

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Dissertação de Mestrado

Estudo do efeito de fluxos em aspectos operacionais da soldagem MIG/MAG

Autor: José Roberto Ferreira Neto
Orientador: Prof. Paulo J. Modenesi

Março/2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

José Roberto Ferreira Neto

ESTUDO DO EFEITO DE FLUXOS EM ASPECTOS OPERACIONAIS DA
SOLDAGEM MIG/MAG

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Metalúrgica, Materiais e de Minas da
Universidade Federal de Minas Gerais

Área de concentração: Metalurgia de
Transformação

Orientador: Prof. Paulo J. Modenesi

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2017

F383e	<p>Ferreira Neto, José Roberto. Estudo do efeito de fluxos em aspectos operacionais da soldagem MIG/MAG [manuscrito / José Roberto ferreira Neto. - 2017. iv,100 f., enc.: il.</p> <p>Orientador: Paulo José Modenesi .</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia</p> <p>Anexos: f. 99-100.</p> <p>Bibliografia: f.92-98.</p> <p>1. Engenharia metalúrgica - Teses. 2. Soldagem - Teses. 3. Metalurgia de transformação - Teses. 4. Óxidos - Teses. I. Modenesi, Paulo José. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 669(043)</p>
-------	---

Dedico essa dissertação a minha família.

AGRADECIMENTOS

Uma frase muito interessante que expõe a evolução e interligação do saber científico é atribuída a Issac Newton, sendo ela: “Se vi mais longe, foi por estar sobre os ombros de gigantes”. Assim gostaria de agradecer pelo suporte:

Aos meus pais Elizabete e José Roberto, agradeço pela minha formação como pessoa, suporte e constante incentivo a estudar, aos meus irmãos Danilo, Félix e Maria de Lourdes pela companhia e a minha esposa, Isabela, pelo constante apoio e motivação.

Ao professor Ph.D. Paulo José Modenesi agradeço pela oportunidade de ser meu orientador e pelos seus ensinamentos, cujos muitos saberes transmitidos não se limitaram ao campo da pesquisa e se tornaram exemplos de comportamento profissional e de educação a serem seguidos.

Ao técnico de laboratório Eustáquio Roberto Apolinário pelo treinamento inicial para a execução dos testes de soldagem e ao aluno Pedro Bahia Lopes, graduando do curso de Engenharia Metalúrgica e Materiais da UFMG, pela colaboração e disposição na realização dos testes de soldagem e macrografia.

A professora Dra. Maria Celeste M. S. Costa e ao professor Dr. Paulo Villani Marques, membros da banca de qualificação e defesa de mestrado, pelos conselhos, sugestões e interesse em contribuir para o desenvolvimento deste projeto.

Ao professor Dr. Volodymyr Ponomarev pelas suas contribuições, ao professor Dr. Alexandre Q. Bracarense e ao prof. Dr. Giovane Azevedo pelas sugestões no laboratório.

Aos colegas de laboratório pelo apoio e momentos de descontração nas atividades que desenvolvi, em especial aos amigos Guilherme Simões Pandolfi e prof. Frank de Mello Liberato.

A CAPES-PROEX pelo suporte financeiro para a realização desta dissertação.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG pela oportunidade de obter o título de mestre e a todos que contribuíram de alguma forma para a conclusão deste trabalho.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	V
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE NOTAÇÕES	XIII
RESUMO	XVI
ABSTRACT.....	XVII
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Processo GMAW ou MIG/MAG	4
3.1.1 Introdução.....	4
3.1.2 O arco de soldagem	5
3.1.3 Transferência metálica	8
3.1.4 Variáveis na Soldagem GMAW	11
3.1.5 Metalurgia da Soldagem.....	19
3.2 Processo A-MIG/MAG	21
3.2.1 Considerações históricas relativas à soldagem com aplicação de fluxos ativos.....	21
3.2.2 Descrição do processo A-MIG/MAG.....	26
3.2.3 Efeitos do fluxo ativo.....	27
4 METODOLOGIA	34
4.1 Introdução	34
4.2 Programa Experimental.....	34
4.3 Materiais e Métodos	35
4.3.1 Materiais	35
4.3.2 Equipamentos e montagens.....	36
4.4 Preparação dos corpos de prova e do fluxo.....	39
4.5 Procedimento de Soldagem.....	41
4.6 Testes Iniciais	43

4.7	Testes Complementares	44
4.8	Aquisição de dados e análise de resultados.....	44
4.8.1	Sinais elétricos	45
4.8.2	Aspectos geométricos do cordão de solda	48
4.8.3	Avaliação estatística de dados	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5.1	Método de preparo dos corpos de prova e aplicação de fluxos.....	53
5.2	Testes iniciais	53
5.2.1	Soldagem dos corpos de prova	53
5.2.2	Efeito de fluxos simples em sinais elétricos de soldagem.....	54
5.2.3	Efeito dos fluxos na geometria dos cordões de solda	63
5.2.4	Considerações sobre os testes iniciais.....	66
5.3	Testes Complementares	69
5.3.1	Efeito dos fluxos em sinais elétricos com diferentes tensões de operação	69
5.3.2	Efeito dos fluxos com variação de tensão na geometria dos cordões de solda	78
5.3.3	Outros efeitos observados.....	82
5.3.4	Considerações sobre os testes complementares	84
6	CONCLUSÕES	88
7	RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS.....	90
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	91
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA	92
10	APÊNDICE	99
10.1	Macrografias obtidas nos testes iniciais	99
10.2	Macrografias obtidas nos testes complementares.....	100

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Esquema da distribuição de potencial elétrico em um arco e suas regiões (A) Zona de queda anódica (B) Coluna do arco e (C) Zona de queda catódica	7
Figura 3.2 Modos de transferência metálica no arco de soldagem	9
Figura 3.3 Diagrama da tensão de soldagem e as imagens da transferência metálica por um período de curto-circuito.....	11
Figura 3.4 Controle do comprimento do arco por uma fonte do tipo tensão constante e velocidade de alimentação de arame constante.	13
Figura 3.5 Desenho esquemático mostrando os parâmetros DBCP, extensão do arame e comprimento do arco.	15
Figura 3.6 – Representação esquemática da relação entre a distância entre o bico de contato e a peça e a corrente de soldagem	15
Figura 3.7 Esboço das diferenças de perfis típicos de cordões de solda produzidos com diversos gases de proteção ou mistura destes	17
Figura 3.8 Possíveis efeitos da inclinação da tocha na geometria do cordão de solda.	19
Figura 3.9 Esquema representativo das regiões de uma solda: Zona Fundida (ZF), Zona Termicamente Afetada (ZTA) e Metal de Base (MB).....	20
Figura 3.10 Macrografias de cortes transvesais de soldas obtidas pelo processo TIG, em a) não foram aplicados fluxos e em b) com aplicação de fluxos (A-TIG). Soldas obtidas as configurações: 187 A; 9,5 V(a) e 10V (b); 100 mm . min ⁻¹ ; energia do arco 1,07 kJ mm ⁻¹ (a) e 1,12 kJ mm ⁻¹ (b).....	22
Figura 3.11 Esquema representativo da soldagem pelo processo MIG/MAG de um corpo de prova em que foi depositado uma camada de fluxo ativo.....	27
Figura 3.12 Efeito de fluxos ativos na morfologia dos cordões de solda em aço carbono	29
Figura 3.13 Macrografias das juntas (a) sem aplicação do fluxo de SiO ₂ , (b) com aplicação do fluxo de SiO ₂	30
Figura 3.14 Variação da corrente de soldagem na soldagem MIG sem e com a aplicação de fluxos ativos.....	31

Figura 3.15 Comportamento da transferência metálica na soldagem MIG com e sem a aplicação de fluxos ativos.....	31
Figura 3.16 Efeito do fluxo ativo na penetração do cordão de solda.....	32
Figura 4.1 Fluxograma representativo da metodologia utilizada, em a) os blocos de testes e em b) alguns procedimentos padrões adotadas em cada bloco de teste.....	35
Figura 4.2. Materiais utilizados na preparação das máscaras adesivas e aplicação de fluxos sobre o corpo de prova.....	37
Figura 4.3 Representação esquemática da montagem experimental para as soldagens A-MIG/MAG.....	38
Figura 4.4 Representação esquemática das dimensões do corpo de prova.....	39
Figura 4.5 Esquema das dimensões utilizadas para a aplicação do fluxo no corpo de prova.....	41
Figura 4.6 Dimensões do corpo de prova em que se aplicou óxido de cromo III na região à direita do corpo de prova.....	41
Figura 4.7 Esboço dos períodos de tempo analisados com o programa SINAL em relação as dimensões do corpo de prova, em detalhe um oscilograma de tensão.....	46
Figura 4.8 Dimensões dos cordões: L – largura, p – penetração, r – reforço.....	50
Figura 4.9 Função densidade de probabilidade de uma curva com distribuição normal, sendo M a média aritmética e s o desvio padrão.....	52
Figura 5.1 Cordão de solda obtido sob tensão de soldagem nominal de 24 volts, com a região sem a aplicação de fluxos, à esquerda, zona de transição e a região com aplicação de dióxido de silício (A-MIG/MAG), à direita.....	54
Figura 5.2 Oscilogramas de tensão e corrente de soldagem de um ensaio em que a primeira fração do corpo de prova era sem fluxo e a segunda metade com fluxo de fluoreto de cálcio.....	55
Figura 5.3 Detalhes do oscilograma de tensão com fluxo de fluoreto de cálcio (CaF ₂) mostrado na figura 5.2, em (a) MIG/MAG (sem fluxo) e (b) A-MIG/MAG (CaF ₂).....	55
Figura 5.4 Comparação do fator de curto-circuito na soldagem sem e com fluxo sob tensão nominal de 24V.....	59

Figura 5.5 Tensão de soldagem durante os períodos de arco na soldagem sem fluxo e com os diferentes fluxos estudados.	60
Figura 5.6 Comparação da corrente de soldagem durante os períodos de arco na soldagem sem fluxo e com os diferentes fluxos estudados.	61
Figura 5.7 Comparação entre a soma das tensões de queda anódica e catódica na soldagem sem fluxo e com os diferentes fluxos estudados.	62
Figura 5.8 Comparação entre os valores de resistividade do eletrodo estimados durante os períodos de curto-circuito na soldagem sem fluxo e com os diferentes fluxos estudados.....	63
Figura 5.9 Variação da largura em relação à média observada em A-MIG/MAG, em milímetros, para cada corpo de prova testado.....	64
Figura 5.10 Variação do reforço em relação à média observada em MIG, em milímetros, para cada corpo de prova testado.....	64
Figura 5.11 Macrografias das seções transversais de dois cordões de solda, sendo que em A) não foi aplicado fluxo (MIG/MAG), em B) usou-se dióxido de silício (A-MIG/MAG). Ataque: Nital 10%.....	65
Figura 5.12 Oscilogramas de tensão e corrente de soldagem no experimento em que se aplicou fluoreto de cálcio (CaF_2) sob tensão nominal de soldagem de 20V.	70
Figura 5.13. Oscilogramas de tensão e corrente de soldagem no experimento em que se aplicou fluoreto de cálcio (CaF_2) sob tensão nominal de soldagem de 32V.....	71
Figura 5.14 Oscilogramas de tensão e corrente de soldagem no experimento em que se aplicou dióxido de silício (SiO_2) sob tensão nominal de soldagem de 20V.....	72
Figura 5.15 Oscilogramas de tensão e corrente de soldagem no experimento em que se aplicou dióxido de silício (SiO_2) sob tensão nominal de soldagem de 32V.....	73
Figura 5.16 Gráfico da variação da corrente de soldagem, em relação a soldagem MIG/MAG sem aplicação de fluxos, pela tensão média observada.	74
Figura 5.17 Comportamento do fator de curto-circuito observado, em percentual, na soldagem sem ou com fluxos (SiO_2 ou CaF_2) em relação a tensão média.	75
Figura 5.18 Gráfico dos valores de tensão no arco em relação a tensão média observada, na soldagem MIG/MAG sem aplicação de fluxo ou com deposição de SiO_2 ou CaF_2	75

Figura 5.19 Gráfico dos valores da soma das quedas de tensão anódica e catódica (U_{ac}) e a tensão média observada nos testes de soldagem MIG/MAG sem e com aplicação de fluxos (SiO_2 ou CaF_2).	76
Figura 5.20 Foto superficial do cordão de solda obtido de um corpo de prova em que se depositou SiO_2 na parte da direita, sob tensão nominal de 20 volts.....	78
Figura 5.21 Macrografias das seções transversais de alguns cordões de solda obtidas sob tensão nominal de 20V, sem a) sem fluxo, b) SiO_2 , c) CaF_2	79
Figura 5.22 Variação da largura do cordão de solda com a tensão nominal de soldagem (20, 24, 28 e 32 V) com ou sem fluxos (SiO_2 e CaF_2).....	79
Figura 5.23 Variação do reforço do cordão de solda com a tensão nominal de soldagem (20, 24, 28 e 32 V) com ou sem fluxos (SiO_2 e CaF_2).....	80
Figura 5.24 Gráfico da penetração do cordão de solda (mm) observada em macrografia para a soldagem com e sem fluxos (SiO_2 e CaF_2) sob variação de tensão nominal(V).....	81
Figura 5.25 Fotografias da superfície da extremidade final de cordões de solda obtidos via A-MIG/MAG sob tensão nominal de 20V em que foi aplicado em a) CaF_2 e b) SiO_2 , com indicativo para as escórias formadas, fluxos e cordão de solda.	83
Figura 10.1 Macrografias das seções transversais de alguns cordões de solda obtidos sob tensão nominal de 24 volts, sendo que em A) não foi aplicado fluxo, em B) foi aplicado carbonato de cálcio, em C) fluoreto de cálcio, em D) óxido de cromo III, em E) dióxido de silício e em F) óxido de ferro III. Ataque: Nital 10%.	99
Figura 10.2 Macrografias das seções transversais de alguns cordões de solda, sendo em A) Fração sem fluxo (20 V), B) SiO_2 (20 V), C) CaF_2 (20 V), D) Fração sem fluxo (24 V), E) SiO_2 (24 V), F) CaF_2 (24 V), G) Fração sem fluxo (28 V), H) SiO_2 (28 V), I) CaF_2 (28 V), J) Fração sem fluxo (32 V), K) SiO_2 (32 V) e L) CaF_2 (32 V). Ataque: Nital 10%.	100

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1. Modos comuns de transferência no arco de soldagem.....	9
Tabela IV.1 Teor percentual em massa de alguns elementos químicos do eletrodo consumível utilizado nos experimentos.....	36
Tabela IV.2. Parâmetros de soldagem GMAW com aplicação de fluxos para os testes exploratórios de soldagem.	42
Tabela IV.3 Condições experimentais dos testes exploratórios de soldagem.	43
Tabela IV.4. Ensaios para avaliação do efeito do nível de tensão no processo da variação da tensão de soldagem nos fluxos selecionados para ensaios complementares..	44
Tabela V.1 Valores médios e desvio padrão de alguns parâmetros elétricos de soldagem agrupados em regiões de soldagem sem (MIG) e com fluxo (A-MIG/MAG).....	57
Tabela V.2 Parâmetros geométricos médios e os respectivos desvios padrão medidos em seções transversais dos cordões de solda com ou sem aplicação de fluxos	66
Tabela V.3 Tendências das variações associadas à aplicação de SiO ₂ ou CaF ₂ em relação a soldagem sem fluxo nos parâmetros elétricos: tensão e corrente de soldagem, fator de curto-circuito, tensão e corrente durante a operação em arco e da soma das quedas anódica e catódica do arco.....	77
Tabela V.4 Tendências das variações associadas a aplicação de SiO ₂ ou CaF ₂ em relação a soldagem sem fluxo nos parâmetros geométricos do cordão: reforço, largura e penetração.....	82

LISTA DE NOTAÇÕES

A	Unidade de corrente elétrica que representa ampere (ou <i>ampère</i>) ou, dependendo do contexto, a letra A pode representar a área de uma região.
A-GMAW	<i>Active [Flux]Gas Metal Arc Welding</i> , GMAW com aplicação de fluxo ativo.
Al	Alumínio.
A-MIG/MAG	Refere-se a soldagem MIG/MAG com aplicação de fluxo ativo.
A-TIG	<i>Active [flux] Tungsten Inert Gas</i> : TIG com aplicação de fluxo ativo.
CMT	<i>Cold Metal Transfer</i> , de tradução livre como transferência com metal frio, sendo uma tecnologia da empresa Fronius
CaCl ₂	Cloreto de cálcio.
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
Cr ₂ O ₃	Óxido de cromo (III)
CTWD	<i>Contact tip to work distance</i> , que pode equivaler a distância entre o bico de contato à peça de trabalho.
DPR	Desvio Padrão Relativo
ESO	<i>Electrical stickout</i> , que pode equivaler à extensão do eletrodo após bico de contato ao arco elétrico.
F _{cc}	Fator de curto-circuito
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro (III)
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i> , que se refere ao processo de soldagem a arco com proteção gasosa e eletrodo metálico consumível.
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i> , que se refere ao processo de soldagem a arco com proteção gasosa e eletrodo metálico de tungstênio (não consumível).
i_{cc}	Corrente de curto-circuito.
KCl	Cloreto de potássio.
KClO ₄	Perclorato de potássio

MB	Metal de Base
MIG/MAG	<i>Metal Inert Gas/Metal Active Gas</i> , de tradução livre como processo de soldagem que utiliza eletrodo metálico e gás inerte ou gás ativo.
MgCO ₃	Carbonato de magnésio
MgO	Óxido de magnésio
Mn	Elemento químico manganês, ou manganês metálico
MoO ₃	Óxido de molibdênio (VI)
MoS ₂	Sulfeto de molibdênio (IV)
ms	Milissegundos.
Na ₂ CO ₃	Carbonato de sódio
NaF	Fluoreto de sódio
O	Oxigênio
p_e	Resistividade elétrica de um eletrodo.
P.A.	Pureza Analítica
PAW	<i>Plasma arc welding</i> , soldagem a arco de plasma.
R_e	Resistência elétrica do eletrodo
R_{cc}	Resistência média de soldagem durante os períodos de curto-circuito
R_p	Resistência de contato eletrodo/poça
R_c	Resistência de contato entre o bico e o arame, s é o comprimento do eletrodo e A é a área da seção transversal do eletrodo.
RMD	<i>Regulated Metal Deposition</i> , de tradução livre como deposição regulada de metal. Tecnologia da empresa <i>Miller</i> .
s	Desvio padrão observado
s_p	Desvio padrão combinado, ou <i>pooled</i>
S	Enxofre
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> – EUA, de tradução livre como a Sociedade de Engenheiros Automotivos, que pode designar uma classificação normativa de aços.

Se	Selênio
SiO ₂	Dióxido de silício
STT	<i>Surface Tension Transfer</i> de tradução livre como transferência por tensão superficial, sendo uma tecnologia da empresa <i>Lincoln Electric</i>
T	Período de transferência.
T _{cc}	Tempo de curto-circuito
Ti	Titânio, ou titânio metálico.
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i> , que se refere ao processo de soldagem a arco com proteção gasosa e eletrodo metálico de tungstênio (não consumível).
TiO ₂	Dióxido de titânio
TWI:	<i>The Welding Institute</i> , é uma organização internacional relacionada ao desenvolvimento da soldagem e registro de profissionais do ramo.
U _{ac}	Soma das quedas de tensão anódica e catódica na região do arco elétrico.
U _{arc}	Tensão antes do início de um curto-circuito
U _{cc}	Tensão imediatamente após o início de um curto-circuito
V	Símbolo da unidade volts
ZF:	Zona Fundida
ZnO	Óxido de zinco
ZTA	Zona Termicamente Afetada

RESUMO

A soldagem MIG/MAG é muito utilizada na união de componentes de aço e de diversas ligas não ferrosas, entretanto esse processo apresenta frequentemente problemas de estabilidade e controle. Recentemente, várias destas limitações estão sendo reduzidas com o desenvolvimento de fontes e sistemas especiais de soldagem, que em geral possuem um custo elevado. Uma possível alternativa para minimizar instabilidades neste processo e controlar o formato do cordão é a soldagem MIG/MAG com a aplicação de fluxos ativos. Inspirada na soldagem A-TIG, a soldagem A-MIG/MAG ainda é pouco conhecida; nela um fluxo em pó é aplicado à superfície da junta antes da soldagem convencional. O presente trabalho avalia o efeito da aplicação de fluxos simples, de um único componente, sobre os aspectos operacionais da soldagem MIG/MAG em aço carbono (SAE 1020). Para isso o estudo foi dividido em duas fases. Inicialmente, foram realizados testes exploratórios para se avaliar o efeito da aplicação, como fluxo, de nove diferentes compostos sobre as características operacionais do processo e aspectos geométricos do cordão. Em seguida, com base nos resultados da primeira etapa, foram selecionados dois fluxos simples para se avaliar os efeitos deles nas características operacionais e do formato do cordão quando se altera a tensão de soldagem. Esses testes foram realizados com dispositivo de deslocamento de tocha mecanizado, a corrente e a tensão de soldagem foram monitoradas e os seus sinais analisados juntamente com parâmetros geométricos do cordão. Os resultados indicaram alterações nos oscilogramas de tensão e corrente em diversos fluxos simples testados quando comparados aos da soldagem sem fluxo. Contudo os efeitos observados, principalmente quanto à penetração do cordão de solda, foram menos intensos do que os geralmente reportados na soldagem TIG com fluxo ativo (A-TIG). Sugere-se como importante agente no mecanismo atuante na soldagem A-MIG/MAG a capacidade do fluxo simples em formar uma película uniforme sobre a superfície do metal de base, as propriedades do fluxo como isolante elétrico e térmico e as propriedades da escória formada durante a soldagem.

Palavras-chave: A-MIG/MAG. A-GMAW. Fluxos. Óxidos.

ABSTRACT

MIG/MAG welding is widely used for joining steel components and various non-ferrous alloys, but this process often has stability and control problems. Nowadays, many aspects of this shortcoming have been controlled by developments in electronic power sources and special welding systems that, however, tend to be expensive. A possible alternative to minimize instability and control problems in this process is the application of active fluxes. Inspired by A-TIG, A-MIG/MAG welding is still little known. In it, a powder flux is applied on the surface of the joint before welding. This study evaluates the effect of application of simple fluxes of a single component on operational aspects of MIG/MAG welding of carbon steel (SAE 1020). It is with this aim that this study was divided into two phases. Initially, exploratory tests were performed to evaluate the effect of nine simple component fluxes on welding electrical signals and weld bead shape with short-circuit metal transfer operation. Then, based on the results of the first step, two simple fluxes were selected to evaluate their effects on operational characteristics and shape of weld bead, when the welding voltage was changed. These tests were performed with a mechanized torch displacement device, the welding current and voltage were monitored and their signals analyzed together with geometric parameters of weld bead. The results indicated changes in voltage and current oscillograms by several simple fluxes tested when compared with non-flux welding. However the observed effects were less intense than those generally reported in active flux TIG welding (A-TIG), especially in relation to the weld bead penetration. It is suggested as an important agent in the A-MIG/MAG welding effect the ability of the component to form a uniform film on the base metal surface, the flux properties as an electrical and thermal insulation and the characteristics of the slag film formed on welding.

Key-words: A-MIG/MAG. A-GMAW. Fluxes. Oxides.

1 INTRODUÇÃO

O processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) se refere à soldagem a arco com proteção gasosa e eletrodo consumível, sendo também conhecido pela sigla MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Activated Gas*). Nesse processo, a energia gerada no arco, na forma de calor, ocasiona a fusão da ponta do eletrodo e de uma parcela do metal de base, produzindo assim a solda. Ele é um processo muito utilizado industrialmente, podendo ser aplicado tanto na fabricação de peças como na união de componentes, visando à produção de equipamentos ou de outros tipos de produtos. Isso se deve à sua elevada taxa de deposição, facilidade de automação, flexibilidade para aplicação em soldagem de materiais ferrosos e não ferrosos dentre outros fatores. Entretanto, contrastando com essas características, um dos principais problemas desse processo é a sua maior dificuldade de controle, existindo vários parâmetros que o afetam e que podem apresentar significativas inter-relações.

O desenvolvimento de variantes do processo MIG/MAG com fontes eletrônicas (por exemplo, a soldagem pulsada e diferentes formas comerciais de controle da transferência por curto-circuito como CMT da *Fronius*, RMD da *Miller Electric* e STT da *Lincoln Electric*) permitiu superar diversas limitações de aplicação do processo, entretanto essas tecnologias tendem a apresentar um custo elevado. O aprimoramento de tecnologias como a soldagem com fluxos ativos surgiu, também, como uma possibilidade de melhorar ou controlar alguns aspectos do processo usando equipamentos convencionais de menor custo.

Atualmente, a tecnologia de se soldar com a aplicação prévia de fluxos ativos vem sendo pesquisada no processo de soldagem TIG, a plasma (PAW) entre outros. Esses estudos relatam importantes efeitos na soldagem, como alterações de condições operacionais do processo e da geometria do cordão de solda. Outra possibilidade, ainda pouco estudada, é o processo MIG/MAG com aplicação de fluxos ativos (A-MIG/MAG, A-MIG, ou A-GMAW), que apresenta o potencial de elevar a penetração do cordão de solda e de melhorar as características operacionais do processo.

Estudos recentes sobre a soldagem A-MIG/MAG relatam importantes efeitos desse processo, como alterações na geometria do cordão de solda, na quantidade de respingos gerados e na

distorção angular dentre outros fatores. As informações sobre o tema ainda são escassas na literatura, em especial o estudo do efeito de fluxos com diferentes composições na soldagem A-MIG/MAG, o efeito deles sob alterações de variáveis de processo, as variações ocasionadas pelos fluxos nas condições operacionais e geometria do cordão de solda, além dos mecanismos responsáveis pelos efeitos observados nesse processo. Nesse contexto, a investigação dos efeitos de nove fluxos, de um único componente, na soldagem com aço carbono SAE 1020 foi objeto de estudo neste trabalho.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivo básico avaliar os efeitos de fluxos em aspectos operacionais da soldagem MIG/MAG de aços carbono SAE1020.

Podem-se destacar entre os seus objetivos específicos:

- Avaliar os efeitos da aplicação de diferentes fluxos, de um componente, nas condições de transferência metálica por curto-circuito na soldagem A-MIG/MAG;
- Classificar os tipos de alterações de comportamento induzidos pelos fluxos estudados;
- Selecionar alguns compostos dentre todos os estudados para a avaliação dos efeitos com variação de tensão e, possivelmente, o modo de transferência metálica;
- Estudar as variações observadas nas condições de operação e no aspecto do cordão.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Processo GMAW ou MIG/MAG

3.1.1 Introdução

GMAW é a sigla do termo em inglês: “*Gas Metal Arc Welding*”, que se refere à soldagem a arco com eletrodo consumível e proteção gasosa (TWI, 1995). Esse processo também é conhecido como MIG/MAG (do inglês “*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*”, de tradução livre como o processo de soldagem que utiliza eletrodo metálico e gás inerte/eletrodo metálico e gás ativo). Os dois termos refletem a classificação do processo de acordo com o gás de proteção utilizado, sendo MIG a designação para a proteção composta por gases inertes ou rica neles e MAG para a proteção feita por gases ativos ou que contenham uma mistura rica neles (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2011). De acordo com uma classificação feita pela *American Welding Society* (AWS) dos processos de soldagem, o GMAW pertence ao grupo “Soldagem a Arco”.

O processo de soldagem MIG/MAG possibilita a união entre metais através do calor gerado pela passagem de corrente elétrica no eletrodo (efeito Joule) e no arco, que tende a fundir a ponta do eletrodo além de uma parcela do metal de base, formando a poça de fusão, que ao se estender e ser solidificada se torna o cordão de solda. Para uma adequada proteção do arco elétrico, do metal sendo fundido na ponta do eletrodo e transferido no arco e da poça de fusão é necessário se utilizar um gás de proteção de composição química apropriada.

A soldagem MIG/MAG, considerada em conjunto com a soldagem com arames tubulares, é muito utilizada na indústria metal-mecânica, com destaque para aplicações na indústria automobilística, de fabricação de estruturas e autopeças (MODENESI *et al.*, 2012). A aplicabilidade deste processo se estende à soldagem de diversos metais de importante interesse comercial (aço carbono, aço inoxidável, alumínio, cobre dentre outros). O processo é adequado à robotização, o que tende a elevar a qualidade do produto, a repetitividade das características da junta soldada, a segurança operacional além da redução de custos de fabricação (SANTANA, 2010). Em contraste com esses aspectos positivos, MARQUES,

MODENESI e BRACARENSE (2011) citam que uma importante limitação da soldagem MIG/MAG é a sua elevada sensibilidade à variação dos parâmetros de soldagem, que pode influenciar diretamente na qualidade do cordão de solda depositado, além da necessidade de se ajustar com rigor as configurações do processo, visando uma determinada qualidade do cordão de solda.

O processo de soldagem MIG/MAG apresenta maior complexidade para ser ajustado, quando comparado com a soldagem com eletrodo revestido, devido à maior quantidade de variáveis operacionais envolvidas e às suas complexas interrelações. Nesse aspecto, diversos fatores como, por exemplo, as características do metal de base, a composição química e diâmetro do eletrodo, a composição do gás de proteção, as características do equipamento de soldagem e a configuração geométrica do sistema podem influenciar o processo e os produtos obtidos (MODENESI *et al.*, 2012) Alguns trabalhos (WANG e TSAI, 2001; HUANG, 2010; ZHANG e CAO, 2012; LIN, 2012; LIN e YAN, 2014; PATEL, CHOUDHARY e PATEL, 2014; PATEL e PATEL, 2015) sugerem que a presença de elementos superficiais ativos no metal de base, através de fluxos aplicados, também possa ser um fator que afete o processo de soldagem.

Descrições detalhadas do processo MIG/MAG podem ser encontradas na literatura (TWI, 1995; MESSLER, 2004; SCOTTI e PONOMAREV, 2008; MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2011).

3.1.2 O arco de soldagem

O estudo dos aspectos gerais do arco de soldagem é de fundamental importância para se compreender os fenômenos envolvidos na passagem da corrente entre o eletrodo e a peça quando uma diferença de potencial elétrico é estabelecida entre eles. Além desses, o conhecimento básico sobre as zonas que compõe o arco elétrico e a capacidade dele em gerar calor, capaz de fundir materiais metálicos, é importante para melhor entendimento do processo de soldagem MIG/MAG.

Segundo MARQUES, MODENESI e BRACARENSE (2011), “o arco elétrico consiste de uma descarga elétrica, sustentada através de um gás ionizado, a alta temperatura, conhecido como plasma”. Em condições estáveis e controladas, o arco pode ser operado de maneira a gerar energia suficiente e adequada para a fusão de uma parcela do metal de base e do metal de adição para a produção de uma solda (MODENESI, 1990).

O termo soldagem a arco é aplicável a um grande e diversificado grupo de processos de soldagem que utilizam um arco elétrico como uma fonte de calor. O arco é estabelecido entre a ponta do eletrodo e a peça, proporcionando um intenso aquecimento, que rapidamente funde uma porção do metal de base e, dependendo do processo, o metal de adição propiciando a formação da solda.

Para que o arco exista e se mantenha aberto, deve existir a condução de cargas elétricas (elétrons e íons) em quantidade adequada para a manutenção da corrente nele. Diversos mecanismos são propostos para explicar a emissão de elétrons no cátodo. Sobre o transporte de íons positivos, LANCASTER (1986) ressalta que “exceto em circunstâncias especiais (como, por exemplo, em um anodo de aço com impurezas superficiais, LUDWIG 1967), um anodo não emite íons positivos, assim a corrente na região anódica é conduzida prioritariamente por elétrons”.

Outro aspecto importante do arco elétrico é a sua forma. Ela pode variar, existindo uma relação entre o seu comprimento e a tensão do arco. Segundo EGERLAND (2015), a tensão do arco apresenta uma relação aproximadamente linear com o comprimento do arco, sendo que um aumento de tensão conduz à extensão do arco e vice-versa. O mesmo autor menciona que o comportamento dinâmico do arco na soldagem GMAW é muito influenciado pela contínua alimentação e fusão do arame-eletrodo, sendo que o modo de avaliação do comprimento de arco, estabelecido por normas, pode ser considerado insuficiente para a sua quantificação precisa.

O estudo do comportamento da queda de tensão ao longo do arco elétrico demonstra que ela não é uniforme, existindo importantes quedas de tensão junto aos eletrodos (ânodo e cátodo) além de uma variação relativamente linear do potencial elétrico na coluna do arco. Assim, o

arco é comumente dividido em três regiões: a Zona de Queda Catódica; a Coluna de Plasma; e, a Zona de Queda Anódica (LANCASTER, 1986; USHIO, 1987). A figura 3.1 apresenta um esquema da distribuição de potencial ao longo do arco elétrico, em que a coluna de plasma representa a maior parte da região do arco, enquanto que as regiões junto aos eletrodos apresentam dimensões menores.

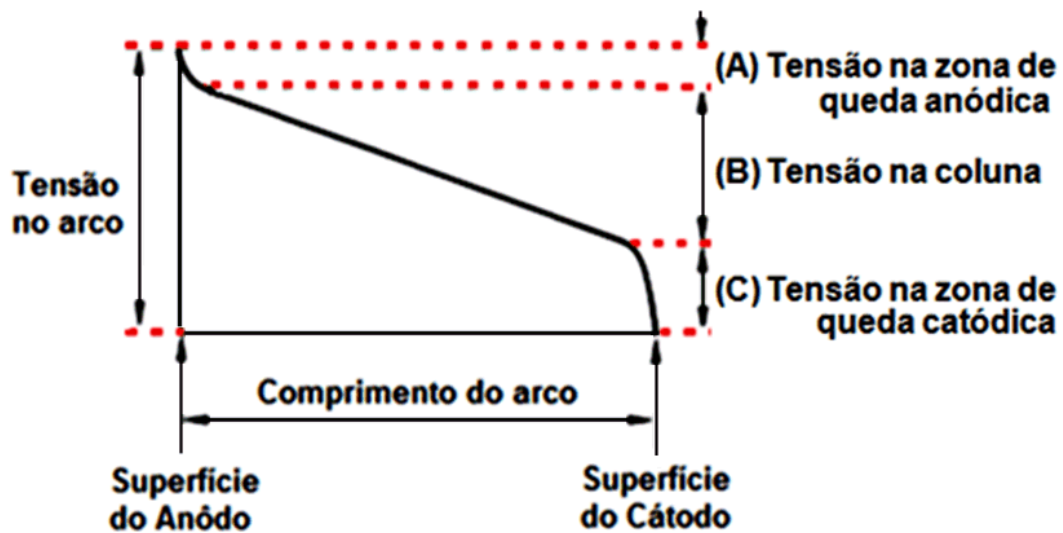


Figura 3.1 Esquema da distribuição de potencial elétrico em um arco e suas regiões (A) Zona de queda anódica (B) Coluna do arco e (C) Zona de queda catódica. (Adaptado de LANCASTER, 1986)

Em relação as quedas de tensão observadas no arco elétrico, LANCASTER (1986) sugere que a queda de tensão catódica encontra-se na faixa de 10 a 20 V e que, geralmente, o valor da queda de tensão anódica é de um a dois volts em correntes muito altas, podendo chegar a doze volts em correntes baixas. Ao apresentar esses valores o autor ressaltou as dificuldades em se obter dados precisos, devido as técnicas adotadas e a complexidade do tema. Em 2011, MODENESI e colaboradores apresentaram uma metodologia para o levantamento de

parâmetros básicos da soldagem GMAW com transferência por curto-circuito, incluindo a soma das tensões associadas com as regiões anódica e catódica.

Informações mais detalhadas sobre a física do arco elétrico para a soldagem já foram extensamente apresentadas por outros autores (GUILLE, 1971; LANCASTER, 1986; EAGAR, 1990; AWS, 2001; MESSLER, 2004; FAN e KOVACEVIC, 2004; MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011; EGERLAND, S., 2015).

3.1.3 Transferência metálica

Uma característica distintiva do processo GMAW em relação a outros processos de soldagem a arco é a possibilidade de intencional alteração e controle do modo de transferência de metal fundido da ponta do eletrodo para a poça de fusão. Isso pode ser realizado através de uma combinação adequada de parâmetros de soldagem que incluem, por exemplo, a composição do gás de proteção, tipo de fonte de soldagem, tipo e forma do eletrodo, velocidade de alimentação de arame e a tensão e corrente de soldagem (MESSLER, 2004). A AWS (2001) menciona efeitos produzidos pelo tipo de gás de proteção e das características do eletrodo nos modos de transferência metálica.

Messler (2004) menciona que diferentes técnicas podem ser usadas no estudo da transferência metálica como, por exemplo, a filmagem de alta velocidade e análise de sinais elétricos (tensão e corrente de soldagem) ao longo do tempo. Baseado nas informações conhecidas até a metade da década de 1970, o Instituto Internacional de Soldagem (IIW) apresentou uma classificação dos modos de transferência em três grupos: Transferência por queda livre (*Free-flight transfer*); Transferência por contato (*Bridging transfer*) e assistida por escória (*Slag-protected transfer*), que podem ser vistos resumidamente na tabela III.1 (Adaptada de IIW, 1976). A figura 3.2 exibe um esquema dos modos de transferência de metal de acordo com a classificação do IIW (Adaptado de LIU e SIEWERT, 1989).

Tabela III.1. Modos comuns de transferência no arco de soldagem (Adaptado e traduzido livremente de IIW, 1976).

Modos de Transferência Metálica	
1. Transferência por Queda Livre (<i>Free Flight Transfer</i>):	
1.1. Globular	(<i>Globular</i>)
1.1.1. Globular ou gota	(<i>Drop</i>)
1.1.2. Repelida	(<i>Repelled</i>)
1.2. Goticular ou Aerossol	(<i>Spray</i>)
1.2.1. Axial ou Projetada	(<i>Projected</i>)
1.2.2. Com Alongamento	(<i>Streaming</i>)
1.2.3. Rotacional	(<i>Rotating</i>)
1.3. Explosiva	(<i>Explosive</i>)
2. Transferência por Contato (<i>Bridging Transfer</i>)	
2.1. Curto-circuito	(<i>Short-circuiting</i>)
2.2. Contínua ou ininterrupta	(<i>Without Interruption</i>)
3. Transferência Protegida pela Escória (<i>Slag Protected Transfer</i>):	
3.1. Guiada pela parede	(<i>Flux-Wall Guided</i>)
3.2. Outros modos	(<i>Other modes</i>)

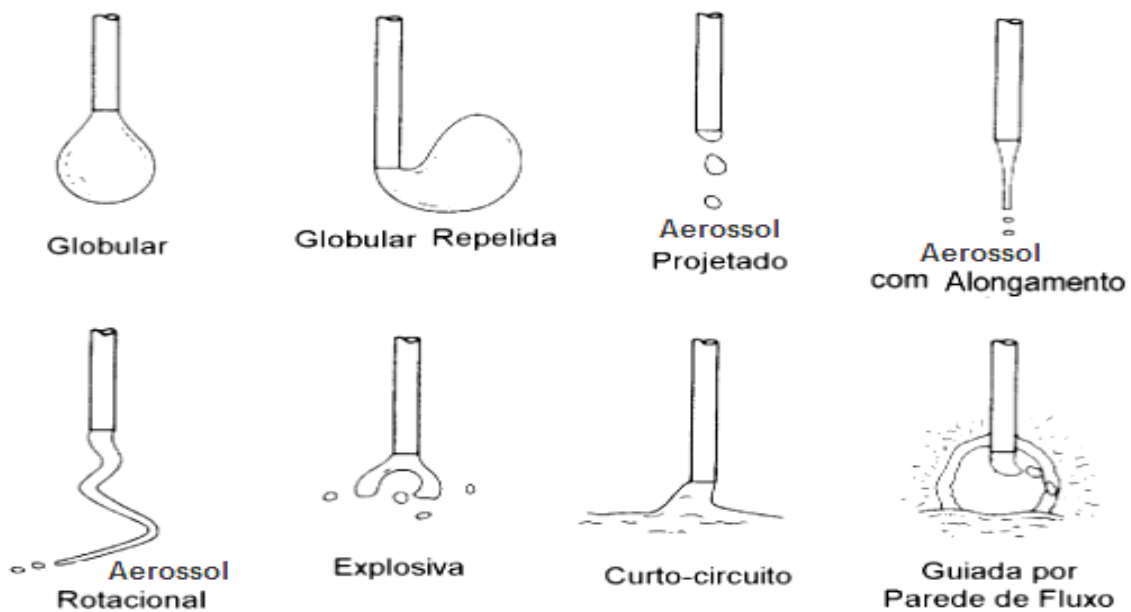


Figura 3.2 Modos de transferência metálica no arco de soldagem (Adaptado pela tradução livre de LIU e SIEWERT, 1989, página 2, figura 2)

A literatura sugere a classificação dos principais modos de transferência metálica em três classes, de acordo com os tipos de forças dominantes no destacamento do metal do arame-eletrodo. Esses três modos são: Curto-circuito (devido à força dominante de tensão superficial); Globular (devido à força dominante da gravidade); e *Spray* ou aerossol (devido ao efeito da força dominante de origem eletromagnética) (LANCASTER, 1980; IORDACHESCU e QUINTINO, 2008;). Segue abaixo uma descrição dessas formas de transferência, baseada no trabalho de MESSLER (2004):

- a transferência metálica por curto-circuito ocorre em tensões de soldagem relativamente baixas. Neste tipo de transferência o material fundido na ponta do eletrodo consumível é periodicamente transferido para a poça de fusão por ação da tensão superficial e de forças de origem magnética. A figura 3.3 (CHAPUIS, OPDERBECKE e FORTAIN, 2007, citado por CHAPUIS, 2011) mostra o estabelecimento de um curto-circuito através de imagens obtidas da transferência metálica ao longo de um período de curto-circuito, e de um diagrama da tensão de soldagem.
- a transferência globular ocorre pela fusão da ponta do eletrodo consumível, cujo material permanece aderido à ponta do arame devido à ação da tensão superficial. O aumento de sua massa ocasiona o destacamento da gota metálica pela ação da gravidade. Esse modo de transferência é caracterizado pela formação de gotas de metal líquido com diâmetro superior ao do eletrodo, que se transferem para poça de fusão em baixa frequência (1 a 10 Hz);
- a transferência goticular (aerossol ou *spray*) é caracterizada pela transferência de finas gotículas fundidas a partir do eletrodo metálico consumível para a poça de fusão a taxas de centenas de gotas por segundo, devido à elevação da corrente acima de um determinado valor de transição. A transferência de metal é estável, direcionada e apresenta poucos respingos;

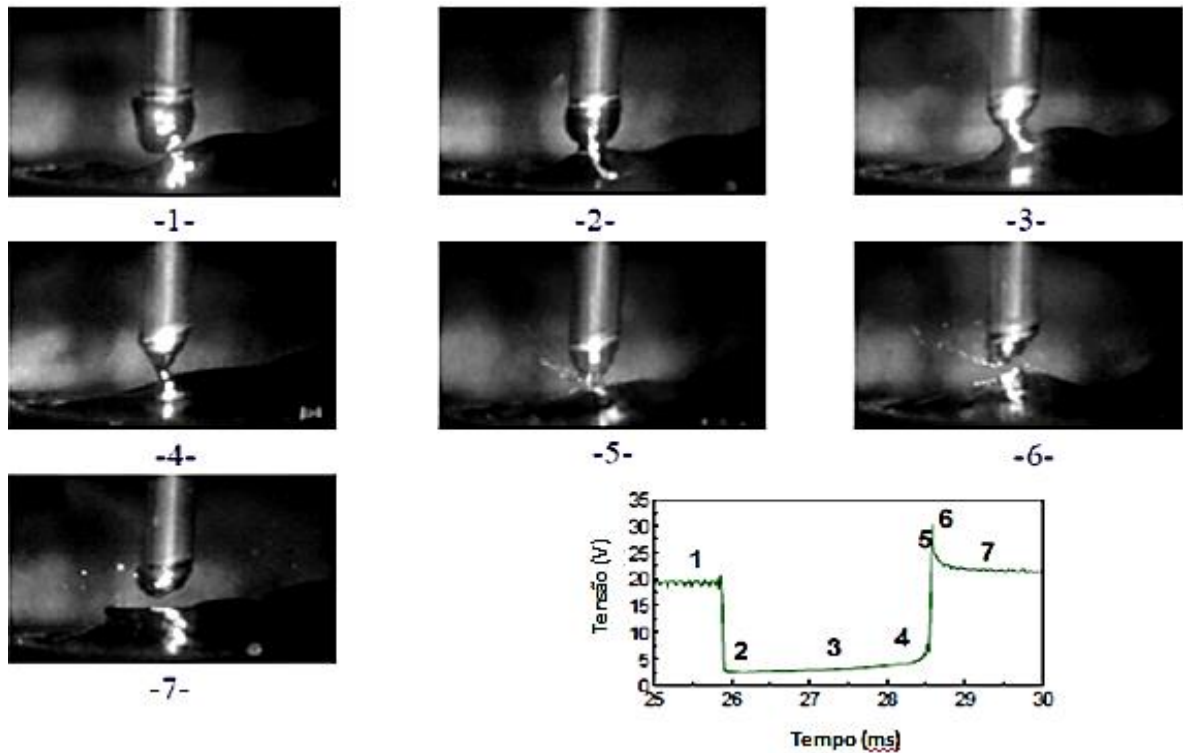


Figura 3.3 Diagrama da tensão de soldagem e as imagens da transferência metálica por um período de curto-circuito. (Imagem extraída de CHAPUIS, J. *Une approche pour l'optimisation des opérations de soudage à l'arc*. Tese. França: Université de Montpellier 2 - Sciences et Techniques du Languedoc , 2011. Pagina 21. Figura 1.8, que cita CHAPUIS, OPDERBECKE e FORTAIN, 2007 . Tradução livre.).

Informações mais detalhadas sobre os modos de transferência metálica podem ser encontradas apresentadas na literatura (AWS , 2001; MESSLER, 2004; IORDACHESCU e QUINTINO 2008; SCOTTI, PONOMAREV, LUCAS, 2012, SOUZA *et al.*, 2011).

3.1.4 Variáveis na Soldagem GMAW

O processo GMAW apresenta muitos parâmetros que devem ser controlados durante a soldagem e que podem estar interligados. A literatura (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011; DUTRA, 2008) destaca a tensão, a corrente, a polaridade do eletrodo, a velocidade de soldagem, a vazão de gás de proteção, a composição do gás de proteção, o eletrodo e a indutância da fonte de soldagem como algumas das principais variáveis desse

processo. A correta seleção desses parâmetros afeta de forma importante no custo da atividade e na qualidade do produto gerado.

A seguir será descrito de maneira geral a influência de algumas das variáveis mencionadas.

3.1.4.1 Tensão de soldagem

A tensão de soldagem pode afetar o comprimento do arco, o modo de transferência metálica e o formato do cordão, devendo ser escolhida de acordo com a corrente de soldagem e o gás de proteção.

Numa faixa adequada de operação, menores valores de tensão tendem a favorecer a transferência por curto-circuito, que pode se tornar o processo de soldagem muito instável caso a tensão seja reduzida excessivamente (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011). Tensões mais elevadas favorecem a transferência metálica por queda livre, além de elevar a largura do cordão de solda e a geração de respingos.

3.1.4.2 Corrente de soldagem

No processo de soldagem MIG/MAG, é comum a utilização de fonte de corrente contínua (CC) com o eletrodo consumível ligado ao seu polo positivo (polaridade inversa) visando proporcionar maior estabilidade e fusão do metal de base. Para alguns fins específicos, pode-se adotar o eletrodo com polaridade negativa, ou mesmo, com a utilização de fontes eletrônicas, a operação em polaridade variável ou com condições de pulso programadas.

Segundo o TWI (1995), a corrente está relacionada com a velocidade de alimentação do eletrodo e sua extensão, para uma dada composição e diâmetro de eletrodo. Ela influencia diretamente a taxa de deposição, o modo de transferência metálica e em características do cordão, afetando assim a qualidade da solda.

3.1.4.3 Velocidade de fusão

Segundo MARQUES, MODENESI e BRACARENSE (2011), na soldagem MIG/MAG, existem duas formas fundamentais de se obter a velocidade de fusão (de consumo do

eletrodo), em média, igual à velocidade de alimentação, de modo a manter o comprimento do arco relativamente constante ao longo de uma operação:

- manter a corrente constante e permitir que o equipamento faça ajustes na velocidade de alimentação, igualando-a a velocidade de fusão, ou;
- manter a velocidade de alimentação constante e permitir alterações na corrente de soldagem. Nesse caso, utiliza-se uma fonte do tipo tensão constante, o que tende a manter o comprimento do arco estável, semelhante ao ilustrado na figura 3.4.

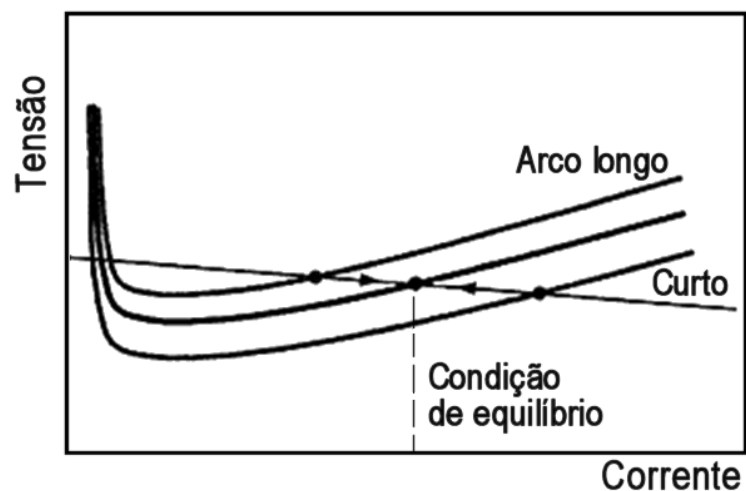


Figura 3.4 Controle do comprimento do arco por uma fonte do tipo tensão constante e velocidade de alimentação de arame constante. (Imagem extraída de MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011)

3.1.4.4 Velocidade de soldagem

A velocidade de soldagem pode ser definida como a variação da posição do arco elétrico, que se desloca ao longo de uma junta, em relação ao tempo. Considerando que outros parâmetros sejam mantidos constantes, ela pode controlar a energia de soldagem (menor velocidade, maior energia) e a quantidade de material de adição depositado por unidade de comprimento de solda. Valores excessivos para baixo e para cima de um valor de referência, podem levar à formação de discontinuidades na solda pela perda do controle da poça de fusão e podem ter efeitos metalúrgicos negativos.

MARQUES, MODENESI e BRACARENSE (2011) informam sobre o efeito da velocidade de soldagem na energia fornecida por unidade de comprimento da junta e destacam as possíveis influências ocasionadas por três níveis da velocidade de soldagem:

- a velocidade de soldagem elevada pode ocasionar menor penetração, largura e reforço do cordão de solda;
- a velocidade excessivamente elevada pode promover a formação de mordeduras, falta de fusão e de penetração do cordão de solda;
- a velocidade muito baixa tende, geralmente, a elevar o custo da soldagem e causar problemas metalúrgicos.

3.1.4.5 Extensão livre de eletrodo e a distância bico de contato à peça de trabalho (DBCP)

A extensão livre de eletrodo, ou da sigla inglesa ESO (*electrical stick-out*), se refere à distância entre o último ponto de contato elétrico (no bico de contato) até a extremidade do arame em iminência de fusão. Nesse trecho do arame eletrodo, ocorre aquecimento por efeito Joule devido a passagem de corrente elétrica.

A distância entre o último ponto de contato elétrico entre o bico de contato e o arame até a peça de trabalho é denominada de distância do bico de contato à peça (DBCP), ou do inglês CTWD (*Contact Tip to Work Distance*). Ela é a soma a extensão do arame-eletrodo e do comprimento do arco. Pode-se estabelecer que para um comprimento do arco mantido relativamente constante, quanto maior for a extensão do arame-eletrodo, maior será a DBCP. Na figura 3.5 pode-se observar um desenho esquemático mostrando os parâmetros DBCP, extensão do arame e comprimento do arco.

Considerando que todos os outros parâmetros estejam fixos, a DBCP pode afetar a corrente de soldagem, conforme ilustrado na figura 3.6. Uma das possíveis consequências é a interferência na energia disponibilizada para se fundir o arame-eletrodo

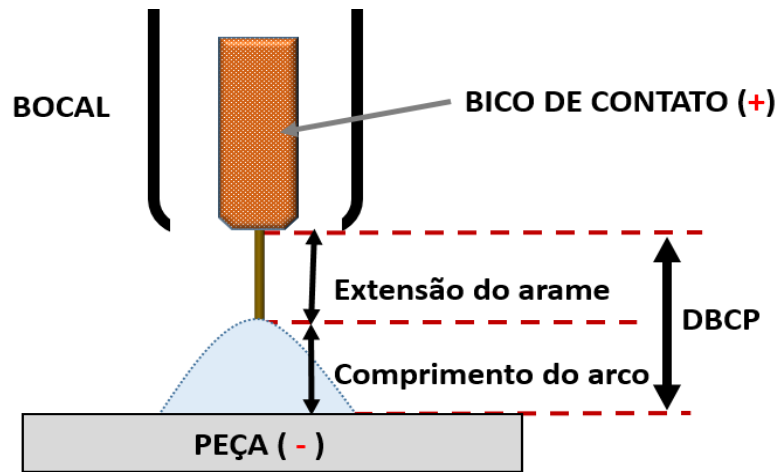


Figura 3.5 Desenho esquemático mostrando os parâmetros DBCP, extensão do arame e comprimento do arco.



Figura 3.6 – Representação esquemática da relação entre a distância entre o bico de contato e a peça e a corrente de soldagem (Extraído de ESAB, 2005)

3.1.4.6 Gás de proteção

O gás de proteção na soldagem a arco visa proteger o metal fundido durante a sua transferência e a poça de fusão contra os efeitos de substâncias contidas no ar atmosférico, como o oxigênio. A correta seleção desse insumo associada com características adequadas da fonte de energia e dos metais de adição podem auxiliar na melhoria do funcionamento, produtividade e qualidade do cordão de solda realizados em na soldagem de aços carbono,

aços inoxidáveis, ligas de alumínio dentre outras aplicações (TATAGIBA, GONÇALVES e PARANHOS, 2012).

DUTRA (2008) comenta que a disponibilidade de gases de proteção com diferentes composições pode não ser vantajosa se não for feita uma criteriosa seleção deles de acordo com a aplicação pretendida. Sobre isso, o autor menciona que apesar de uma nova composição de gás poder ocasionar uma melhoria de desempenho para um caso específico, como por exemplo na transferência por curto-circuito, isso deve ser “sempre analisado em conjunto com as características da fonte de soldagem utilizada”. Dutra sintetiza essa ideia citando que “um gás não pode ter a sua validade julgada de maneira absoluta”.

A proteção gasosa pode ser feita por gás de característica inerte (com baixa solubilidade na maioria dos metais), ativo, ou misturas destes. No processo de soldagem de sigla MIG adotam-se apenas gases de proteção inertes, e MAG, gases de comportamento ativo, ou de determinada mistura destes. Na soldagem MIG/MAG, que é uma definição mais geral, engloba-se a aplicação dos gases de proteção presentes em ambos os grupos, em qualquer proporção. TATAGIBA, GONÇALVES e PARANHOS (2012) ressaltam que de acordo com a natureza e composição dos gases, estes terão uma influência preponderante nas características do arco e no tipo de transferência metálica, podendo afetar também na perda por respingos, no formato do cordão de solda, na seleção da velocidade de soldagem e no custo final da operação de soldagem. Os mesmos autores mencionam que os gases de proteção podem influenciar as perdas de elementos químicos, a sensibilidade à fissuração, formação de porosidade, a temperatura da poça de fusão, assim como a facilidade de execução da atividade de solda em variadas posições. Acrescenta-se a isso a capacidade da proteção gasosa poder influenciar os perfis típicos dos cordões de solda, como ilustrado na figura 3.7.

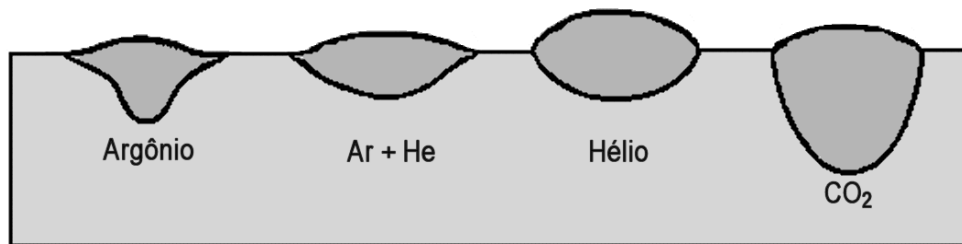


Figura 3.7 Esboço das diferenças de perfis típicos de cordões de solda produzidos com diversos gases de proteção ou mistura destes (Imagem extraída de MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011)

Além da composição química do gás de proteção, outro fator importante é a vazão de gás de proteção. Ela deve ser adequada, de modo a propiciar uma eficiente proteção da região do arco e da poça de fusão contra possíveis contaminações provenientes do ar. MARQUES, MODENESI e BRACARENSE (2011) afirmam que vazões elevadas podem aumentar o custo de operação, tornar o cordão de solda irregular e causar depressões na poça de fusão. Os mesmos autores relatam a possibilidade de vazões reduzidas ocasionarem o surgimento de porosidades além de outros efeitos, como a perda de elementos de liga.

Nesse contexto, a seleção do tipo de atmosfera protetora para a soldagem e a vazão de gás deve se basear em fatores como facilidade de manuseio, efeitos fisiológicos sobre as pessoas, características do cordão de solda, geração de fumos e gases, dentre outros. Para maiores informações sugere-se a leitura de catálogos de fabricantes gases aplicáveis a soldagem e da literatura acadêmica (TATAGIBA, GONÇALVES e PARANHOS, 2012; TATAGIBA, 2015 ; MARQUES, MODENESI e BRACARENSE; 2011; MVOLA e KAH, 2016).

3.1.4.7 Efeito da indutância

As características dinâmicas de processo na soldagem MIG/MAG podem ser reguladas pelo que é conhecido convencionalmente como indutância, nas fontes de energia convencionais, e como efeito indutivo, nas fontes transistoradas. Estes controles podem afetar as características físicas do arco e, por consequência, a formação e destacamento da gota (DUTRA, 2008). Eles tem um papel particularmente importante na soldagem com

transferência por curto-circuito devido às grandes variações de corrente e tensão de soldagem observadas em cada período de transferência metálica. Isso se deve à alternância entre os momentos de arco e de curto-circuito e à diferença de comportamento dos sinais elétricos em cada um deles.

As taxas de crescimento e decrescimento da corrente (A/s) podem influenciar a estabilidade do processo de soldagem MIG/MAG no modo de transferência por curto-circuito, sendo que elas podem ser afetadas pela indutância do equipamento. Estudando as características dinâmicas das fontes de soldagem com o tipo de gás de proteção, DUTRA (2008) destaca que nunca o gás de proteção deve ser avaliado de forma isolada e ressalta o importante papel desempenhado pela regulagem da taxa de decrescimento da corrente, como um fator determinante da estabilidade da soldagem MAG com transferência por curto-circuito.

Mantendo-se todos os outros parâmetros constantes, a orientação da tocha durante a soldagem (puxando, empurrando ou perpendicular ao plano de soldagem, Figura 3.8) pode afetar a geometria do cordão, quantidade de respingos formados e a estabilidade do arco elétrico. Pode-se estabelecer que a “técnica empurrando” a poça de fusão ocorre com o ângulo formado entre o sentido da velocidade de soldagem e o eixo da tocha é maior do que 90°. Já nos casos em que o ângulo formado entre o sentido de soldagem e a tocha for menor que 90°, tem-se a “técnica puxando”.

A “técnica puxando” tende a elevar a penetração do cordão, enquanto que a técnica de soldagem “empurrando” é aplicável a em materiais de pequena espessura ou onde for necessária uma pequena penetração (ESAB, 2005). Ângulos entre a tocha e o plano da junta inadequados tendem a tornar o processo mais instável e com maior quantidade de respingos.

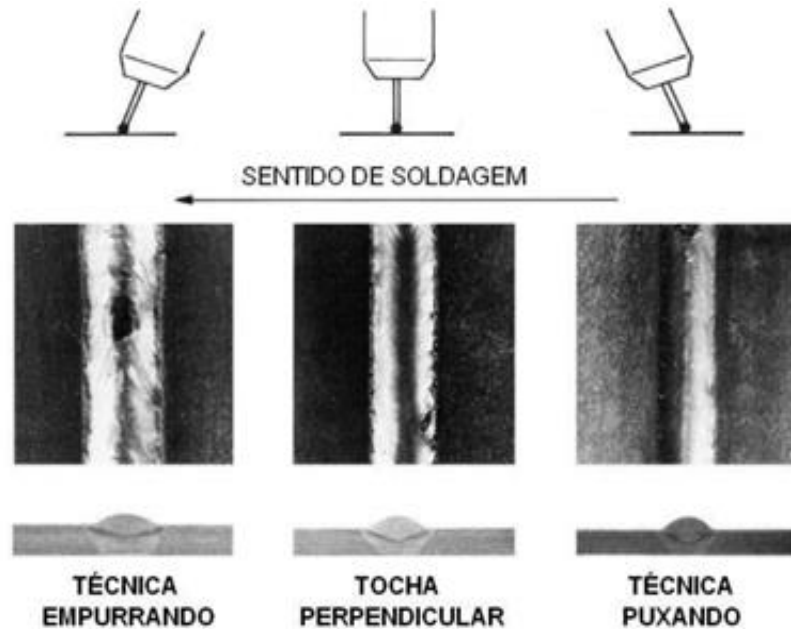


Figura 3.8 Possíveis efeitos da inclinação da tocha na geometria do cordão de solda. (Adaptado de ESAB, 2005).

3.1.4.8 Outras considerações

Maiores esclarecimentos sobre o funcionamento de equipamentos para a soldagem e de seus componentes podem ser obtidos na literatura técnica (HOLLIDAY, 1993; MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011), em catálogos de fabricantes de equipamentos, peças e consumíveis e em patentes. Existem, também, muitas informações disponíveis sobre a regulagem de parâmetros de soldagem no processo GMAW (DUTRA, 2008; REZENDE *et al.*, 2011; SOUZA *et al.*, 2011) e sobre o desenvolvimento e efeitos de gases de proteção utilizados na soldagem GMAW (TATAGIBA, GONÇALVES e PARANHOS, 2012; COSTA, STARLING, MODENESI, 2010; DÍAZ-CEDRÉ *et al.*, 2010).

3.1.5 Metalurgia da Soldagem

As fontes de aquecimento no processo de soldagem MIG/MAG são o efeito Joule no eletrodo, o arco elétrico e as possíveis reações químicas exotérmicas que possam ocorrer na atividade. A energia gerada na forma de calor eleva a temperatura do material na região sendo soldada, funde parte do material além de causar outras mudanças metalúrgicas. Em condições

adequadas, a energia gerada é suficiente e apropriada para a fusão do metal de adição e de uma parcela do material de base viabilizando a formação da poça de fusão, que ao se solidificar se torna o cordão de solda.

A energia de soldagem é um parâmetro de medida simples, sendo comumente adotada para se especificar as condições de soldagem. Entretanto, é possível a obtenção de soldas de diferentes formas pela alteração dos parâmetros de soldagem (corrente, tensão e velocidade de deslocamento), sem afetar significativamente o valor da energia de soldagem, pois eles podem afetar de modo diferente as características operacionais do processo de soldagem, assim como o perfil do cordão de solda.

A transferência de energia das fontes de calor e da poça de fusão em direção as regiões adjacentes a ela no metal de base tende a ocasionar transformações metalúrgicas na região soldada e vizinhanças, propiciando a formação de zonas perceptíveis em macrografia, conforme ilustrado na figura 3.9, que se distinguem do Metal de Base (MB). Para realçar o contraste entre essas regiões, pode-se recorrer a macrografia, com uso de reativo como, por exemplo, o NITAL, solução contendo ácido nítrico e álcool, aplicável aos aços carbono.

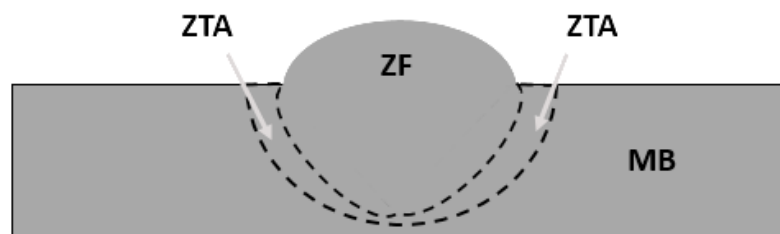


Figura 3.9 Esquema representativo das regiões de uma solda: Zona Fundida (ZF), Zona Termicamente Afetada (ZTA) e Metal de Base (MB).

A zona fundida compreende a região solidificada a partir da poça de fusão em que houve a mistura de metal de base com metal de adição. A ZTA compreende as regiões vizinhas à ZF no metal de base, que sofreram transformações metalúrgicas devido às variações de temperatura durante a soldagem. Dependendo do metal de base usado, ela pode apresentar sub-regiões, que não serão objeto de estudo desse trabalho. A formação da ZTA é

determinada pelas características do metal de base e das variações térmicas ocasionadas no material, como a temperatura de pico atingida e a taxa de resfriamento.

3.2 Processo A-MIG/MAG

3.2.1 Considerações históricas relativas à soldagem com aplicação de fluxos ativos

Nas décadas de 60 e 70 houve um uso crescente da soldagem TIG mecanizada de aços inoxidáveis e de ligas não ferrosas sem o uso de metal de adição (METCALFE e QUIGLEY, 1977; HEIPLE e ROPER, 1982). A observação de desvios de resultados desses processos evidenciou um fenômeno considerado, então, surpreendente: foram feitos registros de alterações significativas no aspecto do cordão de solda e na relação entre a penetração e a largura (METCALFE e QUIGLEY, 1977). Estudos sobre o tema propuseram algumas possíveis causas para esses fenômenos, sendo um dos fatores listados em comum: o efeito de elementos residuais no metal de base. Assim, pequenas diferenças nos teores de alguns elementos químicos – como Al, Se, Ti, O, S dentre outros – no metal de base poderiam alterar o formato do cordão. Como, aparentemente, nem todos os elementos promoviam alterações no processo, os que as ocasionariam poderiam ser considerados como elementos de comportamento ativo. Fluxos aplicados superficialmente também podem fornecer tais elementos, podendo também ser referenciados como elementos superficiais ativos.

O primeiro relato da utilização de fluxos no processo TIG é atribuído ao *Paton Institute of Electric Welding*, na extinta União das Repúblicas Socialistas Soviéticas, no final da década de 1950 (HOWSE e LUCAS, 2000). Os primeiros trabalhos publicados sobre o tema (GUREVICH, 1965; GUREVICH e ZAMKOV, 1966) descreviam a aplicação de fluxos ativos na soldagem de ligas de titânio, sendo a primeira referência de seu uso tecnológico em aços em 1968 (MAKARA, 1968, citado por HOWSE e LUCAS, 2000). Relatou-se que o uso desses fluxos ocasionava uma significativa elevação de penetração da solda, o que reduzia a necessidade de preparação e elevou a produtividade, devido à minimização do número de passes necessários para uma junta (HOWSE E LUCAS, 2000). Nesse contexto surgiu uma variante do processo TIG convencional denominada de soldagem TIG com fluxo ativo (A-TIG), em que se deposita uma fina camada de fluxo sobre a junta antes da soldagem

convencional. A figura 3.10 apresenta macrografias de cortes transvesais de soldas obtidas pelo processo TIG (a) e A-TIG (b) feitas com a mesma corrente elétrica. Observando-se as dimensões da ZF nas macrograficas pode-se perceber as significativas alterações do cordão de solda pela adoção do processo A-TIG em relação ao processo convencional, TIG, especialmente em relação a elevação da penetração do cordão de solda.

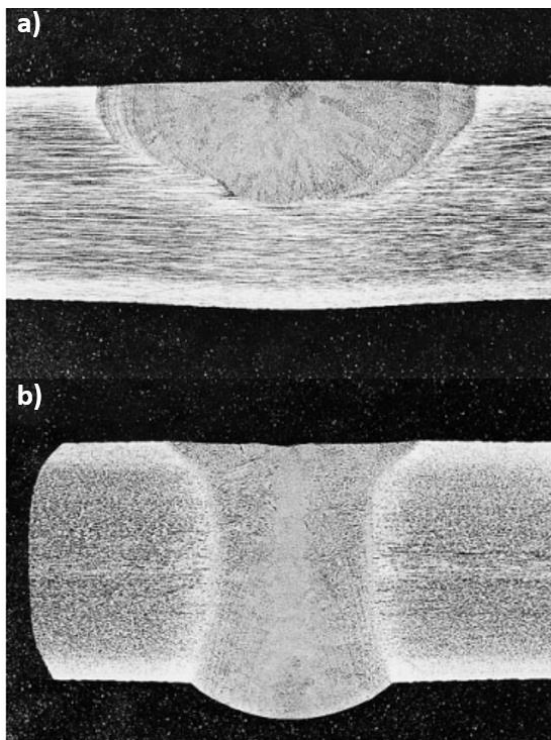


Figura 3.10 Macrografias de cortes transvesais de soldas obtidas pelo processo TIG, em a) não foram aplicados fluxos e em b) com aplicação de fluxos (A-TIG). Soldas obtidas as configurações: 187 A; 9,5 V(a) e 10V (b); 100 mm . min⁻¹; energia do arco 1,07 kJ mm⁻¹ (a) e 1,12 kJ mm⁻¹ (b). (Extraído de HOWSE E LUCAS, 2000)

Além da elevação da penetração do cordão de solda, outro fenômeno interessante comumente observado na soldagem A-TIG é a redução nas dimensões do arco elétrico (constricção do arco) e da mancha anódica. Elas foram constatadas através da percepção e análise da imagem do arco de soldagem utilizando-se diferentes fluxos, conforme apresentado numa revisão de MODENESI (2013). Baseados nas evidências de alterações tanto no arco elétrico como na

superfície da poça de fusão, vários mecanismos foram propostos para se explicar os efeitos observados na soldagem com elementos ativos (MODENESI, 2013).

SÁNDOR e colaboradores (2009, 2012) relataram que apesar do processo A-TIG ser bem conhecido empiricamente, ainda existe uma controvérsia na literatura em relação aos fenômenos físicos e explicações teóricas relativas aos efeitos do processo. Segundo eles são quatro os principais modelos teóricos para se explicar o efeito do fluxo na soldagem A-TIG:

- Teoria de Simonik (1976): Simonik menciona que compostos iônicos, como óxidos e fluoretos, presentes em alguns fluxos ativos, com afinidade por elétrons livres, poderiam capturá-los em regiões mais frias do arco. Os íons formados dessa forma tenderiam a apresentar menor mobilidade do que elétrons livres. Isso conduziria ao aumento da densidade de corrente no centro do arco, devido à maior movimentação de elétrons livres, que conseqüentemente provocaria uma melhor focalização do arco e penetração mais profunda.
- Teoria de Savitskii e Leskov (1980): o modelo estabelece que a diminuição da tensão superficial, devido ao fluxo, faz com que a pressão do arco crie uma depressão mais profunda na poça de fusão, o que, conseqüentemente, eleva a capacidade de penetração.
- Teoria de Heiple e Roper (1982): estes autores sugeriram um modelo, que se baseia na suposição do aparecimento da convecção de Marangoni. Nele assume-se a capacidade de um fluxo em alterar o sinal do coeficiente de temperatura da tensão superficial de negativo para positivo e, conseqüentemente, altera-se a direção do fluxo de Marangoni (a direção do centro para as bordas troca para das bordas ao centro). Esse efeito ocorreria devido ao teor de elementos tenso-ativos (exemplo: S e O), enquanto outros elementos químicos (exemplo: Al, Mn e Ti) atuariam de forma indireta controlando o teor de elementos tenso-ativos livres. Dessa forma, o movimento convectivo apresentaria sentido descendente no centro da poça de fusão, elevando a transferência de calor para o fundo da poça e fundindo o metal dessa região. Na literatura, esse mecanismo é comumente referenciado como efeito

Marangoni, em homenagem ao físico italiano Carlo Marangoni, que foi um estudioso do fenômeno no século XIX.

- Teoria de Lowke, Tanaka e Ushio (2005): esse modelo baseia-se no efeito isolante do fluxo. Nele, a presença de fluxos na superfície da peça elevaria a resistência elétrica do meio, tornando o arco mais estreito, o que levaria a uma maior densidade de corrente no ponto de arco, resultando numa maior penetração.

SÁNDOR e colaboradores (2012) apresentam algumas críticas e reflexões sobre esses modelos mencionados. Segundo eles a Teoria de Simonik (1976) estabelece um mecanismo coerente nos casos em que a condutividade elétrica do arco ocorre, principalmente, por íons, entretanto estudos demonstram que são os elétrons, e não os íons, os principais responsáveis pela condutividade elétrica no arco em temperaturas acima de 4500 K (4223 °C). Sobre a teoria de Savitskii e Leskov (1980), SÁNDOR e colaboradores (2012) não acreditam que essa teoria justifique a diferença vista entre o TIG e o A-TIG tendo como base resultados experimentais realizados anteriormente por eles.

Atualmente o efeito Marangoni (Teoria de Heiple e Roper, 1982) é o mais adotado para se justificar a elevação da penetração observada em A-TIG com fluxos que contém óxidos em aços inoxidáveis austeníticos, sendo a sua ocorrência também citada para a soldagem A-TIG de ligas de magnésio dentre outros (MODENESI, 2013). Sándor e colaboradores (2012) mencionam que esse mecanismo é confirmado nos casos em que o oxigênio é fornecido por um fluxo ou por um gás. Além disso, mudanças na convecção do metal líquido contido na poça de fusão foram evidenciadas através de diversas técnicas para observação do comportamento da poça de fusão, como a filmagem da superfície da poça, com e sem o uso de traçadores (DONG et al. 2004) e videoradiografia (DONG et al. 2004) (Zhang et al. 2011). Existem ainda algumas propostas, que consideram alguns dos mecanismos citados anteriormente atuando conjuntamente para os fenômenos observados em A-TIG em relação ao TIG convencional.

Os fluxos podem ser aplicados de diversas formas na soldagem MIG/MAG, como através de tratamento químico superficial do eletrodo com essas substâncias (PARSHIN e LENIVKI,

2012; PARSHIN, 2012; PARSHIN, 2013) e na deposição de fluxos pulverizados ao longo da linha da junta (HUANG, 2010; LIN, 2012; RUAN *et al.*, 2012; ZHANG e CAO, 2012; LIN e YAN, 2014; PATEL, CHOUDHARY e PATEL, 2014; PATEL e PATEL, 2015).

O recobrimento de eletrodos consumíveis com fluxos ativos esteve associado a variações em diversos parâmetros operacionais, como o tempo entre os curtos-circuitos, diâmetro da gota, frequência de gotejamento, tensão no arco e corrente, além da geometria e propriedades do cordão de solda. Segundo PARSHIN esses efeitos se devem à capacidade dos fluxos em afetar os parâmetros termodinâmicos do arco, aumento do gradiente da concentração de íons no volume do arco de soldagem e a redução da tensão superficial do metal fundido. Sobre essa tecnologia, observou-se também uma elevação da produtividade na soldagem MIG, superior a da soldagem MAG.

A aplicação de fluxos ativos ao longo da linha da junta no processo MIG/MAG é recente. Diversos pesquisadores estudaram essa aplicação nas soldagens TIG, arco de plasma, laser entre outros, mas poucos trabalhos têm sido feitos sobre o processo MIG/MAG (HUANG, 2010).

Em 2001, WANG e TSAI apresentaram uma simulação matemática envolvendo os efeitos de elementos superficiais ativos na soldagem MIG/MAG, no modelo foi incluído o gotejamento (transferência metálica) para a poça de fusão, sendo os efeitos previstos com alguma semelhança aos observados em A-TIG, contudo não houve referência de validação de resultados através de testes experimentais. Em 2010, HUANG estudou os efeitos da aplicação de fluxos ativos (Fe_2O_3 , SiO_2 e MgCO_3) nas características de uma junta soldada por MIG/MAG. Nesse trabalho, investigou-se o efeito dos fluxos ativos sobre a geometria do cordão de solda, a distorção angular e propriedades mecânicas de juntas de aço carbono SAE 1020. Posteriormente, ZHANG e CAO (2012) estudaram o comportamento da transferência de metal na soldagem MIG de uma liga de magnésio com e sem a aplicação de fluxos ativos (KCl, CaCl_2 , TiO_2). RUAN *et al.* (2012) desenvolveu um trabalho sobre as propriedades mecânicas e microestruturais de uma junta soldada por soldagem MIG com eletrodo duplo, de uma liga da série Al-Mg-Si denominada 6082-T6 e deposição do fluxo de

SiO₂. LIN (2012) abordou a otimização do desempenho da soldagem dissimilar de um aço inoxidável JIS SUS304 e um aço de baixo carbono SAE 1020, utilizando fluxos ativos (MoS₂ e MoO₃). Mais recentemente, LIN e YAN (2014) desenvolveram um estudo envolvendo a avaliação do efeito de cinco componentes de fluxo (MgO, ZnO, SiO₂, MoS₂ e Na₂CO₃) na penetração do cordão de solda durante o processo MIG/MAG, utilizando uma liga de alumínio 6061. PATEL, CHOUDHARY e PATEL, em 2014, apresentaram uma revisão bibliográfica sobre o aperfeiçoamento do processo de soldagem MIG/MAG através da aplicação de fluxos e do método Taguchi. No ano seguinte, PATEL e PATEL (2015) apresentaram um trabalho sobre a soldagem de um aço inoxidável SS 304, em que foram alterados alguns parâmetros (corrente, tensão e velocidade de soldagem) na soldagem MIG/MAG com e sem a aplicação dos fluxos carbonato de magnésio, MgCO₃, e dióxido de titânio, TiO₂.

3.2.2 Descrição do processo A-MIG/MAG

A principal característica da soldagem A-MIG/MAG é a aplicação de um fluxo à superfície do material da junta com posterior soldagem pelo processo MIG/MAG convencional. Caso o gás de proteção utilizado contenha apenas gases inertes sugere-se a denominação A-MIG, para os demais casos acredita-se que a denominação, genérica, A-MIG/MAG seja mais coerente. De uma forma geral, pode-se descrever a soldagem A-MIG/MAG, ou A-MIG, conforme o ilustrado na figura 3.11. Como potenciais efeitos da aplicação desses fluxos acredita-se que as variações de tensão e corrente durante a soldagem possam ser alterados, assim como alguns parâmetros geométricos do cordão de solda, como, por exemplo, foi relatado por HUANG (2010): a elevação da penetração do cordão de solda.

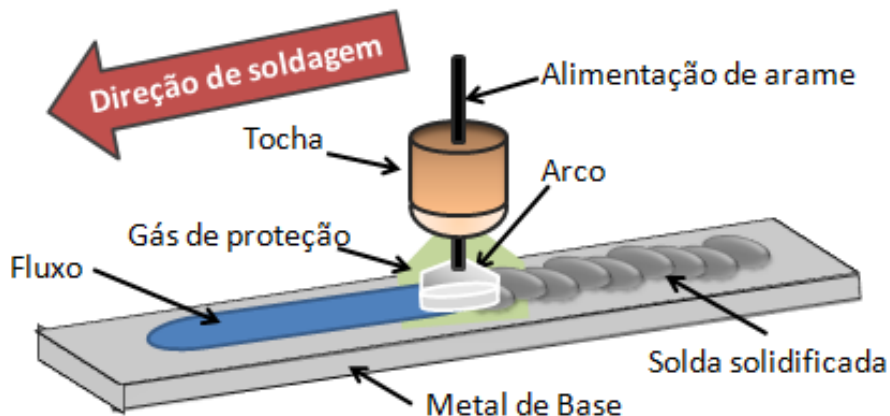


Figura 3.11 Esquema representativo da soldagem pelo processo MIG/MAG de um corpo de prova em que foi depositado uma camada de fluxo ativo.

MODENESI (2013), comentando sobre a soldagem A-TIG, menciona que um fluxo ativo para uso em aço inoxidável é constituído principalmente por óxidos e haletos na forma de um pó fino disperso em solvente orgânico. Geralmente o solvente utilizado é a acetona e essa se evapora em poucos segundos deixando uma camada de fluxo sobre a superfície. É necessária uma pequena quantidade de fluxo para afetar o arco e a poça de fusão, no caso da soldagem A-TIG, por isso a aplicação de uma camada com poucas dezenas ou centenas de micrometros de espessura é suficiente (TWI, 1995).

Um maior nível de detalhes sobre o tema pode ser obtido através da leitura dos trabalhos encontrados na literatura (WANG e TSAI, 2001; HUANG, 2010; LIN, 2012; RUAN *et al.*, 2012; ZHANG e CAO, 2012; LIN e YAN, 2014; PATEL, CHOUDHARY e PATEL, 2014; PATEL e PATEL, 2015) envolvendo a aplicação de fluxos ativos no processo MIG/MAG, ou pela denominação GMAW.

3.2.3 Efeitos do fluxo ativo

LUCAS (2000) comentando sobre o processo TIG, menciona algumas vantagens atribuídas à adoção do processo com fluxos ativos em relação ao processo convencional, sendo algumas delas o aumento da penetração e redução da contração e distorção da solda. Alguns autores (HOWSE e LUCAS, 2000; KUMAR *et al.*, 2009) consideram que a produtividade do

processo TIG pode ser elevada pela aplicação de fluxos ativos, isso pode ser associado a redução do tempo demandado para a atividade soldagem pela diminuição do número de passos ou pela elevação da velocidade de soldagem. Esse fato foi confirmado em um trabalho de VILARINHO e colaboradores (2009).

Alguns estudos (HUANG, 2010; ZHANG e CAO, 2012) sugerem que o uso de fluxos na soldagem MIG/MAG pode afetar a geometria do cordão de solda, o perfil do arco, as propriedades mecânicas do metal de solda e a intensidade da distorção angular da peça.

WANG e TSAI (2001) apresentaram um trabalho através da simulação matemática do fluxo de fluidos e da transferência de calor, massa e de momento relacionado a soldagem MIG/MAG. O modelo considera o efeito da transferência de metal e a possibilidade de convecção por efeito Marangoni. Os fenômenos e parâmetros inseridos no modelo se basearam no efeito de elementos ativos na soldagem A-TIG ao MIG/MAG. Os resultados obtidos na simulação previam que o efeito de elementos em MIG/MAG apresentaria uma tendência semelhante ao observado em A-TIG. O estudo indicou que a quantidade de movimento transferida pela queda das gotas de metal à poça de fusão tenderia a ser absorvida e atenuada na poça, contribuindo menos que a força relativa à tensão superficial na penetração do cordão. Além disso foram previstas alterações no perfil do cordão de solda de acordo com a concentração de enxofre presente nas gotas transferidas à poça de fusão. O trabalho não indica se os resultados da simulação foram validados por ensaios laboratoriais. Acredita-se que a previsão de comportamento semelhante entre A-TIG e A-MIG/MAG se deve às considerações teóricas e parâmetros inseridos no modelo matemático do autor, que considera a influência da tensão superficial no fluido como o principal fator responsável pelo fluxo na poça de fusão e na penetração do cordão de solda sem contudo simular outros efeitos propostos por outras teorias

HUANG (2010) estudou a aplicação de fluxos ativos (Fe_2O_3 , SiO_2 e MgCO_3) na soldagem MIG/MAG de uma junta de aço carbono AISI 1020 pelo processo MIG/MAG e evidenciou alguns dos efeitos descritos para A-TIG. O gás de proteção adotado foi o argônio e as quantidades médias de fluxos depositados foram de $22,6 \text{ mg/cm}^2$ de óxido de ferro III

(Fe₂O₃), 10,4 mg/cm² de dióxido de silício (SiO₂) e 11,7 mg/cm² de carbonato de magnésio (MgCO₃). Segundo ele, os fluxos de Fe₂O₃, SiO₂ e MgCO₃ foram capazes de elevar a área da seção transversal do cordão e a penetração do cordão de solda, conforme pode ser observado na Figura 3.12 Efeito de fluxos ativos na morfologia dos cordões de solda em aço carbono (Adaptado de HUANG, 2010). Outros efeitos associados a aplicação do fluxos foram percebidos, como a elevação da resistência da junta à tração e uma significativa redução da distorção angular.

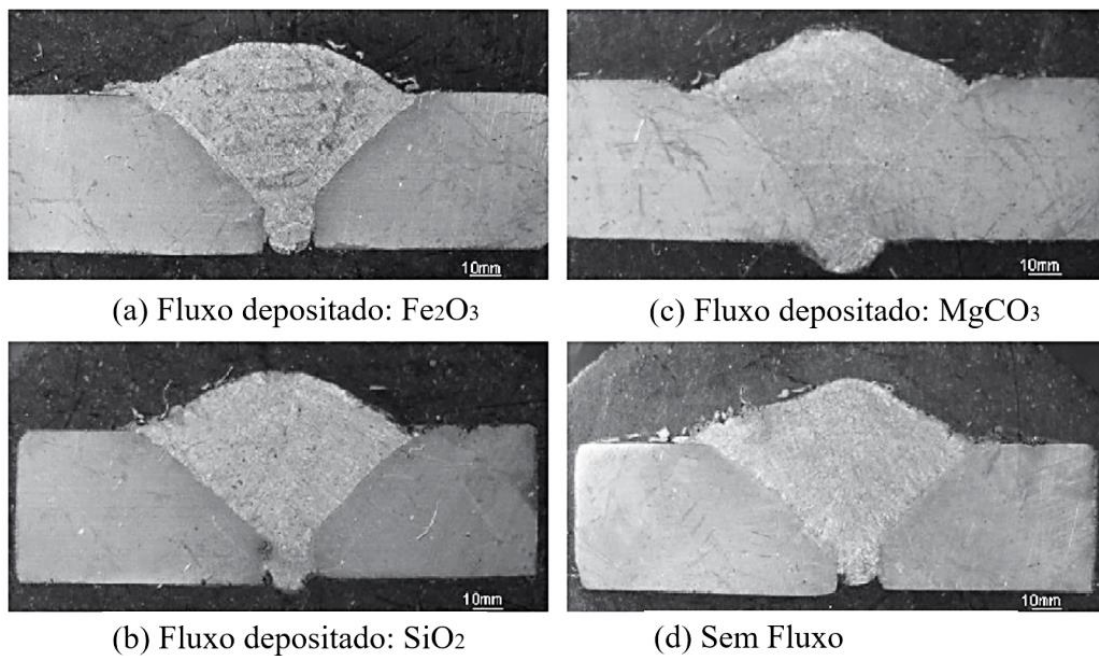


Figura 3.12 Efeito de fluxos ativos na morfologia dos cordões de solda em aço carbono (Adaptado de HUANG, 2010)

RUAN *et al.* (2012) desenvolveu um trabalho sobre as propriedades mecânicas e microestruturais de uma junta soldada de uma liga da série Al-Mg-Si (6082-T6) por soldagem MIG com eletrodo duplo e fluxo de SiO₂. Comparando-se os resultados das juntas soldadas com e sem fluxo, não foram encontradas evidências de diferenças perceptíveis entre as microestruturas, superfícies de fratura, microdureza e resistência da junta. Contudo, a região em que foi aplicado o fluxo aparentou ter uma ZTA um pouco mais larga, além de uma elevação da penetração do cordão de solda em 26%. A figura 3.13 ilustra as macrografias com e sem fluxo de SiO₂ da junta. Nelas pode-se perceber o efeito da aplicação do fluxo na

penetração do cordão de solda. Os autores sugeriram que a constrição do arco e a maior temperatura seriam os principais agentes que influenciaram os resultados observados.

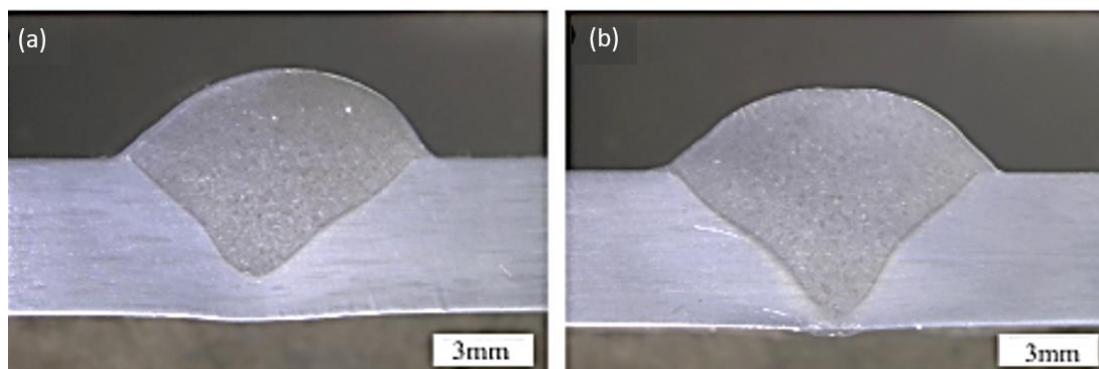


Figura 3.13 Macrografias das juntas (a) sem aplicação do fluxo de SiO_2 , (b) com aplicação do fluxo de SiO_2 . (Adaptado de RUAN *et al.*, 2012).

ZHANG e CAO (2012) investigaram os efeitos da aplicação de fluxos ativos (KCl , CaCl_2 , TiO_2) na soldagem MIG de uma liga de magnésio AZ61, em relação a transferência metálica e a perda por respingos. A comparação entre os resultados com e sem a aplicação de fluxos indicaram que o cloreto de potássio tende a elevar a estabilidade do processo e a reduzir a perda por respingos, enquanto que o cloreto de cálcio tende a elevar o período de transferência metálica e a perda por respingos, já para o dióxido de titânio não foram observadas alterações significantes. Fotos do comportamento da transferência metálica para cada conjunto de testes com os seus respectivos tempos são apresentados na figura 3.14. Nela percebe-se uma elevação do tempo de transferência metálica ao se utilizar CaCl_2 como fluxo e uma redução com KCl em comparação a soldagem sem fluxos. A alteração na transferência metálica na soldagem MIG com aplicação de KCl foi justificada pela elevação da força eletromagnética oriunda do aumento da corrente de soldagem, conforme o ilustrado na figura 3.15. Além disso, baseado nos efeitos provocados pelo cloreto de potássio e o cloreto de cálcio, eles afirmaram que a condutividade no arco pode ser afetada pelos cátions metálicos e pelo ânion cloreto presentes em ambos os fluxos.

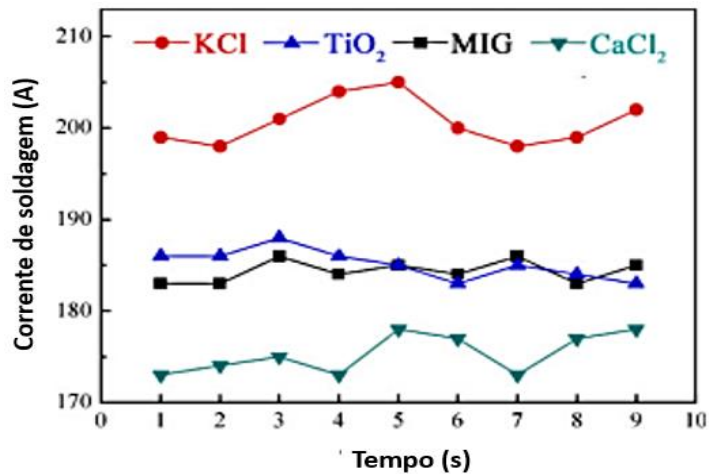


Figura 3.14 Variação da corrente de soldagem na soldagem MIG sem e com a aplicação de fluxos ativos. (Adaptado de ZHANG e CAO, 2012)

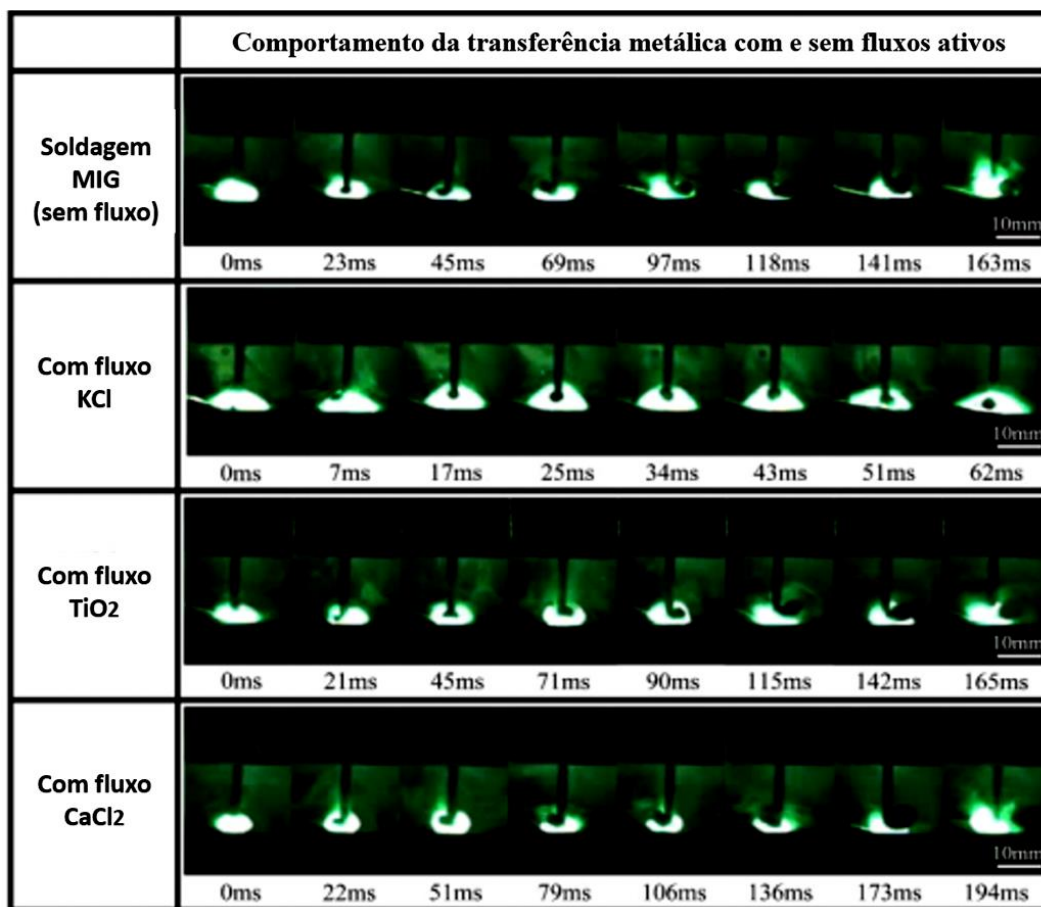
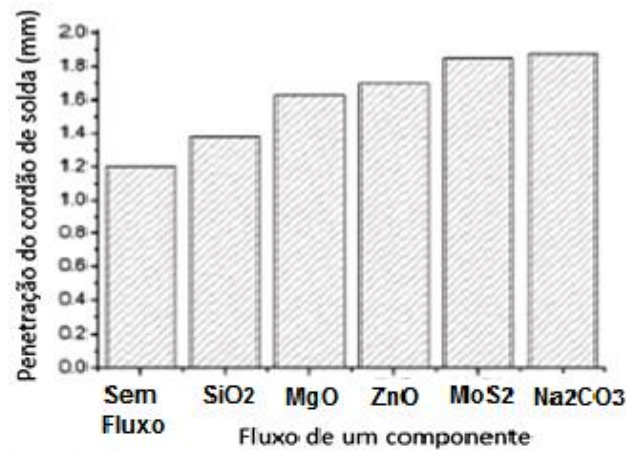
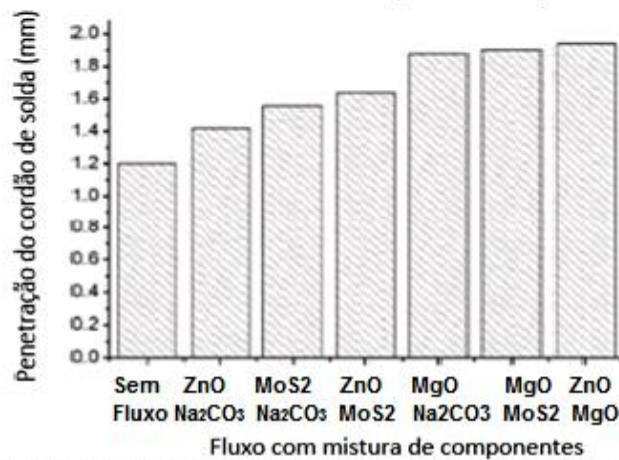


Figura 3.15 Comportamento da transferência metálica na soldagem MIG com e sem a aplicação de fluxos ativos. (Adaptado de ZHANG e CAO, 2012)

LIN e YAN (2014) apresentaram um trabalho de otimização da geometria do cordão de solda, utilizando uma chapa de liga de alumínio 606, através da aplicação de cinco fluxos de componente único (SiO_2 , MgO , ZnO , MoS_2 , Na_2CO_3) sobre a junta. Todos eles afetaram a penetração do cordão, elevando-a, sendo o carbonato de sódio o que resultou na maior penetração. Baseados nesses dados elaboraram-se misturas de dois componentes para avaliação. Nessa etapa a aplicação da mistura de dois componentes composta por 50% óxido de zinco II (ZnO) e 50% óxido de magnésio (MgO) foi a que proporcionou o maior aumento na penetração do cordão no processo avaliado, conforme pode-se observar na figura 3.16.



(a) Efeito de fluxos de um único componente na penetração



(b) Efeito da fluxos com mistura de componentes na penetração

Figura 3.16 Efeito do fluxo ativo na penetração do cordão de solda. (Adaptado de LIN e YAN, 2014)

PATEL, CHOUDHARY e PATEL (2014) relataram em sua revisão bibliográfica os potenciais usos da soldagem MIG/MAG com a aplicação de fluxos e a possibilidade de utilização do método Taguchi, para se encontrar os parâmetros ótimos que melhorem o desempenho de soldagem. No ano seguinte, PATEL e PATEL (2015) relataram os efeitos ocasionados na soldagem GMAW de um aço inoxidável SS 304 pela aplicação de dois fluxos ($MgCO_3$ e TiO_2), alterando-se os parâmetros corrente, tensão e velocidade de soldagem na soldagem. Os autores comentaram que esses três parâmetros afetaram a penetração do cordão de solda. A configuração ótima de soldagem encontrada, dentro da faixa de variáveis exploradas no trabalho, contemplou a aplicação do fluxo $MgCO_3$.

4 METODOLOGIA

4.1 Introdução

Através da revisão bibliográfica feita, percebe-se que a literatura sobre a soldagem MIG/MAG com aplicação de fluxos ativos é relativamente escassa, particularmente se comparada com a disponível sobre a soldagem A-TIG. A maioria dos trabalhos publicados sobre o tema analisaram um pequeno número de compostos químicos e focaram na avaliação das características do cordão de solda. Neste contexto, o planejamento do presente trabalho procurou contemplar uma etapa de testes exploratórios, com avaliação do efeito de diversos fluxos simples, de um único componente, em sinais elétricos de operação da soldagem MIG/MAG e nas características geométricas do cordão de solda. Seguido de uma etapa complementar, com dois fluxos selecionados, para avaliação de seus efeitos sob variação de tensão de soldagem.

4.2 Programa Experimental

A metodologia experimental estabelecida neste trabalho procurou avaliar os efeitos de fluxos em aspectos operacionais da soldagem GMAW de um aço de baixo carbono, SAE 1020. A figura 4.1 apresenta o fluxograma da metodologia adotada. Percebem-se, em a), os blocos de testes e, em b), alguns procedimentos padrões adotadas em cada bloco de teste. Na etapa inicial, foram realizados testes com nove diferentes compostos, candidatos a fluxo, que, sob as mesmas condições de soldagem, foram avaliados quanto aos efeitos produzidos no cordão de solda e nos parâmetros elétricos de operação do processo. Para essa etapa, foi usada uma tensão de referência de 24 volts, o que juntamente com outros parâmetros pré-estabelecidos resultou em uma operação com transferência via curto-circuito. Esta etapa permitiu diferenciar a influência dos fluxos simples na operação de soldagem e no formato do cordão, além de permitir a seleção de dois compostos para uma avaliação complementar com variação da tensão de soldagem e do modo de transferência metálica.

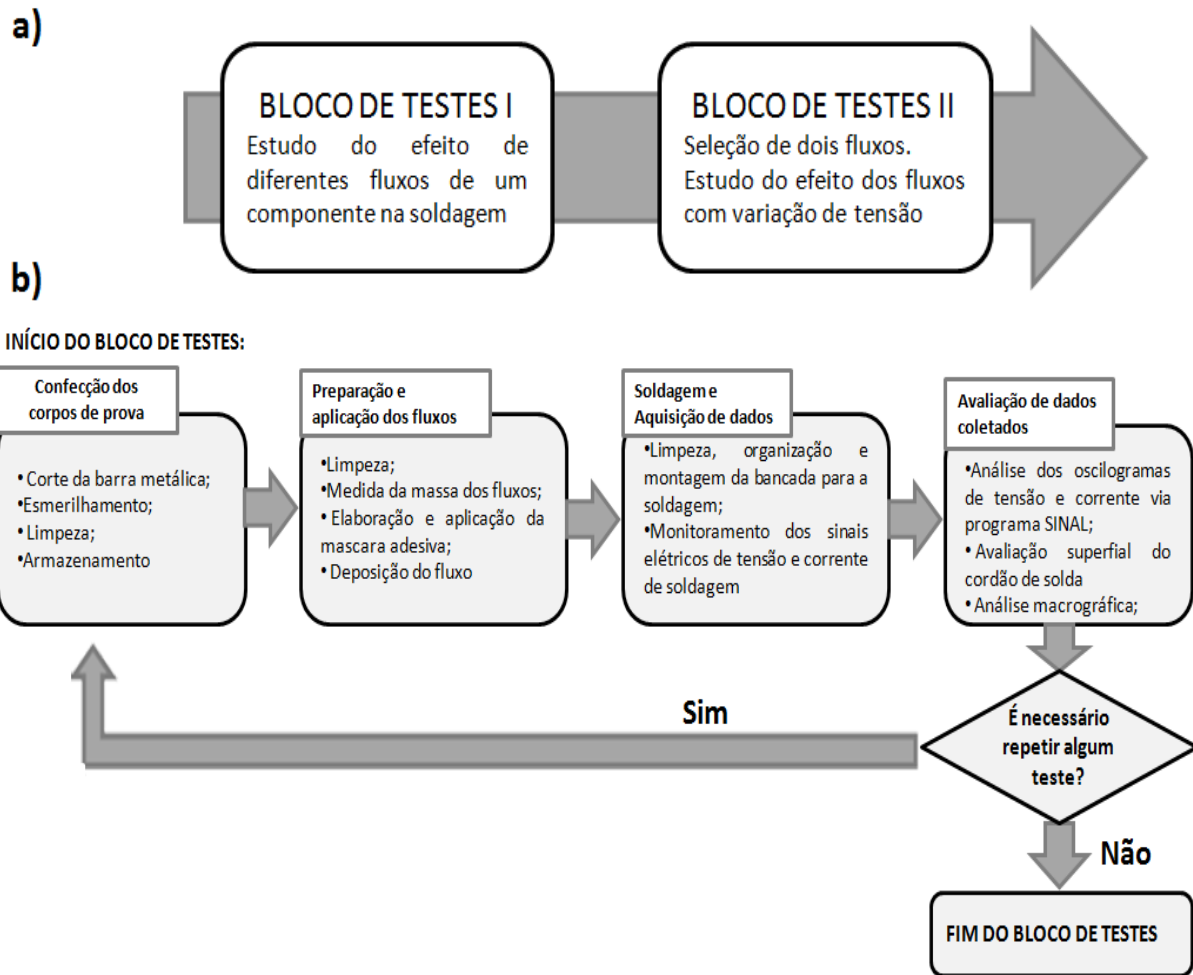


Figura 4.1 Fluxograma representativo da metodologia utilizada, em a) os blocos de testes e em b) alguns procedimentos padrões adotadas em cada bloco de teste.

Ao final de cada procedimento e bloco de testes foram feitas inspeções para se avaliar a qualidade dos resultados obtidos.

4.3 Materiais e Métodos

4.3.1 Materiais

Os compostos estudados na etapa inicial de experimentos foram o óxido de alumínio III (Al_2O_3), carbonato de cálcio (CaCO_3), fluoreto de cálcio (CaF_2), óxido de cromo III (Cr_2O_3), óxido de ferro III (Fe_2O_3), perclorato de potássio (KClO_4), fluoreto de sódio (NaF), dióxido de silício (SiO_2) e o dióxido de titânio (TiO_2). Alguns destes compostos foram fornecidos por

uma empresa nacional fabricante de insumos para a soldagem (ESAB Comércio e Indústria Ltda) e outros eram materiais de pureza analítica obtidos no Laboratório de Análises Químicas, Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG. Esses materiais foram selecionados por não serem higroscópicos (por não absorverem umidade, apresentando massa constante durante e após a pesagem) e serem componentes geralmente utilizados na fabricação de eletrodos revestidos.

Para a confecção dos corpos de prova foram utilizadas barras de aço de baixo carbono (SAE1020) com espessura 9,5 mm (3/8”) e largura de 51 mm (2”), além de um líquido refrigerante para o corte. O arame usado nos testes de soldagem foi da classe AWS A5.18 ER70S6 com bitola de 1,2 mm. A tabela IV.1 mostra a composição química típica deste arame. No procedimento de limpeza dos corpos de prova e na deposição de fluxos sobre eles utilizou-se acetona de pureza analítica (P.A.). Materiais diversos, incluindo, por exemplo, algodão, papel higiênico, folhas de alumínio, lixas e reativos para metalografia (ácido nítrico e álcool etílico) foram utilizados nas etapas de preparação dos corpos de prova e caracterização da solda.

Tabela IV.1 Teor percentual em massa de alguns elementos químicos típicos do eletrodo consumível utilizado nos experimentos. (Extraído de LINCOLN ELECTRIC®, 2017)

	C	Mn	Si	S	P	Cu	Ni	Cr	Mo
Eletrodo consumível	0,086	1,57	0,86	0,012	0,014	0,018	0,019	0,016	0,006

4.3.2 Equipamentos e montagens

No preparo dos corpos de prova para a soldagem e a deposição de fluxos, foram necessários uma serra mecanizada e esmerilhadeira com disco para desbaste. Ainda nessa etapa utilizou-se uma balança analítica digital Bioprecisa FA2104N com precisão de 1×10^{-4} g, para a pesagem da quantidade de fluxo adequada a cada teste, um béquer de 100 mL, um contagotas, uma ferramenta de corte desenvolvida no laboratório para a confecção de máscaras adesivas para a deposição de fluxos, uma haste metálica dentre outros utensílios ilustrados

na figura 4.2. Uma vez preparadas, estas máscaras continham uma abertura de área conhecida (1000 mm^2) que permitia preparar camadas de fluxo com densidade superficial controlada nos corpos de prova para soldagem.



Figura 4.2. Materiais utilizados na preparação das máscaras adesivas e aplicação de fluxos sobre o corpo de prova.

Para a soldagem utilizou-se uma fonte eletrônica multiprocessos Digitec 600 da IMC Soldagem operando em tensão constante. Para o deslocamento da tocha utilizou-se uma tartaruga de máquina de corte portátil MC 46 – *White Martins* (dispositivo de deslocamento), com controle de velocidade. A calibração da velocidade desse equipamento foi feita para assegurar o valor real da velocidade de soldagem, utilizando-se uma régua e um cronometro. A figura 4.3 apresenta um esquema da montagem experimental utilizada.

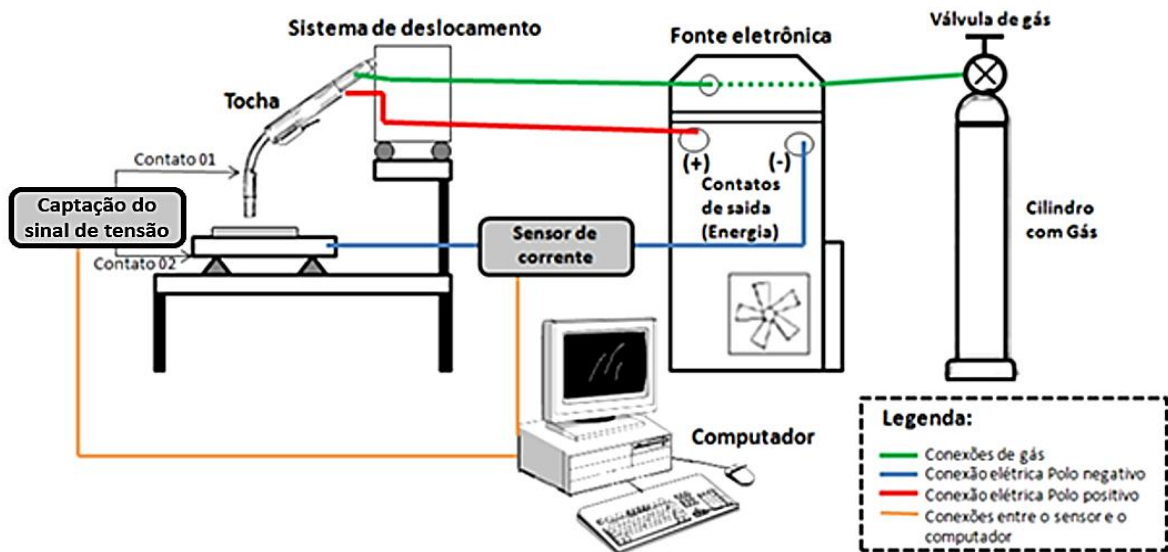


Figura 4.3 Representação esquemática da montagem experimental para as soldagens A-MIG/MAG.

O monitoramento dos sinais elétricos durante a soldagem foi feito através de um sistema de aquisição de dados, composto por um microcomputador equipado com uma placa de aquisição de dados da *Advantech* (modelo PCI 1714S) e *software* PCI 1714S da mesma empresa juntamente com um sensor de corrente por efeito *Hall* da marca *Beckman Industrial* (modelo CT 233, 600A AC/DC) e um divisor de tensões. Este último foi construído no próprio Laboratório de Soldagem para adequar o valor da tensão de soldagem ao requerido pela placa de aquisição de dados. Para avaliação, processamento e análise dos sinais captados utilizou-se o programa *SINAL*, desenvolvido no laboratório. A disposição desses equipamentos segue o esquema ilustrado na figura 4.3.

Na etapa de caracterização macro estrutural da solda, utilizou-se uma serra mecanizada, uma escova de aço, lixas (nº 220, 320, 400 e 600), politrizes de bancada e paquímetro calibrado. As imagens das seções dos cordões de solda foram registradas com uma máquina digital *Canon Rebel XTI* com lente de macro, que foram analisadas com o auxílio do programa *ImageJ* versão 1.48 (RASBAND, 2015).

4.4 Preparação dos corpos de prova e do fluxo

A metodologia adotada neste trabalho para o preparo dos corpos de prova e deposição de fluxos é uma versão adaptada da metodologia para A-TIG adotada por OLIVEIRA (2007) e PANDOLFI (2016) ao processo A-MIG/MAG, com corpos de prova em aço carbono. A análise de resultados baseou-se também em trabalhos de outros autores (HUANG, 2010; ZHANG e CAO, 2012; LIN, 2012; LIN e YAN, 2014), que utilizaram fluxos ativos no processo GMAW.

A preparação dos corpos de prova para a soldagem foi realizada em algumas etapas: corte e acabamento do corpo de prova, preparo da máscara adesiva, pesagem e aplicação do fluxo sobre o corpo de prova. Assim, inicialmente, cortaram-se as barras de aço carbono, de seção transversal 51 mm por 9,5mm, em corpos de prova de dimensões 51 mm, 170 mm e 9,5 mm para etapa de soldagem. A figura 4.4 ilustra as dimensões finais de um corpo de prova. Com as dimensões adequadas, ele foi esmerilhado, para a retirada da carepa superficial, seguido pela sua identificação e armazenagem em ambiente limpo e seco, para posterior aplicação do fluxo e execução de testes de soldagem. Durante o esmerilhamento, tomou-se a precaução em se obter um acabamento superficial o mais homogêneo possível para todos os corpos de prova produzidos.

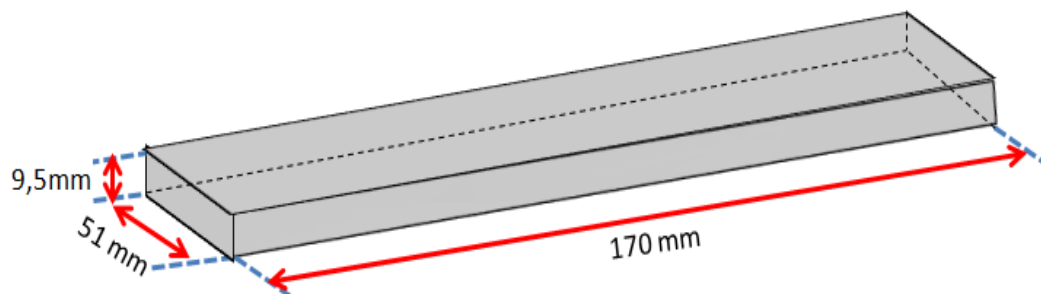


Figura 4.4 Representação esquemática das dimensões do corpo de prova.

Para cada composto químico selecionado mediu-se quantidades individuais de 80 mg, em balança analítica, com posterior armazenagem em papel alumínio até o momento de sua aplicação sobre um corpo de prova. Essa massa foi estabelecida tendo como base trabalhos

com A-TIG (MODENESI *et al.*, 2013; PANDOLFI, 2016), em que a razão de massa pela área de deposição encontrava-se na faixa de 7,5 a 120 g/m². Supondo que o processo MIG/MAG propicie condições de soldagem menos estáveis que as observadas em TIG e que para isso necessite de uma maior quantidade de fluxo aplicado para tornar efeitos mais evidentes, estabeleceu-se a quantidade de 80 g/m² como valor padrão. Essa quantidade foi aplicada em todos os experimentos feitos.

Na fase de aplicação do fluxo, selecionou-se um corpo de prova devidamente esmerilhado, ele foi limpo superficialmente com papel higiênico embebido em acetona de pureza analítica (P.A.). Paralelamente a isso, preparou-se uma máscara adesiva (delimitadora da área de aplicação de fluxo) através do corte de fita adesiva em um molde desenvolvido para este fim. Em seguida, fixou-se a máscara adesiva na superfície do corpo de prova, selecionou-se um composto embalado e o seu conteúdo foi aplicado com auxílio de uma haste metálica e um conta-gotas contendo acetona.

A massa de fluxo pesada e aplicada sobre a região delimitada pela máscara, com área conhecida (1000 mm²), foi então espalhada de modo a se obter a melhor homogeneidade na distribuição do composto sobre a região de interesse, dentro das possibilidades oferecidas pela técnica adotada. Utilizou-se neste procedimento uma haste metálica e um conta-gotas contendo o líquido, acetona P.A. aplicada com um conta-gotas. Um esquema mostrando o posicionamento da área de aplicação de fluxo sobre o corpo de prova e as dimensões envolvidas pode ser observado na figura 4.5. Após a secagem do fluxo depositado, a máscara foi retirada e descartada. A figura 4.6 ilustra as dimensões de um corpo de prova onde se aplicou Cr₂O₃ em seu lado direito (parte A-MIG/MAG).

Durante a aplicação do fluxo na superfície do corpo de prova, avaliou-se qualitativamente a facilidade em se aplicar cada um deles. Ao final da aplicação, o recobrimento obtido e a homogeneidade da camada de fluxo foram avaliados visualmente.

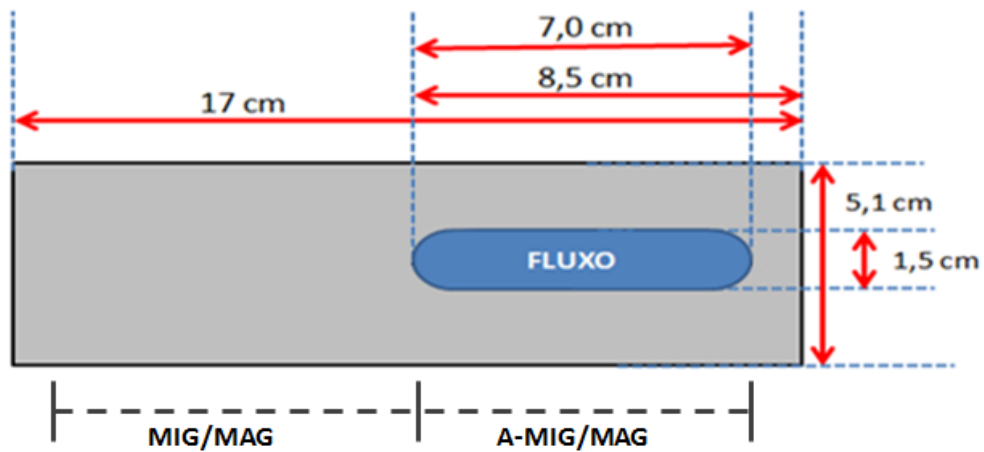


Figura 4.5 Esquema das dimensões utilizadas para a aplicação do fluxo no corpo de prova.

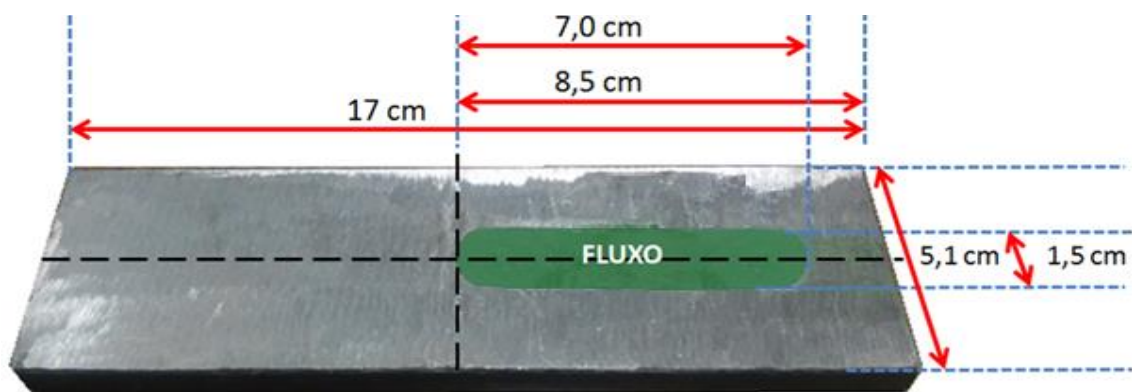


Figura 4.6 Dimensões do corpo de prova em que se aplicou óxido de cromo III na região à direita do corpo de prova.

4.5 Procedimento de Soldagem

Tanto no primeiro quanto no segundo bloco de testes, alguns parâmetros foram mantidos constantes, visando à possibilidade de comparação de resultados. A Tabela IV.2 mostra os parâmetros experimentais fixados, que foram utilizados nos testes iniciais. No segundo bloco de testes, complementares, alterou-se a tensão de soldagem de 24 V, para 20, 28 e 32 V. Essa variação de tensão visou possibilitar a avaliação do efeito de fluxos para condições diferentes de soldagem e de modo de transferência metálica.

Tabela IV.2 Parâmetros de soldagem estabelecidos para a soldagem MIG/MAG com aplicação de fluxos.

Parâmetro	Valor ou condição estabelecido
Distância do bico de contato à peça	14 mm
Velocidade de alimentação de arame	4 m/min
Velocidade de deslocamento	0,5 m/min
Gás de proteção	Ar-18%CO ₂
Vazão	12 ℓ/min
Taxa de aquisição de dados	10.000 medidas por segundo
Indutância*	ks = 10 e kd = 10
Tensão	24 V
Tipo de Corrente	Corrente Contínua (CC)
Polaridade do eletrodo na tocha	Polo positivo (+)
Orientação do eletrodo	Perpendicular ao plano da mesa

* Índices que indicam a taxa de crescimento (ks) e de diminuição (kd) da corrente de soldagem na fonte usada.

Como medida de segurança de proteção coletiva deixou-se o exaustor ligado durante toda a operação de soldagem, para a dispersão de fumos metálicos e gases oriundos dos testes. Além disto, utilizaram-se biombos ao redor do conjunto montado para os experimentos e equipamentos de proteção individual para evitar ou minimizar possíveis efeitos deletérios a saúde.

Considerando a sensibilidade da soldagem MIG/MAG à variação dos parâmetros operacionais, optou-se por precaução e por maior controle dos parâmetros envolvidos, em se planejar as atividades de soldagem com a menor quantidade de dias envolvidos e em condições climáticas semelhantes. Além disso, para diminuir a possibilidade de que possíveis variações influenciem apenas um conjunto de testes, fez-se o sequenciamento aleatório dos testes e réplicas e um tratamento estatístico dos resultados.

4.6 Testes Iniciais

Os testes iniciais de soldagem A-MIG/MAG foram realizados utilizando-se os parâmetros estabelecidos na Tabela IV.2, sendo que as condições experimentais planejadas para esta etapa estão listadas na Tabela IV.3. A sequência de realização desses testes foi aleatória para minimizar a ocorrência de erros sistemáticos.

Tabela IV.3 Condições experimentais dos testes exploratórios de soldagem.

Teste	Fluxo	Concentração (g/m ²)
1	Al ₂ O ₃	80
2		80
3	CaCO ₃	80
4		80
5	CaF ₂	80
6		80
7	Cr ₂ O ₃	80
8		80
9	Fe ₂ O ₃	80
10		80
11	KClO ₄	80
12		80
13	NaF	80
14		80
15	SiO ₂	80
16		80
17	TiO ₂	80
18		80
19	Sem fluxo	-
20		-

Os testes iniciais foram planejados para ocorrer num mesmo dia. As réplicas substitutivas, para suprir possíveis falhas de soldagem, foram feitas num dia posterior, em condições ambientais semelhantes para se evitar ao máximo possíveis influências do meio ambiente na soldagem.

Dentre os fluxos ensaiados, cinco foram selecionados para fazer macrografia da seção transversal do cordão de solda. A escolha dos fluxos se baseou em semelhanças de

composição química (cátions ou ânions em comum), em efeitos nos sinais elétricos de soldagem ou em aspectos geométricos do cordão de solda.

4.7 Testes Complementares

Dentre os compostos testados como fluxos de um componente na etapa anterior, dois foram selecionados, com base em efeitos nos sinais elétricos de soldagem ou nas características geométricas do cordão, para uma avaliação complementar.

Nesta etapa, cada fluxo selecionado foi avaliado quanto às alterações provocadas em relação à soldagem sem aplicação de fluxos, variando-se a tensão de soldagem. As demais configurações adotadas nos testes iniciais mantiveram fixas. Avaliaram-se, também, as possíveis alterações no modo de transferência metálica, como curto-circuito e globular. A Tabela IV.4 apresenta as condições de ensaio estabelecidas para avaliação do efeito da variação da tensão de soldagem nos dois fluxos selecionados. A sequência de realização desses testes foi determinada de maneira aleatória.

Tabela IV.4 Ensaio para avaliação do efeito do nível de tensão no processo da variação da tensão de soldagem nos fluxos selecionados para ensaios complementares.

Níveis de tensão	Velocidade de Alimentação	Gás de proteção
20 V	4 m/min	Ar-18%CO ₂
24 V	4 m/min	Ar-18%CO ₂
28 V	4 m/min	Ar-18%CO ₂
32 V	4 m/min	Ar-18%CO ₂

4.8 Aquisição de dados e análise de resultados

Durante os experimentos foram feitas anotações e fotografias para realçar eventuais alterações nas condições de soldagem. Essas avaliações qualitativas contemplaram a percepção da intensidade da luz oriunda do arco elétrico, aspecto da escória formada,

quantidade de respingos e de fumos metálicos gerados. Informações mais precisas sobre o efeito dos fluxos foram obtidas através dos sinais elétricos coletados durante a execução da solda e das características do cordão de solda (dimensões e aspecto superficial), considerando um devido tratamento estatístico de dados.

4.8.1 Sinais elétricos

Ao término de cada uma das duas etapas experimentais descritas nas seções 4.5 e 4.6, os sinais elétricos coletados foram analisados com um programa desenvolvido no LRSS/LabSEND, denominado programa SINAL. Através deste programa os dados foram visualizados na forma de oscilogramas de corrente e tensão de soldagem, que possibilitou uma melhor percepção dos efeitos associados à aplicação de fluxos.

O sistema de aquisição de dados de tensão e corrente de soldagem foi configurado para a captura de dados durante 16 segundos. Após o posicionamento da tocha, o início do seu deslocamento e a abertura do arco elétrico, iniciava-se a coleta de dados. Para fins de análise via programa SINAL, decidiu-se descartar os primeiros dois segundos dos oscilogramas colhidos, pois estes poderiam apresentar alterações devido a possíveis instabilidades iniciais do processo após a abertura do arco. Além disso, considerou-se como período representativo para cada condição de soldagem uma fração de tempo de 4 segundos. Seguindo essa consideração, a fração de tempo considerada no oscilograma para a parte sem fluxo (parte MIG/MAG) foi um trecho de 4 segundos, em seguida desconsiderou-se 3 segundos devido ao trecho de transição, e continua-se a avaliação da parcela com fluxo (A-MIG/MAG) por um período de 4 segundos. Acredita-se que essa metodologia, ilustrada na figura 4.7, possibilite a análise das frações dos oscilogramas mais representativos da soldagem, contemplando os trechos sem fluxos (MIG/MAG) e com ele (A-MIG/MAG).

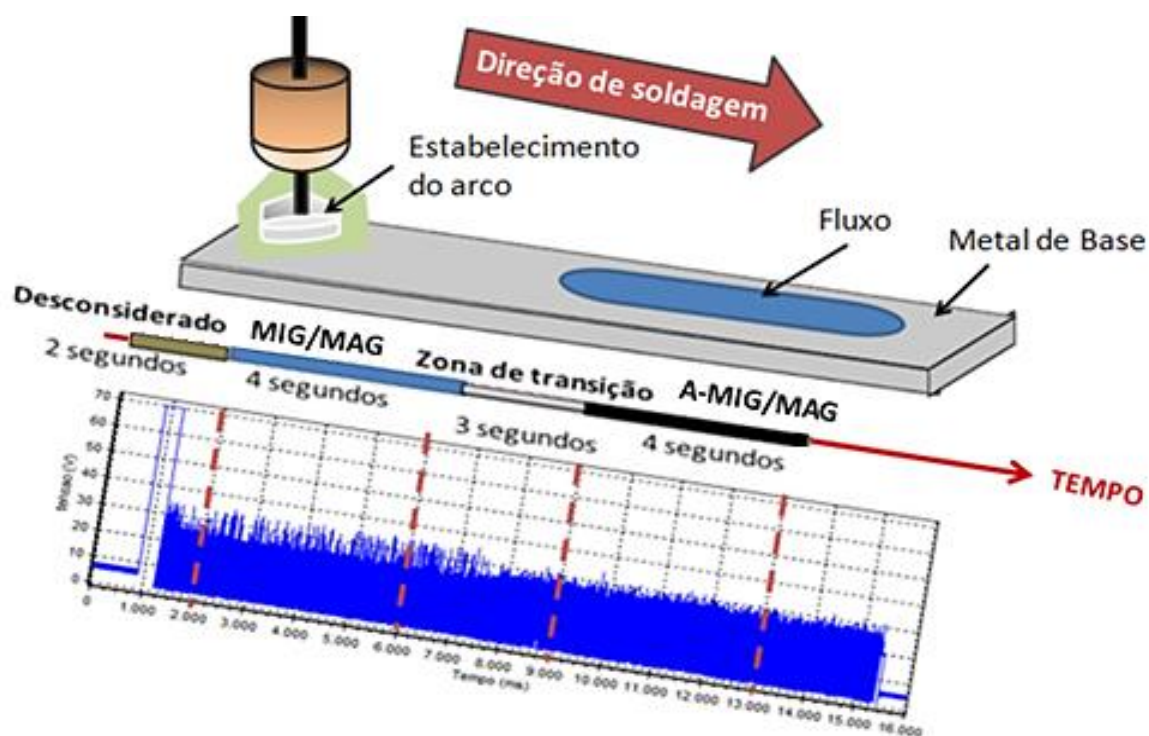


Figura 4.7 Esboço dos períodos de tempo analisados com o programa SINAL em relação as dimensões do corpo de prova, em detalhe um oscilograma de tensão.

Através do programa SINAL e dos oscilogramas coletados foram calculados alguns parâmetros para estudo, como os valores médios de tensão e de corrente de soldagem e os seus respectivos desvios padrões, os tempos de transferência, as tensões e correntes médias nos períodos de arco e de curto-circuito, a resistência elétrica do eletrodo durante os curtos-circuitos e a soma das quedas de tensão catódica e anódica.

Os procedimentos e a fundamentação para a obtenção de diversos parâmetros apresentados neste trabalho podem ser encontrados em MODENESI *et al.* (2011), alguns deles serão descritos a seguir.

Os valores médios de duração do ciclo de transferência (tempo entre o início de dois curtos-circuitos consecutivos, T) e dos tempos de arco e curto-circuito (Tcc) foram calculados nos dados de tensão por uma rotina do programa Sinal. Esta usa uma tensão de referência especificada pelo usuário para separar a operação em arco (com tensões superiores à de

referência) da operação em curto-circuito (com tensões inferiores à de referência). A tensão de referência foi obtida através do histograma do número de pontos captados em cada faixa de tensão e, em geral, o seu valor foi de aproximadamente 15 V.

O fator de curto-circuito (F_{cc}) foi calculado através da equação 4.1, com os tempos obtidos pelo processamento do sinal de tensão, mencionado no parágrafo anterior. Este fator indica a porcentagem da duração de um ciclo de transferência metálica em que o eletrodo permanece em contato com a poça de fusão. O seu valor tende a zero quando a tensão de operação é elevada e a transferência tende a ocorrer por queda livre, já em valores percentuais elevados o modo de transferência metálica ocorre por contato.

$$F_{cc} = \frac{T_{cc}}{T} \times 100\% \quad (4.1)$$

Nesta equação, T_{cc} é o tempo médio de curto-circuito, referente à duração média dos curtos, e T é a duração média do ciclo de transferência metálica.

A resistividade do eletrodo (p_e) durante os períodos de curto-circuito foi calculada pela equação 4.2. Para este cálculo, foi necessário obter valores da resistência elétrica do circuito durante os períodos de curto-circuito. MODENESI *et al.* (2011) considera que a resistência medida nos períodos de curto-circuito engloba a resistência elétrica do eletrodo (R_e), a resistência média de soldagem durante os períodos de curto-circuito (R_{cc}), a resistência de contato eletrodo/poça (R_p) e a resistência de contato entre o bico e o arame (R_c). No presente trabalho, estas duas últimas foram consideradas como nulas.

$$p_e = R_e \times \frac{A}{s} = (R_{cc} - R_c - R_p) \times \frac{A}{s} \quad (4.2)$$

Onde, p_e é resistividade elétrica de um eletrodo em condições de curto-circuito durante a soldagem, R_e é a resistência elétrica do eletrodo, R_{cc} é a resistência média de soldagem durante os períodos de curto-circuito, R_p é a resistência de contato eletrodo/poça, R_c é a resistência de contato entre o bico e o arame, s é o comprimento do eletrodo e A é a área da seção transversal do eletrodo.

Outro parâmetro calculado a partir da análise dos oscilogramas foi a soma das quedas anódica e catódica do arco (U_{ac}). Ela foi também obtida por uma rotina específica do programa Sinal, cujos detalhes deste procedimento e sua fundamentação podem ser encontrados em MODENESI *et al.* (2011). Segundo MODENESI e colaboradores, 2011, nas transições entre os períodos de operação em arco e de curto, a diferença de tensão permitiria obter uma estimativa do valor da tensão do arco. A equação 4.3 estabelece a equação utilizada na referência para o cálculo de U_{AC} :

$$(U_{arc})_0 - (U_{cc})_0 = U_{AC} - (R_p) \cdot (i_{cc})_{ini} \approx U_{AC} \quad (4.3)$$

onde U_{AC} é soma das quedas anódica e catódica do arco elétrico, U_{arc} e U_{cc} são, respectivamente, tensão antes e imediatamente após o início de um curto-circuito, R_p é a resistência de contato entre o eletrodo e a poça de fusão resistência de contato entre o bico e o arame e i_{cc} é a corrente de curto-circuito.

Algumas inferências sobre o comportamento dos oscilogramas de tensão em relação ao modo de transferência metálica via curto-circuito foram feitas baseadas nas informações presentes na figura 3.3.

4.8.2 Aspectos geométricos do cordão de solda

Após a soldagem, realizou-se a limpeza superficial dos corpos de prova e a caracterização dos cordões de solda obtidos baseando-se em algumas orientações da AWS, 2001. Ao término de cada etapa de testes de soldagem (seções 4.5 e 4.6), medidas da largura e do reforço do cordão de solda foram coletados.

As dimensões do reforço do cordão de solda foram medidas diretamente nas amostras soldadas com um paquímetro, para isso mediu-se a espessura do corpo de prova com o cordão de solda e descontou-se a espessura do corpo de prova. Três medidas foram feitas em cada uma das duas regiões de interesse do cordão, contemplado as regiões investigadas na seção 4.7.1 e contidas no período de 4 segundos úteis representativos de cada tipo de soldagem.

As medidas de largura do cordão de solda foram feitas em fotografias da superfície dos corpos de prova que continham uma escala. Todas as fotografias foram tiradas numa mesma distância entre o corpo de prova e a lente da câmera, sendo o corpo de prova centralizado. Com o auxílio do programa de computador *ImageJ*, foram feitas medidas na imagem do cordão tendo-se como referência as marcações de milímetros da escala. Para cada corpo de prova analisado foram realizados vinte medidas da largura do cordão de solda, sendo dez na primeira metade do cordão, referente à soldagem sem fluxo, e mais dez na segunda, referente a soldagem com fluxo ou sem no caso do corpo de prova padrão.

Dentre os fluxos de um componente ensaiados nos testes iniciais, cinco deles foram selecionados para análise macrográfica. Eles foram escolhidos pelos efeitos provocados nos sinais elétricos de soldagem ou em aspectos superficiais do cordão de solda considerados significativos, quando comparados aos da soldagem sem fluxo. Para as macrografias os cordões de solda foram cortados na transversal, em regiões correspondentes às regiões com e sem fluxo, referentes aos tempos uteis de quatro segundos, mencionado no item 4.7.1. Em seguida realizou-se o polimento das amostras e ataque com o reativo Nital-10%, solução contendo 10% em volume de ácido nítrico e 90% em volume de álcool. As medidas foram feitas através da digitalização da imagem do cordão e medição dos parâmetros largura, penetração e reforço (sugere-se observar a figura 4.8), utilizando-se como referência um objeto de dimensões conhecidas presente na mesma fotografia. Foram feitos duas macrografias em cada corpo de prova, uma na região sem fluxo e uma na região em que se aplicou o fluxo, ou não no caso do “Padrão(SF)”. Como os testes de soldagem foram realizados em duplicata, totalizaram-se quatro macrografias para cada fluxo selecionado e oito na região sem fluxo para uma dada tensão. Através de macrografias das seções transversais do cordão, foram medidos os parâmetros penetração, reforço e largura do cordão, cujas dimensões são ilustradas na figura 4.8.

Ao final da primeira etapa de testes de soldagem, os métodos (paquímetro, fotografia da superfície ou macrografia seguido medição via *ImageJ*) de obtenção das dimensões do cordão de solda foram comparados para avaliação e validação.

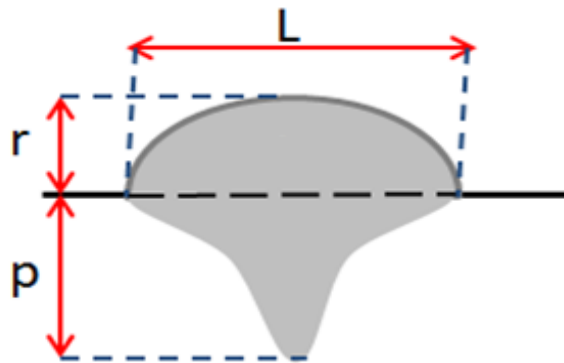


Figura 4.8 Dimensões dos cordões: L – largura, p – penetração, r – reforço.

4.8.3 Avaliação estatística de dados

Variações de parâmetros podem ocorrer durante a soldagem, afetando as condições operacionais de cada teste. Considerando a elevada sensibilidade da soldagem MIG/MAG à variação de seus parâmetros operacionais, estas alterações podem dificultar a análise dos resultados dos ensaios. Embora o foco desse estudo não seja a avaliação dessas influências, procurou-se, por precaução, utilizar métodos para minimizar os seus possíveis efeitos. Citam-se como exemplos, a execução de ensaios em dias com condições ambientais semelhantes (especialmente quanto à umidade do ar), a comparação das variações observadas (equação 4.4), além dos valores médios e desvios dos parâmetros em estudo e o sequenciamento aleatório dos testes e réplicas.

Os testes de soldagem realizados neste trabalho envolveram uma região inicial sem fluxo e uma região final com fluxo. Assim, um cálculo geralmente adotado foi a variação de algum parâmetro (ΔP) medido nas duas partes do corpo de prova (Equação 4.4):

$$\Delta P = P - P_{msf} \quad (4.4)$$

onde P é o valor do parâmetro considerado na segunda parte do corpo de prova (geralmente com fluxo, ou sem fluxo nos corpos de prova padrão) e P_{msf} é a média observada na primeira parte sem fluxo obtida de testes com as mesmas configurações.

O método de cálculo dos desvios observados dependeu da quantidade de medidas em cada conjunto de dados. Quando pelo menos três medidas estavam disponíveis, calculou-se a variância, o desvio padrão (Equação 4.5) ou o coeficiente de variação destas (Equação 4.6). Quando a quantidade de medidas para uma dada condição experimental era inferior a três e existiam medidas de outras condições experimentais similares, adotou-se o desvio padrão combinado, ou *pooled* (S_p), definido pela equação 4.7, considerando que as variâncias para as condições consideradas eram iguais. Em alguns casos, considerou-se que o desvio padrão de algum parâmetro medido na segunda parte do corpo de prova padrão tinha o mesmo valor do desvio padrão obtido na primeira parte dos corpos de prova em que não houve aplicação de fluxo.

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (4.5)$$

Nesta equação, s é o desvio padrão, x representa o valor observado, \bar{x} a média observada e n a quantidade de dados analisados.

$$c_v = \frac{S}{\bar{x}} \quad (4.6)$$

Na equação 4.6 c_v representa o coeficiente de variação, S o desvio padrão observado e \bar{x} a média observada.

$$S_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + \dots + (n_k - 1)s_k^2}{(n_1 + \dots + n_k) - k}} \quad (4.7)$$

Nela, s_p é o desvio padrão combinado, n_1, \dots, n_k são as quantidades de testes para cada condição e s_1, \dots, s_k são os desvios padrões observados dos respectivos testes).

Sobre o agrupamento de dados e tratamento estatístico. Inicialmente, organizaram-se dois conjuntos de dados para uma pré-análise: MIG/MAG (testes sem fluxo) e A-MIG/MAG (testes com fluxo). As médias, as variâncias e os desvios padrões para cada parâmetro analisado foram comparados, visando detectar alguma alteração significativa. Após essa avaliação, os dados foram reagrupados para outras análises mais criteriosas, em onze grupos: “Sem Fluxo” (referentes a primeira parte do corpo de prova sem fluxo), “Padrão(SF)”

(referente a segunda parte do corpo de prova padrão, sem fluxo) e os testes A-MIG/MAG com o indicativo dos fluxos utilizados, sendo eles Al_2O_3 , CaCO_3 , CaF_2 , Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , KClO_4 , NaF , SiO_2 e TiO_2 . Nesta etapa, considerou-se, para fins de comparação e elaboração de gráficos o desvio padrão combinado (Equação 4.7) entre todos os testes com indicativos de uso de fluxos, cujo número de réplicas/medidas por fluxo utilizado era igual ou inferior a dois e as variâncias entre os grupos MIG/MAG e A-MIG/MAG oriundas da pré-análise serem distintos. Nos demais casos adotava-se o desvio padrão, convencional. Em algumas avaliações o desvio padrão do “Padrão (SF)” foi considerado o mesmo das amostras sem fluxos (“Sem Fluxo”), baseado no fato de ambas serem oriundas da soldagem convencional e estarem submetidas as mesmas condições de soldagem.

Em relação à elaboração de gráficos, foram adotados alguns padrões. Figuras geométricas como quadrados, losangos ou círculos representam as médias aritméticas obtidas em um conjunto de dados. Uma linha pontilhada horizontal representa a média observada na soldagem “Sem Fluxo”. Além destes, considerando que os dados coletados se comportem como uma distribuição normal (ver figura 4.8) os valores que se distanciam da média em mais ou menos um (± 1) desvio padrão correspondem a 68% do total observado. Assim para fins de interpretação da significância dos resultados, tanto graficamente quanto numericamente, foram expressas a média e a faixa compreendida por mais ou menos um desvio padrão em torno dela.

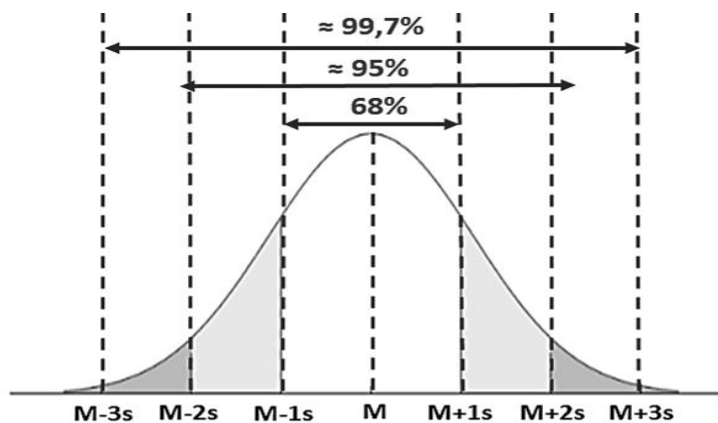


Figura 4.9 Função densidade de probabilidade de uma curva com distribuição normal, sendo M a média aritmética e s o desvio padrão.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados referentes ao desenvolvimento deste projeto de pesquisa. A aplicação dos fluxos de um composto químico foi avaliada qualitativamente quanto à homogeneidade da distribuição de massa por unidade de área e as facilidades ou dificuldades observadas durante a aplicação. Em seguida, os resultados dos testes iniciais foram avaliados. Nessa etapa, os sinais elétricos obtidos durante a soldagem com o uso dos fluxos e a geometria dos cordões resultantes foram comparados com os valores observados na soldagem sem aplicação de fluxo. Baseado nas alterações associadas ao uso de cada fluxo, dois deles (CaF_2 e SiO_2) foram selecionados para um conjunto de testes complementares. Neste investigou-se o efeito dos fluxos na soldagem A-MIG/MAG com variação de tensão.

5.1 Método de preparo dos corpos de prova e aplicação de fluxos

A facilidade de aplicação dos fluxos com a metodologia proposta foi avaliada qualitativamente. Com base na experiência do autor deste trabalho, os que apresentaram maior facilidade de aplicação e de serem espalhados na superfície do corpo de prova, resultando em uma distribuição mais homogênea de massa por unidade de área foram: Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , CaCO_3 , CaF_2 , KClO_4 e SiO_2 .

5.2 Testes iniciais

5.2.1 Soldagem dos corpos de prova

Os testes iniciais constituem uma etapa exploratória, em que vários fluxos simples previamente selecionados foram aplicados à superfície dos corpos de prova com posterior soldagem e os seus efeitos nos sinais elétricos de soldagem e no formato do cordão foram estudados. A figura 5.1 apresenta uma fotografia do cordão de solda produzido com tensão nominal de soldagem de 24 V, nela são destacadas as regiões de soldagem MIG/MAG (esquerda), zona de transição (centro) e A-MIG/MAG utilizando-se um fluxo de SiO_2 (direita). Ao se comparar visualmente o aspecto deste cordão de solda entre as partes com e sem fluxo é visível alguns efeitos, como a alteração da largura do cordão.



Figura 5.1 Cordão de solda obtido sob tensão de soldagem nominal de 24 volts, com a região sem a aplicação de fluxos, à esquerda, zona de transição e a região com aplicação de dióxido de silício (A-MIG/MAG), à direita.

Durante os experimentos realizados observou-se, na transição entre a região sem fluxo para a com fluxo no corpo de prova, um possível aumento da luminosidade do arco elétrico nos ensaios em que foram aplicados CaCO_3 , CaF_2 , Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , KClO_4 e SiO_2 . Uma elevação da quantidade de respingos e fumos metálicos foi perceptível, em particular, na soldagem com aplicação de KClO_4 .

5.2.2 Efeito de fluxos simples em sinais elétricos de soldagem

A análise dos sinais elétricos coletados durante a soldagem revelou que os fluxos podem afetar as características operacionais da soldagem MIG/MAG em diferentes intensidades e formas. A figura 5.2 exibe oscilogramas de tensão e corrente de soldagem de um teste em que se utilizou como fluxo o fluoreto de cálcio (CaF_2) na segunda parte do corpo de prova. Imagens com um maior nível de detalhamento do oscilograma de tensão de soldagem nas regiões correspondentes à soldagem com e sem fluxo são apresentadas na figura 5.3.

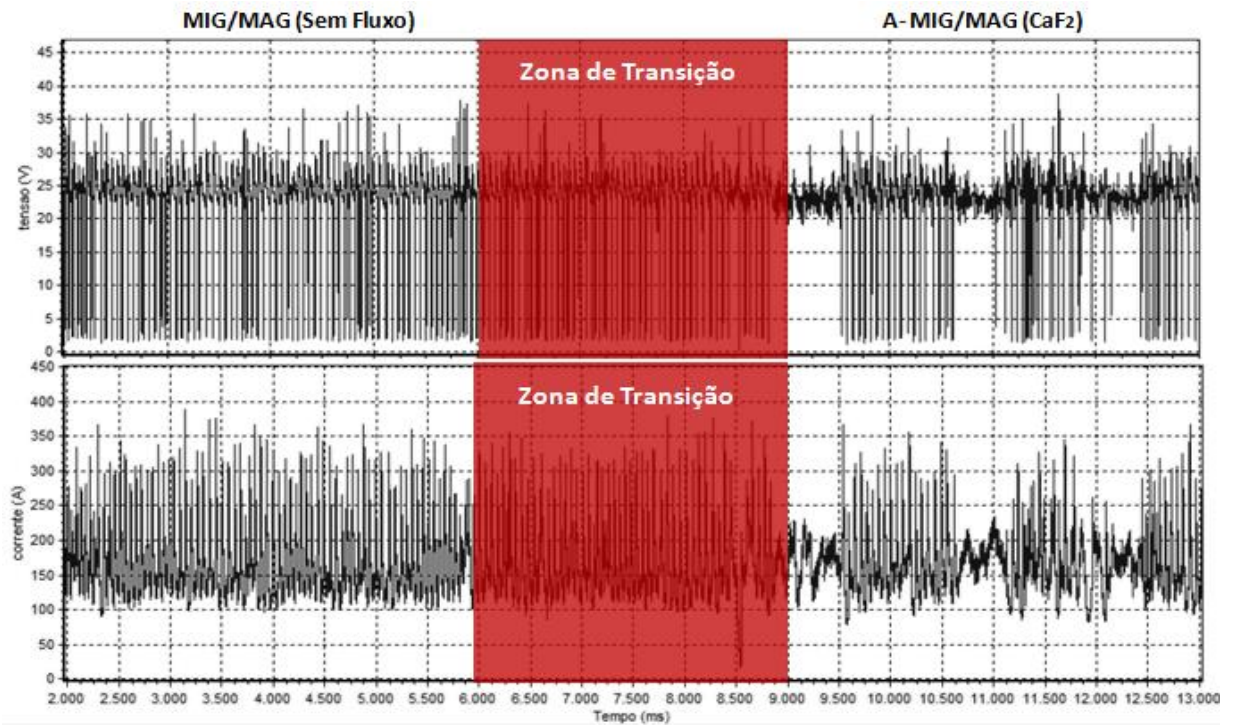


Figura 5.2 Oscilogramas de tensão e corrente de soldagem de um ensaio em que a primeira fração do corpo de prova era sem fluxo e a segunda metade com fluxo de fluoreto de cálcio.

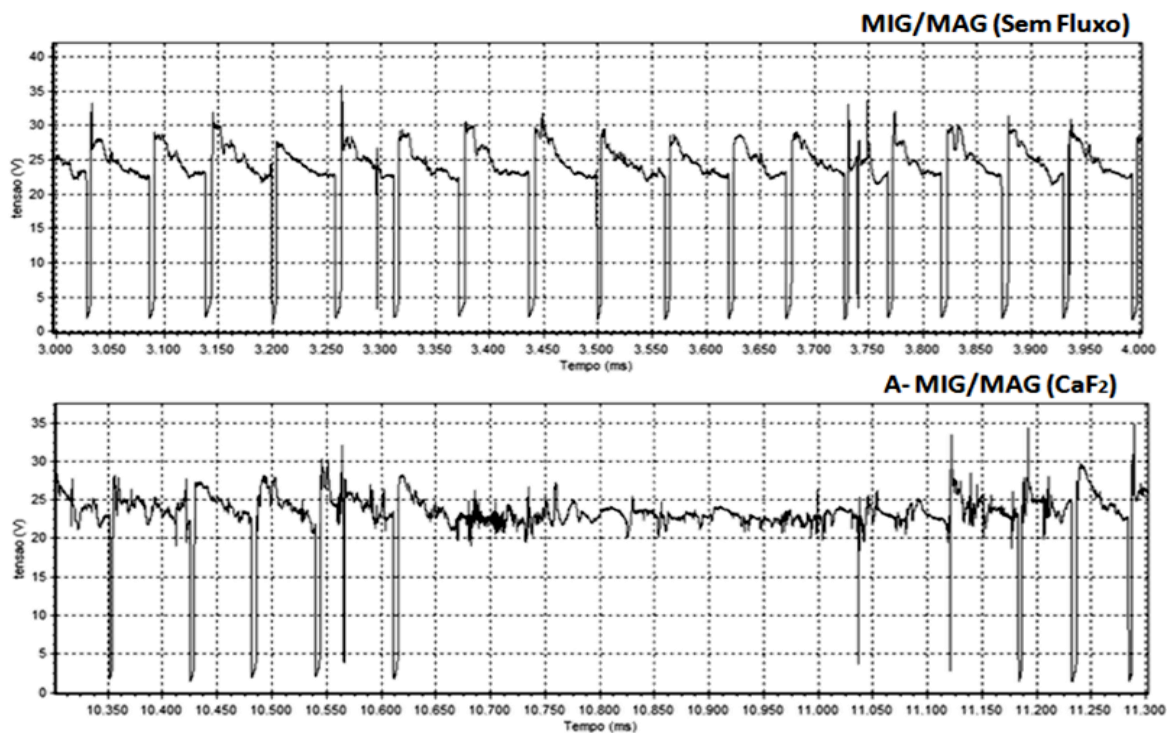


Figura 5.3 Detalhes do oscilograma de tensão com fluxo de fluoreto de cálcio (CaF_2) mostrado na figura 5.2, em (a) MIG/MAG (sem fluxo) e (b) A-MIG/MAG (CaF_2).

Em ambas as figuras contendo os oscilogramas de tensão e corrente de soldagem, 5.2 e 5.3, percebem-se na região sem fluxo condições operacionais típicas de transferência por curto-circuito. Na parte do corpo de prova recoberta com fluxo (A-MIG/MAG), o processo tendeu a operar de forma mais irregular apresentando intervalos mais longos sem a ocorrência de transferência por curto-circuito. Uma possível causa para estas variações no modo de transferência seria uma irregularidade na distribuição do fluxo sobre a superfície do corpo de prova devido à etapa de aplicação. Este efeito ainda pode ter sido amplificado por um arraste de parte do material depositado na superfície do corpo de prova pelo gás de proteção, situação às vezes observada em testes de soldagem TIG com fluxo conforme relatado por PANDOLFI (2016). Pelos experimentos realizados, acredita-se que esse arraste ocorra principalmente nos compostos que, pelo método adotado, apresentaram baixa coesão com a superfície do corpo de prova. Os compostos que apresentaram esse comportamento de forma mais clara foram o TiO_2 , NaF e Al_2O_3 .

Uma hipótese levantada, baseada em conhecimentos teóricos e empíricos, é que a orientação da tocha, que direciona a vazão do gás de proteção, possa interferir significativamente na aderência ou homogeneidade do filme de fluxo depositado durante a soldagem, assim a orientação do eletrodo perpendicular ao plano da mesa tenderia a dispersar menos os componentes do fluxo depositado, que a orientação empurrando. A orientação do eletrodo adotada neste trabalho foi perpendicular ao plano da peça o que minimizaria esse efeito. Contudo, outros fatores podem interferir neste comportamento como a interação dos fluxos com a poça de fusão, os movimentos convectivos na poça e a interação entre a escória formada e o metal líquido. Isso poderia influenciar numa distribuição superficial irregular de fluxo, na região abaixo do arco, afetando o comportamento da fase de arco durante a soldagem. A figura 5.3 b ilustra a ocorrência de um relativo longo período de arco (de quase 0,4 segundos de duração) iniciado com o estabelecimento do arco após um curto-circuito no tempo indicado, na figura, pouco superior a 10.600 ms. Eventos similares não foram observados, durante o teste na região sem fluxo.

Para pré-avaliar as informações coletadas, os dados foram agrupados em dois grandes grupos: (a) MIG/MAG, que compreende todos os resultados referentes às partes soldadas sem a

aplicação de fluxos e (b) A-MIG/MAG, que agrega os dados oriundos da soldagem com os diversos fluxos aplicados. Em seguida, compararam-se as médias e os desvios padrões observados em cada um desses grupos. As alterações mais significantes de comportamento, que foram associadas à aplicação de fluxos na soldagem, ocorreram no fator de curto-circuito (F_{cc}), no período de transferência e na tensão de soldagem durante os períodos de arco. A tabela V.1 apresenta essas informações. A tensão no período de arco, embora apresente valores médios similares nas soldagens MIG/MAG e A-MIG/MAG, teve um desvio padrão, nas regiões com fluxo, uma ordem de grandeza maior. Esta diferença foi associada a alterações no processo, durante os períodos de arco, causadas por alguns dos fluxos testados e a variabilidade desses efeitos entre cada fluxo simples aplicado. Um resultado similar é encontrado, embora de forma menos evidente, para a soma das quedas anódica e catódica do arco (U_{ac}).

Tabela V.1 Valores médios e desvio padrão de alguns parâmetros elétricos de soldagem agrupados em regiões de soldagem sem (MIG) e com fluxo (A-MIG/MAG).

		Tensão (V)	Corrente (A)	Período (ms)	t curto (ms)	FCC (%)	Uarc (V)	Iarc (A)	ρ $\mu\Omega.m$	Uac (V)
MIG/MAG (sem fluxo)	Média	22,97	178	42,3	3,6	8,6	24,81	173	1,11	21,0
	Desvio Padrão	0,03	3	5,1	0,4	0,2	0,03	3	0,05	0,1
A-MIG/MAG (com fluxo)	Média	22,97	176	45,7	3,6	8,1	24,68	172	1,11	21
	Desvio Padrão	0,02	3	9,3	0,3	1,4	0,33	4	0,06	0,3

Observação: Tensão – Tensão média observada de soldagem, Corrente – Corrente média observada de soldagem Período – tempo médio de transferência, t_{curto} – Duração média dos curtos-circuitos, F_{cc} – Fator de curto-circuito médio, U_{arc} e I_{arc} – tensão e corrente médios durante a operação em arco, ρ – Resistividade elétrica média do eletrodo e U_{ac} – soma das quedas anódica e catódica do arco.

Como a variância observada no processo A-MIG/MAG foi distinta da MIG/MAG (sem fluxo) para alguns parâmetros, considerou-se, para fins de comparação e elaboração de gráficos, o desvio padrão combinado (Equação 4.7), exceto quando o número de medidas feitas para cada fluxo era superior a três. Assim, apenas nas medidas da largura e reforço do

cordão de solda na soldagem A-MIG/MAG adotou-se o cálculo do desvio padrão, convencional. Em alguns casos, o desvio padrão da segunda parte do corpo de prova padrão sem fluxo, denominado Padrão (SF), foi considerado o mesmo das amostras sem fluxos, da primeira parte do corpo de prova, baseado no fato de ambas serem oriundas da soldagem convencional e submetidas às mesmas condições de soldagem.

A figura 5.4 mostra os valores médios do fator de curto-circuito obtidos nos testes realizados. Nesta figura, a linha tracejada é o valor médio obtido na soldagem sem aplicação de fluxos. As barras indicam o desvio padrão combinado para os resultados da soldagem com fluxo e o mesmo desvio padrão foi usado para as regiões sem fluxo tanto na primeira como na segunda metade do corpo de prova como mencionado no parágrafo anterior. Considerando os desvios calculados do parâmetro Fcc presentes na tabela V.1, a disposição dos dados da Figura 5.4 sugere que a redução desse fator causada pelos fluxos CaCO_3 , CaF_2 e KClO_4 , além do aumento pelo SiO_2 e, possivelmente, pelo Cr_2O_3 foram significativos. É interessante observar que os resultados sugerem que a maior intensidade na redução do fator de curto-circuito esteja associada a presença de cátions cálcio no fluxo. Essa hipótese é levantada tomando-se como base que ambos os compostos, CaCO_3 , CaF_2 , apresentam cátions Ca^{2+} em comum e produziram efeitos de intensidade semelhante apesar de possuírem ânions diferentes (CO_3^{2-} e F_2^{2-}).

Uma percepção relevante a se considerar é que os compostos que mais afetaram em módulo o Fcc (CaCO_3 , CaF_2 e SiO_2) foram os que apresentaram a maior diferença de Fcc para cada réplica desse parâmetro. Isso pode estar relacionado à maior sensibilidade da soldagem com a aplicação desses compostos a pequenas alterações na densidade de fluxo depositado na superfície dos corpos de prova. Assim, de uma forma geral, esses fatos sugerem que o fator de curto-circuito seja mais sensivelmente afetado pelo carbonato de cálcio, fluoreto de cálcio e o dióxido de silício em relação aos demais.

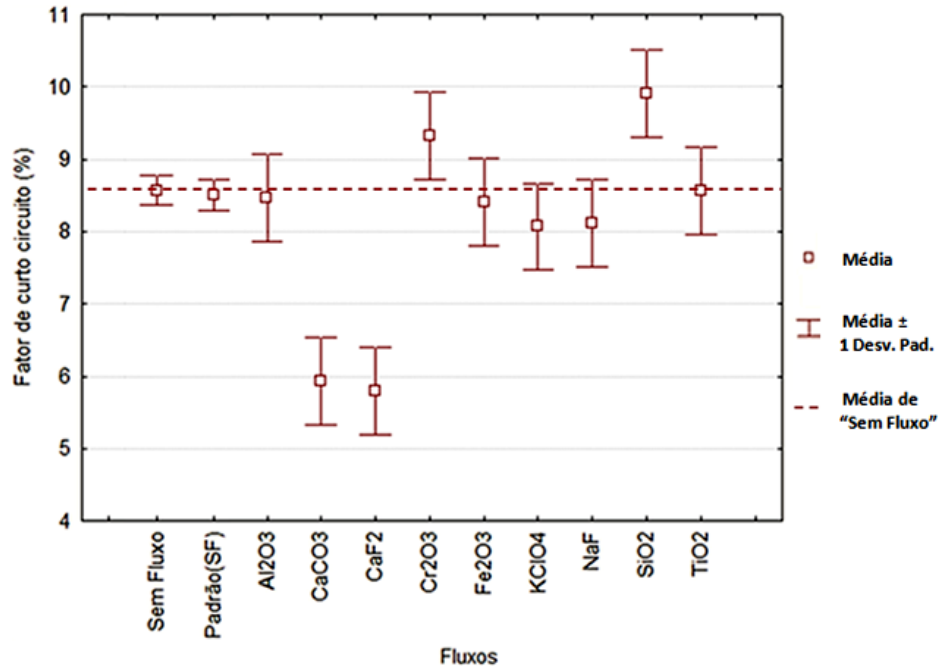


Figura 5.4 Comparação do fator de curto-circuito na soldagem sem e com fluxo sob tensão nominal de 24V.

Varição similar à do fator de curto-circuito ocorre para a tensão de soldagem durante os períodos de arco (Figura 5.5). Como no caso anterior, os efeitos mais evidentes ocorreram com o uso de CaCO₃, CaF₂, associados a redução da tensão, de SiO₂ e possivelmente de Cr₂O₃, ao aumento da tensão. Contudo, deve-se observar que, em termos percentuais, as variações na tensão de operação em arco foram, aproximadamente, uma ordem de grandeza menor do que as observadas no fator de curto-circuito. Os resultados sugerem que elementos como sódio e potássio, que apresentam baixa energia de ionização de forma semelhante ao cálcio, também poderiam levar a uma redução na tensão de operação durante os períodos de arco.

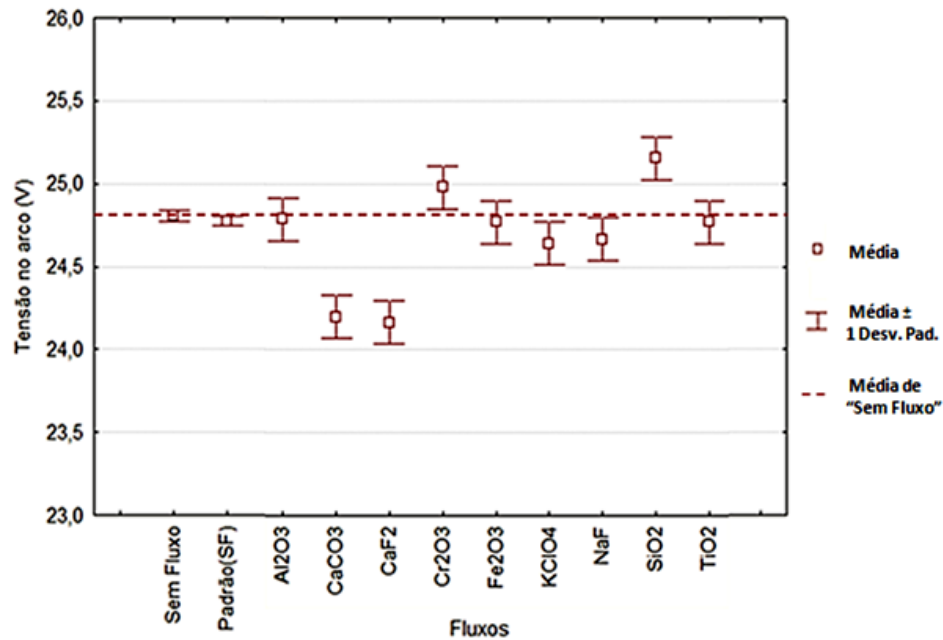


Figura 5.5 Tensão de soldagem durante os períodos de arco na soldagem sem fluxo e com os diferentes fluxos estudados.

LI et al. (2007) estudando sobre a soldagem A-TIG, mencionam que a sílica eleva a tensão de soldagem, sendo que isto estaria relacionado à sua capacidade de dificultar a passagem da corrente elétrica entre o arco e a poça de fusão. Neste contexto, pode-se supor que este efeito favoreça a ocorrência de mais curtos-circuitos na soldagem A-MIG/MAG com este fluxo, o que refletiria nos maiores valores de F_{cc} e da tensão de soldagem durante os períodos de arco (U_{arc}). Na mesma linha, a tendência de redução conjunta de F_{cc} e U_{arc} observadas na soldagem A-MIG/MAG aplicando-se CaF_2 , $CaCO_3$ e, de forma menos significativa, nos fluxos contendo sódio e potássio pode ser considerada como esperada. Este efeito poderia estar relacionado à disponibilidade, na atmosfera do arco, de elementos mais facilmente ionizáveis. Contudo, se ele de forma isolada fosse considerado a principal causa das mudanças observadas, seria esperado que a variação observada fosse maior com os fluxos contendo sódio e potássio. Assim acredita-se que outras características térmicas ou elétricas, como a rigidez dielétrica dos compostos estudados poderiam influenciar a soldagem. A rigidez dielétrica, mensura um valor limite de campo elétrico aplicado sobre a espessura de um material (kV/mm), sendo que, a partir dele, os átomos que compõem o material se

ionizam e o material dielétrico deixa de funcionar como um isolante, permitindo o fluxo de corrente elétrica.

A relatada dificuldade de passagem da corrente durante os períodos de arco na soldagem com fluxo de SiO_2 pode ser a causa, também, da maior redução da corrente elétrica na fase de arco (Iarc) da soldagem A-MIG/MAG (Figura 5.6). Os demais fluxos não apresentaram variação em Iarc significativa, em relação ao resultado da soldagem sem fluxo.

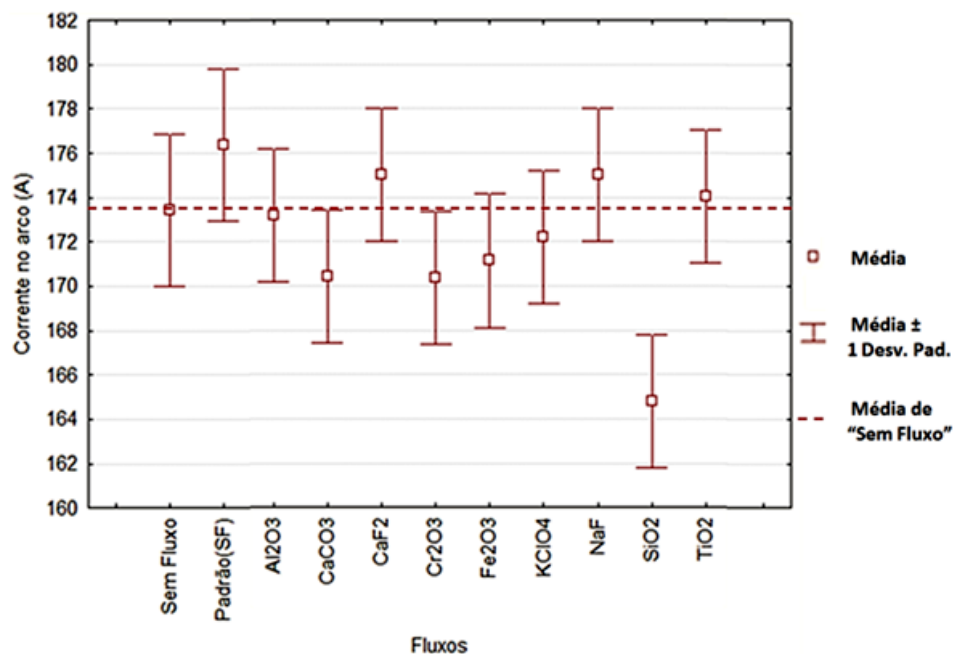


Figura 5.6 Comparação da corrente de soldagem durante os períodos de arco na soldagem sem fluxo e com os diferentes fluxos estudados.

Entre os fluxos testados, o de sílica foi o único que causou uma variação significativa na soma das quedas anódica e catódica do arco (U_{ac}), sendo a diferença entre os valores encontrados na soldagem MIG/MAG e a A-MIG/MAG de aproximadamente 0,7 Volts (Figura 5.7). O valor mais elevado de U_{ac} observado na soldagem com fluxo de SiO_2 pode estar relacionado com uma maior resistência à passagem de corrente elétrica entre o arco e a poça de fusão ou um efeito deste fluxo de redução da emissão de elétrons para o arco, a qual ocorre principalmente nas regiões do metal base adjacentes à poça de fusão. A primeira sugestão corrobora com a hipótese de que rigidez dielétrica da sílica e/ou condutividade térmica serem capazes de influenciar o processo A-MIG/MAG, provocando os efeitos mais

pronunciados. Acrescenta-se a isso, que a tensão de ruptura do material dielétrico dependeria da espessura de um material, que nesse caso seria a de uma camada de fluxo depositado.

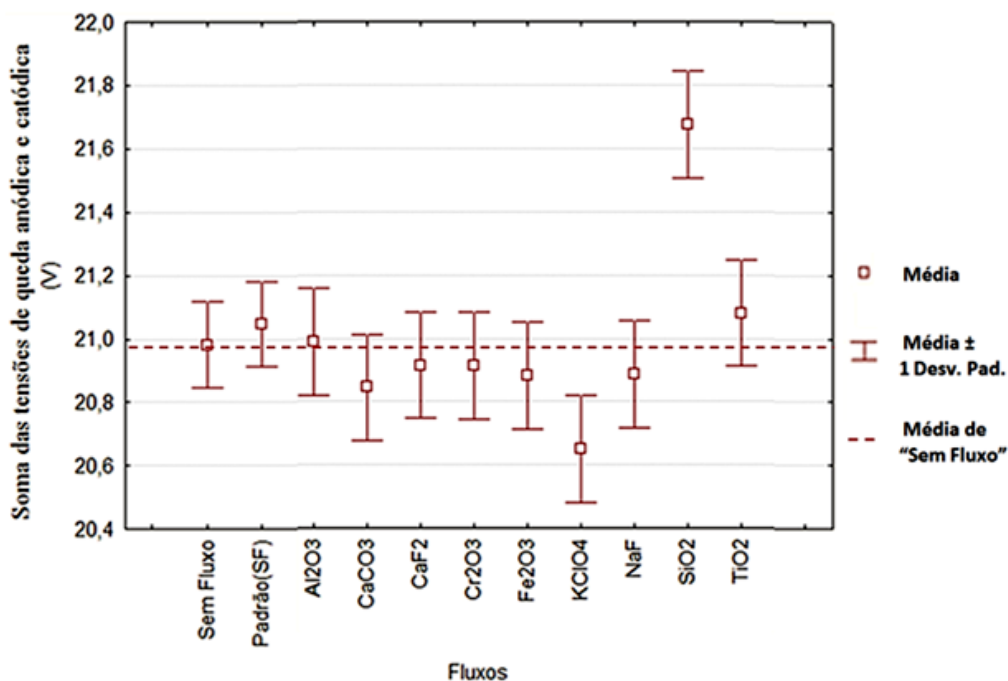


Figura 5.7 Comparação entre a soma das tensões de queda anódica e catódica na soldagem sem fluxo e com os diferentes fluxos estudados.

De uma forma geral, os fluxos parecem ter afetado de forma menos significativa o processo durante os períodos de curto-circuito. Neste sentido, tanto os tempos médios de curto-circuito (Tabela V.1) como a resistividade média do arame medida durante este período (Figura 5.8) foram similares na soldagem com e sem fluxo. Este resultado sugere que, uma vez estabelecido o contato elétrico direto entre o eletrodo e a poça de fusão, o comportamento do sistema não dependeria mais da presença de fluxo. Baseado no fato de os principais efeitos dos fluxos observados serem relacionados à fase de arco sugere-se também que as propriedades elétricas dos componentes que recobrem a superfície próxima ao arame-eletrodo devem desempenhar um importante papel, afetando o valor mínimo do campo elétrico que deve ser aplicado para tornar condutora a região entre o eletrodo e uma fração do corpo de prova, sendo isso relacionado à rigidez dielétrica de cada composto ou da escória formada.

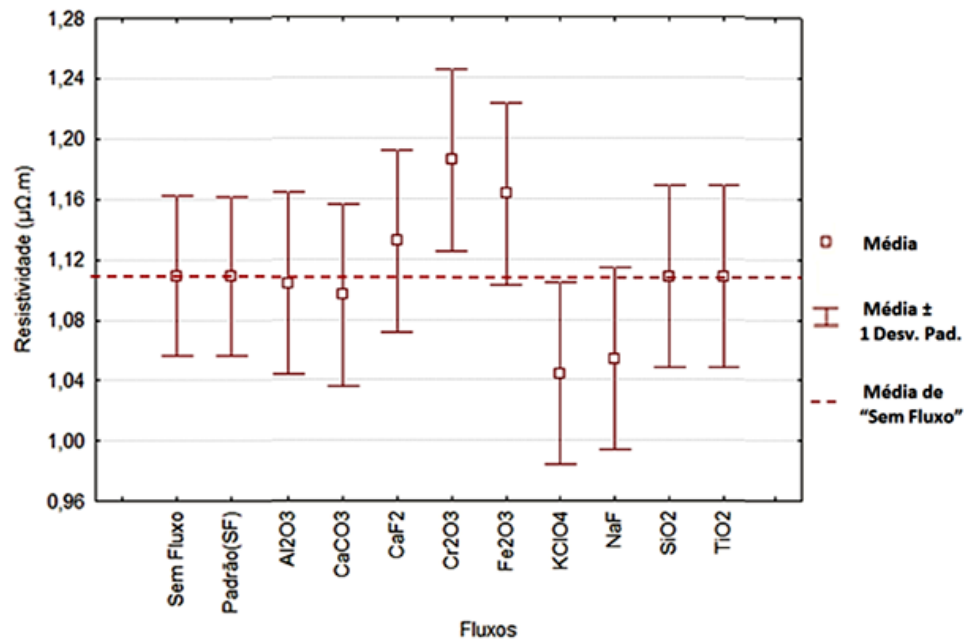


Figura 5.8 Comparação entre os valores de resistividade do eletrodo estimados durante os períodos de curto-circuito na soldagem sem fluxo e com os diferentes fluxos estudados.

5.2.3 Efeito dos fluxos na geometria dos cordões de solda

Essa etapa de trabalho concentrou-se no estudo dos efeitos de nove fluxos simples na geometria do cordão de solda, sob tensão nominal de 24V.

Dentre as medidas da largura do cordão de solda, o efeito mais significativo foi na redução da largura média nos testes com os fluxos: óxido de cromo III, óxido de ferro III, perclorato de potássio e dióxido de silício; sendo mais intenso nesse último. Embora ambos os grupos apresentem certa probabilidade de se coincidirem estatisticamente, considerando a faixa contemplada pela média e um desvio padrão, a segunda parte do corpo de prova padrão apresentou tendência de uma largura média maior. Isso foi atribuído a possíveis efeitos de aquecimento do corpo de prova.

Para demonstrar as diferenças nos aspectos superficiais do cordão, as figuras 5.9 e 5.10 mostram respectivamente a variação de largura e de reforço dos cordões de solda, nas regiões: sem fluxo, Padrão(SF) e com os diferentes fluxos de um componente aplicados.

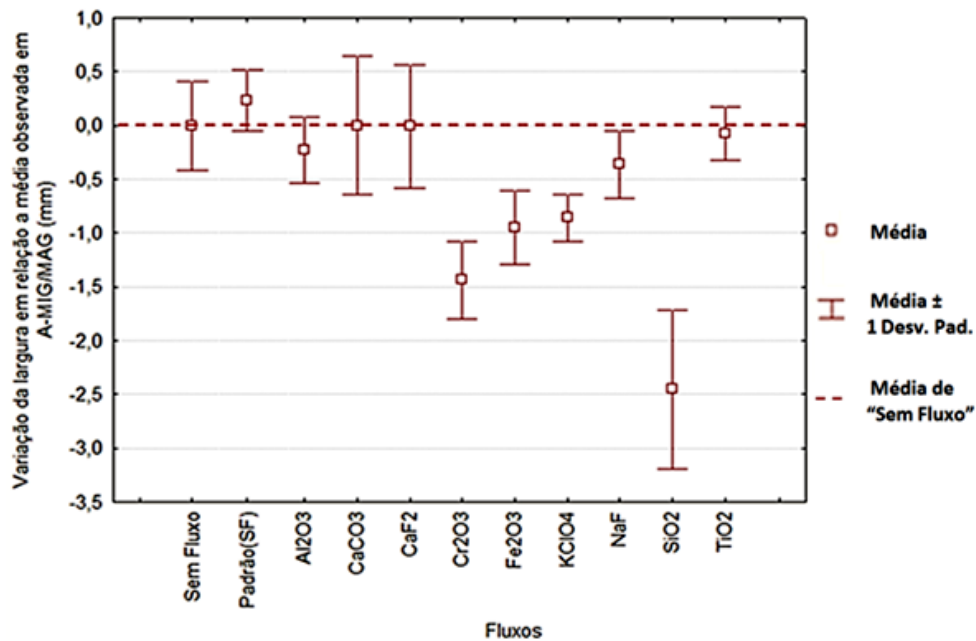


Figura 5.9 Variação da largura em relação à média observada em A-MIG/MAG, em milímetros, para cada corpo de prova testado.

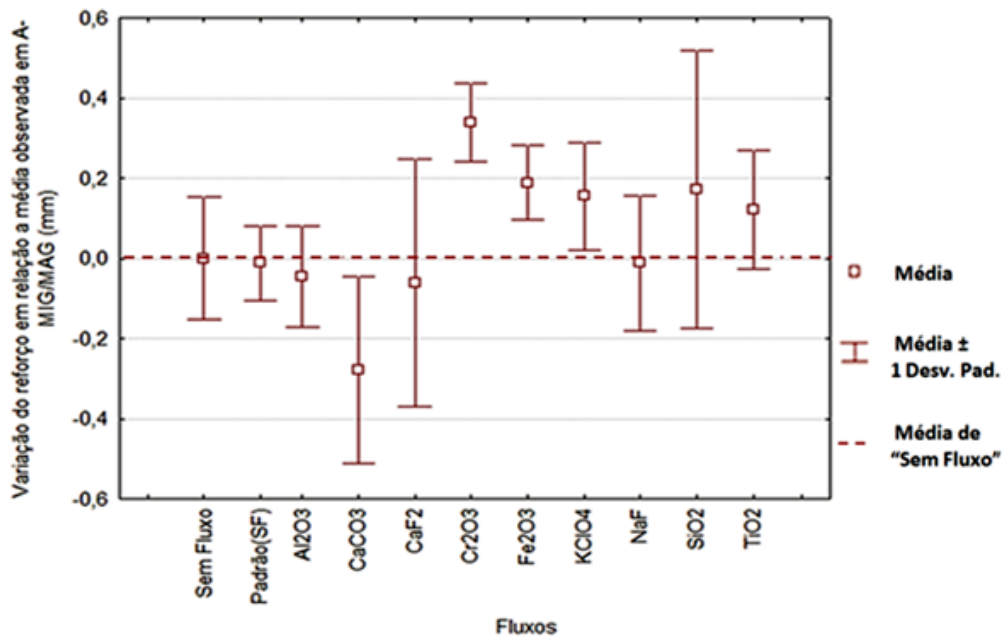


Figura 5.10 Variação do reforço em relação à média observada em MIG/MAG, em milímetros, para cada corpo de prova testado.

Estas figuras, 5.9 e 5.10 confirmam a capacidade mais pronunciada do SiO₂ e Cr₂O₃ em reduzir a largura do cordão de solda em relação àquela obtida na fração sem fluxo, tendo

ambos, também, causado elevação do reforço do cordão. O efeito dos demais fluxos simples na largura e no reforço dos cordões parece ser menos significativo, por exemplo, há indícios de que o Fe_2O_3 e o KClO_4 possam reduzir a largura e elevar o reforço do cordão, mas as variações medidas foram inferiores a um milímetro.

Dentre os fluxos simples ensaiados, cinco foram selecionados para fazer macrografia (CaCO_3 , CaF_2 , Cr_2O_3 , SiO_2 e Fe_2O_3). A seleção se baseou em semelhanças de composição química (cátions ou ânions em comum), em efeitos nos sinais elétricos de soldagem (F_{cc} e U_{arc}) ou em aspectos geométricos superficiais do cordão de solda (largura), que provocaram variações de parâmetros mais intensas em relação a soldagem convencional, sem aplicação de fluxo.

As macrografias feitas mostram alterações no formato do cordão, como ilustrado na figura 5.11, maiores detalhes podem ser obtidos no Apêndice. Os parâmetros geométricos verificados nos cordões de solda via macrografia estão resumidos na Tabela V.2. Nela, adotou-se o desvio padrão combinado (Equação 4.7).

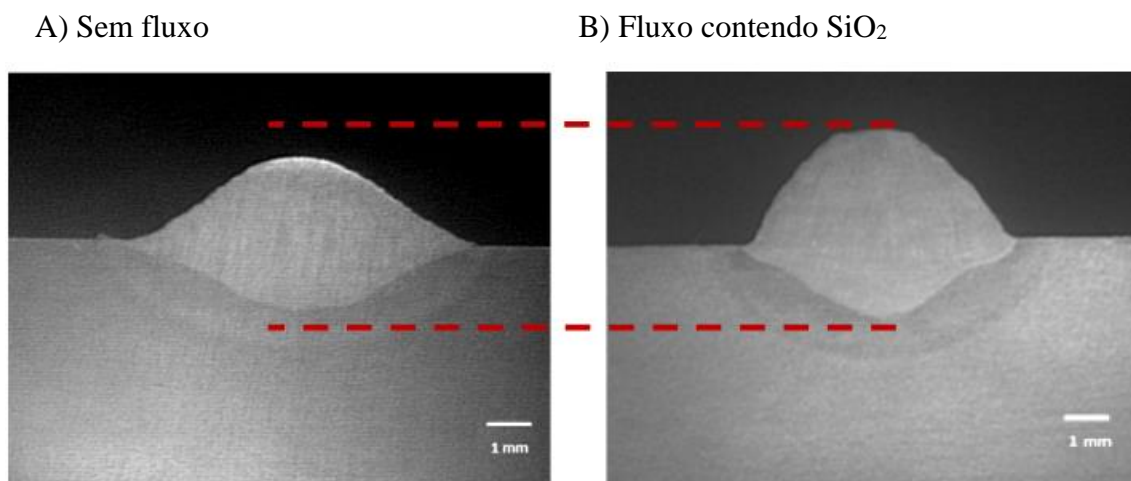


Figura 5.11 Macrografias das seções transversais de dois cordões de solda, sendo que em A) não foi aplicado fluxo (MIG/MAG), em B) usou-se dióxido de silício (A-MIG/MAG). Ataque: Nital 10%.

Tabela V.2 Parâmetros geométricos médios e os respectivos desvios padrão medidos em seções transversais dos cordões de solda com ou sem aplicação de fluxos.

Parâmetros geométricos		Sem Fluxo	CaCO ₃	CaF ₂	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂
Largura (mm)	Média	8,7	8,8	8,3	7,0	7,2	6,7
	Desvio Padrão*	0,6			0,2		
Reforço (mm)	Média	1,9	1,3	1,7	2,2	1,9	2,3
	Desvio Padrão*	0,2			0,3		
Penetração (mm)	Média	1,4	1,1	1,5	1,8	1,5	1,6
	Desvio Padrão*	0,2			0,2		

*Para as amostras com aplicação de fluxo, refere-se ao desvio padrão combinado.

Considerando as médias e desvios calculados, as medidas de largura e reforço feitas via macrografia estão coerentes com os dados gerados nas medidas superficiais dos corpos de provas. Considerando que as medidas superficiais foram feitas em maior quantidade devido à maior facilidade de execução, acredita-se que os parâmetros estatísticos provenientes desses dados devem ser mais representativos da realidade.

Em relação à penetração do cordão, dentre os fluxos avaliados nesta etapa, o carbonato de cálcio parece ter diminuído significativamente este parâmetro, enquanto que o óxido de cromo III e o dióxido de silício parecem tê-lo elevado. Contudo, deve-se enfatizar que as variações observadas são muito pequenas quando comparadas com as obtidas na soldagem TIG com fluxo, para a qual a literatura frequentemente reporta ganhos de penetração superiores a 100% (MODENESI, 2013; LUCAS, 2000; HOWSE e LUCAS, 2000; KUMAR *et al.*, 2009).

5.2.4 Considerações sobre os testes iniciais

Esta etapa do trabalho teve um caráter exploratório em que foi avaliado um conjunto de compostos usados separadamente como fluxos na soldagem MIG/MAG. A seleção desses compostos foi feita com base em resultados anteriores, obtidos pelo grupo de pesquisa e por outros, na soldagem A-TIG e em eletrodos revestidos, considerando a estabilidade da massa durante a pesagem e aplicação, pouca tendência para a absorção de água e a presença de cátions ou íons em comum entre os compostos.

Algumas percepções sobre o A-MIG/MAG foram possíveis através da análise dos experimentos iniciais conduzidos envolvendo o modo de transferência metálica por curto-circuito:

1. Alguns compostos químicos quando depositados isoladamente sobre a superfície de um corpo de prova podem afetar tanto as condições operacionais do processo como o formato do cordão obtido em relação ao processo de soldagem MIG/MAG tradicional. Entretanto esses efeitos foram muito inferiores aos geralmente reportados na literatura para a soldagem TIG com fluxo ativo;
2. A facilidade da aplicação dos fluxos testados e a capacidade deles de recobrir a superfície do corpo de prova de forma homogênea foi avaliada qualitativamente, percebeu-se os melhores resultados com os fluxos de Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , CaCO_3 , CaF_2 , KClO_4 ou SiO_2 ;
3. Alterações no processo de soldagem devido a presença do fluxo foram detectadas visualmente, observaram-se indícios de elevação da intensidade da luz na região do arco elétrico nos ensaios com aplicação de alguns fluxos (CaCO_3 , CaF_2 , Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , KClO_4 e SiO_2) e a elevação da quantidade de respingos e de fumos metálicos na soldagem com aplicação KClO_4 ;
4. A elevação das emissões de fumos metálicos e de respingos na soldagem com aplicação KClO_4 pode estar associada a característica oxidante desse composto. Essa consideração se deve a possibilidade desse composto se decompor no arco, gerando cloreto de potássio e oxigênio gasoso, em temperaturas próximas a 600°C . Baseado na literatura (GARCIA e SCOTTI, 2010; TATAGIBA, GONÇALVES e PARANHOS, 2012) um aumento do potencial de oxidação do gás de proteção pode, conseqüentemente, elevar a quantidade de respingos e a taxa de formação de fumos;
5. Entre os compostos testados, o carbonato de cálcio e o fluoreto de cálcio tenderam a diminuir a intensidade dos curtos-circuitos, caracterizados pelo menor valor de F_{cc} , e a tensão de operação durante os períodos de arco, em relação à soldagem sem fluxo. Por outro lado, os óxidos de cromo e de silício tenderam a aumentar a intensidade dos curtos-circuitos e a elevar a tensão durante os períodos de arco. Para o óxido de silício,

perceberam-se indícios de elevação do valor de tensão nas regiões de queda anódica e catódica do arco;

6. Assim como o reportado por ZHANG e CAO, 2012, não foram observadas diferenças significativas entre a soldagem A-MIG/MAG com aplicação de TiO_2 e a soldagem convencional, sem fluxo. Contudo observou-se para diversos fluxos testados a sua capacidade de afetar o período de transferência metálica, assim como observado por esse autor para os fluxos contendo KCl e o CaCl_2 ;
7. Indícios sugerem que os fluxos podem afetar a geometria do cordão de solda, alterando-a em comparação com a soldagem sem fluxo. Os fluxos que apresentaram os efeitos mais intensos foram o dióxido de silício e o óxido de cromo III, que tenderam a aumentar a penetração e a diminuir a largura do cordão de solda. A elevação da penetração do cordão de solda com o uso de SiO_2 , também é reportado na literatura (HUANG, 2010; RUAN *et al.*, 2012; de LIN e YAN, 2014).
8. A análise dos parâmetros elétricos (tensão na fase de curto, tensão na fase de arco, corrente na fase de curto ou corrente na fase de arco, o fator de curto-circuito) em conjunto com os geométricos (largura, penetração e reforço) do cordão de solda para cada fluxo testado, em especial dos efeitos dos compostos CaF_2 e Fe_2O_3 , sugere que as variações nos parâmetros elétricos da soldagem e geométricos do cordão de solda talvez ocorram de forma dissociada.
9. Ao final da primeira etapa de testes de soldagem, os métodos de obtenção de medidas de reforço, via paquímetro, e da largura, via fotografia e medição com o programa ImageJ, foram comparados com os valores obtidos em macrografia para avaliação e validação. Ambos os métodos são mais simples e demandam menor tempo de execução que a macrografia, de modo a possibilitar a realização de um maior número de medidas em um mesmo tempo.

Baseado nos resultados dos testes iniciais, foram selecionados dois compostos para testes complementares. Os fluxos simples selecionados foram o dióxido de silício (SiO_2), pelas alterações provocadas no cordão de solda, e o fluoreto de cálcio (CaF_2), devido ao seu efeito sobre o fator de curto-circuito. Ambos os compostos são usados comumente como

formadores de escória em soldagem, contribuindo para elevar o volume dela, ou contendo componentes capazes de afetar as suas características, como a viscosidade, a tensão superficial e temperatura de fusão.

Por fim, a metodologia de aplicação de fluxos, aquisição de dados e análise de resultados se mostrou adequada e de fácil replicação. Em relação às metodologias de obtenção de medidas de reforço, via paquímetro, e largura, via fotografia auxílio pelo programa ImageJ, se mostraram de fácil reprodução e com menor tempo de execução que a macrografia. A comparação dos resultados oriundos das técnicas alternativas com as obtidas via macrografia foram similares considerando os respectivos erros e, portanto, essas metodologias foram validadas para aplicação na etapa de testes complementares.

5.3 Testes Complementares

Nessa etapa realizaram-se testes com os fluxos dióxido de silício ou fluoreto de cálcio, separadamente com tensões nominais de 20, 28 e 32 V para se avaliar o efeito dos fluxos com variações na tensão de soldagem e, com possíveis, alterações do modo de transferência metálica. Para análise, acrescentou-se o conjunto de dados de 24 volts da etapa anterior referente aos dois fluxos selecionados.

O comportamento dos dados foi avaliado através de gráficos, das diferenças (variações) observadas entre um parâmetro e a média da soldagem MIG/MAG convencional, sem fluxo (equação 4.4) e por estatística. Inferências sobre o comportamento dos oscilogramas de tensão no modo de transferência metálica por curto-circuito basearam-se nas informações presentes na figura 3.3, que apresenta fotografias da soldagem em curto-circuito e o oscilograma correspondente.

5.3.1 Efeito dos fluxos em sinais elétricos com diferentes tensões de operação

A figura 5.12 exhibe um trecho dos oscilogramas de tensão e corrente de soldagem no experimento em que se aplicou fluoreto de cálcio (CaF_2) sob tensão nominal de soldagem de 20 V. O oscilograma de tensão da soldagem A-MIG/MAG (CaF_2 , 20V) apresentou menor variação de tensão durante o rompimento do curto-circuito e estabelecimento do arco,

atingindo uma tensão de pico menor. A aplicação de CaF_2 tendeu a diminuir a tensão média nos momentos de arco. Os períodos de arco foram alterados pela aplicação de fluxos, percebe-se uma elevação do período médio e da duração média dos picos na soldagem com aplicação de CaF_2 , conseqüentemente o fator de curto-circuito foi menor.

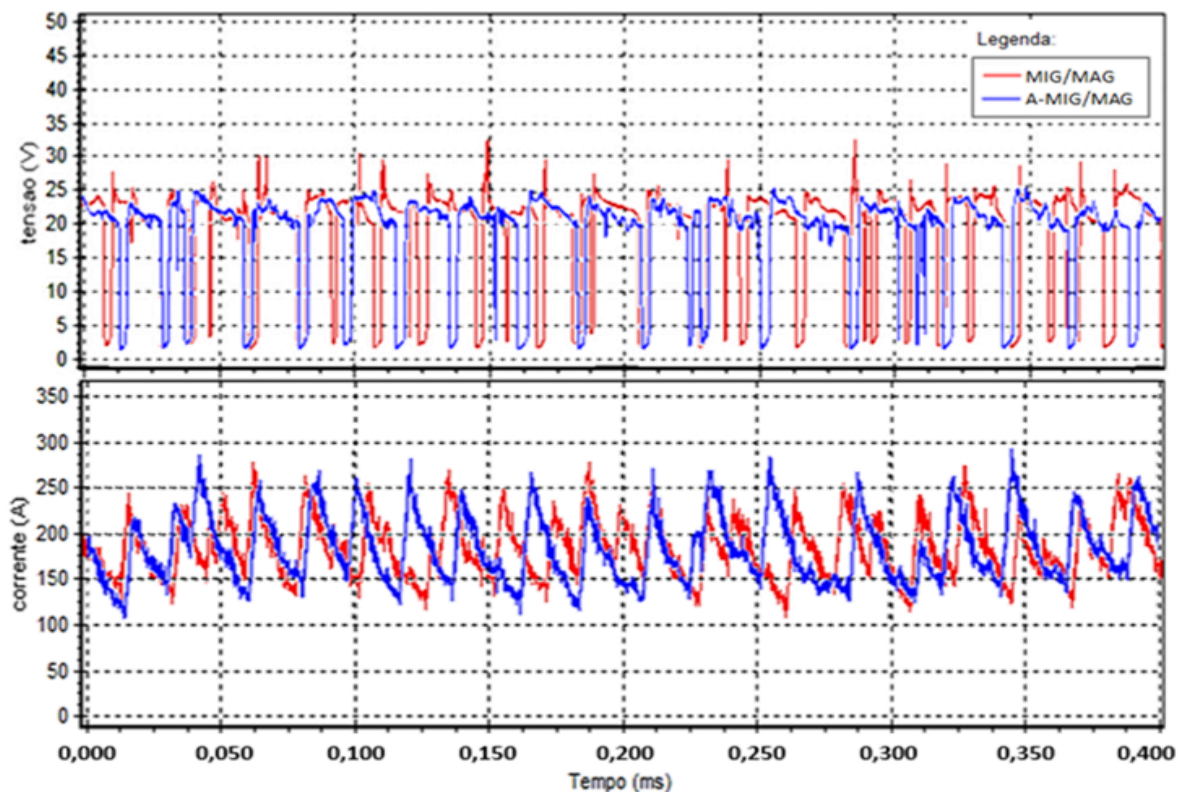


Figura 5.12 Oscilogramas de tensão e corrente de soldagem no experimento em que se aplicou fluoreto de cálcio (CaF_2) sob tensão nominal de soldagem de 20 V.

Detalhes do oscilograma de tensão e corrente de soldagem com a aplicação de fluoreto de cálcio (CaF_2) sob tensão nominal de soldagem de 32V são apresentados na figura 5.13. O oscilograma de tensão da soldagem MIG/MAG apresenta picos em alguns instantes com valor superior aos observados em A-MIG/MAG. Dois desses picos podem ser observados entre os intervalos de 0,000 ms a 0,050 ms e de 0,150 ms a 0,200 ms. Os oscilogramas de corrente não apresentaram alterações significativas.

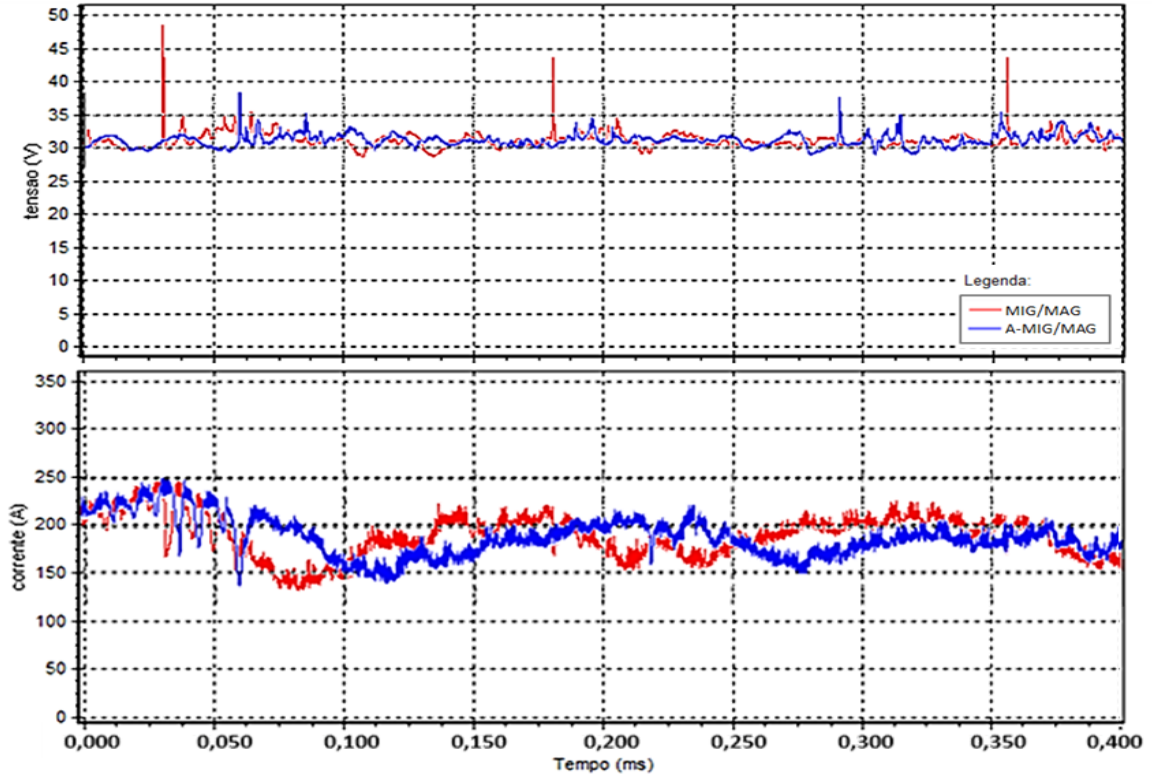


Figura 5.13. Oscilogramas de tensão e corrente de soldagem no experimento em que se aplicou fluoreto de cálcio (CaF_2) sob tensão nominal de soldagem de 32 V.

O oscilograma de tensão da soldagem A-MIG/MAG (SiO_2 , 20 V) apresentou menor variação durante o momento de rompimento do curto-circuito e estabelecimento do arco, atingindo uma tensão de pico em alguns momentos menor. Esse fato foi observado de forma semelhante na soldagem com aplicação de CaF_2 . A aplicação de SiO_2 aparenta ter elevado a tensão média nos momentos de arco em 7%, confirmando o que foi observado na etapa anterior. Os períodos de arco também foram afetados pelos fluxos de modo que o fator de curto-circuito aumentou com a aplicação de SiO_2 . Em relação ao oscilograma de corrente, além da alteração dos períodos entre picos, percebeu-se em alguns momentos que os valores absolutos dos picos e vales na soldagem com SiO_2 apresentaram maior valor absoluto que na soldagem sem fluxo, isso pode ser observado no período de 0,200 a 0,250 ms da figura 5.14.

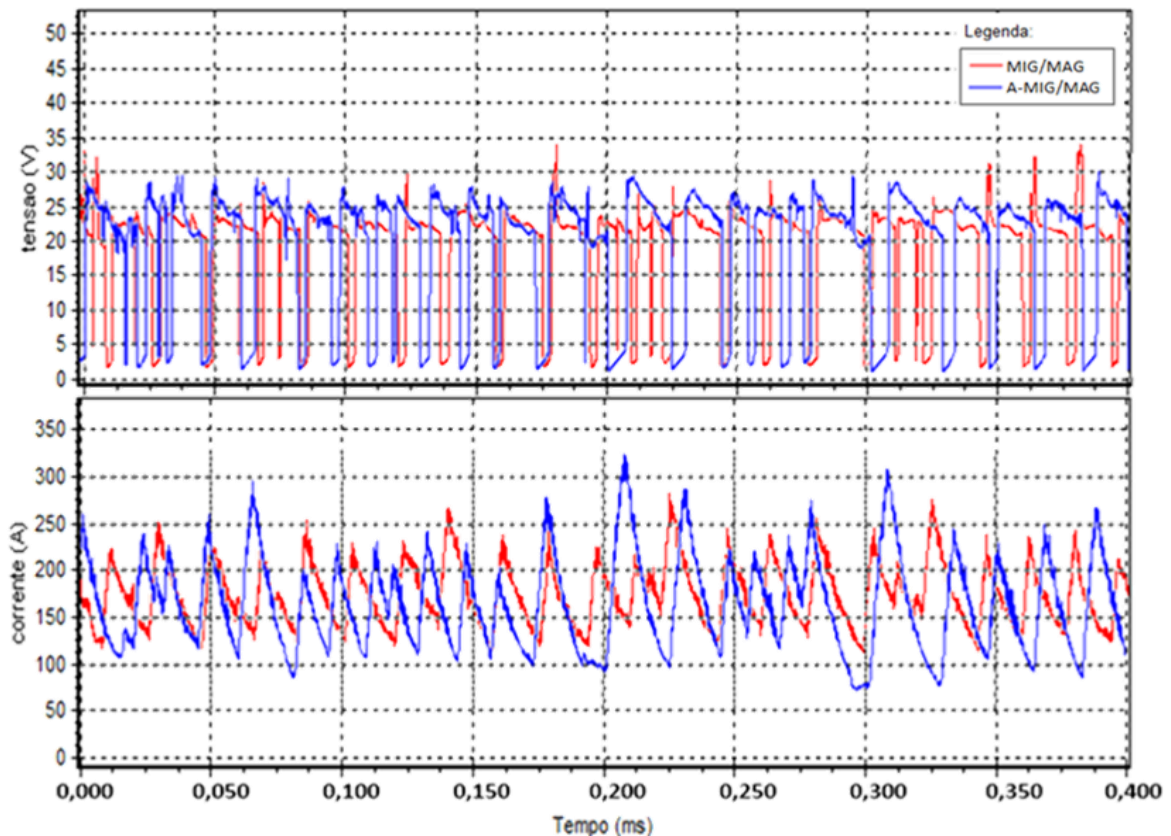


Figura 5.14 Oscilogramas de tensão e corrente de soldagem no experimento em que se aplicou dióxido de silício (SiO_2) sob tensão nominal de soldagem de 20V.

A figura 5.15 apresenta os oscilogramas de tensão e corrente de um experimento com e sem a aplicação de SiO_2 sob tensão nominal de 32V. O oscilograma de tensão da soldagem MIG/MAG apresenta picos em alguns instantes com valor superior ao A-MIG/MAG. Já, os oscilogramas de corrente não apresentaram diferenças significativas.

De um modo geral, a avaliação visual dos oscilogramas de corrente e tensão torna perceptível a capacidade dos fluxos em reduzir a variação de tensão durante a reignição do arco (rompimento do contato durante o curto-circuito e estabelecimento do arco), atingindo uma tensão de pico menor. Além disso, percebeu-se a capacidade deles em alterar os períodos de transferência e a tensão nos períodos de arco.

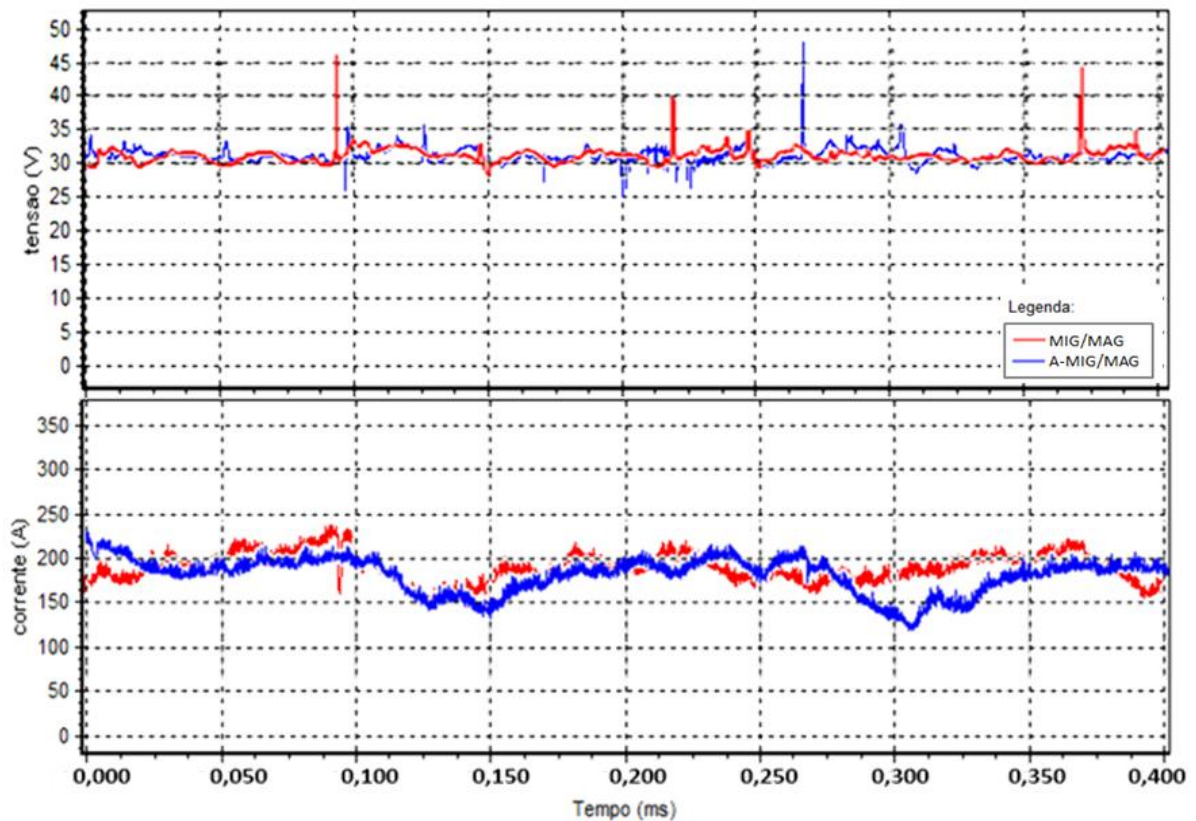


Figura 5.15 Oscilogramas de tensão e corrente de soldagem no experimento em que se aplicou dióxido de silício (SiO_2) sob tensão nominal de soldagem de 32V.

Uma análise mais detalhada dos efeitos dos fluxos pode ser feita comparando-se as médias e desvios dos resultados da soldagem com e sem fluxo. As alterações mais significativas observadas foram na corrente média, fator de curto-circuito, tensão do arco, na corrente do arco e na variação e pico de tensão durante a reignição do arco, ao final dos curtos-circuitos. A soma das quedas de tensão anódica e catódica do arco apresentou alterações significantes apenas para o SiO_2 . As maiores variações de parâmetros observadas ocorreram em menores tensões, 20 V, com transferência metálica via curto-circuito.

Avaliando-se a variação da corrente em relação à tensão média de soldagem, considerando-se os desvios padrões observados na soldagem sem fluxo, percebe-se que a aplicação de SiO_2 tendeu a diminuir a corrente, enquanto que as variações observadas com CaF_2 não foram tão significantes (Figura 5.16).

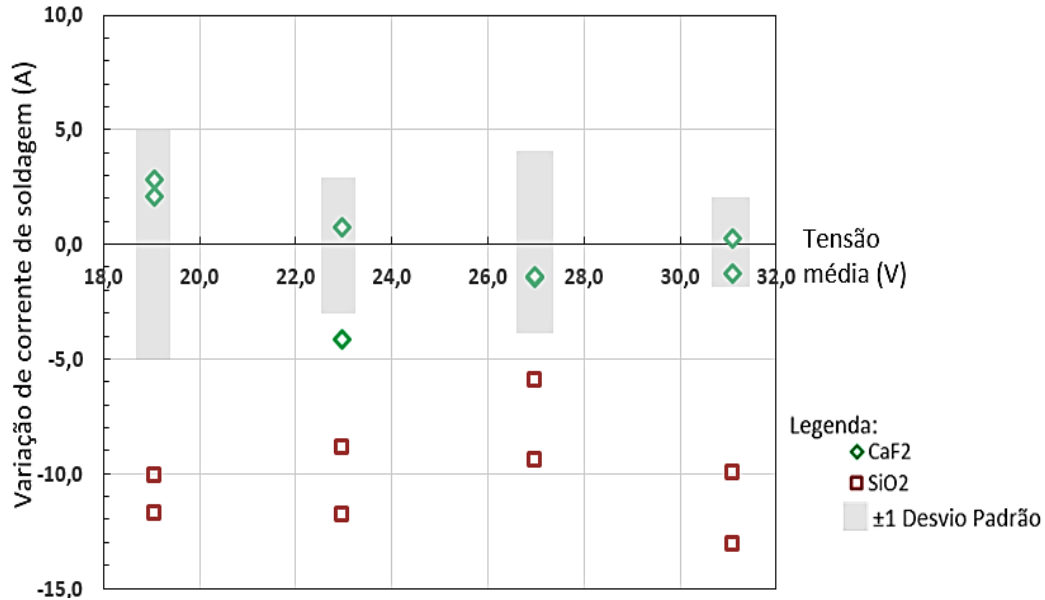


Figura 5.16 Gráfico da variação da corrente de soldagem, em relação a soldagem MIG/MAG sem aplicação de fluxos, pela tensão média observada.

A figura 5.17 expõe os valores observados do fator de curto-circuito em relação à tensão média de soldagem. Observou-se que as variações no parâmetro F_{cc} foram mais intensas em menores tensões, em que o fator de curto-circuito é maior. O fator de curto-circuito tendeu a aumentar com a aplicação de SiO_2 e a reduzir com CaF_2 nas tensões médias de 19 V e 23 V. Na tensão média de 27 V observou-se que o CaF_2 apresentou transferência metálica somente por queda livre, enquanto que, na soldagem sem fluxo e com a deposição de SiO_2 , ainda ocorreu transferência por curto-circuito. Com a tensão média de 31 V, tanto a soldagem sem fluxos quanto a com aplicação de SiO_2 ou CaF_2 apresentaram transferência metálica por queda livre.

Os resultados indicam que o SiO_2 tende a aumentar a tensão nos períodos de arco enquanto que o CaF_2 tende a reduzi-la. Essa tendência é mais evidente com os menores valores de tensão. Para uma tensão média de 31 V, ambos os fluxos apresentaram variação da tensão média de arco insignificante em relação à soldagem sem fluxo. A figura 5.18 mostra os

valores de tensão no arco em relação à tensão média observada na soldagem MIG/MAG sem aplicação de fluxo, com deposição de SiO_2 ou CaF_2 .

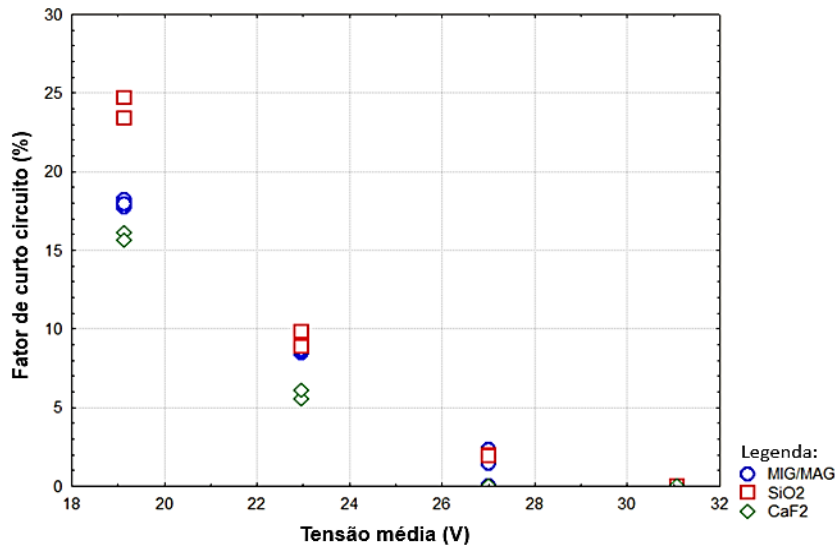


Figura 5.17 Comportamento do fator de curto-circuito observado, em percentual, na soldagem sem ou com fluxos (SiO_2 ou CaF_2) em relação a tensão média.

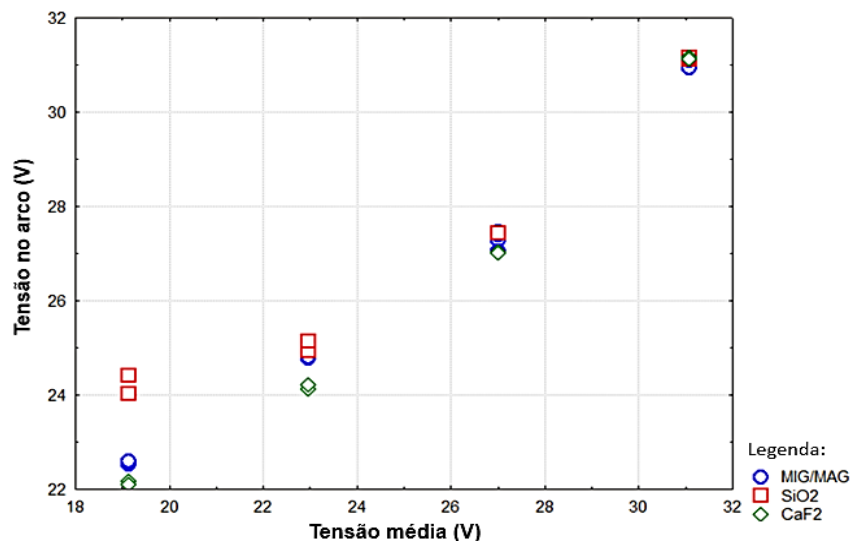


Figura 5.18 Gráfico dos valores de tensão no arco em relação a tensão média observada, na soldagem MIG/MAG sem aplicação de fluxo ou com deposição de SiO_2 ou CaF_2 .

Através da avaliação das variações de corrente na fase de arco em cada tensão de soldagem percebe-se que o fluxo de SiO₂ apresentou os efeitos mais significativos, com tendência de diminuir a corrente de arco. O fluxo contendo CaF₂ não apresentou variação significativa desse parâmetro em relação a soldagem sem aplicação de fluxo.

A tensão e a corrente durante o curto-circuito não apresentaram variações significativas quando se compara os dados com e sem aplicação de fluxos.

Os valores da soma das quedas de tensão anódicas e catódicas (U_{ac}), em volts, para as tensões nominais e fluxos avaliados é exibida na figura 5.19. Nela, observa-se a tendência do SiO₂ em elevar o valor da soma das quedas de tensão anódica e catódica. O comportamento observado para as médias sem fluxo e com aplicação de CaF₂ nesse parâmetro são semelhantes. As variações mais significativas ocorreram nas menores tensões, em que o fator de curto-circuito é mais elevado.

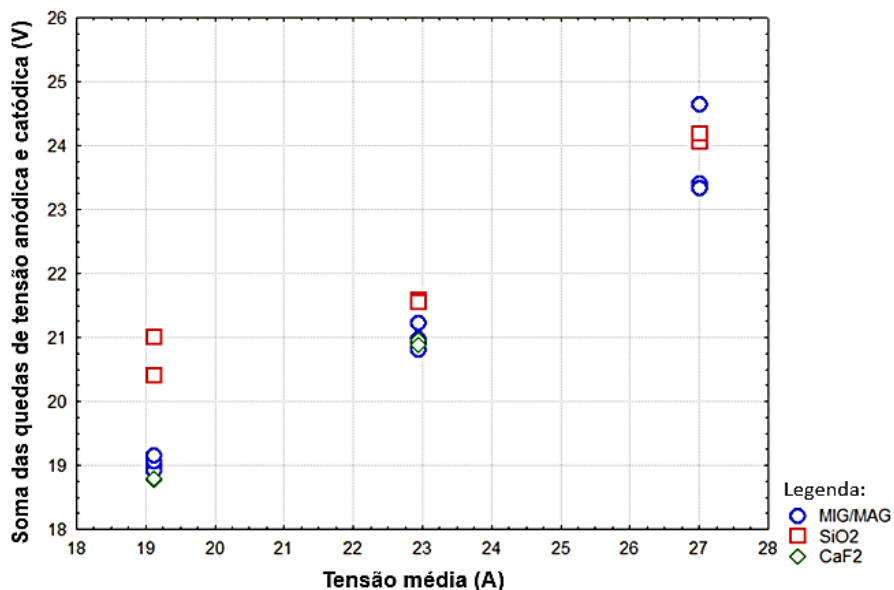


Figura 5.19 Gráfico dos valores da soma das quedas de tensão anódica e catódica (U_{ac}) e a tensão média observada nos testes de soldagem MIG/MAG sem e com aplicação de fluxos (SiO₂ ou CaF₂).

Resumidamente, os ensaios conduzidos com tensão nominal de 20 V apresentaram transferência metálica por curto-circuito para os testes com e sem fluxo. Com a elevação da tensão, os períodos de arco foram aumentados. Para tensão nominal de 28 V, os experimentos

em que se aplicou CaF₂ apresentaram transferência metálica por queda livre, enquanto que nos demais (sem fluxo e com fluxo contendo SiO₂) esse mesmo modo de transferência ocorreu intercalado com curtos-circuitos, isto é, o valor de Fcc era pequeno, mas diferente de zero. Com tensão nominal de 32 V, todos os ensaios apresentaram transferência por queda livre.

Indícios sugerem que a aplicação de SiO₂ ou CaF₂ afete os sinais elétricos operacionais em diferentes intensidades e sentidos, conduzindo a um aumento ou redução de valores. A tabela V.3 resume as tendências observadas dos principais parâmetros elétricos afetados pela aplicação de fluxos em MIG/MAG nessa etapa de testes. Observou-se que o fluxo contendo SiO₂ tendeu a elevar a tensão média, o fator de curto-circuito, a tensão no arco e a soma das quedas de tensão anódica e catódica, enquanto que a corrente de soldagem e a corrente de arco tenderam a ser reduzidas. O fluxo com CaF₂ não alterou de forma significativa a corrente de soldagem, corrente de arco e os parâmetros Fcc e tensão no arco nos ensaios de tensão mais elevada. Contudo, observou-se que nas tensões mais reduzidas os ensaios contendo CaF₂ tendeu a elevar a tensão de soldagem e a reduzir o fator de curto-circuito, a tensão no arco e a soma das quedas de tensão anódica e catódica.

Tabela V.3 Tendências das variações associadas à aplicação de SiO₂ ou CaF₂ em relação a soldagem sem fluxo nos parâmetros elétricos: tensão e corrente de soldagem, fator de curto-circuito, tensão e corrente do arco e a soma das quedas anódica e catódica do arco.

		Tensão				Corrente				Fcc			
Tensão Nominal(V)		20	24	28	32	20	24	28	32	20	24	28	32
Fluxos	SiO ₂	+	+	0	0	-	-	-	-	+	+	+	0
	CaF ₂	+	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	0
		Uarc				Iarc				Uac			
Tensão Nominal(V)		20	24	28	32	20	24	28	32	20	24	28	32
Fluxos	SiO ₂	+	+	0	0	-	-	-	-	+	+	0	nd
	CaF ₂	-	-	0	0	0	0	0	0	-	0	nd	nd

Observação: “+” refere-se à tendência de elevação de valor, “0” a variação de valor insignificante ou nula, “-” a tendência de redução de valor, “nd” a valor não determinado.

A tensão e a corrente de curto-circuito não apresentaram variações significativas com ambos os fluxos testados em relação à soldagem sem fluxos. Essa tendência está coerente com o que foi observado nos testes iniciais para os nove fluxos testados, o que reforça a hipótese de que uma vez estabelecido o contato direto entre o eletrodo e a poça de fusão, o comportamento do sistema não seria mais afetado pela presença de fluxos. Considerando que o efeito dos fluxos selecionados diminuiu com a elevação da tensão, infere-se que as variações provocadas por eles ocorram principalmente no modo de transferência por contato, via curto-circuito, e em especial nos momentos de reignição do arco.

5.3.2 Efeito dos fluxos com variação de tensão na geometria dos cordões de solda

Nessa etapa avaliaram-se os efeitos provocados pelos fluxos simples, dióxido de silício ou fluoreto de cálcio, na geometria dos cordões de solda, com tensões nominais de soldagem de 20, 24, 28 e 32 V. Em geral, a elevação da tensão média de soldagem esteve associada à tendência de aumento da largura e a redução do reforço e penetração do cordão de solda. Dentre os fluxos estudados nessa etapa, o SiO_2 tendeu a promover efeitos mais significativos que o CaF_2 .

A figura 5.20 apresenta uma foto da superfície de um corpo de prova em que se aplicou SiO_2 na parte da direita e a soldagem foi conduzida com tensão nominal de 20V. Esta mostra uma significativa redução da largura ocasionada pelo fluxo. Para avaliação da largura e reforço do cordão, foram realizadas medidas em macrografias de seções transversais do cordão e por paquímetro; os dois métodos apresentaram médias semelhantes considerando os respectivos desvios padrões. Algumas dessas macrografias obtidas de cordões sem e com fluxo (SiO_2 ou CaF_2) podem ser observadas na figura 5.21.



Figura 5.20 Foto superficial do cordão de solda obtido de um corpo de prova em que se depositou SiO_2 na parte da direita, sob tensão nominal de 20 volts.

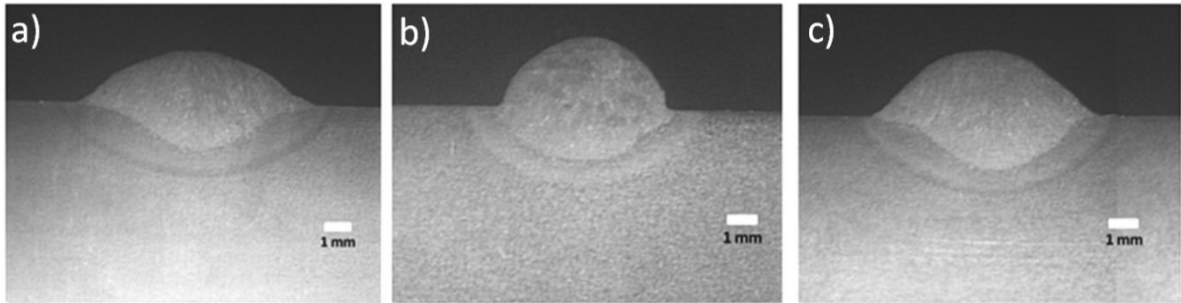


Figura 5.21 Macrografias das seções transversais de alguns cordões de solda obtidas sob tensão nominal de 20V, sem a) sem fluxo, b) SiO₂, c) CaF₂.

A figura 5.22 apresenta a largura do cordão de solda em função da tensão nominal e aplicação, ou não, de fluxos na soldagem. A tendência geral observada é da elevação da largura do cordão com a elevação da tensão de soldagem. Conforme se pode observar nas tensões de 20 V, 24 V e 28 V, o SiO₂ tende a diminuir significativamente a largura do cordão, tendência também observada em menor significância com o uso de CaF₂ nas tensões de 20 e 24 V. Com 32 V, não foi verificada diferença significativa entre a soldagem com ou sem fluxo quanto à largura do cordão de solda.

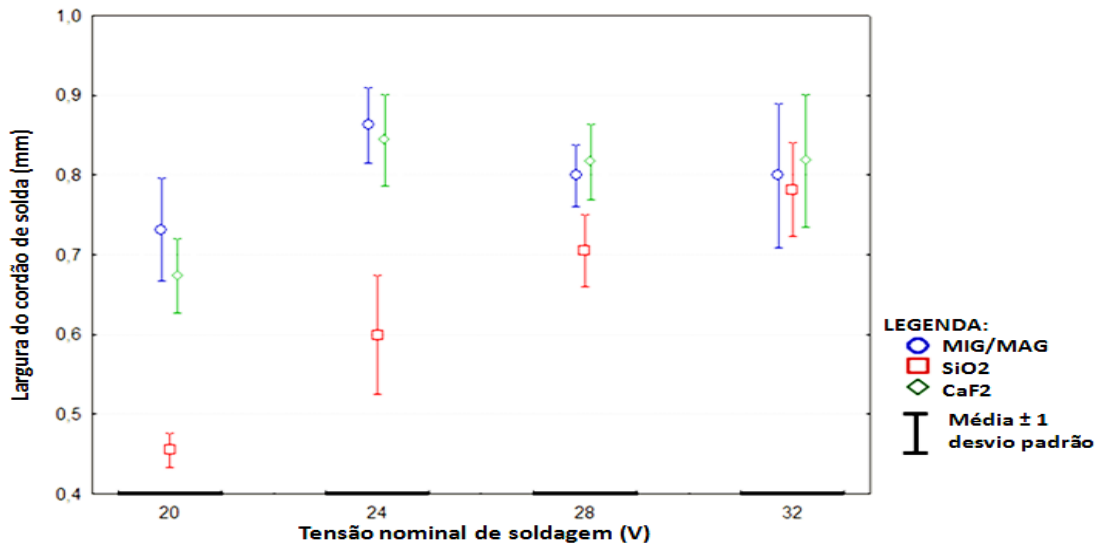


Figura 5.22 Variação da largura do cordão de solda com a tensão nominal de soldagem (20, 24, 28 e 32V) com ou sem fluxos (SiO₂ e CaF₂). *Observação: pequenas diferenças de posição na horizontal foram feitas para visualizar melhor a disposição dos dados e não significam tensões diferentes.*

A variação do reforço do cordão de solda com a tensão nominal de soldagem e aplicação, ou não, de fluxos é apresentada na figura 5.23. A tendência geral observada é de redução do reforço com a elevação da tensão. Percebe-se que o fluxo de SiO₂ tende elevar o reforço nas tensões nominais de 20 e 24 V e a reduzi-lo nas tensões de 28 e 32 V. Tendência similar, mas menos intensa, foi observada com a aplicação de CaF₂. Neste caso, o reforço médio foi superior ao dos cordões obtidos na soldagem sem fluxo com 20 V. Para tensões de soldagem mais elevadas, as diferenças no reforço dos cordões não foram significativas.

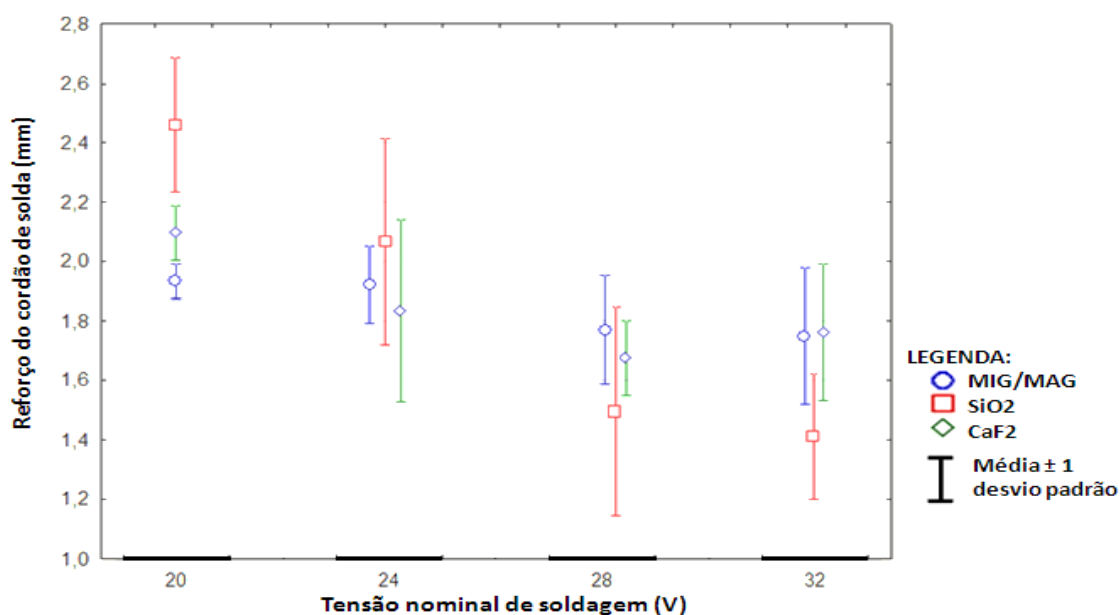


Figura 5.23 Variação do reforço do cordão de solda com a tensão nominal de soldagem (20, 24, 28 e 32 V) com ou sem fluxos (SiO₂ e CaF₂). *Observação: pequenas diferenças de posição na horizontal foram feitas para visualizar melhor a disposição dos dados e não significam tensões diferentes.*

Na figura 5.24, é apresentada a variação da penetração medida em macrografia dos cordões obtidos em soldagem com e sem fluxo (SiO₂ e CaF₂) e com diferentes tensões nominais de soldagem. Percebe-se que, enquanto a tendência geral da soldagem convencional (sem fluxos) é de reduzir a penetração com a elevação da tensão, a tendência observada da

soldagem A-MIG/MAG dos fluxos selecionados foi de elevar a penetração para tensões nominais de 20 a 28 V. Nos cordões obtidos com 32 V as penetrações não apresentaram diferenças significativas.

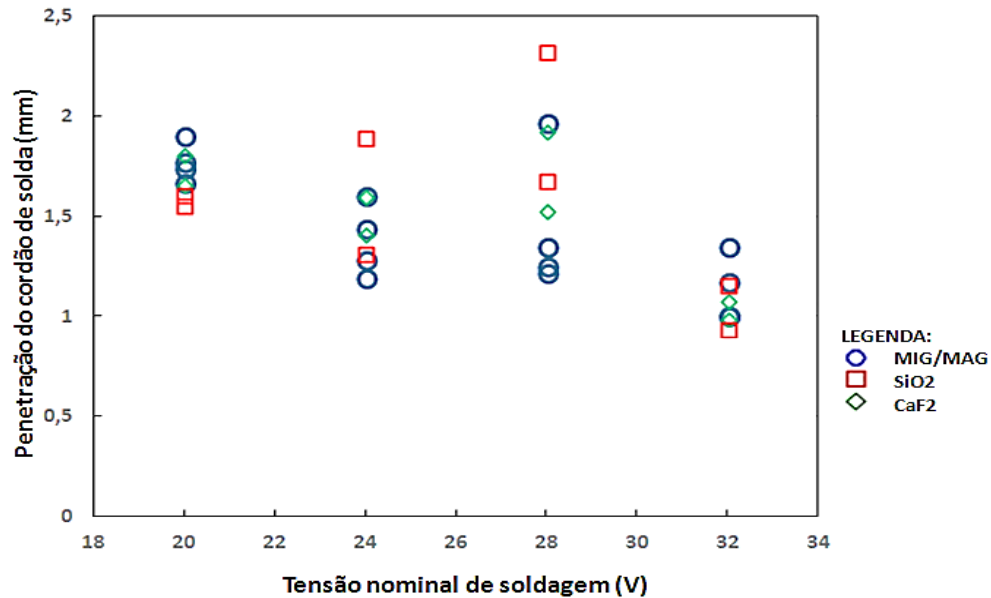


Figura 5.24 Gráfico da penetração do cordão de solda (mm) observada em macrografia para a soldagem com e sem fluxos (SiO₂ e CaF₂) sob variação de tensão nominal(V).

De forma resumida, a avaliação da geometria dos cordões de solda gerou informações importantes para a compreensão dos efeitos dos fluxos selecionados no cordão de solda com variação de tensão. Índícios mostram que o modo como os fluxos selecionados afetam a geometria pode ser alterado com a elevação da tensão. O efeito de fluxos pode variar de intensidade e sentido (redução ou aumento de um parâmetro) de acordo com a tensão. Com tensão nominal de 20 V, o fluxo contendo SiO₂ tendeu a elevar o reforço do cordão de solda, contudo observou-se que com a elevação da tensão média a tendência observada é desse fluxo reduzir o reforço. A tabela V.4 apresenta as tendências observadas de variação de reforço, largura e penetração do cordão de solda.

Tabela V.4 Tendências das variações associadas a aplicação de SiO₂ ou CaF₂ em relação a soldagem sem fluxo nos parâmetros geométricos do cordão: reforço, largura e penetração

	20V		24V		28V		32V	
	SiO ₂	CaF ₂	SiO ₂	CaF ₂	SiO ₂	CaF ₂	SiO ₂	CaF ₂
Reforço	+	+	+	0	-	0	-	0
Largura	-	-	-	0	-	0	0	0
Penetração	-	0	0	0	+	+	0	0

Observação: “+” refere-se à tendência de elevação de valor, “0” a variação de valor insignificativa ou nula, “-” a tendência de redução de valor, “nd” a valor não determinado.

5.3.3 Outros efeitos observados

Ao se observar as características dos corpos de prova soldados nessa etapa, perceberam-se alterações em aspectos do cordão e das escórias formadas. A figura 5.25 exibe fotografias da superfície de cordões de solda contendo a região da cratera obtidos via A-MIG/MAG sob tensão nominal de 20V, em que foram aplicados em a) CaF₂ e b) SiO₂. Comparando-se as imagens das figuras 5.16 a) e b) percebem-se alterações na distribuição de escória na região da cratera e ao longo do cordão. Considerando que os parâmetros de soldagem se mantiveram fixos, em especial a velocidade de soldagem, a alteração da distribuição da escória observada indica que a composição do fluxo afetou as propriedades da escória, como a viscosidade ou a fluidez. Dentre as características de cada componente aplicado como fluxo ressalta-se a capacidade do CaF₂ como agente fluxante e do SiO₂, para alterar a viscosidade. Assim, escórias com maior viscosidade, tenderiam a apresentar maior resistência ao movimento e menor capacidade de escoar. Os pontos de fusão das escórias também poderão ser alterados pelos componentes fornecidos pelos fluxos, sendo o ponto de fusão do composto SiO₂ mais elevado que a do CaF₂.

a) A-MIG/MAG (CaF₂, 20V)



b) A-MIG/MAG (SiO₂, 20V)



Figura 5.25 Fotografias da superfície da extremidade final de cordões de solda obtidos via A-MIG/MAG sob tensão nominal de 20V em que foi aplicado em a) CaF₂ e b) SiO₂, com indicativo para as escorias formadas, fluxos e cordão de solda.

Baseado nas alterações na distribuição de escória na região da cratera e ao longo do cordão, observada na figura 5.25, e demais considerações sobre o assunto, acredita-se que a composição do fluxo poderia afetar a tensão superficial, a viscosidade, o ponto de fusão dentre outras características da escória formada. Ela se moveria juntamente com a poça de fusão podendo afetar a molhabilidade ou a fluidez da poça de fusão, sendo que parte do fluxo não decomposto ou fundido presente nas laterais do cordão de solda poderia se comportar como uma barreira física de retenção da poça de fusão e exercer, ou não, algum nível de isolamento térmico e elétrico do meio, pela presença de óxidos com temperatura de fusão superior à do metal de base e de alterações na rigidez dielétrica.

5.3.4 Considerações sobre os testes complementares

As alterações na geometria do cordão de solda estiveram associadas a variações em sinais elétricos operacionais. Baseado nisso, acredita-se que as condições operacionais e o formato do cordão estejam necessariamente ligados na soldagem A-MIG/MAG, dentro das condições estudadas. Na primeira etapa de testes, isto não fica evidente, pois as variações de sinais elétricos operacionais ocasionadas por alguns componentes, CaCO_3 e CaF_2 , não foram acompanhadas de significativas alterações na geometria do cordão de solda. Contudo, na segunda etapa, o efeito dos fluxos foi mais perceptível, sendo mais evidente a associação de variações operacionais às geométricas na transferência por curto-circuito. Assim, a hipótese levantada de que os efeitos em parâmetros elétricos e de geometria do cordão estarem dissociados, sugerida na seção 5.2.4, não foi confirmada.

Em relação aos mecanismos propostos na literatura sobre o efeito de fluxos, em especial na soldagem A-TIG, dois deles puderam ser avaliados em relação às evidências observadas nessa pesquisa.

Através da análise de dados percebe-se que as variações associadas ao uso de fluxos (SiO_2 e CaF_2) nos parâmetros elétricos de operação (fator de curto-circuito, tensão na fase de arco e soma das quedas catódica e anódica do arco) e geométricos do cordão de solda tendem a ser mais intensas na transferência metálica por curto-circuito, particularmente em maiores valores do fator de curto-circuito. Esse fato não concorda com uma proposta inicial deste trabalho em que se esperava um maior efeito dos fluxos com a transferência em queda livre baseado na suposição de que os fluxos atuariam mais fortemente durante os momentos de arco, devido à ionização ou vaporização de componentes do fluxo. Essa constatação deve ser relevante para se compreender o mecanismo de participação dos fluxos aplicados durante a soldagem e em que configurações de soldagem eles promovem efeitos mais significativos. Naturalmente, são necessários mais estudos sobre o tema.

A tendência observada de redução da corrente média e de arco na soldagem A-MIG/MAG com fluxo de dióxido de silício pode estar associada às propriedades elétricas e/ou térmicas desse material. Essa inferência reforça a hipótese de que a rigidez dielétrica da sílica dificulte

mais a passagem de corrente elétrica, em comparação a dos demais compostos estudados, levando a diminuição de corrente. Sugere-se que essa redução seja mais evidente em fluxos com maior capacidade de recobrir a superfície do metal de base e formar um filme homogêneo. Assim a parte da superfície coberta por esses fluxos teria uma maior resistência elétrica, tornando o arco mais estreito, com densidade de corrente superior no ponto de arco, resultando numa penetração mais profunda. Acredita-se que o sistema constituído pelo eletrodo, gás de proteção, película de fluxo e corpo de prova se assemelharia, grosseiramente, a um capacitor, em que se altera o material entre as placas metálicas paralelas, e ocorre passagem de corrente elétrica devido ao rompimento da rigidez dielétrica do meio. Esse modelo é uma versão adaptada da proposta de efeito isolante do fluxo presente na literatura (LOWKE, TANAKA E USHIO, 2005). Contudo, não se exclui a possibilidade de ocorrer o efeito Marangoni (HEIPLE E ROPER, 1982) ou a constrição do arco elétrico.

Acredita-se que os possíveis mecanismos ou efeitos que promovem intensas variações em A-TIG possam ser atenuados em A-MIG/MAG. Esse argumento pode ser utilizado para se justificar a menor evidencia de possíveis alterações oriundas do efeito Marangoni, que é um mecanismo defendido por diversos autores para se justificar os efeitos em A-TIG.

Baseado no fato do efeito dos fluxos ser mais intenso em menores tensões de soldagem, em que a transferência metálica se dá por contato, e nas alterações observadas das características da escória, acredita-se que a escória produzida durante a soldagem possa desempenhar um importante papel na alteração dos sinais elétricos de soldagem, pois as suas propriedades são passíveis de serem modificadas pelos fluxos. Assim, a composição do fluxo afetaria a tensão superficial, a viscosidade, o ponto de fusão dentre outras características da escória formada.

Sugere-se, como mecanismo de atuação dos fluxos na soldagem A-MIG/MAG, que, à medida que a poça de fusão se desloca juntamente com o arco elétrico, a parte recoberta por fluxos da superfície teria uma maior resistência elétrica ou térmica, tornando o arco mais estreito, com maior densidade de corrente. O fluxo presente na direção do movimento de soldagem também tenderia a formar escória, juntamente com outros óxidos presentes na poça de fusão. Enquanto isso, parte do fluxo não decomposto ou fundido presente nas laterais da

poça de fusão poderia se comportar como uma barreira física de retenção da poça de fusão e exercer, ou não, algum nível de isolamento térmico do meio, pela presença de óxidos com temperatura de fusão superior à do metal de base. De acordo com a composição de cada fluxo, as propriedades da escória formada se alterariam, assim como os efeitos ocasionados pelos fluxos nas laterais da poça de fusão. Paralelamente a isso, devido ao arco elétrico parte dos fluxos poderia ser vaporizada, decomposta ou ionizada, fornecendo elementos ao plasma. Em tensões de soldagem reduzidas, o modo de transferência metálica por contato prevalece e a transferência da gota fundida à poça de fusão poderia ser mais afetada pela escória presente. Com a elevação da tensão e aumento dos períodos de arco, a energia de soldagem se elevaria ocasionando condições mais agressivas, o que atenuaria os efeitos associados ao fluxo.

Acredita-se que entre os mecanismos estudados, o sugerido que envolve a participação dos fluxos como isolante elétrico e térmico conjuntamente com os efeitos da escória formada sejam os mais relevantes para se justificar as evidências e efeitos observados dentro das condições estudadas em A-MIG/MAG. Como exemplo de efeito, a escória formada ou os fluxos aplicados ao longo da junta poderiam facilitar a reignição do arco, reduzindo, assim, o pico de tensão observado ao final de um curto-circuito. Em trabalhos futuros, testes de soldagem com filmagem de alta velocidade poderiam avaliar a validade desta proposta.

Ressalta-se que os efeitos observados no processo A-MIG/MAG não foram acompanhados de alterações tão intensas na penetração do cordão de solda, como é reportado na literatura para o A-TIG. Sugere-se, como possíveis causas desse resultado, a atenuação de efeitos que ocorrem na poça de fusão durante a soldagem TIG pela maior complexidade do sistema eletrodo/arco/poça de fusão e perturbações mais intensas neste durante a soldagem MIG/MAG, o fato do eletrodo no processo MIG/MAG ser consumível e geralmente com polaridade positiva e as perturbações ocasionadas pela transferência de metal para a poça de fusão.

Em relação à interação entre o gás de proteção estudado (Ar-18%CO₂) e a aplicação de fluxos simples, acredita-se que a utilização de gases de proteção com menor potencial de oxidação,

em especial os constituídos apenas por argônio ou hélio gasosos, poderá promover efeitos de maior intensidade ou torná-los de alguma forma mais evidentes. Essa hipótese considera que, em uma atmosfera de gases inertes, os fluxos, principalmente quando na forma de óxidos, poderiam contribuir para a emissão de elétrons na região catódica, o que, com um gás ativo, seria facilitado pela oxidação contínua da superfície do cátodo.

6 CONCLUSÕES

Dentro das condições experimentais realizadas, as seguintes conclusões foram possíveis sobre o processo MIG/MAG com aplicação de fluxos sólidos sobre a linha de junta (A-MIG/MAG):

1. O processo de soldagem MIG/MAG convencional pode ter as suas condições operacionais e o formato do cordão de solda alterados quando se depositam compostos químicos pulverizados sobre a superfície do metal de base.
2. Os efeitos observados no processo A-MIG/MAG, dentro das condições experimentais realizadas, não foram acompanhados de alterações tão intensas na penetração do cordão de solda, como é reportado na literatura para o A-TIG;
3. Os efeitos do fluxo, tanto no processo como formato do cordão de solda, podem variar de intensidade e sentido de acordo com a tensão de soldagem e a composição do fluxo;
4. Entre os fluxos testados com uma tensão nominal de soldagem de 24 V, o SiO_2 e o Cr_2O_3 foram os que afetaram de forma mais intensa a morfologia do cordão de solda, enquanto que o CaF_2 e o CaCO_3 causaram efeitos mais fortes em parâmetros elétricos de soldagem;
5. Na soldagem A-MIG/MAG com tensão nominal de 24 V, os fluxos que causaram maior dispersão nos valores de reforço e largura do cordão foram o SiO_2 , CaF_2 e CaCO_3 . Este resultado foi relacionado a uma maior sensibilidade da operação de soldagem a variações de densidade superficial desses fluxos;
6. Entre todos os nove compostos avaliados como fluxo, o SiO_2 foi o que proporcionou a maior variação nas correntes médias de soldagem e de arco, ocasionando uma redução de 12 A em relação às obtidas na soldagem sem fluxo.
7. Na tensão nominal de 24 V, os fluxos contendo CaF_2 e CaCO_3 foram os que demonstraram maior capacidade em reduzir a tensão elétrica nos períodos de arco e o fator de curto-circuito.
8. Com a aplicação de CaF_2 , foi possível obter transferência metálica em queda livre com valores de tensão inferiores aos necessários para a sua obtenção na soldagem sem fluxo;

9. De forma geral, os fluxos que apresentaram maior facilidade para recobrir a superfície do corpo de prova formando uma camada mais homogênea (Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , CaCO_3 , CaF_2 , KClO_4 e SiO_2) foram associados aos efeitos mais intensos ou perceptíveis na soldagem e no cordão resultante;
10. Nos testes com SiO_2 ou CaF_2 , o efeito do fluxo tanto nas condições de soldagem como no formato do cordão foi mais intenso para baixas tensões de soldagem com transferência por curto-circuito.
11. Sugere-se que as propriedades dos fluxos como agentes formadores e modificadores de escória durante a soldagem seja uma característica importante, que se relaciona aos efeitos observados em A-MIG/MAG. Além desses, sugere-se também as propriedades de isolamento térmico, ponto de fusão, rigidez dielétrica dentre outros;
12. Foi considerada, como um possível fator para explicar os efeitos dos fluxos no processo de soldagem e no formato do cordão, a capacidade destes para recobrir o metal de base causando isolamento térmico e elétrico ao longo da junta e nas laterais da poça de fusão.

7 RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS

A pesquisa apresenta o estudo do efeito de nove compostos como fluxos na soldagem A-MIG/MAG. A diversidade de efeitos ocasionados pelos nove fluxos experimentados nas condições operacionais de soldagem e características geométricas do cordão de solda pode ser utilizada para a elaboração de fluxos sólidos para a soldagem MIG/MAG, tanto voltada para a indústria como a pesquisa e desenvolvimento. Dentro das condições experimentais testadas percebeu-se que os efeitos associados ao A-MIG/MAG foram menos intensos que em A-TIG, especialmente quanto à penetração do cordão de solda. Baseado nos efeitos e na revisão bibliográfica feita, mecanismos para justificar os efeitos observados foram avaliados e sugeriu-se uma nova proposta de mecanismo. Este poderá ser verificado com maiores detalhes em futuras pesquisas, especialmente com filmagem de alta velocidade e caracterização das escórias. Por fim, este trabalho explorou uma potencial aplicação de fluxos na soldagem MIG/MAG expondo alguns efeitos e abrindo novas possibilidades de pesquisa e desenvolvimento.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Acredita-se que apesar dos esforços para se estudar os efeitos operacionais da soldagem MIG/MAG com fluxos realizados e das contribuições feitas ao longo deste trabalho, que o assunto ainda merece maior atenção e pesquisas, visando ampliar a compreensão científica sobre o tema. Devido a isso, sugerem-se para trabalhos futuros:

- Estudo do comportamento dos fluxos na soldagem MIG com proteção gasosa, inerte, composta por argônio ou hélio.
- Avaliação dos efeitos de fluxos de mais de um composto nos sinais elétricos de soldagem e no cordão de solda.
- Avaliação do comportamento dos fluxos sob variação de velocidade de alimentação, velocidade de soldagem e de indutância.
- Estudo comparativo de efeito da soldagem A-MIG/MAG entre aços inoxidáveis e aços carbono.
- Investigar o efeito de fluxos em MIG/MAG com corrente alternada ou com eletrodo polarizado negativamente.
- Caracterizar as propriedades térmicas e elétricas dos fluxos simples e escórias oriundas da soldagem A-MIG/MAG;
- Investigar os mecanismos atuantes nas soldagens A-TIG ou A-MIG/MAG, que podem produzir alterações nos parâmetros operacionais ou geométricos do cordão de solda, em relação aos processos convencionais, através da identificação de parâmetros ou comportamentos que desempenham papel-chave em modelos propostos seguido pelo estudo detalhado deles.
- Estudo da transferência de metal usando filmagem de alta velocidade, além da observação do comportamento do arco elétrico e do sistema constituído pela poça de fusão, escória e eletrodo.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

As referências bibliográficas aqui apresentadas estão em ordem alfabética.

AWS (American Welding Society). *Welding Handbook*. 9ª. ed. Miami (FL), USA: [s.n.], v. 1- *Welding Science and Technology*, 2001.

CHAPUIS, J. *Une approche pour l'optimisation des opérations de soudage à l'arc*. Tese. França: *Université de Montpellier 2 - Sciences et Techniques du Languedoc* , 2011.

CHAPUIS, J.; OPDERBECKE, T.; FORTAIN, J. M. *Compréhension et évaluation d'un poste de soudage mig-mag "pinch effect"*. *Mémoire de D.E.A., Polytech'Montpellier - Air*. [S.l.]. 2007.

DONG, C; ZHU, Y; ZHANG, G. C. H.; KATAYAMA, S. *Preliminary study on the mechanism of arc welding with the activating flux, In Aeronautical Manufacturing Technology, International Symposium, High Energy Density Beam Processing Technology*, p. 271-278. Kunming, China, 12-17 de setembro de. 2004

COSTA, M.C.M.S.; STARLING, C.M.D.; MODENESI, P.J. *Characterization of GMAW arc instability phenomena related to low oxidation potential shielding gases. Welding International*, v. 24. n. 3, p. 214-221. *March* 2010. Selecionado de Soldagem & Inspeção 13(3) p. 181-189. 2008.

COSTA, T.F.; FILHO, E.B.; AREVALO, H.D.H.; VILARINHO, L.O. **Avaliação de Processos MIG/MAG Curto-Circuito Convencional e Controlado para a Soldagem de Dutos de Aço Carbono em Passe Único**. *Soldagem & Inspeção*, São Paulo, v. 17, n. 4, p 356 – 368, Out/Dez 2012.

DÍAZ-CEDRÉ, E.; CRUZ-CRESPO, A.; MORALES, F.R.; MAURICIO, T.R. GONZÁLES, J.C.; PÉREZ, M.R.; MOREJÓN, J.A.P.; PUCHOL, R.Q.; PINO, N.M.P. *Effect of the O₂/CO₂ ratio and welding current on the geometry of square groove weld joints in low carbon steels obtained with GMAW*. *Welding International*, v. 24. n. 7, p. 499-508. July 2010. Selecionado de Soldagem & Inspeção 2008 13(4) p. 319-328.

DICKEHUT, B.G.; HOTZ, U. *Effect of Climatic Conditions on Diffusible Hydrogen Content in Weld Metal*. Suplemento do *Welding Journal*. Janeiro de 1991

DUTRA, J. C. **MIG/MAG - Transferência metálica por curto-circuito - fontes de soldagem versus gases do arco**. *Soldagem & Inspeção*, São Paulo, v. 13, p. 19-24, Jan/Mar 2008.

EAGAR, T. W. *The physics of arc welding processes. Advanced Joining Technologies*, Londres, Reino Unido, v. 61, p. 61-68, 1990.

EGERLAND, S. *A Contribution to Arc Length Discussion*. Soldagem & Inspeção, São Paulo, v. 20, n.3, 2015

ESAB. **Soldagem MIG/MAG**. (Apostila). Disponível em: http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev1_apostilasoldagemmigmag_nova.pdf. Acesso em: 27/12/2016.

FAN, H.G.; KOVACEVIC, R. *A unified model of transport phenomena in gas metal arc welding including electrode arc plasma and molten pool*. *Journal of Physics D:Applied Physics*. 37, p. 2531-2544. 2004.

GARCIA, R.P.; SCOTTI, A. Análise comparativa da geração de fumos entre arames maciços (GMAW) e tubulares (FCAW). *Soldagem & Inspeção*, São Paulo, v.15, n.2. Apr./Junho 2010

GUILLE, A. E. *Arc-electrode phenomena*. PROC. IEE, IEE REVIEWS, Leeds, v. 118, p. 1131-1154, Sept 1971. ISSN 9R.

GUREVICH, S.M. et al. *Improving the penetration of titanium alloys when they are welded by argon tungsten arc process*. *Automatic Welding*, v. 9, p. 1-4. 1965.

GUREVICH, S.M. e ZAMKOV. *Welding titanium with a non-consumable electrode using fluxes*. *Automatic Welding*, 12, 13-16. 1966.

HEIPLE, C. R.; ROPER, J. R. *Mechanism for minor element effect on GTA fusion zone geometry*. *Welding Journal*, Abril 1982. 97-102.

HOLLIDAY, D. B. *Gas-Metal Arc Welding: Equipment*. In: *ASM Welding Brasing and soldering*. Estados Unidos da América: [s.n.], v. 6, 1993. p. 577-579.

HOWSE, D. S.; LUCAS, W. *An investigation into arc constriction by active fluxes for TIG (A-TIG) welding*. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 5, n. 3, p. 189-193, 2000.

HUANG, H-Y. *Effects of activating flux on the welded joint characteristics in gas metal arc welding*. *Materials and Design*, v. 31, p. 2488–2495. 2010.

International Institute of Welding (IIW). Classification of Metal Transfer, Documento XII-636-76. , 1976.

IORDACHESCU, D.; QUINTINO, L.. *Steps toward a new classification of metal transfer in gas metal arc welding*. *Journal of Materials Processing Technology*, p.391-397, 2008.

IVAN, J. S. **Modelamento Matemático do processo de soldagem GMAW**. 200 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Programa de Pós-Graduação em

Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 2010.

IVAN, J. S.; MODENESI, P.J. **Modelagem Matemática do Processo de Soldagem GMAW - Transferencia por Voo Livre**. Soldagem & Inspeção. São Paulo, v.16, No. 3, p.213-222, Jul/Set 2011.

KUMAR, V.; LUCAS, B.; HOWSE, D.; MELTON, G.; RAGHUNATHAN, S.; VILARINHO, L. **Investigation of the A-TIG mechanism and the productivity benefits in TIG welding**. 15th International Conference on the Joining of Materials (JOM 15) and 6th International Conference on Education in Welding (ICEW 6). Helsingor, Denmark. 3-6 Maio, 2009.

LANCASTER, J. F. **Metallurgy of welding**. 3ª edição. George Allen & Unwin. Londres, 1980.

LANCASTER, J. F. **The Physics of Welding**. 2ª. Ed. São Paulo: The International Institute of Welding. Pergamon Editora, v. Unico 1986.

LI, et al. **Effect of activating flux on arc shape and arc voltage in tungsten inert gas welding**. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, v. 17. Pag. 486-49. 2007.

LIN, H-L. **The use of the Taguchi method with grey relational analysis and a neural network to optimize a novel GMA welding process**. J Intell Manuf, v. 23, p. 1671–1680. 2012.

LINCOLN ELECTRIC®. **Catálogo de Arame MERIT S-6**. Disponível em: <<http://www.lincolnelectric.com.br/consumiveis/arame-solido/merit-s-6-er70s-6>>. Acesso em: 24 de janeiro. 2017.

LIU, B. S.; SIEWERT, T. A. **Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding Droplet Rate**. Welding Journal, v. 68(2), p. 52 - 58, Fevereiro 1989.

LIN, H-L; YAN, J-C. **Optimization of weld bead geometry in the activated GMA welding process via a grey-based Taguchi method**. Journal of Mechanical Science and Technology, v. 28 (8), p. 3249~3254. 2014.

LOWKE J. J.; TANAKA M; USHIO M.: **Mechanisms giving increased weld depth due to a flux**; Journal of Physics D: Applied physics 2005/38 p.3438-3445.

LUCAS, W. **Activating flux - improving the performance of the TIG process**. Welding and Metal Fabrication, v. 68, n. 2, p. 7-10. 2000.

- MAKARA, A.M. et al. *High-tensile martensitic steels welded by argon tungsten arc process using flux*. Automatic Welding, v.7, p. 78-79. 1968.
- MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3ª. ed. Belo Horizonte: UFMG, v. Unico, 2011.
- MESSLER, J. R. W. *PRINCIPLES OF WELDING: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*. 2. ed. [S.l.]: WILEY-VCH, v. Unico, 2004.
- METCALFE, J. C.; QUIGLEY, M. B. C. *Arc and pool instability in GTA welding*. *Welding Journal*, p. 133-139, Maio 1977.
- MODENESI, P. J. *Statistical Modelling of the Narrow Gap Gas Metal Arc Welding Process*. Cranfield Institute of Technology. Cranfield, UK, p. 274. 1990.
- MODENESI, P. J. **A química da formação do cordão na soldagem TIG**. Soldagem & Inspeção, São Paulo, v. 18, p. 118-126, Abr/Jun 2013.
- MODENESI, P. J. et al. **Estudo de alguns parâmetros básicos da soldagem GMAW com transferência por curto-circuito**. Revista Soldagem & Inspeção, São Paulo, v. 16, p. 12-21, Jan/Mar 2011.
- MODENESI, P. J.; MATILDE, S.; CANÇADO, G. L. Q.; MELO, C. E. D. **Um Programa de Computador para Simular Alguns Aspectos Operacionais da Soldagem MIG/MAG**. Revista Soldagem & Inspeção, São Paulo, v. 17, n. 1, p. 032-039, Jan/Mar 2012.
- MODENESI, P. J. ; NETO, P.C.; APOLINÁRIO, E.R.; DIAS, K.B. **Efeito da Densidade do Fluxo e da presença de aditivos na Soldagem A-TIG de Aço Inoxidável Austenítico**. Revista Soldagem & Inspeção, São Paulo, v. 18, n. 02, p.118-126. Abr/Jun 2013.
- MVOLA, B.; KAH, P. *Effects of shielding gas control: welded joint properties in GMAW process optimization*. Int. J. Adv. Manuf. Technol. Junho de 2016.
- NAITO, C.; ZIMPFER, J; SAUSE, R.; KAUFMANN, E. *Effect of environmental conditions on field welding of precast concrete connections*. Spring, PCI Journal. 2012.
- OLIVEIRA, W.C. **Estudo do Efeito de Fluxos na Soldagem ATIG de Alumínio**. 181p. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica)– Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 2007.
- PANDOLFI, G.S. **Avaliação da ocorrência de constrição mecânica do arco na soldagem A-TIG de aços inoxidáveis austeníticos**. Dissertação. Brasil: Universidade Federal de

Minas Gerais - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, 2016.

PARSHIN, S.G.; LENIVKI, V.A. *Effect of activating halide-containing wire coatings on the properties of the arc in MIG welding*. *Welding International*. Vol. 26, No. 3, p. 205–211, mar. 2012. Selecionado de *Svarochnoe Proizvodstvo* 63(10) p. 3–8, 2010.

PARSHIN, S.G. *Increasing the productivity of MIG welding aluminium alloys by adding ultrafine particles of activating fluxes*. *Welding International*, Vol. 27, n. 9, P.735–739, 2013. Selecionado de *Svarochnoe Proizvodstvo* 2012 65(9) 34–38.

PARSHIN, S.G. *Using ultrafine particles of activating fluxes for increasing the productivity of MIG/MAG welding of steels*. *Welding International* Vol. 26, No. 10, p.800–804, Out. 2012. Selecionado de *Svarochnoe Proizvodstvo* 64(6) p. 16–21, 2011.

PATEL, K.R.; CHOUDHARY, A.B.; PATEL, T.M. *Parametric Optimization Of Gas Metal Arc Welding Process Using Activated Flux On En 8 By Taguchi Method: A Review*. *Mechanical & Automobile Engineering*. ISBN 978-81-929261-0-0. ICCIET. 2014

PATEL, T.M.; PATEL, K.R. *Parametric Optimization of Gas Metal Arc Welding Process Using Activated Flux for SS 304 by Taguchi Method*. *International Journal of Advanced Scientific and Technical Research*. ISSN 2249-9954. 5ª Edição, volume 4, Julho/Agosto de 2015.

RASBAND, W.S., *ImageJ*, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <http://imagej.nih.gov/ij/>, 1997-2015.

REZENDE, G. M. C.; LISKÉVYCH, O.; VILARINHO, L. O.; SCOTTI, A. **Um critério para determinar a regulagem da tensão em soldagem MIG/MAG por curto-circuito**. *Soldagem & Inspeção*, São Paulo, v. 16, p. 98-103, Abr/Jun 2011.

ROCA, A. S.; FALS, H.C.; FERNÁNDEZ, J.B.; ADÁN, F. S. *Application of U versus I Diagrams for Process Stability Evaluation in Gas Metal Arc Welding in Short Circuit Transfer Mode*. *Soldagem & Inspeção*, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 85-91. Abr/Jun 2005.

RUAN, Y.; QIU, X. M.; GONG, W.B.; SUN, D.Q.; LI, Y.P. *Mechanical properties and microstructures of 6082-T6 joint welded by twin wire metal inert gas arc welding with the SiO₂ flux*. *Materials and Design*, 35, p. 20–24. 2012.

RUI-HUA ZHANG, JI-LUAN PAN1, SEIJI KATAYAMA, *The mechanism of penetration increase in A-TIG welding*. *Front. Mater. Sci.*, 5(2),p. 109-118. 2011.

SÁNDOR, T., *Comparison of penetration profiles of different TIG process variations*. *Stainless Steel World Conference* 2009, Artigo P9047. 12 Nov. 2009.

SAVITSKII M. M. and Leskov G. I.: *The mechanism of the effects of electrically negative elements on the penetrating power of an arc with a tungsten cathode*; Avt. Svarka p.17–22. 1980.

SIMONIK A G: *The effect of contraction of the arc discharge upon the introduction of electro-negative elements*. Svar. Proiz. p.49–51. 1976.

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

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V.; LUCAS, W. *A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding*. *Journal of Materials Processing Technology*, 212, p. 1406– 1413. 2012.

SOUZA, D.; ROSSI, M. L.; KEOCHEGUERIAN, F.; NASCIMENTO, V. C.; VILARINHO, L. O.; SCOTTI, A. et al. **Influência da Regulagem de parâmetros de soldagem sobre a estabilidade do processo MIG/MAG operando em curto-circuito**. *Soldagem & Inspeção*, São Paulo, v. 16, p. 22-32, Jan/Mar 2011.

TATAGIBA, L. C. S.; GONÇALVES, R. B.; PARANHOS, R. **Tendências no desenvolvimento de gases de proteção utilizados na soldagem MIG/MAG**. *Soldagem & Inspeção*, São Paulo, v. 17, p. 218-228, Jul/Set 2012.

TATAGIBA, L. C. S. **Formulação de gases de proteção com adições de gases redutores para a soldagem MIG-MAG**. 169 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, Campos dos Goytacazes – RJ. 2015.

TSENG, K.H., LIN, P.Y. *UNS S31603 Stainless Steel Tungsten Inert Gas Welds Made with Microparticle and Nanoparticle Oxides*. *Materials*. v.7, p.4755-4772, June, 2014.

TWI (*The Welding Institute*). *An Evaluation of the A-TIG Welding Process*, 1995.

USHIO, Masao. *Arc Discharge and Electrode Phenomena*. ISPC-8, Tokyo. Artigo numero S1-02. 1987.

VILARINHO, L.O.; KUMAR, V.; LUCAS, B.; RAGHUNATHAN, S. **Successful High-Productivity Welding With A-Tig Proces**. *20th International Congress of Mechanical Engineering*. COBEM, Copyright © by ABCM. November 15-20, 2009, Gramado, RS, Brasil.

ZHANG, Z.D.; CAO, Q.J. *Study on metal transfer behavior in metal inert gas arc welding with activating flux for magnesium alloy*. *Science and Technology of Welding and Joining* v. 17, n. 7, p. 550-555. Maio/2012.

WANG, Y.; TSAI, H.L. *Effects of Surface Active Elements on Weld Pool Fluid Flow and Weld Penetration in Gas Metal Arc Welding*. *Metallurgical And Materials Transactions B* v. 32b, p. 501-515. Junho/2001.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. *Soldagem – Processos e metalurgia*. São Paulo: Edgard Blucher, 494 p. 1992.

10 APÊNDICE

10.1 Macrografias obtidas nos testes iniciais

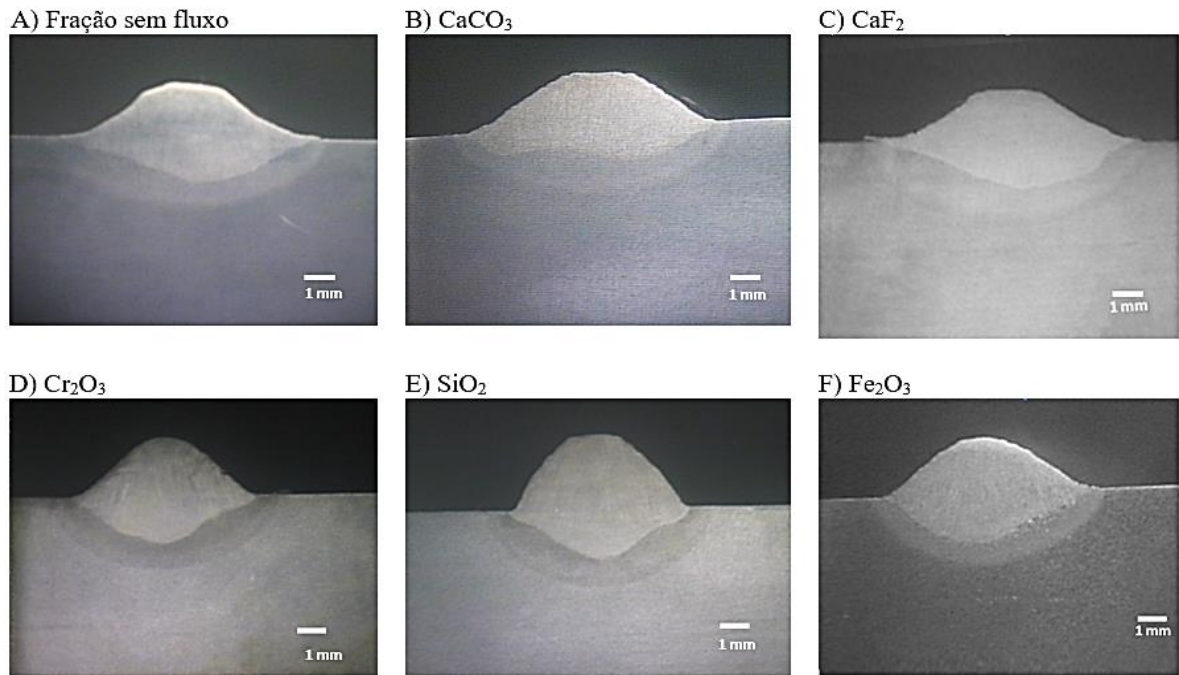


Figura 10.1 Macrografias das seções transversais de alguns cordões de solda obtidos sob tensão nominal de 24 volts, sendo que em A) não foi aplicado fluxo, em B) foi aplicado carbonato de cálcio, em C) fluoreto de cálcio, em D) óxido de cromo III, em E) dióxido de silício e em F) óxido de ferro III. Ataque: Nital 10%.

10.2 Macrografias obtidas nos testes complementares

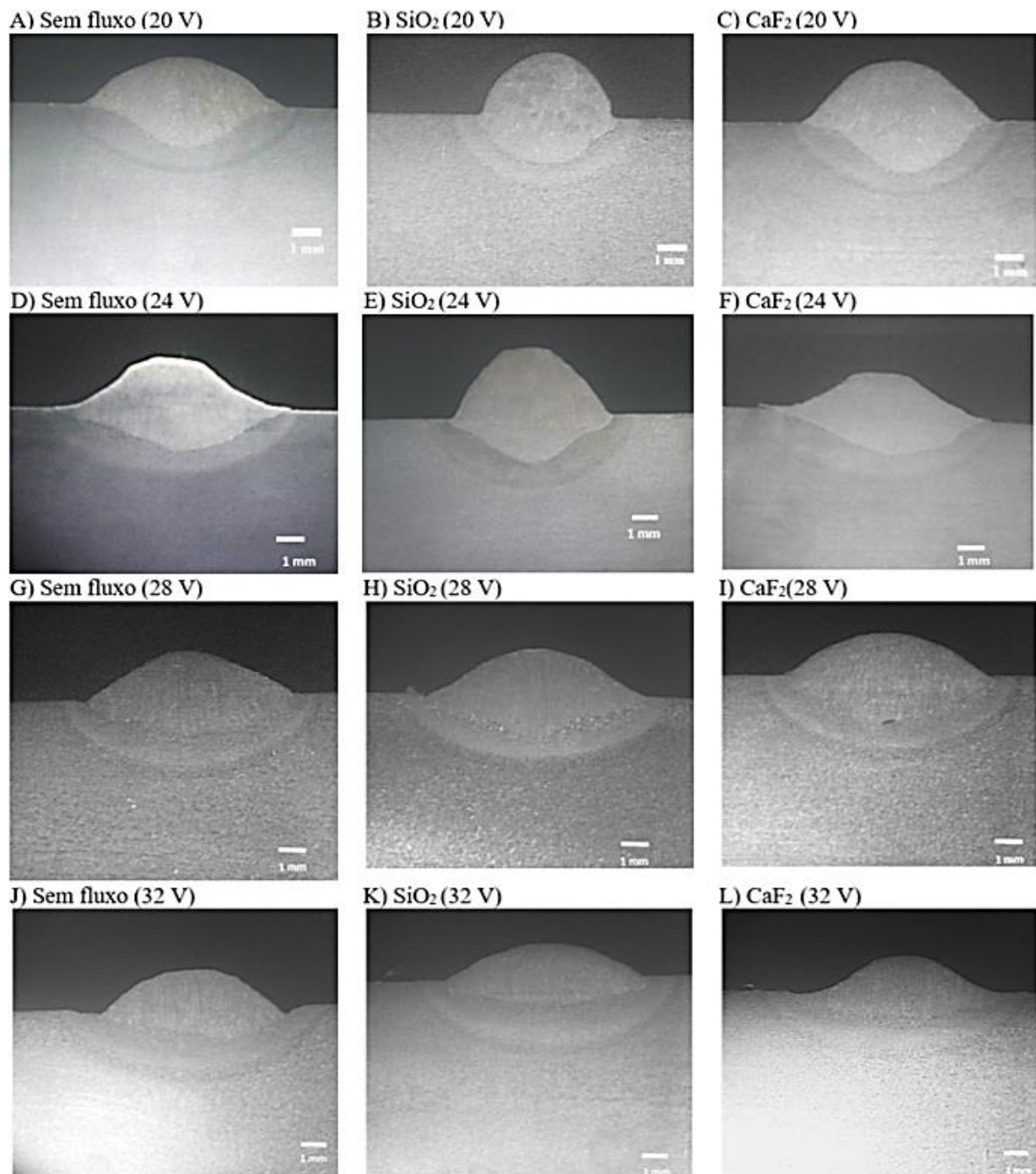


Figura 10.2 Macrografias das seções transversais de alguns cordões de solda, sendo em A) Fração sem fluxo (20 V), B) SiO₂ (20 V), C) CaF₂ (20 V), D) Fração sem fluxo (24 V), E) SiO₂ (24 V), F) CaF₂ (24 V), G) Fração sem fluxo (28 V), H) SiO₂ (28 V), I) CaF₂(28 V), J) Fração sem fluxo (32 V), K) SiO₂ (32 V) e L) CaF₂ (32 V). Ataque: Nital 10%.