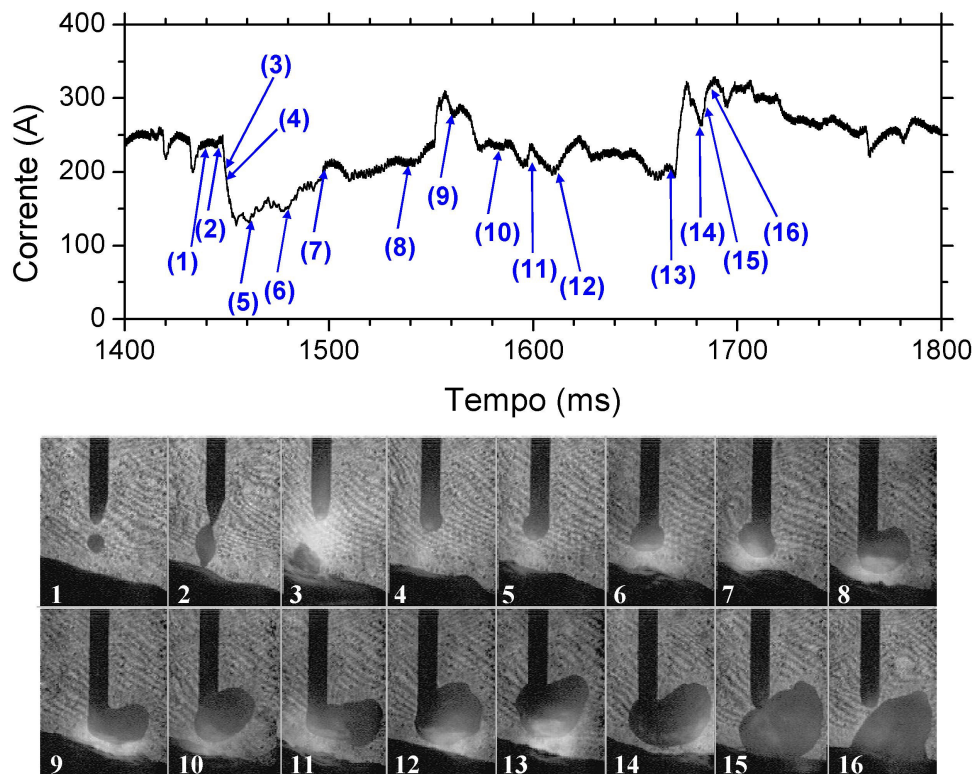


FIGURA 6.40 - Oscilograma e seqüência da filmagem sincronizada com o sinal de corrente com a fonte operando em CV. Material: Aço carbono; Proteção: Argônio puro; Tensão de regulação: 34 V; Velocidade de alimentação do arame: 7,0 m/min; CTWD=22 mm.

Assim, observa-se, nesta figura, que durante o período de transição da operação estável (quadro 1) para instável (quadro 5) houve uma variação de corrente (ΔI) da ordem de 100 A. Observa-se ainda que a transição do modo de operação estável para o instável parece ter ocorrido após um rápido curto-circuito (quadro 2). A FIG. 6.41 mostra três instantes diferentes do mesmo teste da figura anterior em que se tem a transição da

operação estável para a instável (o primeiro exemplo é o mesmo da figura 6.40). Pode-se observar, em todos os casos, que a instabilidade se inicia após um pequeno curto-circuito entre o eletrodo e a poça de fusão. Uma análise mais extensa envolvendo todos os testes realizados indicou que, na grande maioria dos casos, a instabilidade se inicia após a ocorrência de curtos. Esta tendência é, também, confirmada pela observação, por exemplo, de oscilogramas de testes com transferência por curto-circuito que apresentaram indícios da ocorrência da instabilidade de fenômenos catódicos (ver item 6.3.2 c).

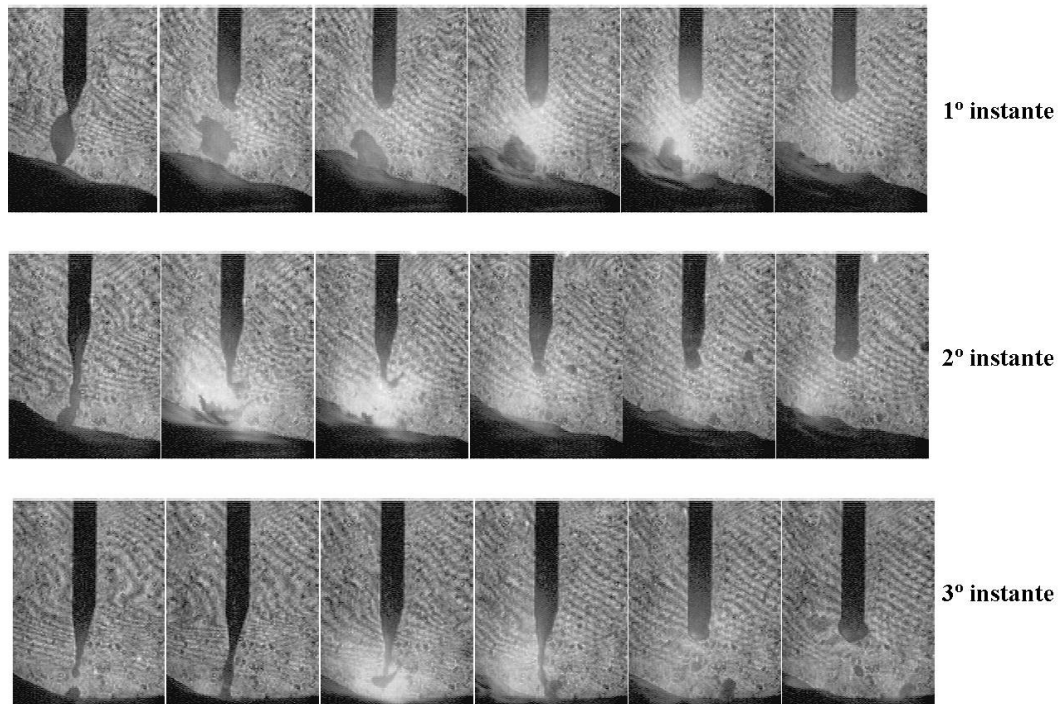


FIGURA 6.41 – Exemplos de transição do modo de operação estável para o instável. Fonte operando em CV, aço carbono, proteção de argônio puro. Tensão de regulagem: 34 V e velocidade de alimentação do arame: 7,0 m/min. CTWD = 22 mm. Frame rate \approx 1,5 ms.

A análise dos oscilogramas dos testes feitos com a fonte operando em tensão constante com proteção por Ar + 2%O₂ indicou que a ocorrência da instabilidade de mecanismos catódicos tende a ser muito menos comum do que quando a proteção é de argônio puro, com a mesma sendo observada somente para os testes feitos com tensão inferior às usadas nos testes com proteção por argônio puro. A FIG. 6.42 mostra um oscilograma e

quadros da filmagem de alta velocidade sincronizada de um dos testes feitos em aço carbono, com a fonte operando em tensão constante com proteção por Ar + 2%O₂ e tensão de soldagem de 30 V. Pode-se observar, no quadro 2, que o metal fundido expande devido à formação de uma bolha de gás e que a instabilidade parece se iniciar a partir da explosão dessa bolha (quadro 3). Este é um exemplo do início da instabilidade a partir de um evento diferente de um curto-circuito.

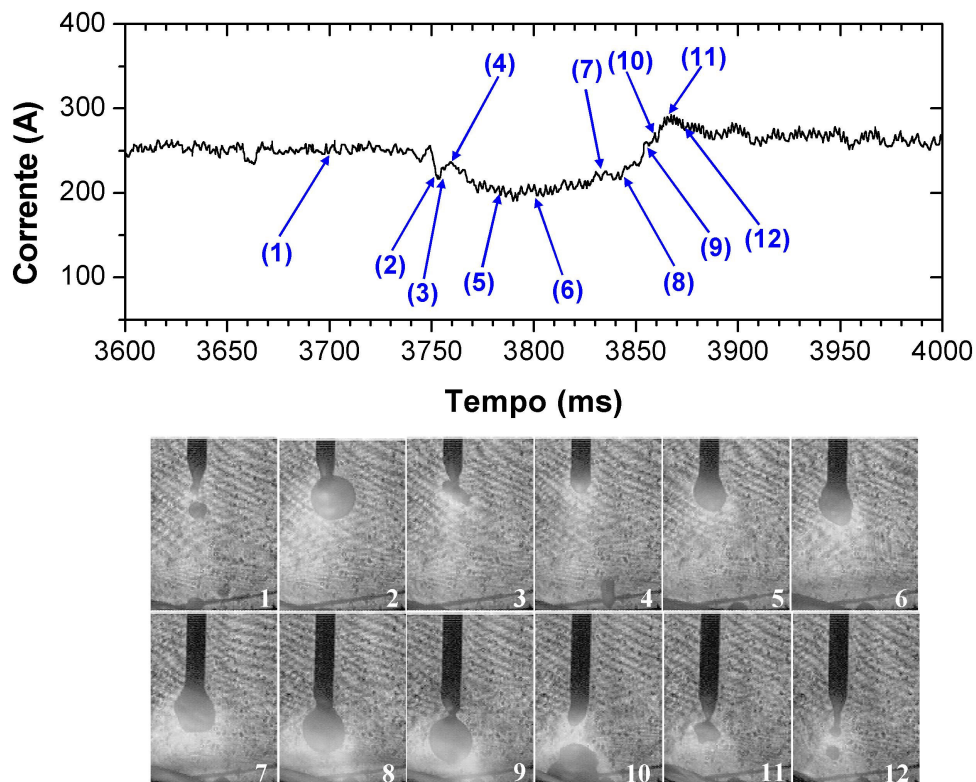


FIGURA 6.42 - Oscilograma e seqüência da filmagem sincronizada com o sinal de corrente com a fonte operando em CV. Aço carbono; Proteção por Ar + 2%O₂; Tensão de regulação: 30 V; Veloc. de alimentação do arame: 7,0 m/min; CTWD = 22 mm.

6.5.2 – Filmagem Sincronizada dos testes com a fonte operando em CI

Algumas características observadas nos testes realizados com a fonte operando em CV foram também observadas nos testes realizados com a fonte operando em CI como: modo de transferência metálica durante os períodos estáveis (spray com algum

alongamento) e instáveis (globular repulsiva), mudanças no formato do arco, agitação da poça de fusão, geração de fumos e o aumento da luminosidade do arco durante os períodos de instabilidade. Por outro lado, o comprimento do arco não se alterou de forma significativa como foi observado nos testes com a fonte operando em CV. A FIG. 6.43 mostra, para um teste em aço carbono com proteção por argônio puro, uma seqüência de quadros durante as transições de operação estável para instável e de volta para estável com o crescimento e o destacamento de uma gota metálica durante a operação instável.

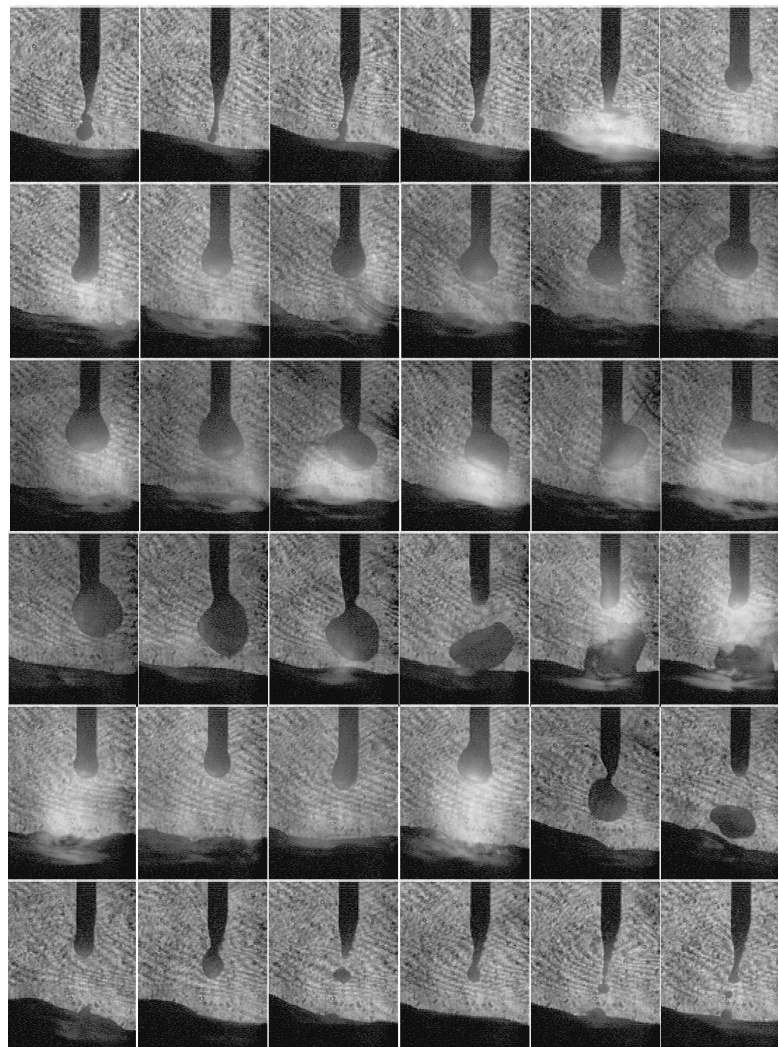


FIGURA 6.43 – Seqüência de quadros durante uma transição estável / instável / estável do processo com a fonte operando em CI. Material: Aço carbono; Proteção: Argônio puro; Corrente de regulagem: 245 A; CTWD = 22 mm. Frame rate \approx 7,5 ms.

A FIG. 6.44 mostra, para um dos testes realizados em aço carbono com proteção por argônio puro, uma parte de seu oscilograma de tensão e a seqüência de quadros sincronizada com o mesmo desde o início até o término de um período de operação instável de cerca de 0,15 s de duração.

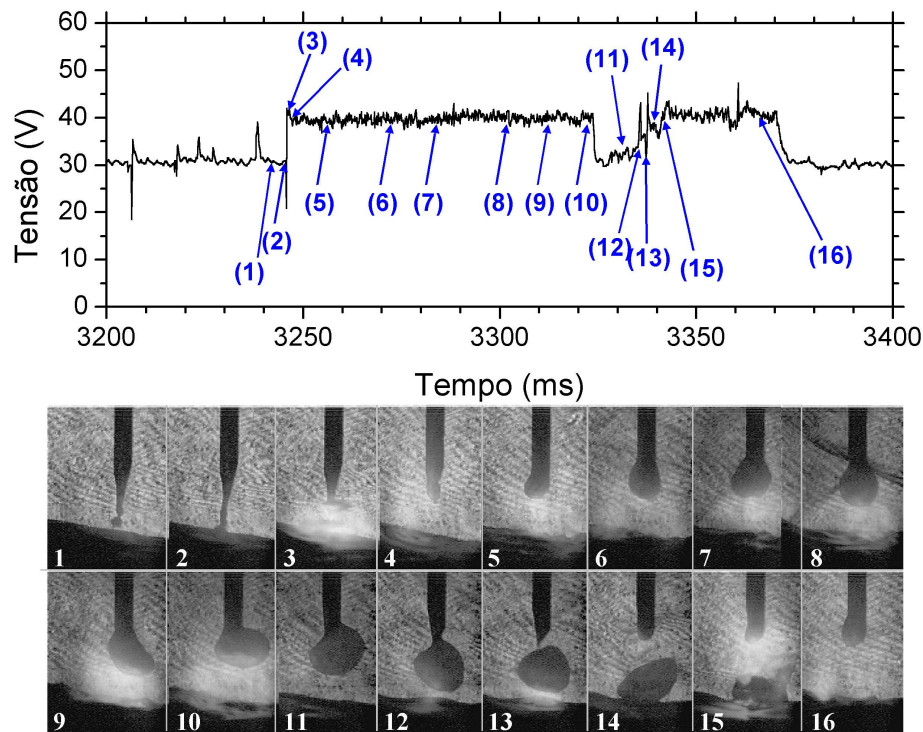


FIGURA 6.44 - Oscilograma e seqüência de filmagem sincronizada com o sinal de tensão. Fonte operando em corrente constante, material: aço carbono. Proteção: Ar puro. Corrente de regulagem: 255 A. CTWD = 19 mm.

Pode ser observado na FIG.6.44 que a ocorrência de transferência globular repulsiva está realmente relacionada com o período em que ocorre um aumento de cerca de 10 V na tensão do arco, que, neste caso, não resulta em uma variação significativa do comprimento do arco. Desta forma e como a corrente de soldagem permaneceu constante durante estas alterações, a variação brusca de tensão não deve estar associada com mudanças na coluna do arco, mas, mais provavelmente, com uma das suas regiões de queda. As mudanças no formato do arco, que passa a atuar mais fortemente sobre a poça de fusão e a forte agitação desta suportam a hipótese de Modenesi e Nixon (1994)

de que estes fenômenos estariam associados com mudanças na região catódica do arco, envolvendo, possivelmente, mudanças nos mecanismos de emissão de elétrons.

6.6 – Aspecto e formato do cordão

6.6.1 – Cordão sobre chapa em testes realizados com a fonte operando em CV

Em termos de estabilidade do processo de soldagem, filmes de óxidos são considerados essenciais para a formação e a estabilização dos pontos catódicos os quais estão geralmente localizados na peça de trabalho e perto da poça de fusão (Essers e Van Gospel, 1984). Quando a soldagem é feita com proteção por argônio puro o arco irá consumir de forma relativamente rápida a camada de óxido do lado da poça de fusão e o mesmo irá mover-se erratically na superfície da chapa resultando assim em um processo mais difícil de ser controlado (Boughton e Amin, 1972).

Para demonstrar o consumo da camada de óxido nos metais de base utilizados neste trabalho, os cordões de solda foram fotografados logo após sua execução. A FIG. 6.45 mostra, para os três metais de base (aço carbono, aço inoxidável e alumínio), cordões de solda típicos obtidos nos testes com a fonte operando em tensão constante com proteção por argônio puro. Independentemente do metal de base considerado, os períodos de operação estável foram associados com regiões com limpeza catódica junto do cordão de solda, enquanto que as regiões correspondentes aos períodos de operação instável, em geral, não apresentavam esta limpeza. Nota-se também, na soldagem com proteção por argônio puro, em particular dos aços, que os períodos de limpeza catódica ocorrem de forma alternada, de forma similar ao comportamento observado nos oscilogramas de corrente das FIG. 6.20 a 6.26.

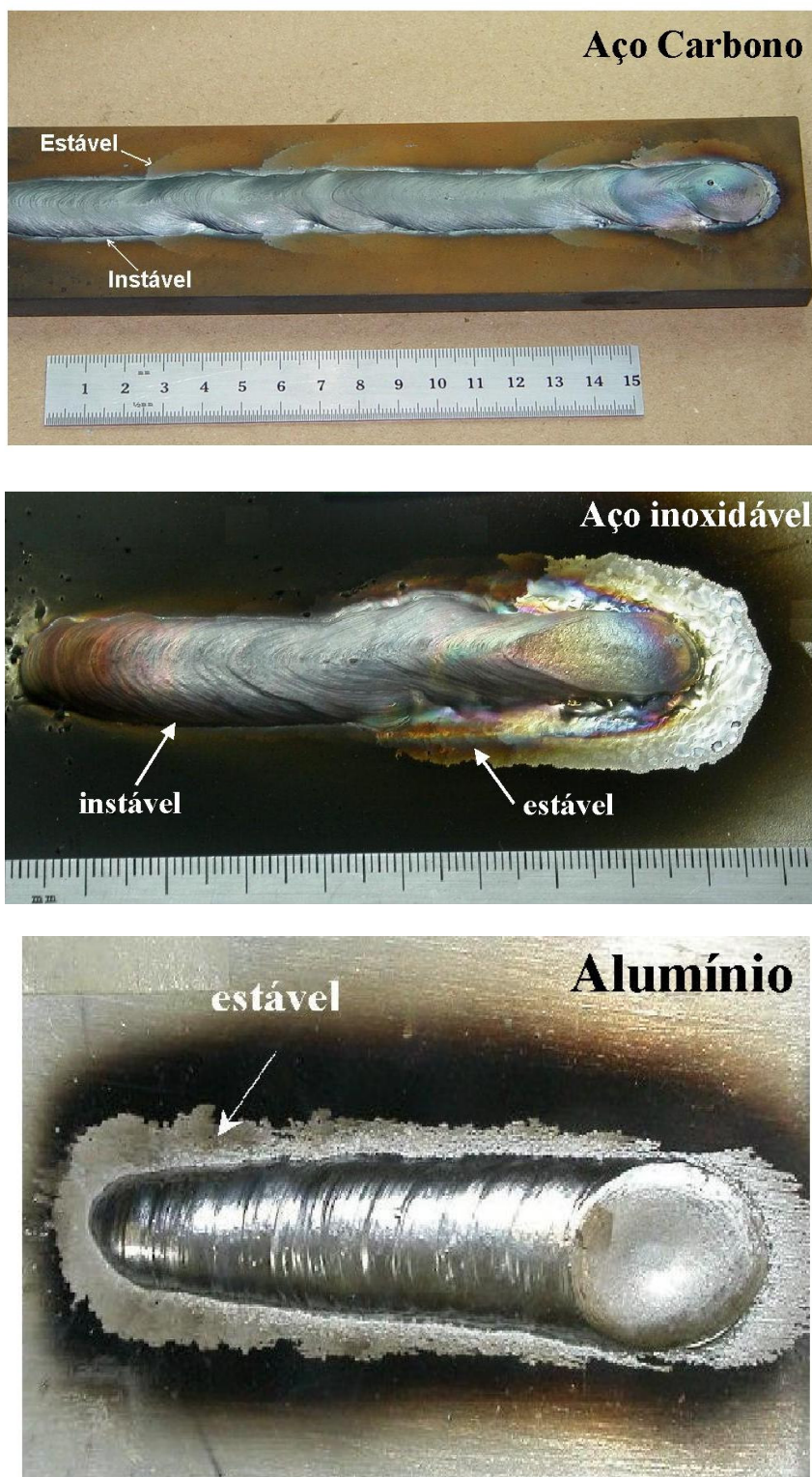


FIGURA 6.45 – Foto dos cordões típicos de solda obtidos com a fonte operando em CV com proteção por Ar puro. Parâmetros de soldagem para o aço carbono e aço inoxidável (35 V e $w = 7$ m/min), para o alumínio (23,5 V e $w = 6$ m/min).

Já para o alumínio, a oscilação entre regiões com e sem marcas de limpeza catódica não foi muito evidente visto que o arco operou predominantemente de forma estável com períodos muito curtos de operação instável. Pode-se observar ainda no cordão de solda do alumínio uma menor extensão da área que sofreu a remoção de óxido na superfície. Este fato sugere uma menor necessidade do arco defletir para longe da poça de fusão para atingir novas regiões ainda recobertas com a camada de óxido, o que deve favorecer a operação estável do processo para este material. Um possível fator que pode contribuir para este comportamento do alumínio é a elevada estabilidade química do seu óxido (poder de oxidação)(Gentil, 1996). A energia livre de formação da alumina (Al_2O_3), a 25 °C, é igual a -1575 kJ/mol, já para o óxido de cromo e de ferro estas são, respectivamente, -1060 kJ/mole -740 kJ/mol (Carvalho *et al.* 1977). Assim, os valores da energia livre de formação dos óxidos dos diferentes metais de base justificam uma maior facilidade de regeneração da camada de óxido de alumínio. Um outro fator possivelmente significativo para este comportamento do alumínio é que a soldagem deste material foi realizada com uma menor velocidade de alimentação de arame (6 m/min) e uma faixa de corrente inferior à utilizada na soldagem dos aços, o que indica uma menor necessidade de consumo de óxido para manter a operação estável. De acordo com uma estimativa de Bougton e Amin (1972), para o arco consumir uma camada de óxido com espessura de 0,2 a 0,5 μm , seria necessária cerca de 0,6 $\text{mm}^2/\text{A s}$. Modenesi (1990) estimou que, para um arco de 250 A e uma área de consumo de óxido de 150 mm^2/s , com proteção de argônio puro e velocidade de soldagem de 7 mm/s, o deslocamento do arco para atingir a região catódica seria igual ou aproximadamente 10 mm. Como neste trabalho a corrente de soldagem para alumínio foi de 160 A e a velocidade de soldagem de 25 cm/min, realmente a região de limpeza catódica deve ser bem inferior às regiões com aço carbono e aço inoxidável.

Pode-se observar ainda na FIG. 6.45 que os períodos de estabilidade e instabilidade do processo influenciaram fortemente o aspecto superficial do cordão, isto é, quando o processo operou de forma instável, o cordão de solda apresentou uma menor variação na largura e escamas mais regulares. Já quando o processo operou de forma estável o cordão apresentou oscilações na largura e as suas escamas não ficaram regulares. Um possível fator responsável por esta diferença no formato do cordão foi uma maior

oscilação do arco quando o processo opera de forma estável. Este efeito foi facilmente observado durante os testes e estaria associado com a deflexão do mesmo para alcançar as regiões do metal de base ainda recobertas com a camada de óxido. Com respeito à geração de respingos, apesar de não ter sido feita nenhuma medição direta, foi observado durante a execução dos testes e através das filmagens que, nos períodos de instabilidade, ocorria uma maior geração dos mesmos.

Apesar das fontes de tensão constante serem as mais utilizadas na indústria devido a sua facilidade de operação, a corrente de soldagem é variável de acordo com as condições operacionais, permitindo assim variações na penetração e no acabamento do cordão. Assim optou-se neste trabalho por estudar os parâmetros geométricos dos cordões e a sua relação com a instabilidade de mecanismos catódicos com operação em corrente constante, o que será tratado nas próximas seções.

6.6.2 – Cordão sobre chapa em testes realizados com a fonte operando em CI

Como neste tipo de operação a instabilidade de mecanismos catódicos ocorre em intervalos de tempo muito curtos, foram feitos testes em condições de operação de grande instabilidade (com CTWD curto) e testes em condição de operação essencialmente estável (com CTWD longo). A FIG. 6.46 mostra para os três metais de base utilizados neste trabalho alguns dos cordões de solda obtidos com proteção por argônio puro. Como nos testes de tensão constante, as condições que apresentavam operação mais estável foram associadas com regiões de limpeza catódica mais extensas junto do cordão de solda.

Pode-se observar nos cordões de aço carbono e aço inoxidável da FIG. 6.46 que a ocorrência da instabilidade de mecanismos catódicos influenciou no aspecto superficial do cordão de solda de forma similar à observada nos testes com a fonte operando em CV. Quando o processo operou de forma mais instável (CTWD menor), o cordão de solda sofreu menor variação na largura e as escamas ficaram mais regulares do quando o processo operou de forma mais estável (CTWD maior).

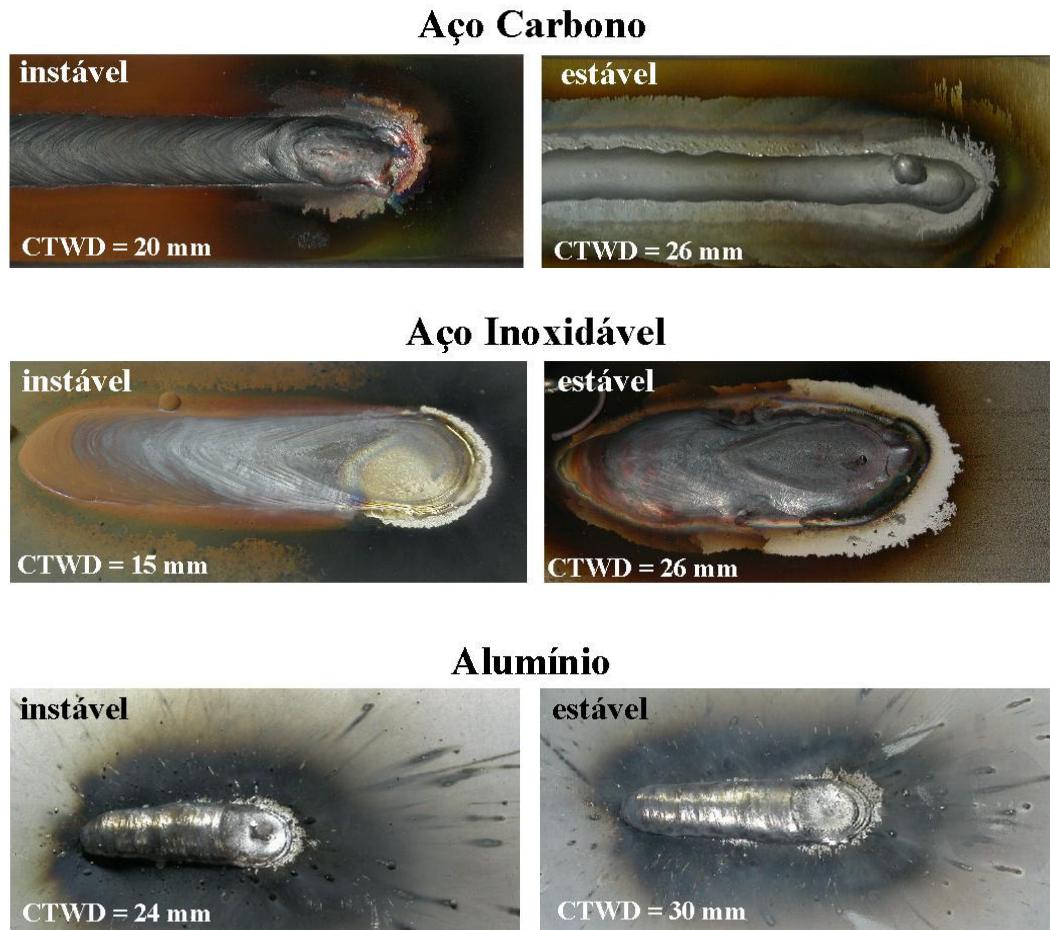


FIGURA 6.46 – Foto dos cordões típicos de solda obtidos com a fonte operando em CI com proteção por Ar puro . Corrente de regulagem para o aço carbono e aço inoxidável: 255 A. Corrente de regulagem para o alumínio: 175 A.

6.6.2.1 - Formato de cordões sobre chapa com a fonte operando em corrente constante

Nas TAB. 6.5 e 6.6 estão apresentados os valores médios das características geométricas dos cordões de solda com seus respectivos desvios para os testes realizados em aço carbono sobre chapa com proteção de argônio puro e Ar + 1%O₂, respectivamente. Cada valor apresentado nestas tabelas corresponde à média de, no mínimo, três réplicas, sendo que em cada réplica foram feitas duas medidas, tiradas de regiões de interesse. As FIG. 6.47 e 6.48 mostram a variação de alguns destes parâmetros em função do CTDW e da estabilidade relativa do processo. Esta última foi

caracterizada pela duração relativa (em %) da operação estável (determinada a partir dos oscilogramas de tensão dos ensaios).

TABELA 6.5 – Características geométricas dos cordões sobre chapa de aço carbono (média \pm desvio padrão). Proteção: Argônio puro. Corrente de regulagem: 255 A.

CTWD (mm)	W (mm)	H (mm)	P _{máx} (mm)	A _d (mm ²)	A _p (mm ²)	A _t (mm ²)
20	16,54 \pm 0,43	2,77 \pm 0,06	2,55 \pm 0,64	31,04 \pm 0,90	23,35 \pm 1,42	54,39 \pm 1,18
21	15,40 \pm 1,05	2,92 \pm 0,10	3,13 \pm 0,25	29,16 \pm 1,67	18,98 \pm 2,17	48,14 \pm 3,06
22	16,09 \pm 0,70	2,75 \pm 0,26	2,81 \pm 0,25	31,43 \pm 2,51	18,41 \pm 2,89	49,84 \pm 1,27
23	14,79 \pm 0,46	2,95 \pm 0,13	2,76 \pm 0,11	30,70 \pm 1,15	13,23 \pm 1,04	43,94 \pm 1,38
24	12,55 \pm 0,53	3,57 \pm 0,12	3,16 \pm 0,24	31,79 \pm 2,30	13,10 \pm 0,99	44,89 \pm 2,38
25	11,21 \pm 0,65	3,76 \pm 0,18	3,05 \pm 0,32	30,30 \pm 1,73	11,94 \pm 1,10	42,25 \pm 1,61
26	11,60 \pm 0,42	3,99 \pm 0,15	3,13 \pm 0,11	31,75 \pm 1,9	11,67 \pm 0,88	43,41 \pm 2,13
27	13,11 \pm 0,42	3,49 \pm 0,10	2,44 \pm 0,26	31,09 \pm 1,39	11,07 \pm 1,87	42,16 \pm 2,34
28	11,06 \pm 0,96	4,02 \pm 0,27	3,19 \pm 0,23	31,82 \pm 3,73	11,89 \pm 1,10	42,76 \pm 2,82

OBS: W = Largura do cordão; h = Reforço; P_{máx} = Penetração máxima; A_d = Área depositada; A_p = Área de penetração axial; A_t = Área total.(ver detalhe na FIG. 5.6).

TABELA 6.6 – Características geométricas dos cordões sobre chapa de aço carbono (média \pm desvio padrão). Proteção: Ar + 1% O₂. Corrente de regulagem: 255 A.

CTWD (mm)	W (mm)	H (mm)	P _{máx} (mm)	A _d (mm ²)	A _p (mm ²)	A _t (mm ²)
16	15,46 \pm 1,02	2,87 \pm 0,13	2,88 \pm 0,49	30,19 \pm 2,62	25,39 \pm 4,41	55,57 \pm 5,10
19	15,65 \pm 0,72	3,01 \pm 0,12	3,29 \pm 0,15	30,79 \pm 1,12	15,27 \pm 0,98	46,06 \pm 1,20
20	15,59 \pm 0,21	3,08 \pm 0,08	3,42 \pm 0,20	30,03 \pm 0,84	12,86 \pm 0,83	42,90 \pm 0,18
21	16,01 \pm 0,28	2,91 \pm 0,08	3,39 \pm 0,16	30,00 \pm 1,39	13,94 \pm 1,16	43,94 \pm 1,09
22	16,38 \pm 0,29	2,68 \pm 0,05	2,75 \pm 0,08	31,27 \pm 1,22	12,63 \pm 0,77	43,90 \pm 1,44
24	14,64 \pm 0,30	3,18 \pm 0,07	3,69 \pm 0,15	30,33 \pm 0,79	13,83 \pm 0,54	44,16 \pm 1,24

OBS: W = Largura do cordão; h = Reforço; P_{máx} = Penetração máxima; A_d = Área depositada; A_p = Área de penetração axial; A_t = Área total.(ver detalhe na FIG. 5.6).

Estes resultados sugerem que a instabilidade de mecanismos catódicos influencia de forma significativa algumas das características geométricas dos cordões. Nos testes em que se soldou com argônio puro (TAB 6.5 e FIG. 6.47), nas condições que apresentaram maior instabilidade (CTWD menor, entre cerca de 20 e 23 mm), tanto a largura do cordão quanto a sua área de penetração foram superiores aos valores obtidos quando se soldou com um CTWD maior (24 a 28 mm). Este comportamento não era, pelo menos inicialmente, esperado, pois a variação do CTWD em operação com corrente constante deve ocasionar como consequência a uma mudança no comprimento do arco (AWS, 1991). Assim, desconsiderando a ocorrência da instabilidade de mecanismos catódicos, um aumento no CTWD deveria causar um aumento no comprimento do arco e, desta forma, um aumento na largura do cordão. O aumento observado na área de penetração com a redução no CTWD foi associado à maior fusão lateral do cordão (FIG.6.49), que pode ter ocorrido devido ao calor acumulado no metal fundido, que se transferiu ao metal de base predominantemente por condução (Ishizaki 1980), pela maior agitação da poça de fusão durante os períodos de instabilidade. Já para os testes feitos com proteção por Ar + 1%O₂ (TAB 6.6, FIG.6.48 e FIG. 6.49), não foram observadas alterações significativas na largura dos cordões com a variação do CTWD, diferentemente ao observado nos testes com proteção por argônio puro. Este comportamento pode estar associado à menor tensão superficial do metal líquido devido a presença de oxigênio na proteção gasosa.

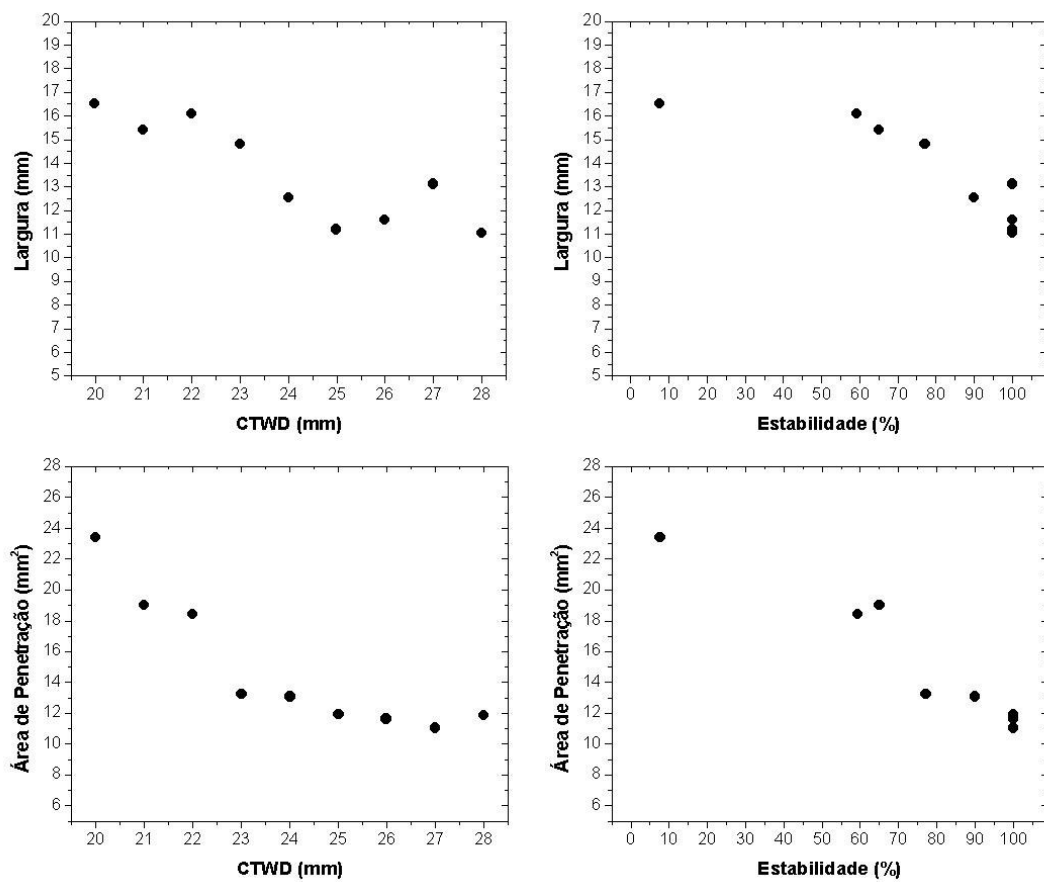


FIGURA 6.47 – Valores médios da largura e área de penetração em função do CTWD e estabilidade. Corrente de regulação: 255 A. Proteção: argônio puro.

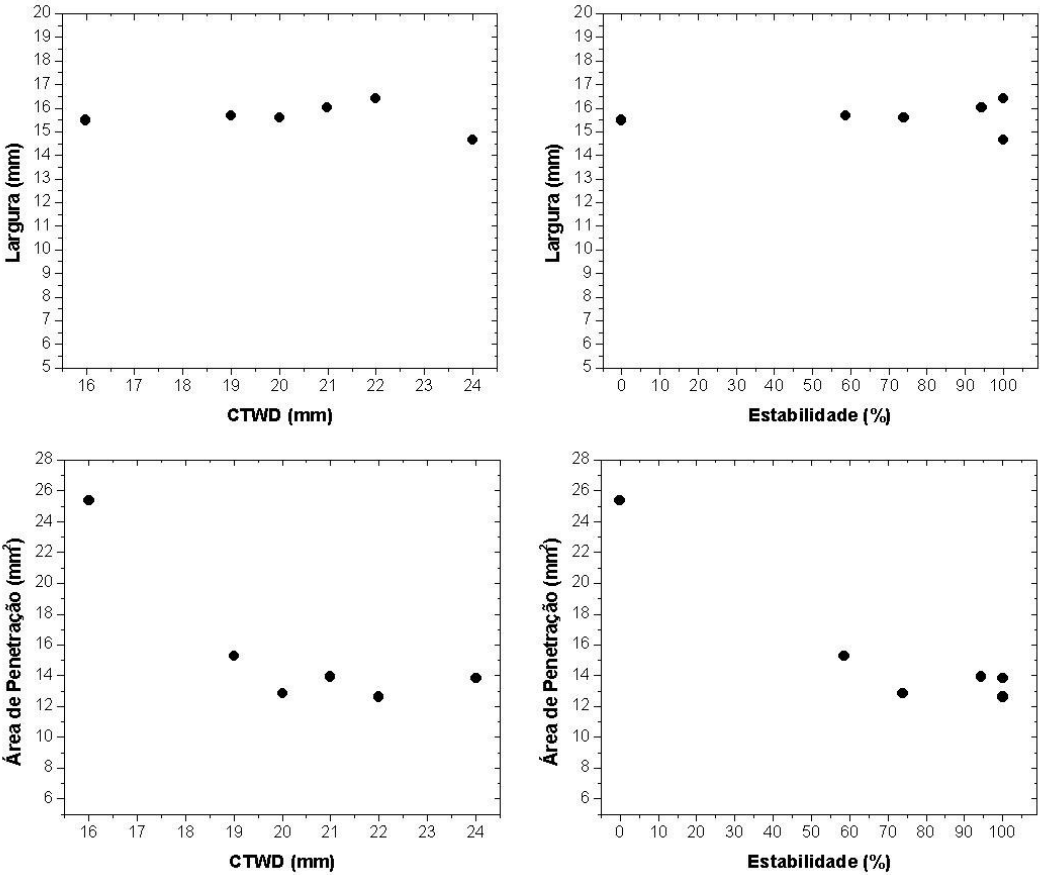


FIGURA 6.48 – Valores médios da largura e área de penetração em função do CTWD e estabilidade. Corrente de regulação 255 A. Proteção Ar + 1% O₂.

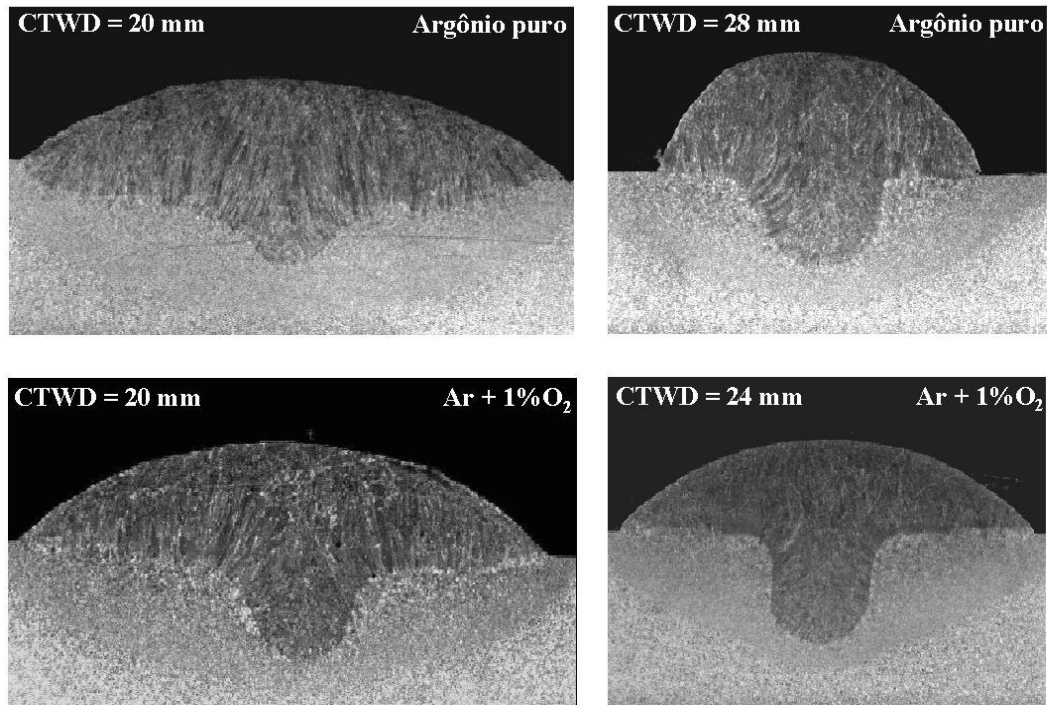


FIGURA 6.49 – Perfis de penetração típicos dos cordões de solda sobre chapas com a fonte operando em corrente constante.

6.6.2.2 - Cordões em chanfro estreito com a fonte operando em corrente constante

A soldagem em chanfro estreito é de grande interesse para indústria, uma vez que este tipo de junta apresenta uma série de vantagens como redução no tempo de preparação da mesma, redução no tempo de soldagem e redução na quantidade de consumível utilizada. As FIG. 6.50 e 6.51 mostram, respectivamente para proteção de argônio puro e de Ar + 2%O₂, oscilogramas típicos de tensão, os cordões de solda obtidos e uma imagem do arco dentro do chanfro (metal base: aço carbono).

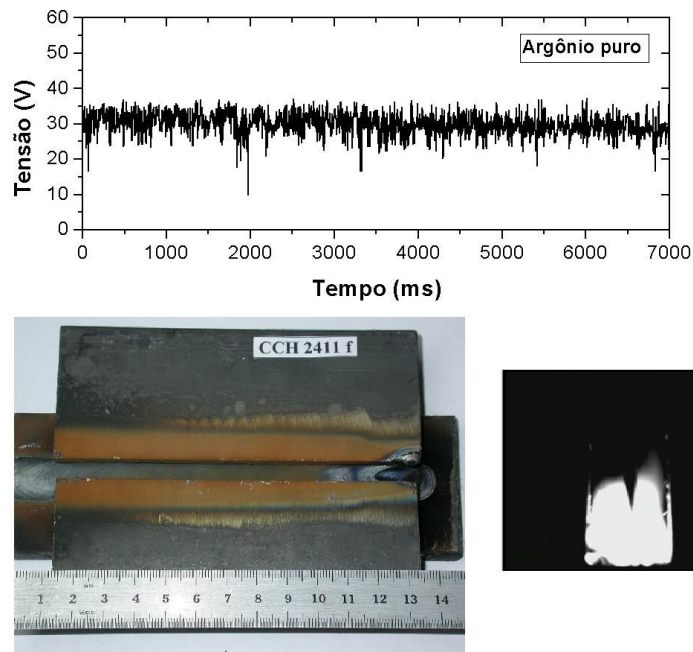


FIGURA 6.50 – Oscilograma de tensão, foto do cordão de solda e imagem do arco no chanfro em um teste em chanfro estreito de aço carbono com a fonte operando em CI. Proteção: Ar puro. Corrente de regulagem: 255 A. CTWD = 20mm.

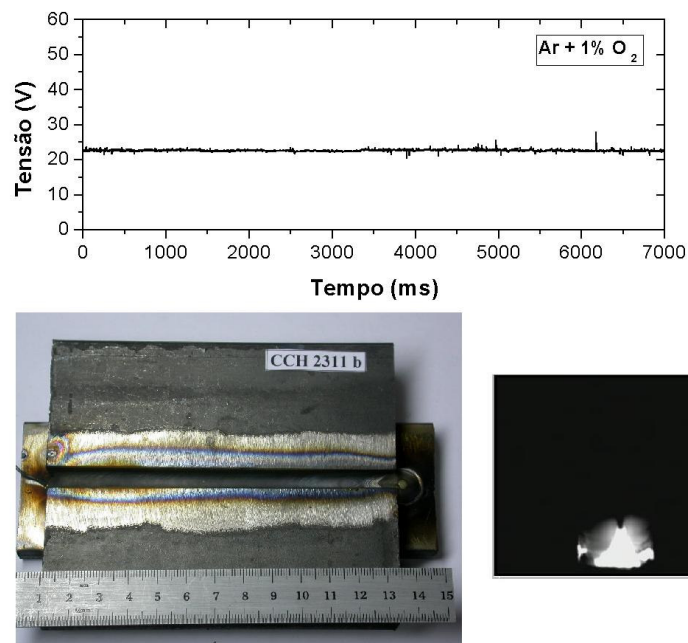


FIGURA 6.51 – Oscilograma de tensão, foto do cordão de solda e imagem do arco no chanfro em um teste em chanfro estreito de aço carbono com a fonte operando em CI. Proteção: Ar + 2% O₂. Corrente de regulagem: 255 A. CTWD = 20mm.

Os oscilogramas obtidos nestes testes foram semelhantes aos obtidos nos testes sobre chapa, isto é, quando o processo apresenta instabilidade tem-se a presença de patamares de tensão com uma diferença de cerca de 10 V. Como nos testes feitos sobre chapa, observou-se que, durante os períodos de tensão mais elevada, a transferência foi do tipo globular repulsiva em oposição à transferência predominantemente goticular (spray) durante os períodos de menor tensão. Pôde-se observar também nestes testes, como observado nos testes sobre chapa, alterações no formato e na luminosidade do arco (FIG. 6.50), na agitação da poça de fusão e no volume de fumos gerados nos períodos de instabilidade do processo.

Como a ausência de oxigênio favorece a ocorrência da instabilidade de mecanismos catódicos, optou-se, nos testes em chanfro estreito, utilizar a composição do gás de proteção como fator para controlar a ocorrência da instabilidade e estudar a sua influência nas características geométricas dos cordões de solda. Isto é, os testes com elevada instabilidade foram feitos com proteção de argônio puro e os que se caracterizaram por alta estabilidade foram feitos com proteção de Ar + 1%O₂ e Ar + 2%O₂ com os demais parâmetros de soldagem mantidos basicamente invariáveis. Além disto, avaliou-se também, a influência da presença do hélio nas características geométricas do cordão de solda. Estes testes foram feitos utilizando como proteção misturas de: 75%Ar + 25%He e Ar + 2%O₂ + 25%He. Todos estes testes foram feitos com arame e metal de base de aço carbono. Para cada tipo de proteção foram feitas no mínimo duas réplicas que geraram no mínimo um total de quatro amostras para medida.

A FIG. 6.52 mostra perfis típicos dos cordões de solda obtidos nesses testes.

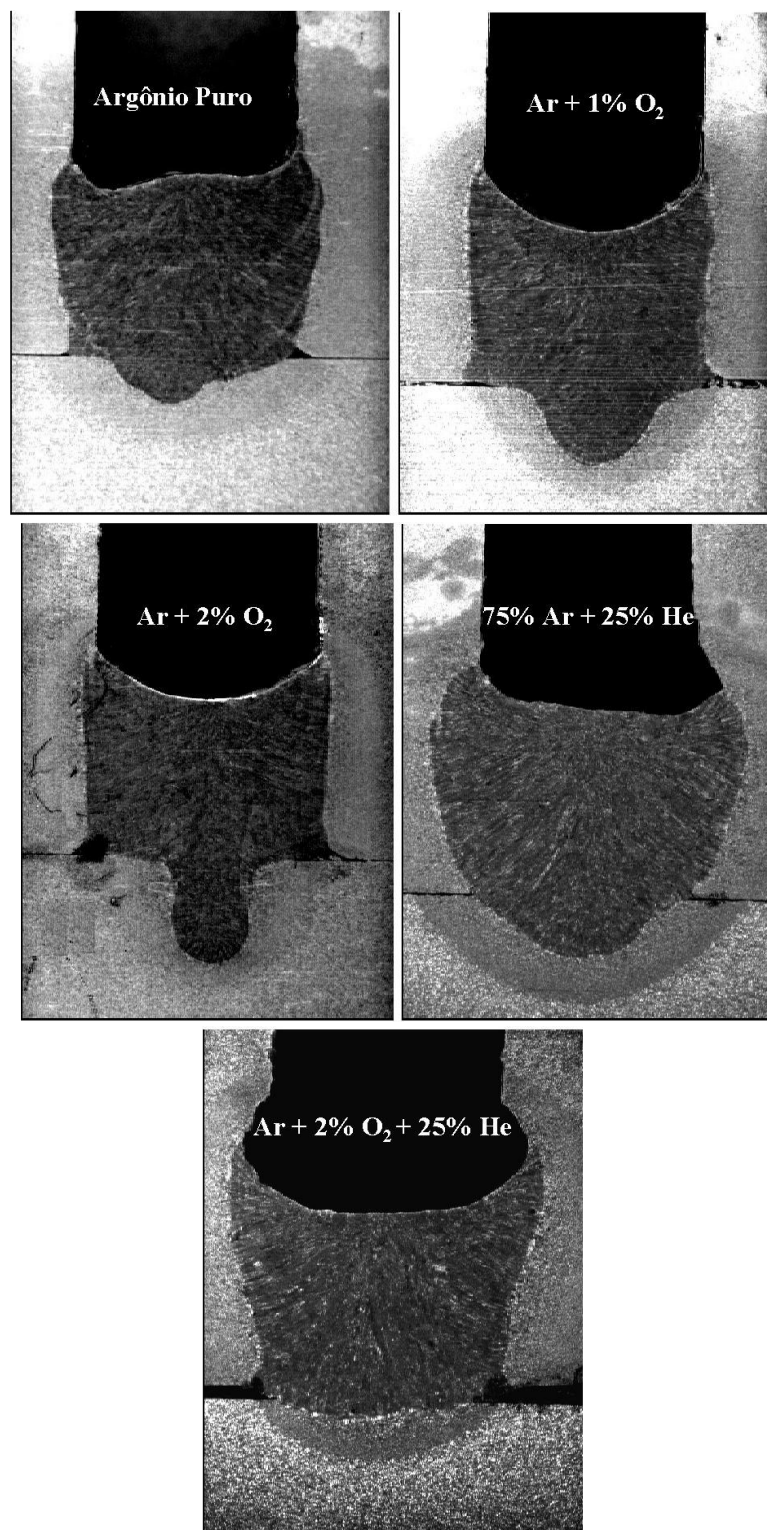


FIGURA 6.52 – Perfis de penetração típicos dos testes feito em chanfro estreito (7 mm de abertura) de aço carbono. Corrente de regulagem 255 A , CTWD = 20 mm.

Na TAB.6.7 estão apresentados os valores médios obtidos das características geométricas dos cordões de solda da FIG.6.52, com seus respectivos desvios padrão. Estes resultados estão também apresentados na FIG. 6.53.

TABELA 6.7 – Características geométricas dos cordões de solda em chanfro estreito (7mm) de aço carbono – (média \pm desvio padrão).

Proteção Gasosa	H (mm)	A _L (mm ²)	A _d (mm ²)	A _p (mm ²)	A _t (mm ²)	P (mm)
Ar puro	6,57 \pm 0,45	4,09 \pm 1,44	34,14 \pm 1,39	4,03 \pm 0,67	43,04 \pm 2,88	1,34 \pm 0,22
Ar + 1% O ₂	7,00 \pm 0,73	3,31 \pm 1,12	32,85 \pm 1,35	6,48 \pm 0,88	42,64 \pm 1,34	2,32 \pm 0,38
Ar + 2% O ₂	7,11 \pm 0,6	3,55 \pm 1,09	33,22 \pm 0,83	6,50 \pm 1,26	42,84 \pm 1,50	2,39 \pm 0,68
75% Ar + 25% He	7,13 \pm 0,36	14,21 \pm 2,42	34,00 \pm 2,53	5,06 \pm 1,19	56,48 \pm 2,17	1,56 \pm 0,20
Ar+2% O ₂ + 25% He	6,90 \pm 0,74	7,50 \pm 1,20	32,80 \pm 1,75	2,85 \pm 1,16	46,28 \pm 2,86	1,12 \pm 0,37

OBS: H = Altura; A_L = Área de penetração lateral; A_d = Área depositada; A_p = Área de penetração axial; A_t = Área total; P = Penetração. (ver detalhe na FIG. 5.7).

Pode-se observar que, quando a proteção da solda foi feita por argônio puro, a área de penetração lateral (A_L) do cordão de solda tendeu a ser superior à das soldas feitas com 1% ou 2% de oxigênio. Esta diferença é relativamente pequena e um teste de hipótese a 95% feito com estes dados não pôde confirmar a sua significância. Apesar disto, e considerando os resultados obtidos com as misturas que continham He, acredita-se que essa diferença possa ser associada ao grau de instabilidade de mecanismos catódicos do processo. Outra observação feita foi que, quando se adicionou hélio à proteção, a penetração lateral tendeu a ser muito superior (3,5 vezes maior) do que quando se soldou com argônio puro e, ainda, a influência da ocorrência da instabilidade no formato do cordão se tornou muito maior. A capacidade do hélio de aumentar a fusão do metal base já é bem conhecida (Hilton, 1982), porém a sua relação com uma maior fusão devido a instabilidade de mecanismos catódicos não foi ainda avaliada. Um possível efeito estaria relacionado com a elevada agitação do metal líquido que pode facilitar a transferência de energia por convecção e condução para o metal de base, aumentando assim a área de penetração lateral.

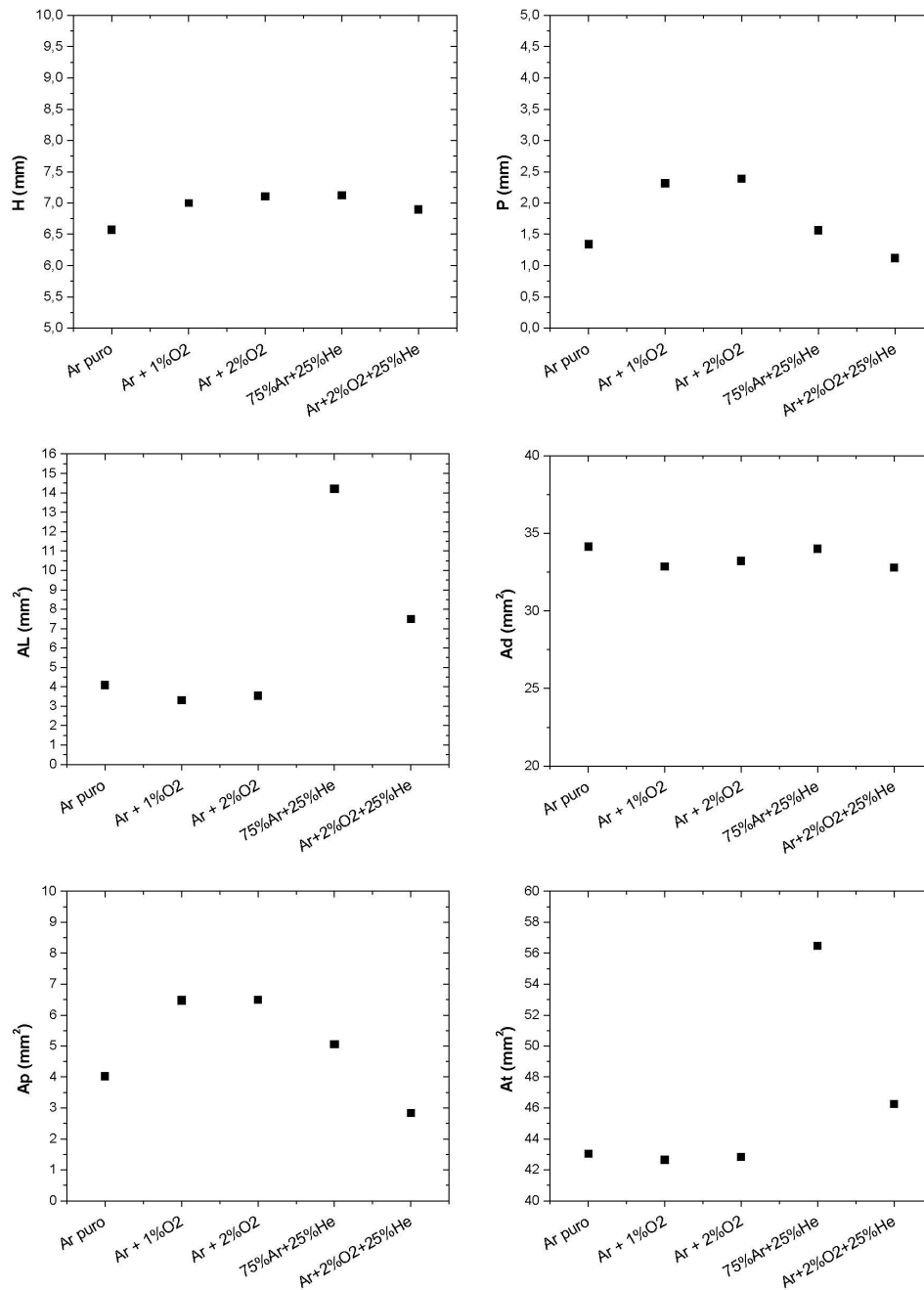


FIGURA 6.53 – Valores médios dos parâmetros geométricos dos cordões de solda obtidos em chanfro estreito (7 mm de abertura) de aço carbono. Corrente de regulação 255 A , CTWD = 20 mm.

Uma forma de relacionar neste trabalho o aumento da fusão lateral em função da mistura utilizada foi através da potência (corrente x tensão instantâneas de soldagem) gerada nos testes. A TAB. 6.8 apresenta os valores médios das potências obtidos para

cada condição de soldagem. Como os valores de Ar + 1%O₂ e Ar + 2%O₂ foram muito próximos optou-se por mostrar a média da potência dos testes de ambos.

Pode-se observar que, para os testes que apresentaram maior instabilidade, isto é, testes feitos com proteção por argônio puro e 75%Ar + 25%He, apresentaram também maior potência (TAB. 6.8). Este aumento da potência poderia ser um fator adicional para explicar o aumento da área de penetração lateral.

TABELA 6.8 – Potência média dos períodos instáveis e estáveis para as soldas realizadas em chanfro estreito de 7 mm - média \pm desvio padrão).

Proteção Gasosa	H _{instável} (kW)	H _{estável} (kW)
Ar puro	9,0 \pm 0,4	-
Ar + 2%O ₂	-	5,6 \pm 0,2
75%Ar + 25%He	9,5 \pm 0,3	-
Ar+2%O ₂ + 25%He	-	6,8 \pm 0,2

Para os testes feitos com proteção de argônio com oxigênio (Ar + 1%O₂ e Ar + 2%O₂), foi observada a tendência dos mesmos apresentarem maior penetração axial e maior área de penetração axial (FIG.6.53). Este comportamento foi associado à estabilidade predominante no processo, visto que nesta condição a transferência metálica é do tipo spray o que favorece a formação de um cordão com penetração mais estreita no centro do cordão (“finger type penetration” - penetração em forma de dedo) (AWS, 1991).

Apesar de uma alguma dispersão dos resultados, pode-se considerar que a área depositada manteve-se relativamente constante independentemente da mistura utilizada, o que era de se esperar uma vez que a taxa de alimentação foi a mesma em todos os experimento ($w = 7,8$ m/min). Esperava-se que eventuais variações desta área tivessem alguma correlação com a quantidade de respingo gerados em cada teste, isto é, com as perdas de metal de adição, o que, entretanto, não foi observado. Certamente, as incertezas envolvidas na determinação da área depositada, como as resultantes de flutuações na alimentação do arame, promoveram variações locais no formato do cordão durante os testes foram mais pronunciadas que as decorrentes das perdas por respingos.

6.7 – Considerações finais

De acordo com o levantamento bibliográfico realizado neste trabalho, foi possível constatar que profissionais de áreas distintas têm abordagens diferentes para o estudo dos mecanismos de emissão de elétrons que podem ocorrer nos eletrodos ligados a descargas elétricas através de gases. Os estudos básicos de física tendem a se concentrar, na maioria das vezes, no mecanismo de emissão não termiônica de elétrons em descargas ocorrendo em ambiente de baixa pressão ou no vácuo, já estudos mais tecnológicos tendem a investigar a emissão termiônica em arcos em meio gasoso a uma pressão igual ou próxima da ambiente. Estes dois enfoques separados podem dificultar um entendimento mais global dos mecanismos de emissão de elétrons.

Guile (1970), como resultado de trabalhos de pesquisas relacionados com processos de soldagem, verificou que os dois mecanismos expostos acima poderiam ocorrer de forma conjunta, ou seja, um arco operando com emissão não termiônica poderia mudar subitamente para o mecanismo de emissão termiônica se houvesse uma variação (aumento) na corrente, o que conseqüentemente aumentaria a temperatura no cátodo.

Na mesma linha de raciocínio de Guile (1970), Modenesi e Nixon (1994) propuseram, para explicar a ocorrência de fenômenos de instabilidade observados na soldagem GMAW de aço de baixo carbono, um modelo (FIG. 3.17) que considera a competição entre mecanismos alternativos para a emissão de elétrons na região catódica do arco. Estes autores relataram que, na ausência de uma quantidade suficiente de oxigênio, a recomposição da camada de óxidos no metal seria dificultada e sua destruição afastaria a poça de fusão, dificultando a manutenção da operação do arco a partir da emissão de elétrons nesta camada. Nesta condição, um mecanismo alternativo, baseado na formação de vapores metálicos tornaria operativo sobre a poça de fusão. Este mecanismo concentraria a raiz do arco em um ponto da poça de fusão, mudando a forma do arco, isto é, reduzindo fortemente o seu diâmetro junto a poça de fusão (FIG. 6.54) e, desta forma aumentando a pressão eletromagnética sobre o arco nesta região e criando um jato de plasma com sentido oposto ao usual. Este jato tenderia a soprar o metal

líquido na ponta do eletrodo, dificultando a sua transferência para a poça e, desta forma, ocasionando uma transferência globular repulsiva.

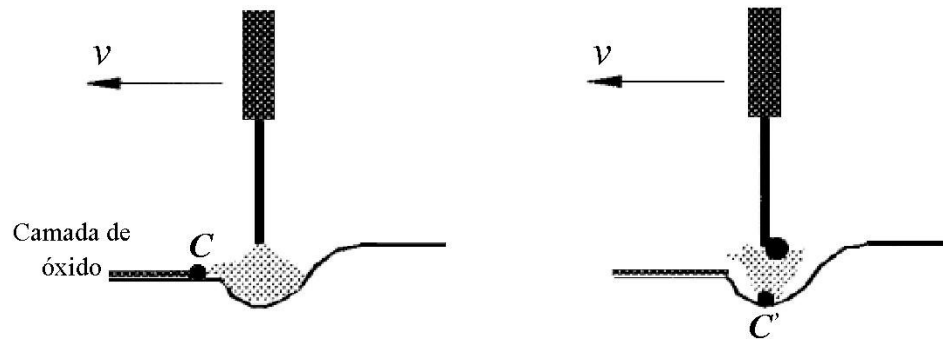


FIGURA 6.54 – Representação esquemática do mecanismo alternativo para a emissão de elétrons baseado na formação de vapores metálicos. (C e C') pontos catódicos) (Modenesi e Nixon, 1994).

Somente após onze anos da publicação do trabalho de Modenesi e Nixon (1994), Tong *et al.* (2005), aparentemente sem relacionar os seus achados com os de Modenesi e Nixon, propuseram essencialmente o mesmo modelo para explicar um aumento anormal na tensão do arco que estes observaram durante a soldagem GMAW de alumínio com polaridade variável. Estes autores relataram que, no momento da reignição do arco, quando o eletrodo estava na polaridade positiva, novos pontos catódicos eram formados no centro da superfície da poça de fusão, onde a presença de óxidos era muito rara. Segundo os autores, a função de trabalho da superfície do cátodo aumentava e os pontos catódicos concentrariam devido à falta de óxidos, conduzindo a um aumento na diferença de potencial nas regiões de queda anódica e catódica. Conseqüentemente, a tensão do arco tornava-se anormalmente elevada, apesar do curto comprimento do arco. Além disso, estes autores observaram que, quando a polaridade do eletrodo mudava do positivo para o negativo, imediatamente após o destacamento de uma gota, novos pontos catódicos eram formados na superfície do metal líquido remanescente na ponta do arame, onde poucos óxidos existiam, levando também a um aumento anormal da tensão do arco. Sendo assim, eles concluíram que mudanças na tensão do arco nem sempre estão necessariamente ligadas a uma flutuação no comprimento do arco (FIG. 6.55).

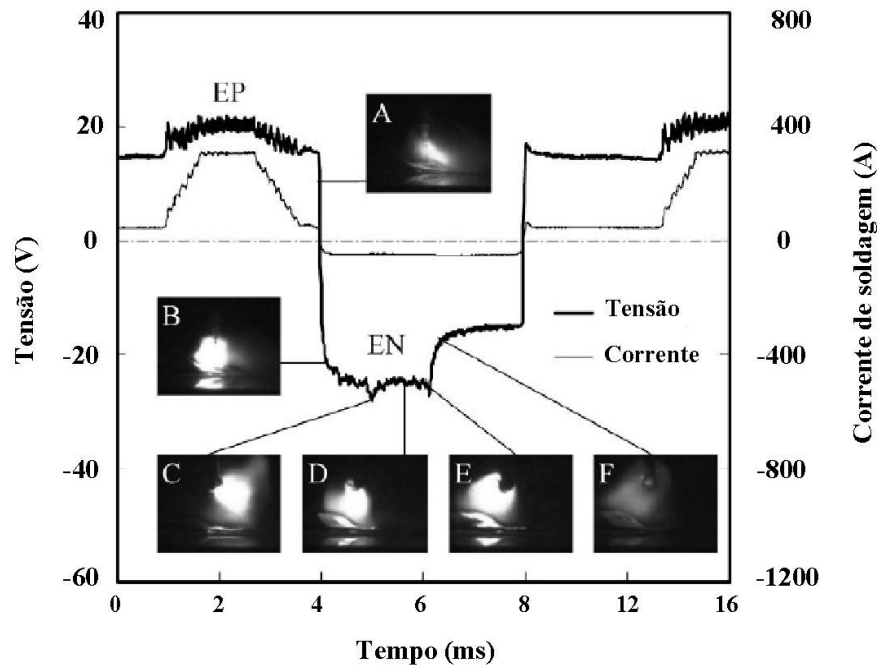


FIGURA 6.55 – Aumento anormal na tensão do arco após um curto-circuito na soldagem MIG com inversão de polaridade (Tong *et al.* 2005).

A análise dos resultados obtidos nesta tese mostrou que a instabilidade de mecanismos catódicos relatada por Modenesi e Nixon (1994) e por Tong *et al.* (2005) ocorre também em aços inoxidáveis austeníticos, além de ocorrer em aço carbono comum e alumínio como já havia sido relatado por esses autores. Além disto, a análise de dados de outros trabalhos permitiu encontrar indícios de sua ocorrência na soldagem GMAW de aços inoxidáveis ferríticos (Rezende, 2005) e de titânio (Eickhoff e Eagar, 1990). Os resultados do presente trabalho suportam e fornecem evidências adicionais de uma relação direta entre os fenômenos observados e mudanças de mecanismos de emissão de elétrons durante a soldagem como foi proposto por Modenesi e Nixon (1994) e mencionado por Tong *et al.* (2005). Os primeiros hipotetizaram que um mecanismo alternativo de emissão de elétrons no cátodo entraria em operação associado com a emissão de jatos de vapores metálicos pelo cátodo, sendo essa forma de emissão comum em arcos formados no vácuo (Juttner, 2001b).

As alterações de comportamento do processo não podem ser associadas a variações da corrente em torno de seu valor de transição, o que poderia ocasionar, por exemplo,

modos mistos de transferência de metal (Ponomarev *et al.* 2004) pois, no presente trabalho, instabilidade foi observada mesmo em testes realizados com valores de corrente bem acima da corrente de transição. Além disto, também foram encontradas evidências da mesma em condições de operação abaixo da corrente de transição com transferências por curto-circuito e globular. Seriam as variações de tensão ligadas a possíveis mudanças na coluna do arco? Acredita-se que isto seja improvável pois as variações de tensão (de cerca de 10V) foram observadas, em muitas situações, sem uma variação importante no comprimento do arco. Quanto a uma mudança na composição química da coluna, esta deve ocorrer, mas os resultados sugerem que deva ser principalmente através de um enriquecimento do arco por vapores metálicos. Estes vapores, contudo, devem apresentar um potencial de ionização menor que o argônio, o que deve contribuir, de fato, para uma redução da diferença de potencial na coluna do arco. Além disto, por apresentarem um peso atômico (pelo menos no caso de vapores de ferro) relativamente elevado, estes não devem contribuir de forma muito forte para aumentar as perdas térmicas no arco e, desta forma, também causar um aumento da tensão da coluna.

Permitiu-se confirmar ainda, através dos resultados da filmagem de alta velocidade juntamente com a técnica de “Shadowgrafia” realizada neste trabalho, a hipótese inicialmente levantada, de que durante os períodos estáveis a transferência metálica é do tipo goticular, porém, em geral com algum alongamento (streaming spray) e que durante os períodos instáveis a transferência metálica é do tipo globular e que estas mudanças ocorrem de forma sincronizada com as mudanças de tensão observadas nos oscilogramas dos testes de soldagem. Observou-se também que durante os períodos instáveis, a gota cresce lentamente até um diâmetro várias vezes maior que o diâmetro do arame, se destacando em geral, lateralmente. Foi observado ainda que a duração da instabilidade era maior quando o teste era feito com proteção de argônio puro. Em misturas contendo algum teor de gás oxidante o período de instabilidade foi mais curto, possivelmente porque este gás facilitava a regeneração das regiões oxidadas favorecendo, assim, a emissão de elétrons associada com filmes de óxido em preferência à emissão de elétrons ligada com a formação de vapores metálicos.

Ainda pôde ser observado durante a análise dos filmes que, em geral, a transição no modo de operação estável para instável ocorre predominantemente após um rápido curto-circuito entre o eletrodo e a poça de fusão (FIG. 6.41 e 6.56) e não pela deflexão do arco. Uma explicação plausível do motivo pelo qual o curto-circuito iniciaria o processo instável seria que, durante o curto, o consumo de óxido devido a ação da limpeza catódica pára, mas o forte aquecimento localizado na poça de fusão e, principalmente, na ligação de metal líquido entre a poça e o eletrodo em função da elevação da corrente elétrica provocaria a vaporização do material, favorecendo, assim, a formação de pontos de emissão de elétrons associados com esta vaporização. Esta característica indica que, nem sempre, o consumo e o conseqüente afastamento das camadas de óxido na superfície do metal base da poça de fusão é o motivo do início da operação instável como proposto por Modenesi e Nixon (1994). De fato, a ruptura da ponte de metal líquido parece ser uma causa bem mais comum e isto explicaria a ocorrência da instabilidade mesmo com misturas gasosas com um teor mais elevado de gases oxidantes como na soldagem com Ar-25%CO₂ com transferência por curto circuito (FIG. 6.18).

Como os pontos de emissão de elétrons durante os períodos de instabilidade se concentram em pequenas regiões sobre a poça de fusão, ocorreria uma contração com arco junto da poça de fusão e, como conseqüência, um jato de plasma dirigida da poça de fusão para o eletrodo seria formado, o que geraria uma força contrária ao destacamento da gota de metal líquido da ponta do eletrodo, desta forma, causando a característica repulsiva na transferência durante a instabilidade. Além disto, as forças de reação a este jato atuando na poça de fusão causariam a forte agitação da mesma.

Uma possível explicação para o retorno do processo para a condição estável seria, com a diminuição da temperatura localizada ao longo do processo, a emissão de elétrons por vapores metálicos da superfície da poça de fusão ficaria mais difícil, então o processo começaria a ser operado pela emissão de elétrons dos filmes de óxidos da superfície do metal base.

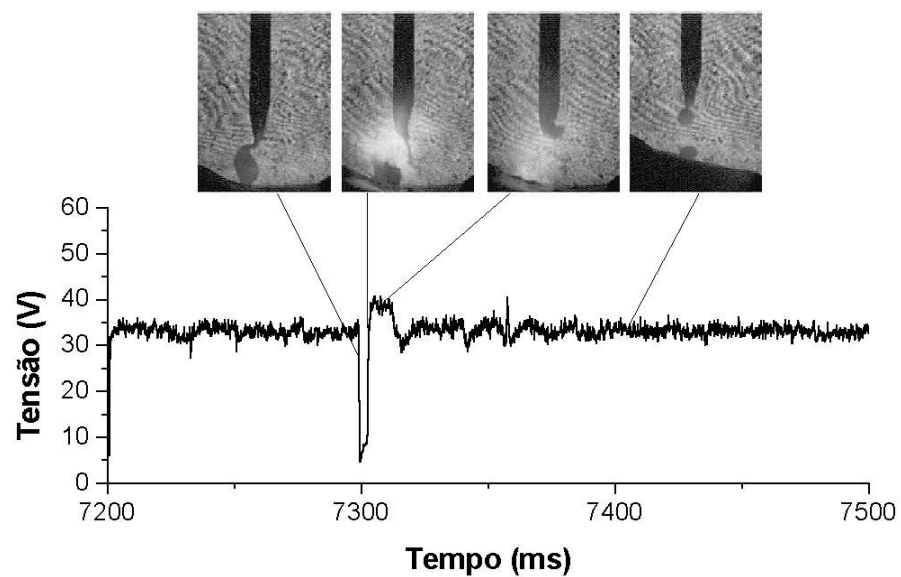


FIGURA 6.56 – Início da instabilidade de mecanismos catódicos após um rápido curto-circuito

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos e com base nas discussões feitas, pôde-se estabelecer as seguintes conclusões:

- ✓ A instabilidade associada com o potencial de oxidação no gás de proteção, que foi observada na soldagem de aço carbono com transferência por spray, também ocorre com outros materiais, em particular o aço inoxidável austenítico e o alumínio, e em outras condições de soldagem como na transferência por curto-circuito e globular.
- ✓ Detalhes de funcionamento do equipamento de soldagem, particularmente as suas características estáticas e dinâmicas influenciam a forma de manifestação da instabilidade de mecanismos catódicos e o nível dos parâmetros de soldagem de sua ocorrência.
- ✓ O diâmetro do bocal de proteção (que determina a extensão da região em torno da solda que é protegida do ar atmosférico) influencia a duração e a quantidade das manifestações de operação instável, contudo, a instabilidade foi observada independentemente da extensão da área protegida em torno da solda.
- ✓ Para os três metais de base utilizados neste trabalho, os períodos de operação estável do arco estão associados às regiões com limpeza catódica junto ao cordão de solda. Durante os períodos de operação instável, esta limpeza não parece ocorrer.

- ✓ Na soldagem de alumínio com proteção por argônio puro, os períodos de operação instável parecem ser muito mais difíceis de ocorrer do que na soldagem de aço carbono e aço inoxidável. No primeiro, os períodos de instabilidade, quando presentes, tendem a ser de curta duração. Este comportamento do alumínio foi associado à sua maior facilidade de oxidar e, desta forma, a sua facilidade de regenerar a camada de óxidos removidos pelos processos ocorrendo no cátodo.
- ✓ Durante os períodos de instabilidade, ocorre uma intensa agitação da poça de fusão (muito maior do que a observada durante os períodos de operação estável). Além disto, o arco apresenta-se mais brilhante e com uma movimentação errática e rápida sobre a poça de fusão. Observou-se, ainda, um aumento significativo no volume de fumos gerados pelo processo. De uma forma geral, a instabilidade foi favorecida por uma redução no comprimento de arco e do teor de oxigênio na atmosfera de proteção.
- ✓ Os resultados obtidos através da filmagem de alta velocidade com sincronismo com os sinais elétricos do processo confirmaram que os períodos de instabilidade apresentam uma transferência do tipo globular repulsiva e que estes períodos ocorrem simultaneamente a mudanças nos valores da corrente e tensão da soldagem que dependem das características estáticas da fonte de soldagem. Com fontes de corrente constante, observa-se, nos períodos de operação instável, um aumento da tensão de soldagem sem uma variação apreciável do comprimento do arco.
- ✓ Observou-se que, em geral, a instabilidade de mecanismos catódicos se inicia ao término de um rápido curto-circuito entre o eletrodo e a poça de fusão. Esta observação não confirma a hipótese levantada em trabalhos anteriores de que a instabilidade seria causada pelo afastamento da camada de óxido da poça de fusão.

- ✓ Independentemente do tipo de operação da fonte, os períodos de instabilidade e estabilidade do processo influenciam fortemente no aspecto superficial do cordão e em algumas características geométricas do mesmo como a sua largura e área de penetração. Esta última, em particular, tendeu a ser maior com a operação instável e este efeito foi significativamente mais importante quando se comparou o formato do cordão em soldas feitas com gases de proteção contendo hélio.

- ✓ Para os aços, notou-se que a adição de 20-25% hélio ao argônio resulta em um decréscimo nos valores das correntes no período estável, o que resulta em uma menor variação de corrente entre os dois períodos de operação.

CAPÍTULO 8

CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS E RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS

De acordo com os resultados desta pesquisa, foi possível enumerar as seguintes contribuições originais.

- ✓ Caracterização da instabilidade de mecanismos catódicos em aço inoxidável austenítico e alumínio e em outras condições de soldagem como na transferência por curto-circuito e globular.
- ✓ Caracterização da relação entre a ocorrência da instabilidade e variações na intensidade da radiação luminosa do arco e a geração de fumos no processo.
- ✓ Demonstração, por filmagem de alta velocidade sincronizada com os sinais de tensão e corrente de soldagem, de que os períodos de instabilidade estão diretamente associados com mudanças na tensão do arco.
- ✓ Constatação de que a instabilidade de mecanismos catódicos tem o seu início, em geral, associado com a ruptura da ponte de metal líquido ao final de um curto circuito, não necessariamente estando ligada com a posição do filme de óxido na superfície do metal de base.

CAPÍTULO 9

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos acredita-se que alguns aspectos deveriam ser melhores explorados para a complementação deste trabalho.

- ✓ Explorar mais detalhadamente o fenômeno de instabilidade de mecanismos catódicos na soldagem com transferência por curto-circuito e globular.
- ✓ Variar a velocidade de soldagem para verificar a sua influência na extensão da mancha catódica.
- ✓ Verificar a influência da natureza e espessura da camada de óxido de cada metal de base na instabilidade de mecanismos catódicos.
- ✓ Verificar a influência das propriedades físicas dos gases de proteção nos valores da corrente estável e instável.
- ✓ Explorar de forma mais profunda a influencia da instabilidade de mecanismos catódicos na soldagem em chanfro estreito quando se utiliza hélio como proteção gasosa, pois este comportamento pode levar a uma contribuição na âmbito industrial.

PUBLICAÇÕES RELACIONADAS COM O TRABALHO

Até o momento, as seguintes publicações foram geradas pela autora a partir dos resultados do presente estudo:

- ✓ COSTA, M. C. M. S.; STARLING, C. M. D.; MODENESI, P. J.; MENDONCA, M. V. L. **Influência de alguns parâmetros operacionais na instabilidade do arco no processo MIG.** In: 3º COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2005, Joinville. Anais... Santa Catarina: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas - anais com trabalhos completos publicados em CD-ROM, 2005. v. 1, p. 1-10.
- ✓ COSTA, M. C. M. S.; STARLING, C. M. D.; MODENESI, P. J. **Instabilidade na soldagem GMAW com gases de baixo potencial de oxidação efeito do metal de base.** In: XXXI CONSOLDA - Congresso Nacional de Soldagem, 2005, São Paulo. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem - anais com trabalhos completos publicados em CD-ROM, 2005. v. 1, p. 1-10.
- ✓ COSTA, M. C. M. S.; STARLING, C. M. D.; MODENESI, P. J. **Instabilidade na soldagem GMAW com gases de baixo potencial de oxidação - caracterização por filmagem de alta velocidade.** In: XXXI CONSOLDA - Congresso Nacional de Soldagem, 2005, São Paulo. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem - anais com trabalhos completos publicados em CD-ROM, 2005. v. 1, p. 1-10.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUSA, K.; NISHIYAMA, N.; TSUBOI, J. **MIG welding with pure argon shielding – arc stabilisation by rare earth additions to electrode wires.** Metal Construction, p.571-574, set. 1981.

ALCAN. **Manual de soldagem.** São Paulo: [s.n.], 1993.133p.

ALLEMAND, C.D; SCHOEDER, R; RIES, D.E; EAGAR, T.W. **A method of filming metal transfer in welding arcs.** Welding Journal, p. 45-47, 1985.

AMIN, M. **Pulsed current parameters for arc stability and controlled metal transfer in arc welding.** Metal construction, p. 272-278, may.1983.

AMSON, J.C. **An analysis of the gas – shielded consumable metal arc welding system.** Welding Journal, v.41, n.4, p. 232-249, 1962.

AWS. **Gas metal arc welding.** Welding Handbook. 8.ed. Miami: AWS, v.2, 1991. p. 109-155.

BÁLSAMO, P.S.S. **Desenvolvimento de um sistema sinérgico não linear para soldagem MIG pulsado de aço inoxidável.** 2000. 193 f. Tese (Doutorado em Materiais e Processos de Fabricação) – Faculdade de Engenharia Mecânica, UFU, Uberlândia, 2000a.

BÁLSAMO, P.S.S. *et al.* **Development of an experimental technique for studying metal transfer in welding: Synchronized shadowgraphy.** Inst. J. for the Joining of Materials, v.12, n.1, 12p. 2000b.

BARRA, S.R. **Influência do processo MIG/MAG térmico sobre a microestrutura e a geometria da zona fundida.** 2003. 209f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, SC, Florianópolis, 2003.

BOUGHTON, P. AMIN M.M. **Aspects of the arc root behaviour in welding.** Second Int. Conf. on Gas Discharges, IEE, p. 130-131, 1972.

BROSILOW, R. **Gases for shielding metal arc welding.** Welding Design e Fabrication, p. 63-69, oct. 1978.

CARVALHO, J.L.R. *et al.* **Dados termodinâmicos para metalurgistas.** Belo Horizonte: UFMG – Escola de Engenharia, 1977. 392p.

CARY, H.B. **Modern welding technology.** 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 120Pp.

CATÁLAGO AGA. **Gases de proteção para solda - teoria e aplicação.** Rio de Janeiro, [s.n.], out.1999.

CATÁLAGO WHITE MARTINS. **Dados técnicos da fonte de soldagem VI-400.** Rio de Janeiro, [s.n.], jun.1979.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos.** 6.ed. São Paulo: ABM, 1988. 576p.

CUNHA, J.A R.; GRUNDMANN, J. **A influência dos gases de proteção nos regimes de transferência metálica em soldagem SAMG.** In: XXI Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem – ABS, 1995, Caxias do Sul. Anais... Rio Grande do Sul: ABS, 1995. v.2, p.513-528.

DEIRÓ, W.C. **Manual de operação do sensor óptico WCD-01.** Belo Horizonte: [s.n.], UFMG – Escola de Engenharia, 2005. 9p.

DEN OUDEN, G.; HEMANS, M.J.M. **Process behavior and stability in short circuit gas metal arc welding,** *Welding Journal*, v. 78, n. 4, p.137-174, apr. 1999.

DUTRA, J.C. **Análise estatística de estabilidade de arco em soldagem MIG/MAG com transferência por curto-circuito.** In: Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem – ABS, 15, 1989, São Paulo. Anais... São Paulo: ABS, 1989. v.1, p.327-347.

EICKHOFF, S.T.; EAGAR, T.W. **Characterization of spatter in low-current GMAW of titanium alloy plate.** *Welding Journal*, p.382s-388s, oct. 1990.

ESSERS, W.G, VAN GOSPEL, M.R. **Arc control with pulsed GMA welding.** *Welding Journal*, p.26-32, june 1984.

GENTIL, V. **Corrosão.** Rio de Janeiro: LTC Editora, 1996. 345p.

GIBSON, G.J.; ROTHSCHILD, G.R. **The effects of DC component in AC inert-gas-arc welding of aluminum.** *Welding Journal*, p. 496s, 1948 apud Patee *et. al.* Theoretical and experimental study of cathodic cleaning with the plasma arc. *Welding Journal Research Supplement*, p. 12, apr. 1968(a).

GUILÉ, A.E. **Arc cathode and anode phenomena.** International Institute of Welding, Doc. 212-170-69, p87, 1970.

GUILÉ, A.E. **Arc-electrode phenomena.** Proceedings IEE Reviews, England, v.118, n.9R, p. 1131-1154, sept. 1971.

GUILÉ, A.E.; JUTTNER, B. **Basic erosion processes of oxidized and clean metal cathodes by electric arcs.** IEEE trans. Plasma Sci, n.8 p. 259-69, sept. 1980.

HEALD, P.R. *et al.* **Mapping the droplet transfer modes for an ER 100S - 1 GMAW electrode.** Welding Journal, Miami, p.38s-44s, apr.1994.

HELMBRECHT, W.H.; OYLER, G.W. **Shielding gases for inert-gas welding.** Welding Journal, Miami, p. 969 – 979, oct. 1957.

HERBST, H.T. **Electrical characteristics of the arc in “heliarc” welding.** Welding Journal, p. 600, 1948 apud Patee *et. al.* Theoretical and experimental study of cathodic cleaning with the plasma arc. Welding Journal Research Supplement, p. 12, apr. 1968a.

HILTON, D.E. **He/Ar gas mixtures prove more economic than Ar for Al welds.** Welding and Metal Fabrication, p. 232-240, jun. 1982.

HILTON, D.E.; NORRISH, J. **Shielding gases for arc welding.** Welding e Metal fabrication, Cambridge, p.189-196, may/june. 1988.

HOLBERG, B.; STEMBACKA, N. **Shielding gas recommendations when gas metal arc when gas metal arc welding some high alloy austenitic stainless steels.** Svetsaren special, ISSUE, 1E, 1990 apud Lagares, M.L. Implementação do processo MIG pulsado para a soldagem de um componente automotivo de aço inoxidável. Dissertação (Mestrado em Materiais e Processos de Fabricação) – Faculdade de Engenharia Mecânica, UFU, Uberlândia - MG, 2001.

ISHIZAKI, K. **A new approach to the mechanism of penetration.** Int. Conf. Weld Pool Chemistry and Metallurgy. TWI, Abington, Cambridge, UK, pp. 65-76, 1980.

JOHNSON, J.A *et al.* **Process control of GMAW: sensing of metal transfer mode.** Welding Journal, Miami, p.91s-99s, apr.1991.

JONES, A. *et al.* **Imagens of a steel electrode in Ar-2%O₂ shielding during constant current gas metal arc welding.** Welding Journal, Miami, p.135s-141s, apr.1998.

JONSSON, P.G.; MURPHY, A.B.; SZELELY, J. **The influence of oxygen additions on argon-shielded GMAW processes.** Welding Journal, Miami, p.48s-58s, feb.1995.

JUTTNER, B. **Characterization of the cathode spot.** IEEE Trans. On Plasma Science, n. 15 (5), p. 474-479, oct. 2001a.

JUTTNER, B. **Cathode spots of electric arcs.** Journal of Physics D: Applied Physics, n. 34, p. R103-R123, 2001b.

KENNEDY, C.R. **Gas mixtures in welding.** The Australian Welding Journal, Australian, p. 38-52, sept. 1970.

KIM, Y.S; EAGAR, T.W. **Analysis of metal transfer in gas metal arc welding.** Welding Journal, Miami, v.72, n.6, p.269s-278s, june.1993.

KUJANPAA, V.P. *et al.*. **Role of shielding gases in discontinuity formation in GTA welding of austenitic steel strips.** Welding Journal, v. 63, p. 150s – 155s, may.1984.

LANCASTER, J.F. **Mass flow from electrode to the workpiece.** In: Welding Metallurgy, 4, 1987, London, 1987. p.21-26.

LANCASTER, J.F. **The physics of welding.** 2.ed. Pergamon Press, International Institute of Welding, 1986. 340p.

LARSON, L.J. **Metal transfer in the metallic arc.** Welding Journal, p.107s-112s, feb.1942.

LESNEWICH, A. **Control of melting rate and metal transfer in gas shielding metal arc welding: part II - control of metal transfer.** Welding Journal, v.37, n.9, p.418s-425s, 1958.

LUCAS, W. **Instrumentation for arc welding – process monitoring and power source validation.** Welding e Metal Fabrication, p. 413-420, nov/dec. 1994.

LUCAS, W.; AMIN, M. **Effect of wire composition in spray transfer mild steel MIG welding.** Metal Construction, p.77-83, feb. 1975.

MACHADO, I.G. **Soldagem e tecnologia e técnicas conexas: processos.** Porto Alegre, 1996. 477p. editado pelo autor.

MANZ, A. F. **The drawn of gas metal arc welding.** Welding Journal, p.67-68, jan. 1990.

MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem – fundamentos e tecnologia.** Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005. 362p.

MERIAM, J.L.; KRAIGE, L.G. **Mecânica: estática.** 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999. p.360.

MITA, T. *et al.* **Quantitative estimatives of arc satability for CO₂ gas shielded arc welding.** Welding international, n.2, 1988. p.152-159.

MODENESI, P.J. **Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalurgia da UFMG, 2004. 141p.(Apostila).

MODENESI, P.J. **Procedimento para obtenção de oscilogramas de corrente e tensão em soldagem.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalurgia da UFMG, 2005. Apostila.

MODENESI, P.J. **Statistical modelling of the narrow gap gas metal arc welding process.** 1990. 308 f. Tese (PhD Thesis – School of Industrial Science) – Cranfield Institute of Technology, Inglând, 1990.

MODENESI, P.J.; NIXON, J.H. **Arc instability phenomena in GMA welding.** Welding Journal, v.73, n.9, p.219s-224s, sept.1994.

NORRISH, J.; RICHARDSON, I.F. **Metal transfer mechanisms.** Welding and Metal Fabrication, p.17-22, jan./feb.1988.

PATTEE, H.E; ANNO, J.N; RANDALL, M.D. **Theoretical and experimental study of cathodic cleaning with the plasma arc.** Welding Journal Research Supplement, p. 12, apr. 1968a.

PATTEE, H.E; MEISTER, R.P; MONROE, R. E. **Cathodic cleaning and plasma arc welding of aluminum.** Welding Journal Research Supplement, p. 08, may. 1968b.

PONOMARAVEV, V. *et al.* **Investigation of the mechanism of short arc MIG/MAG welding metal transfer mixed modes.** International Journal for the Joining of Materials, v. 16, n.3, p.65-70, sept. 2004.

PUMPHREY, W.I. **Researches into the welding of aluminum and its alloys.** Aluminum Development Association Report, n. 27, july 1955 apud Patee *et. al.* Theoretical and experimental study of cathodic cleaning with the plasma arc. Welding Journal Research Supplement, p. 12, apr. 1968(a).

REIS, R.I.; LEMOS, E.I.;MODENESI, P.J. **Fusão do arame na soldagem GMAW com fonte de corrente constante.** IN: - Congresso Brasileiro de Fabricação de Engenharia, 2º, 2003, Uberlândia.

REZENDE, A. **Mapeamento paramétrico da soldagem GMAW com arames de aço inoxidável ferrítico e austenítico.** 41 f. Proposta de Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Escola de Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG, Belo Horizonte, 2005.

RODWELL, M.H. **A preliminary investigation into arc disturbances and poor weld appearance in the spray transfer MIG welding os steel.** Weld. Institute Research Report, 7851.01/84/422.2, 1985.

SALTER, G.R.; DYE, A.S. **Selecting gas mixtures for MIG welding.** Metal Construction and British Welding Journal, p.230-233, june 1971.

SCOTTI, A. **A review on special metal transfer modes in gas metal arc welding.** RBCM- J. of the Braz. Soc. Mechanical Sciences, , v.XX, n.3, p. 465 –478, 1998.

SILVA, A.V. **Avaliação da soldagem GMAW de um aço ABNT 304 com misturas Ar-O₂-H₂ e Ar-O₂-N₂.** 1995. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Escola de Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG, Belo Horizonte, 1995.

SMITH, A.A. *et al.*. **Characteristics of the short-circuiting CO₂ – shielding arc.** In: Symposium the Institute of Welding, 29,1962, London.p.76-91.

STENBACKA, N.; PERSON, K.A. **Gases de proteção para soldagem MIG/MAG de aços inoxidáveis.** Rio de Janeiro: AGA, 1992.

SUBAN, M; TUSEK, J. **Methods for the determination of arc stability.** Journal of Materials Processing Technology, p. 430-437, 2003.

SUBRAMANIAM, S. *et al.* **Droplet transfer in pulsed gas metal arc welding of aluminum,** Welding Journal, p.458s-464s, nov.1998.

SULLIVAN, D. **The gas metal arc welding process celebrates a 50th anniversary.** Welding Journal, p.53-54, set. 1998.

TONG, H. *et al.* **Observations of the phenomenon of abnormal arc voltage occurring in pulsed metal inert gas welding of aluminium alloy.** Science and Technology of Welding and Joining, v.10, n.6, p. 695-700, 2005.

TUSEK, J.; SUBAN, M. **Experimental research of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas in arc welding of high-alloy stainless steel.** International Journal of Hydrogen Energy, Slovenia, v.25, n.25, p. 369-376, 2000.

URMSTON, S.; HILTON, D.; STARES, I. **Developmente of shielding gases for stainless steel welding.** Welding e Metal Fabrication, v.62, n.4, p. 165-168, apr. 1994.

USHIO, M. **Arc discharge and electrode phenomena.** Pure e Appl. Chem, v.60, n.5, p. 809-814, 1988.

VAIDYA, V. **Shielding gas mixtures for semiautomatic welds.** Welding Journal, v.81, n.9, p.43-48, set. 2002.

VILARINHO, L.O. **Desenvolvimento e avaliação de um algoritmo alternativo para soldagem MIG sinérgica de alumínio.** 2000. 111f. Dissertação (Mestrado em Materiais e Processos de Fabricação) – Faculdade de Engenharia Mecânica, UFU, Uberlândia - MG, 2000.

WASZINK, J. H. *et al.* **Heat generation and heat flow in the filler mel in GMA welding.** Welding Journal, Miami, v. 61, n.8, p.269-280, aug.1982.

WASZINK, J. H.; Graat, J.H.L. **Experimental investigation of the forces acting on a drop of weld metal.** Welding Journal, v. 62, n.4, p.109s-116s, 1983.

WICK, B.; FUREY, M.J.; KAJDAS,C. **An examination of thermionic emission due to frictionally generated temperatures.** Tribology Letters, v.13, n.2, p.147-153, aug. 2002.

WIKTOROWICZ, R; CROUCH, J. **Shielding gas developments for TIG welding of duplex and super duplex stainless steels.** Welding e Metal Fabrication, Cambridge, v.62, n.9, p.379-382, oct.1994.

ANEXO A

ANEXO A

PROGRAMA SINAL

Programa Sinal

O programa Sinal foi desenvolvido no Laboratório de Soldagem e Ensaio Não Destrutivos pelo Prof. Paulo J. Modenesi. Este programa foi projetado para analisar e tratar dados obtidos por sistemas digitais de aquisição de dados, particularmente em testes de soldagem.

A presente versão do programa foi desenvolvida através de um projeto de pesquisa financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

Instalação

Para instalar o programa, basta criar um novo diretório através do Windows Explorer (por exemplo: ...**SinalWin**) e copiar (e, se for o caso, descomprimir) os arquivos **sinal.exe**, **cp3240mp.dll** e **borlndmm.dll** para este diretório. Pode-se, também, criar um outro diretório (por exemplo:**SinalWin\Sinais** ou **MeusDocumentos\MeusSinais**) para se armazenar os arquivos de sinais (*.sin). Sugere-se, também, criar um atalho para o programa na área de trabalho do Windows. Para iniciar o programa, clicar duas vezes no seu ícone.

Menu

O menu do programa Sinal apresenta as seguintes opções:

Arquivo:

- Abrir
- Importar
- Fechar
- Salvar
- Salvar como
- Salvar gráfico
- Imprimir
- Sair

Editar:

- Informações
- Canal
- Preferências

Processo:

- Estatística
- Filtrar canal
- Espectro

Operação
 Gráfico:
 Y-t
 Y-X
 Histograma
 Janela
 Ajuda

Abrir:**(Arquivo → Abrir)**

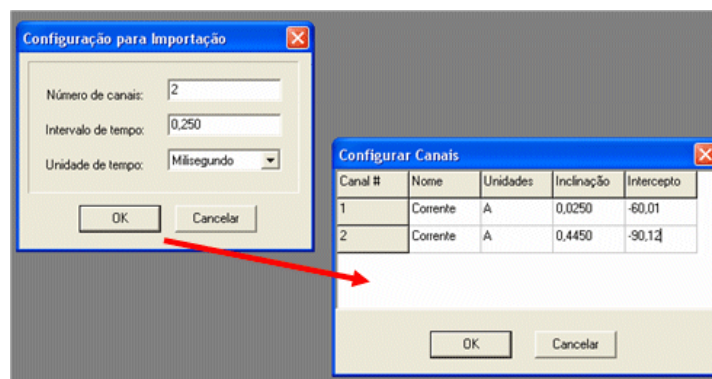
Permite abrir e trabalhar com os arquivos no formato *.sin (sinais). Se o processo for bem sucedido, uma janela com informações gerais sobre o sinal aparecerá no canto superior esquerdo da área de trabalho do programa. Algumas destas informações poderão ser modificadas através da opção **Editar → Informações**.

Importar:

Permite abrir arquivos de outros formatos e criar sinais a partir destes.

Importar → Configurar:

Permite configurar programa para importar um dado arquivo de dados. As seguintes informações são solicitadas: Número de canais do sinal, tempo entre medidas, unidade de tempo e, para cada canal, o seu nome e as suas unidades e, se for o caso, fatores de conversão dos dados. Assume-se, assim, uma relação linear entre os dados de interesse e os dados importados (isto é, o programa solicita a inclinação e o intercepto desta relação).

**Importar → Arquivo Texto:**

Arquivos de texto (formato ASCII) podem ser lidos com os canais dispostos em colunas separadas por espaços em branco ou tabulações e sem títulos. Os arquivos devem terminar exatamente na última linha de dados, isto é, linhas adicionais, mesmo vazias, devem ser evitadas. Se os dados já estiverem em seus valores reais, os fatores de calibração serão 1,0 e 0,0.

Importar → Outros formatos:

O programa sinal permite a leitura de arquivos binários de dados gerados por algumas placas AD. Atualmente, estão implantadas rotinas para a leitura de arquivos gerados por placas da STD (Sistemas Técnicos Digitais), STW (Strawberry, Inc),

PCL818H (Advantech) e Sisdata DAD (IMC). Em particular, para o formato DAD, os seguintes fatores de calibração tem sido usados:

Corrente: 0.131089 e -537.6997 ; Tensão: 0.013765 e -53.1825

Fechar:

Permite fechar o sinal em uso.

Salvar/Salvar Como:

Salvar dados em um arquivo de sinal (.sin). Isto é importante para salvar, por exemplo, os dados recém-importados de um arquivo de outro formato qualquer.

Salvar gráfico:

Permite salvar um gráfico Y-t, Y-X, histograma ou resultante do processamento de um sinal nos formatos BITMAP, WMF ou texto (para ser exportado para outro programa).

Imprimir:

Ainda não implementado.

Sair:

Termina a execução do programa.

Editar:

Informações:

Permite alterar as informações e dados de configuração de um sinal que estão mostrados na sua janela inicial de informações. Se as alterações forem salvas pelo usuário, o sinal fica alterado na memória do programa. Estas alterações poderão ser salvas permanentemente no sinal original ou em um novo sinal através dos comandos **Salvar** ou **Salvar como** do menu Arquivo.

Preferências:

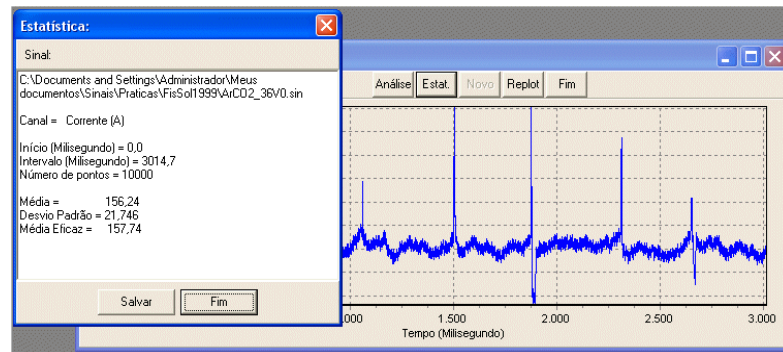
Permite definir dimensões dos gráficos mostrados pelo programa. Ajustar de acordo com a resolução da tela do computador.



Estatística:

(Processo → Estatística)

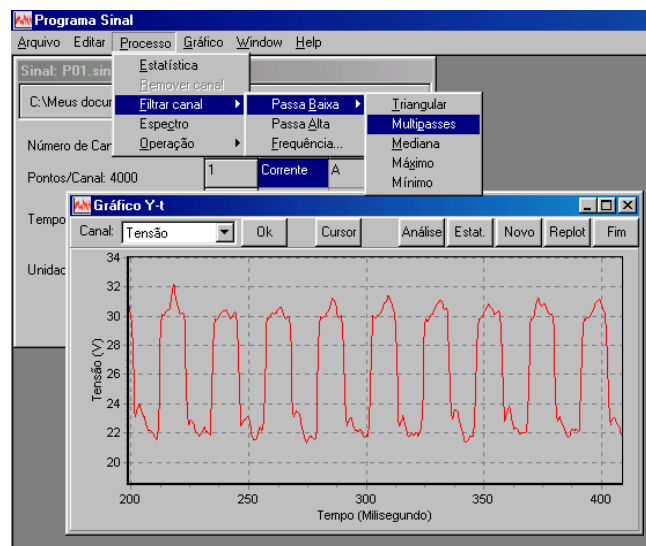
Calcula a média, o desvio padrão e a média eficaz da parte do canal, ou do resultado de algum processamento de um ou mais canais, que é mostrada em um gráfico da janela ativa. Este mesmo resultado pode ser obtido através do botão "**Estatística**" da barra de ferramentas da janela ativa.



Filtrar canal:

(Processo → Filtrar)

Permite processar o canal da janela ativa com diferentes rotinas de filtragem. Após a filtragem, o canal alterado muda de cor (de azul para vermelho) e pode ser salvo como um novo canal no sinal através do botão "Novo canal" da barra de ferramentas da janela do gráfico. Existem duas opções de filtragem: **Passa baixa** e **passa alta**.



Filtro passa baixa:

(Processo → Filtrar → Passa Baixa)

Engloba um número de opções para remover componentes de alta frequência do canal sendo analisado:

Triangular:

Substitui cada ponto do canal por uma média ponderada deste ponto com seus $2(N_f)$ vizinhos mais próximos. O valor de N_f (entre 0 e 100) é escolhido pelo usuário. Os coeficientes de cada ponto na média são calculados de forma que estes diminuem de forma linear com a distância (i) do vizinho do ponto central segundo a equação:

$$\text{Coeficiente}(i) = (1 + N_f - i) / ((1 + N_f) * (1 + N_f))$$

Multipasses:

Rotina baseada na anterior, isto é, um filtro triangular com 1 vizinho de cada lado do ponto sendo filtrado é aplicado N_f vezes ao sinal. Este filtro apresenta um corte mais

suave dos componentes de maior frequência do canal, mas apresenta menores repiques da intensidade de corte destes componentes.

Média:

Rotina similar às anteriores em que cada ponto do sinal é substituído pela média simples deste e de $2(Nf)$ de seus vizinhos.

Mediana:

Substitui cada ponto por aquele ponto que é a mediana do conjunto de valores formado por este ponto e seus $2(Nf)$ vizinhos mais próximos.

Máximo:

Substitui cada ponto por aquele ponto que é o de maior valor do conjunto de valores formado por este ponto e seus $2(Nf)$ vizinhos mais próximos.

Mínimo:

Substitui cada ponto por aquele ponto que é o de menor valor do conjunto de valores formado por este ponto e seus $2(Nf)$ vizinhos mais próximos.

Filtro passa alta:

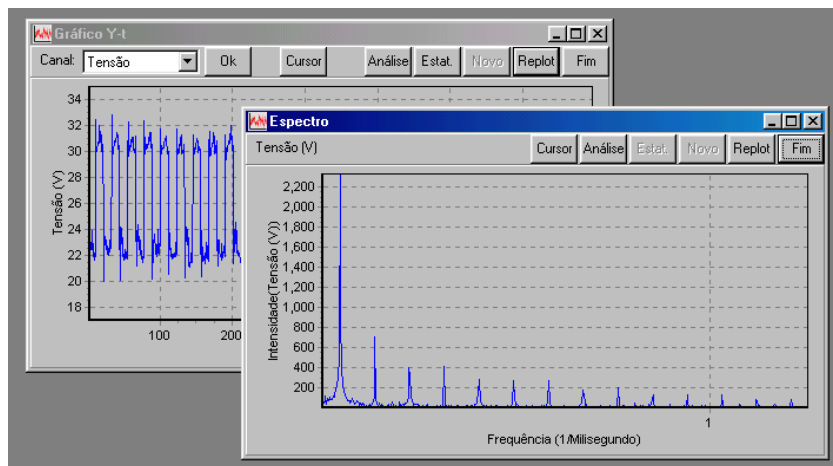
(Processo → Filtrar → Passa Alta)

Remove componentes de baixa frequência do sinal. Para fazer isto, esta rotina subtrai do canal original o mesmo filtrado com a rotina triangular, previamente subtraído de seu valor médio.

Espectro:

(Processo → Espectro)

Gera um gráfico de intensidade das componentes do sinal em função da frequência (espectro). A área mostrada pelo gráfico pode ser alterada desenhando-se um retângulo com o mouse enquanto o botão esquerdo deste é mantido apertado. Esta área pode ser movida mantendo-se o botão direito do mouse apertado.



O gráfico tem uma barra de ferramentas com as **opções:**

Canal: Seleciona o canal para gerar o espectro.

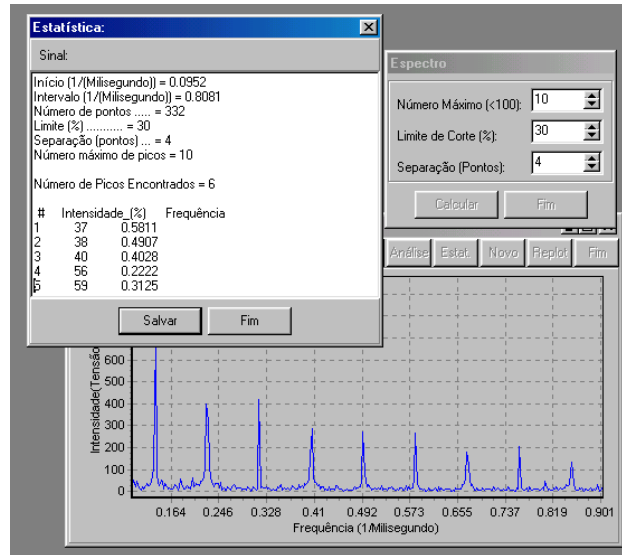
Ok: Calcula o espectro.

Cursor: Permite obter valores de pontos no gráfico com o cursor.

Análise: Permite encontrar a intensidade relativa e a frequência de picos na parte do espectro que está sendo mostrada no gráfico. Este opção é controlada por uma caixa de diálogo que possui as opções: **Número máximo** de picos que serão considerados (máximo = 100), **limite de corte**, em

porcentagem do maior pico (pico de intensidade menor serão desconsiderados) e **separação** (distância mínima, em números de pontos, para que dois picos sejam considerados como picos distintos).

Replot: Restaura os limites iniciais do gráfico.



Operação:

Permite a realização de diferentes operações (soma, subtração,) entre canais de um sinal. As operações possíveis são:

Soma:

(Processo → Operação → Soma)

Calcula e mostra o gráfico da soma de dois canais. A área mostrada pelo gráfico pode ser alterada desenhando-se um retângulo com o mouse enquanto o botão esquerdo deste é mantido apertado. Esta área pode ser movida mantendo-se o botão direito do mouse apertado. O gráfico tem uma barra de ferramentas com as opções:

Canal1 e Canal2: Seleciona canais que serão somados.

Ok: Calcula a soma dos canais e mostra no gráfico.

Cursor: Permite obter valores de pontos no gráfico com o cursor e calcular dados estatísticos dos valores dos pontos entre dois limites estabelecidos pelo usuário.

Estatística: Calcula parâmetros estatísticos dos dados mostrados no gráfico.

Novo: Insere os dados (soma) como um novo canal do sinal. Na versão atual do programa, as informações do novo canal não atualizadas automaticamente nas janelas de gráficos já abertas (as janelas devem ser fechadas e abertas novamente), mas apenas na janela de informações do sinal. Estas informações podem ser alteradas através do menu **Editar** → **Informações**. *Replot*: Restaura limites iniciais do gráfico.

Subtração:

(Processo → Operação → Subtração)

Calcula e mostra o gráfico da diferença de um canal por outro. A área mostrada pelo gráfico pode ser alterada desenhando-se um retângulo com o mouse enquanto o botão esquerdo deste é mantido apertado. Esta área pode ser movida mantendo-se o botão

direito do mouse apertado. O gráfico tem uma barra de ferramentas com as opções:

Canal1 e *Canal2*: Selecciona canais que serão subtraídos.

Ok: Calcula a diferença dos canais e mostra no gráfico.

Cursor: Permite obter valores de pontos no gráfico com o cursor e calcular dados estatísticos dos valores dos pontos entre dois limites estabelecidos pelo usuário.

Estatística: Calcula parâmetros estatísticos dos dados mostrados no gráfico.

Novo: Insere os dados (subtração) como um novo canal do sinal. Na versão atual do programa, as informações do novo canal não atualizadas automaticamente nas janelas de gráficos já abertas (as janelas devem ser fechadas e abertas novamente), mas apenas na janela de informações do sinal. Estas informações podem ser alteradas através do menu **Editar** → **Informações**.

Replot: Restaura limites iniciais do gráfico.

Multiplicação:

(Processo → Operação → Multiplicação)

Calcula e mostra o gráfico da multiplicação de dois canais. A área mostrada pelo gráfico pode ser alterada desenhando-se um retângulo com o mouse enquanto o botão esquerdo deste é mantido apertado. Esta área pode ser movida mantendo-se o botão direito do mouse apertado. O gráfico tem uma barra de ferramentas com as opções:

Canal1 e *Canal2*: Selecciona canais que serão multiplicados.

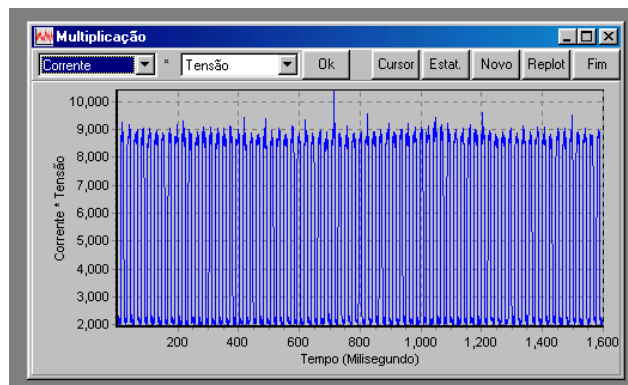
Ok: Calcula a multiplicação dos canais e mostra no gráfico.

Cursor: Permite obter valores de pontos no gráfico com o cursor e calcular dados estatísticos dos valores dos pontos entre dois limites estabelecidos pelo usuário.

Estatística: Calcula parâmetros estatísticos dos dados mostrados no gráfico.

Novo: Insere os dados (multiplicação) como um novo canal do sinal. Na versão atual do programa, as informações do novo canal não atualizadas automaticamente nas janelas de gráficos já abertas (as janelas devem ser fechadas e abertas novamente), mas apenas na janela de informações do sinal. Estas informações podem ser alteradas através do menu **Editar** → **Informações**.

Replot: Restaura limites iniciais do gráfico.



Divisão:**(Processo → Operação → Divisão)**

Calcula e mostra o gráfico da divisão de um canal por outro. No caso de divisão de um valor por zero, o programa considera o resultado como igual a zero e informa ao usuário. O gráfico tem uma barra de ferramentas com as opções:

Canal1 e *Canal2*: Seleciona canais que serão divididos.

Ok: Calcula a divisão entre os canais e mostra no gráfico.

Cursor: Permite obter valores de pontos no gráfico com o cursor e calcular dados estatísticos dos valores dos pontos entre dois limites estabelecidos pelo usuário.

Estatística: Calcula parâmetros estatísticos dos dados mostrados no gráfico.

Novo: Insere os dados (divisão) como um novo canal do sinal. Na versão atual do programa, as informações do novo canal não atualizadas automaticamente nas janelas de gráficos já abertas (as janelas devem ser fechadas e abertas novamente), mas apenas na janela de informações do sinal. Estas informações podem se alteradas através do menu **Editar → Informações**. *Replot*: Restaura limites iniciais do gráfico.

Distância:**(Processo → Operação → Distância)**

Calcula e mostra o gráfico da distância entre os pontos ($d = (P1^2 + P2^2)^{1/2}$) de dois canais. A área mostrada pelo gráfico pode ser alterada desenhando-se um retângulo com o mouse enquanto o botão esquerdo deste é mantido apertado. Esta área pode ser movida mantendo-se o botão direito do mouse apertado. O gráfico tem uma barra de ferramentas com as opções:

Canal1 e *Canal2*: Seleciona canais que serão usados para o cálculo.

Ok: Calcula a distância entre os pontos dos canais e mostra no gráfico.

Cursor: Permite obter valores de pontos no gráfico com o cursor e calcular dados estatísticos dos valores dos pontos entre dois limites estabelecidos pelo usuário.

Estatística: Calcula parâmetros estatísticos dos dados mostrados no gráfico.

Novo: Insere os dados (distância) como um novo canal do sinal. Na versão atual do programa, as informações do novo canal não atualizadas automaticamente nas janelas de gráficos já abertas (as janelas devem ser fechadas e abertas novamente), mas apenas na janela de informações do sinal. Estas informações podem se alteradas através do menu **Editar → Informações**.

Replot: Restaura limites iniciais do gráfico.

Retificação:**(Processo → Operação → Retificação)**

Retifica um canal (isto é, calcula o valor absoluto de seus pontos) e mostra o gráfico do resultado da operação. A área mostrada pelo gráfico pode ser alterada desenhando-se um retângulo com o mouse enquanto o botão esquerdo deste é mantido apertado. Esta área pode ser movida mantendo-se o botão direito do mouse apertado. O gráfico tem uma barra de ferramentas com as opções:

Canal: Seleciona o canal que será retificado.

Ok: Retifica o canal e mostra o resultado no gráfico.

Cursor: Permite obter valores de pontos no gráfico com o cursor e calcular dados estatísticos dos valores dos pontos entre dois limites estabelecidos pelo usuário.

Estatística: Calcula parâmetros estatísticos dos dados mostrados no gráfico.

Novo: Insere os dados (canal retificado) como um novo canal do sinal. Na versão atual do programa, as informações do novo canal não atualizadas automaticamente nas janelas de gráficos já abertas (as janelas devem ser fechadas e abertas novamente), mas apenas na janela de informações do sinal. Estas informações podem ser alteradas através do menu **Editar** → **Informações**.

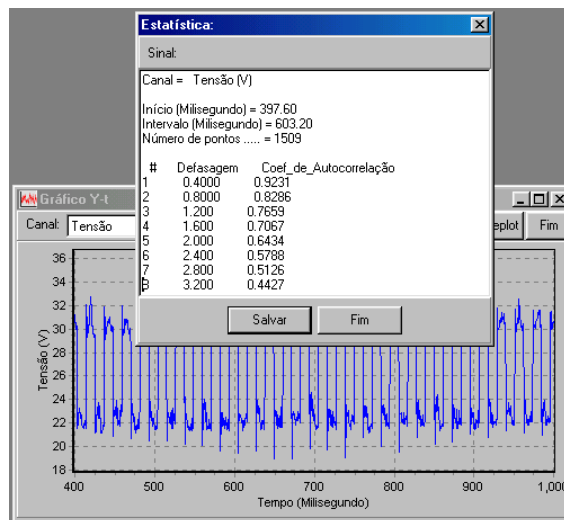
Análise: Calcula o número de picos e bases (ou de períodos curto circuito e de arco, por exemplo) nos dados mostrados no gráfico. A caixa de diálogo mostrada neste item apresenta duas opções: *Limite de corte:* Valor da variável (y - o sinal retificado) que é usado para separar as bases e picos. Este valor pode ser alterado “clicando-se” com o “mouse” no gráfico no nível desejado da variável. *Rejeição de base:* Define o número máximo de pontos de uma base para a sua rejeição (por exemplo, se o valor 2 for escolhido, somente bases com 3 ou mais pontos serão consideradas nos cálculos).

Replot: Restaura limites iniciais do gráfico.

Autocorrelação:

(Processo → Operação → Autocorrelação)

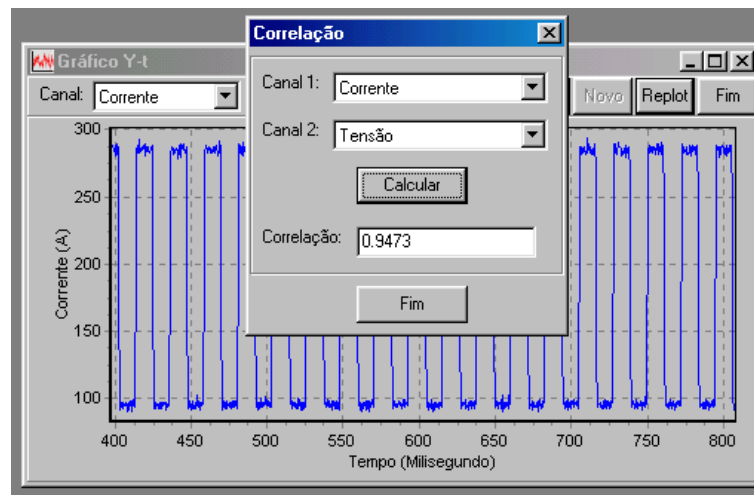
Calcula valores dos coeficientes de autocorrelação em um canal (ou no resultado de operação entre canais) para diferentes valores de defasagem.



Correlação:

(Processo → Operação → Correlação)

Calcula os coeficiente de correlação entre dois canais, podendo-se impor um atraso (defasagem) entre os canais. Esta função não atua em canais processados.



Derivação:

(Processo → Operação → Derivação)

Calcula a derivada de um canal ou do resultado de uma operação entre canais e a mostra em um gráfico. Esta operação é baseada no cálculo do coeficiente angular de uma reta que passa pelo ponto considerado e por 2Nf de seus vizinhos mais próximos. O valor de Nf pode ser escolhido pelo usuário. Quanto maior for este valor, menor será o nível de ruídos da derivada obtida, mas, também, menor será a sensibilidade desta para mudanças no canal original. O gráfico tem uma barra de ferramentas com as opções:

Canal: Seleciona o canal que será usado para o cálculo.

Ok: Calcula a derivada e mostra no gráfico.

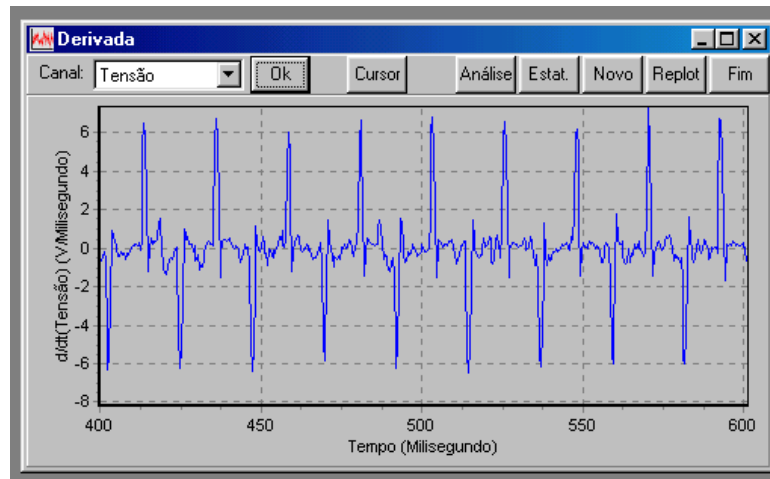
Cursor: Permite obter valores de pontos no gráfico com o cursor e calcular dados estatísticos dos valores dos pontos entre dois limites estabelecidos pelo usuário.

Estatística: Calcula parâmetros estatísticos dos dados mostrados no gráfico.

Novo: Insere os dados (derivada) como um novo canal do sinal. Na versão atual do programa, as informações do novo canal não atualizadas automaticamente nas janelas de gráficos já abertas (as janelas devem ser fechadas e abertas novamente), mas apenas na janela de informações do sinal. Estas informações podem se alteradas através do menu **Editar → Informações**.

Análise: Calcula o número de picos e bases (ou de períodos curto circuito e de arco, por exemplo) nos dados mostrados no gráfico. A caixa de diálogo mostrada neste item apresenta duas opções: *Limite de corte:* Valor da variável (y - o sinal retificado) que é usado para separar as bases e picos. Este valor pode ser alterado "clizando-se" com o "mouse" no gráfico no nível desejado da variável. *Rejeição de base:* Define o número máximo de pontos de uma base para a sua rejeição (por exemplo, se o valor 2 for escolhido, somente bases com 3 ou mais pontos serão consideradas nos cálculos).

Replot: Restaura limites iniciais do gráfico.



Integração:

(Processo → Operação → Integração)

Calcula a integral de um canal desde o seu início e mostra o resultado em um gráfico. A área mostrada pelo gráfico pode ser alterada desenhando-se um retângulo com o mouse enquanto o botão esquerdo deste é mantido apertado. Esta área pode ser movida mantendo-se o botão direito do mouse apertado. Este cálculo é baseado na aplicação da regra de Simpson. O gráfico tem uma barra de ferramentas com as opções:

Canal: Seleciona o canal que será usado para o cálculo.

Ok: Calcula a integral desde o início até o final do canal e mostra o resultado no gráfico.

Cursor: Permite obter valores de pontos no gráfico com o cursor e calcular dados estatísticos dos valores dos pontos entre dois limites estabelecidos pelo usuário.

Estatística: Calcula parâmetros estatísticos dos dados mostrados no gráfico.

Novo: Insere os dados (integral) como um novo canal do sinal. Na versão atual do programa, as informações do novo canal não atualizadas automaticamente nas janelas de gráficos já abertas (as janelas devem ser fechadas e abertas novamente), mas apenas na janela de informações do sinal. Estas informações podem ser alteradas através do menu **Editar → Informações**.

Análise: Calcula o número de picos e bases (ou de períodos curto circuito e de arco, por exemplo) nos dados mostrados no gráfico. A caixa de diálogo mostrada neste item apresenta duas opções: *Limite de corte:* Valor da variável (y - o sinal integrado) que é usado para separar as bases e picos. Este valor pode ser alterado “clitando-se” com o “mouse” no gráfico no nível desejado da variável. *Rejeição de base:* Define o número máximo de pontos de uma base para a sua rejeição (por exemplo, se o valor 2 for escolhido, somente bases com 3 ou mais pontos serão consideradas nos cálculos).

Replot: Restaura limites iniciais do gráfico.

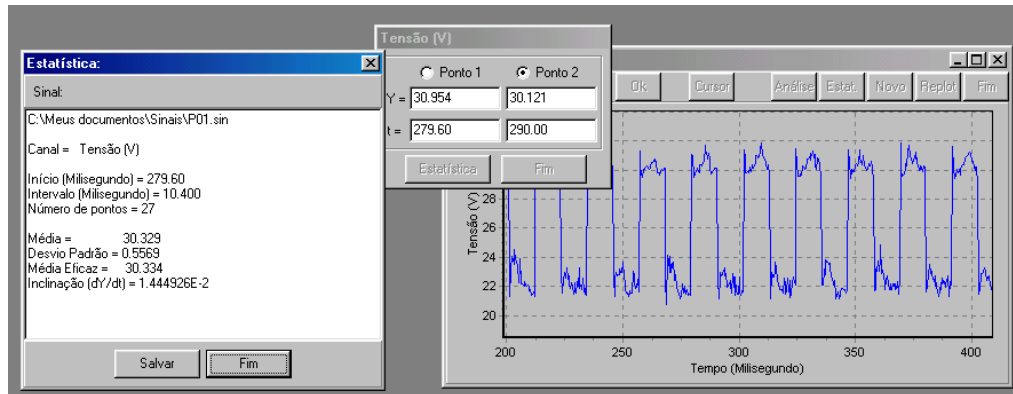
Gráfico Y-t:

(Gráfico → Y-t)

Mostra um gráfico Canal x Tempo. A área mostrada pelo gráfico pode ser alterada desenhando-se um retângulo com o mouse enquanto o botão esquerdo deste é mantido apertado. Esta área pode ser movida movendo-se o mouse e mantendo-se o seu botão direito apertado. O gráfico tem uma barra de ferramentas com as opções:

Canal: Seleciona o canal que será mostrado.

Ok: Mostra o gráfico.



Cursor: Permite obter valores de pontos no gráfico com o cursor e calcular dados estatísticos dos valores dos pontos entre dois limites estabelecidos pelo usuário.

Estatística: Calcula parâmetros estatísticos dos dados mostrados no gráfico.

Novo: Insere os dados eventualmente alterados (por um filtro, por exemplo) como um novo canal do sinal. Na versão atual do programa, as informações do novo canal não atualizadas automaticamente nas janelas de gráficos já abertas (as janelas devem ser fechadas e abertas novamente), mas apenas na janela de informações do sinal. Estas informações podem ser alteradas através do menu **Editar → Informações**.

Análise: Calcula o número de picos e bases (ou de períodos curto circuito e de arco, por exemplo) nos dados mostrados no gráfico. A caixa de diálogo mostrada neste item apresenta duas opções: *Limite de corte:* Valor da variável (y) que é usado para separar as bases e picos. Este valor pode ser alterado "clicando-se" com o "mouse" no gráfico no nível desejado da variável. *Rejeição de base:* Define o número máximo de pontos de uma base para a sua rejeição (por exemplo, se o valor 2 for escolhido, somente bases com 3 ou mais pontos serão consideradas nos cálculos).

Replot: Restaura limites iniciais do gráfico.

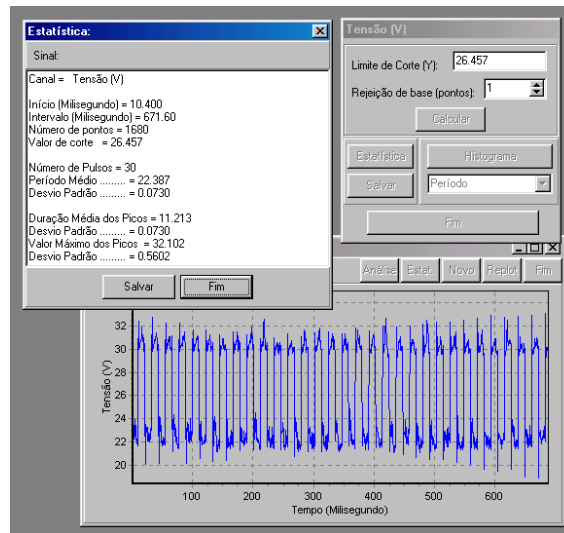


Gráfico Y-X:

(Gráfico → Y-X)

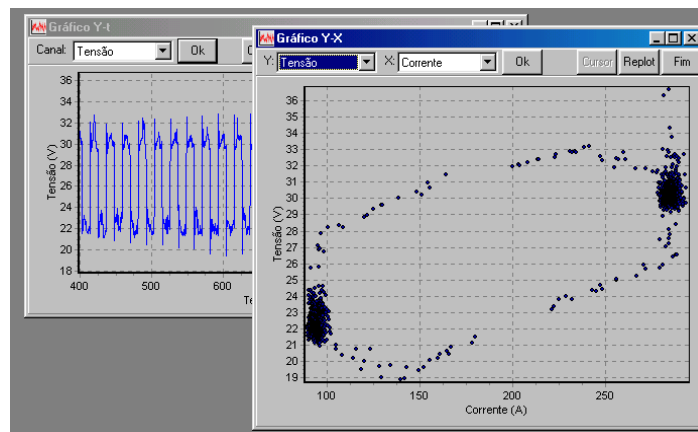
Mostra gráfico de um canal (Y) em função de outro (X). A área mostrada pelo gráfico pode ser alterada desenhando-se um retângulo com o mouse enquanto o botão esquerdo deste é mantido apertado. Esta área pode ser movida mantendo-se o botão direito do mouse apertado. O gráfico tem uma barra de ferramentas com as opções:

Y e X: Seleciona canais que serão usados no gráfico.

Ok: Mostra o gráfico.

Cursor: Permite obter valores de pontos no gráfico.

Replot: Restaura limites iniciais do gráfico.



Histograma:

(Gráfico → Histograma)

Calcula e mostra histograma dos dados mostrados no gráfico ativo. A área mostrada pelo gráfico pode ser alterada desenhando-se um retângulo com o mouse enquanto o botão esquerdo deste é mantido apertado. Esta área pode ser movida mantendo-se o botão direito do mouse apertado. O gráfico tem uma barra de ferramentas com as opções:

- Cursor*: Mostra os valores de pontos no gráfico apontados com o cursor.
- 2X*: Recalcula e mostra o histograma com um número duas vezes maior de divisões.
- /2*: Recalcula e mostra o histograma com um número duas vezes menor de divisões.
- Replot*: Restaura limites iniciais do gráfico.

