

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

Dissertação de Mestrado

**Soldagem MIG/MAG com fluxo ativo do aço inoxidável  
austenítico AISI 304L**

Luana Araújo Batista  
Orientador: Dr. Paulo José Modenesi

Fevereiro/2018

Luana Araújo Batista

Soldagem MIG/MAG com fluxo ativo do aço inoxidável  
austenítico AISI 304L

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do grau de mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Área de Concentração: Metalurgia de Transformação  
Orientador: Dr. Paulo José Modenesi

Belo Horizonte  
Universidade Federal de Minas Gerais  
Escola de Engenharia  
2018

*A todos que acreditam e contribuem para meu desenvolvimento pessoal e profissional, principalmente, minha mãe e minhas irmãs.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida, por iluminar meu caminho e por ser fonte de força.

A minha mãe Lúcia Maria de Araújo, que mais do que me conceber a vida, me ensinou a ser digna, a lutar pelos meus sonhos e nunca mediu esforços para educar e apoiar a mim e meus irmãos. A minhas irmãs Elizabeth e Beatriz, por todo o companheirismo e por sempre acreditarem em meu potencial e me incentivarem. Ao meu irmão Eduardo, pelo carinho e compreensão.

Ao professor Paulo José Modenesi por ter sido um orientador tão dedicado, paciente, ético e humano. Sou muito grata pela oportunidade que tive de aprender um pouco contigo, que é um modelo inspirador de profissional e pessoa.

Ao Eustáquio Roberto Apolinário e ao José Roberto Ferreira Neto pelo treinamento inicial para a execução dos testes de soldagem.

Aos companheiros Leandro Brito Gonçalves, Cristhian Harley Madariaga Rosas e Matheus Azevedo Mendes pela enorme ajuda na execução das soldagens. Obrigada por não desanimarem mesmo quando passávamos 12h no LRSS tentando fazer alguns poucos cordões de solda.

As grandes amigas que fiz neste período, especialmente, a Danielle Mendes, Renata Monteiro, Sheron Tavares e Moara Marques.

Ao professor Alexandre Queiroz Bracarense por ter me recebido na equipe do LRSS e pelos conhecimentos compartilhados.

Aos colegas do LRSS: Fernando, Gabriel, Andrés, Marcelo, Gedael, Etienne, Luiz, Henrique, Carolzinha, Pedro, Matheus, Camila, Caroline, Matheus Pires, Diego, Diogo e Luciano, pelo companheirismo e momentos de descontração. Ao Frank Liberato pelas dicas e pela grande ajuda tendo me emprestado seu computador na reta final da escrita deste trabalho. E aos professores Ezequiel C. P. Pessoa, Ariel R. Arias e Cláudio T. Vaz.

A Viviane Falcão pela verdadeira amizade e orações.

Ao Tarcísio e Cláudio da Aperam South América pelo fornecimento das amostras e por serem aliados no desenvolvimento da ciência.

A CAPES-PROEX e ao CNPq e a FAPEMIG pelo suporte financeiro essencial para a realização desta dissertação.

Ao PPGEM da UFMG pela oportunidade de obter o título de mestre e a todos que contribuíram para a conclusão deste trabalho.

“Bom mesmo é ir à luta com determinação,  
abraçar a vida com paixão,  
perder com classe  
e vencer com ousadia,  
porque o mundo pertence a quem se atreve  
e a vida é muito para ser insignificante.”

Augusto Branco

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>viii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>xii</b>
<b>LISTA DE EQUAÇÕES</b> .....	<b>xiii</b>
<b>LISTA DE NOTAÇÕES</b> .....	<b>xiv</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>xvii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xviii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>19</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>21</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>22</b>
3.1 Soldagem MIG/MAG.....	22
3.1.1 Soldagem MIG/MAG de Aços Inoxidáveis Austeníticos.....	23
3.1.2 Transferência Metálica .....	25
3.1.3 O Arco Elétrico de Soldagem .....	27
3.1.4 Modos de Avaliação da Estabilidade da Soldagem .....	29
3.2 Soldagem Ativada por Fluxos.....	30
3.2.1 Soldagem A-TIG.....	31
3.2.2 Soldagem A-MIG .....	37
3.2.3 Outros Processos com Fluxo Ativo .....	40
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	<b>42</b>
4.1 Materiais.....	42
4.2 Equipamentos .....	43
4.3 Procedimento Experimental .....	46
4.3.1 Introdução .....	46
4.3.2 Preparação dos Corpos de Prova .....	47

4.3.3	Testes de Soldagem com Tensão Constante .....	48
4.3.4	Testes de Soldagem com Corrente Constante.....	49
4.4	Análise dos Sinais Elétricos .....	51
4.5	Avaliação do Perfil do Cordão de Solda .....	52
4.6	Análise Estatística .....	53
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>55</b>
5.1	Soldagem com Tensão Constante .....	55
5.1.1	Influência dos Fluxos nos Aspectos Operacionais .....	55
5.1.2	Filmagem do Processo .....	64
5.1.3	Efeito dos Fluxos no Perfil do Cordão de Solda.....	70
5.2	Soldagem com Corrente Constante.....	75
5.2.1	Influência dos Fluxos nos Aspectos Operacionais .....	76
5.2.2	Filmagem do Processo .....	84
5.2.3	Efeito dos Fluxos no Perfil do Cordão de Solda.....	86
5.3	Considerações Finais.....	89
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>94</b>
<b>7</b>	<b>SUGETÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>95</b>
	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>96</b>
	<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>103</b>
	<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>114</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Equipamentos para soldagem MIG/MAG.....	23
Figura 3.2 Modos de transferência básicos em soldagem MIG/MAG com gás rico em argônio. ....	26
Figura 3.3 Quadros retirados de filmagem de alta velocidade mostrando a sequência típica de eventos nos diferentes modos de transferência. ....	26
Figura 3.4 Regiões do arco elétrico da soldagem MIG/MAG (esquemático). ....	28
Figura 3.5 Oscilograma da tensão de soldagem de uma solda MIG.....	30
Figura 3.6 Superfície do corpo de prova após a deposição da camada de fluxo. ....	31
Figura 3.7 Seções transversais dos cordões de solda em placas de 5 mm do aço AISI 304 para: (a) TIG e (b a g) A-TIG. ....	32
Figura 3.8 Curvas esquemáticas de variação da tensão superficial com a temperatura em um metal líquido: A) Material de alta pureza e B) material contaminado com elemento tenso-ativo.....	34
Figura 3.9 Fluxo de metal líquido induzido na poça de fusão para (a) $dg/dT < 0$ e (b) $dg/dT > 0$ .....	34
Figura 3.10 Constricção do arco elétrico por elementos eletronegativos. ....	36
Figura 3.11 Simulação do cordão de solda com o coeficiente térmico de tensão superficial negativo e positivo com e sem as Forças de Lorentz.....	37
Figura 3.12 Representação da soldagem A-MIG de um corpo de prova em que foi depositado uma camada de fluxo ativo.....	38
Figura 3.13 Macrografias das seções transversais de cordões MIG e A-MIG com diferentes fluxos.....	39
Figura 3.14 Sessões da soldagem (a) PAW e (b) A-PAW com as mesmas condições de soldagem: Aço inoxidável AISI 316L de 6mm de espessura soldado com energia de soldagem de 1,34 KJ/mm.....	40
Figura 3.15 Sessões da soldagem (a) EBW e (b) A-EBW com as mesmas condições de soldagem. ....	41
Figura 4.1 Sistema de soldagem e gabarito. ....	44
Figura 4.2 Representação do sistema de projeção do arco elétrico. ....	45
Figura 4.3 Histograma do procedimento experimental. ....	46



Figura 4.4 Desenho esquemático da superfície do corpo de prova com o fluxo (em mm). .....	48
Figura 4.5 Medição das dimensões do cordão de solda.....	53
Figura 5.1 Oscilograma de tensão de uma soldagem MIG e A-MIG com aplicação de $\text{SiO}_2$ como fluxo.....	57
Figura 5.2 Diferença da tensão do arco elétrico ( $U_{\text{arc}}$ ) e do fator de curto-circuito ( $F_{\text{cc}}$ ) nas soldagens A-MIG em relação à MIG. ....	59
Figura 5.3 Diferença nos tempos de arco aberto ( $t_{\text{arco}}$ ) e em curto-circuito ( $t_{\text{curto}}$ ) do processo A-MIG em relação à MIG. ....	60
Figura 5.4 Diferença da corrente média de soldagem e da corrente no período de arco das amostras A-MIG em relação à MIG. ....	60
Figura 5.5 Detalhe da transferência por curto-circuito no oscilograma de tensão da soldagem MIG e da soldagem A-MIG com $\text{CaCO}_3$ . ....	61
Figura 5.6 Tensão de reignição da soldagem MIG e A-MIG com $\text{SiO}_2$ .....	62
Figura 5.7 Histogramas da tensão de reignição na soldagem MIG e A-MIG. ....	62
Figura 5.8 Gráficos da tensão pela corrente das soldagens MIG e A-MIG com diferentes fluxos e mesma condição de soldagem.....	63
Figura 5.9 Imagens do arco elétrico na soldagem MIG. A primeira imagem marca a reabertura do arco após um curto-circuito e as demais foram tiradas em intervalos de 0,8 ms. A direção de soldagem é indicada pela seta no canto direito da segunda imagem. .....	65
Figura 5.10 Imagens do arco elétrico na soldagem com $\text{CaCO}_3$ . A primeira imagem marca a reabertura do arco após um curto-circuito e as demais foram tiradas em intervalos de 0,8 ms. A direção de soldagem é indicada pela seta no canto direito da segunda imagem. .....	66
Figura 5.11 Imagens do arco elétrico na soldagem com $\text{CaCO}_3$ evidenciando o que parece ser explosões no arco elétrico. A imagem superior corresponde ao tempo de 138,20 ms e a inferior a 138,28 ms. A direção de soldagem é indicada pela seta no canto direito da primeira imagem. ....	67
Figura 5.12 Imagens do arco elétrico na soldagem com $\text{SiO}_2$ . A primeira imagem marca a reabertura do arco após um curto-circuito e as demais foram tiradas em intervalos de	

0,8 ms. A direção de soldagem é indicada pela seta no canto direito da segunda imagem. .....	68
Figura 5.13 Imagens da região do arco filmada de lado durante um teste com fluxo de $\text{SiO}_2$ . As três imagens superiores correspondem à região do cordão sem fluxo (TIG) e as três inferiores, com fluxo (A-TIG). O sentido de soldagem é da esquerda para a direita. .....	68
Figura 5.14 Imagens do arco elétrico na soldagem com $\text{SiO}_2$ evidenciando manchas catódicas sobre a poça de fusão. A imagem superior corresponde ao tempo de 405,60 ms e a inferior a 407,60 ms. A direção de soldagem é indicada pela seta no canto direito da primeira imagem. ....	70
Figura 5.15 Cordão de uma soldagem A-MIG com $\text{SiO}_2$ como fluxo e detalhe exibindo diferença no aspecto do cordão na soldagem A-MIG e MIG. ....	71
Figura 5.16 Macrografias de soldas MIG e A-MIG realizadas com parâmetros de soldagem iguais.....	72
Figura 5.17 Diferença da largura das amostras A-MIG em relação ao MIG.....	73
Figura 5.18 Diferença da penetração das amostras A-MIG em relação ao MIG.....	74
Figura 5.19 Largura em função do ângulo de molhamento interno médio das soldagens. .....	75
Figura 5.20 Oscilograma da tensão de um teste a 200 A. As linhas delimitam a região inicial de acerto do comprimento do arco, a região MIG, a de transição e a com adição de $\text{CaCO}_3$ . ....	76
Figura 5.21 Oscilograma do desvio padrão da tensão calculado para grupos de 100 medidas para o teste da Figura 5.20.....	76
Figura 5.22 Oscilograma da tensão de um teste a 200 A. A linha tracejada delimita a região sem fluxo da com adição de $\text{SiO}_2$ . ....	77
Figura 5.23 Oscilograma do desvio padrão da tensão calculado para grupos de 100 medidas para o teste da Figura 5.22.....	77
Figura 5.24 Diferença da tensão com o uso dos fluxos em função da corrente.....	79
Figura 5.25 Diferença do comprimento do arco ( $l_a$ ) com o uso dos fluxos. ....	80
Figura 5.26 Comparação da variação da tensão de soldagem nas condições de operação sem fluxo (0 - 0,2 s) e com o fluxo $\text{CaCO}_3$ (0,2 - 0,4 s) para correntes de 160 a 250 A.81	

Figura 5.27 Comparação da variação da tensão de soldagem nas condições de operação sem fluxo (0 - 0,2 s) e com o fluxo SiO <sub>2</sub> (0,2 - 0,4 s) para correntes de 160 a 250 A....	84
Figura 5.28 Imagens do arco elétrico da soldagem MIG a 190A. A direção de soldagem é indicada pela seta. ....	85
Figura 5.29 Imagens do arco elétrico da soldagem A-MIG com CaCO <sub>3</sub> a 190A. A direção de soldagem é indicada pela seta. ....	85
Figura 5.30 Imagens do arco elétrico da soldagem A-MIG com SiO <sub>2</sub> a 190A. A direção de soldagem é indicada pela seta. ....	86
Figura 5.31 Macrografias de soldas MIG e A-MIG nas diferentes correntes testadas...	87
Figura 5.32 Diferença da largura do cordão entre as soldagens com o uso de CaCO <sub>3</sub> e SiO <sub>2</sub> e a soldagem MIG. ....	88
Figura 5.33 Diferença da penetração do cordão entre as soldagens com o uso de CaCO <sub>3</sub> e SiO <sub>2</sub> e a soldagem MIG. ....	88
Figura 5.34 Diferença da diluição do cordão entre as soldagens com o uso de CaCO <sub>3</sub> e SiO <sub>2</sub> e a soldagem MIG. ....	89
Figura 5.35 Comparação da distribuição da temperatura no plano x=0 do arco (a) negligenciando (esquerda) e incluindo (direita) a influência do vapor de alumínio; e (b) comparação da seção transversal da solda medida (cinza), calculado incluindo (verde) e negligenciando (vermelha) a influência do vapor de alumínio. (MURPHY, 2013).....	91

**LISTA DE TABELAS**

Tabela IV.1 Composição química da amostra do aço AISI 304L, em peso percentual.....	41
Tabela IV.2- Composição química especificada do arame AWS A5.9 ER308LSi, em peso percentual.....	42
Tabela IV.3 - Parâmetros de soldagem mantidos fixos nos testes com e sem fluxo com tensão constante.....	48
Tabela IV.4. Parâmetros de soldagem mantidos fixos nos testes com e sem fluxo com corrente constante.....	49
Tabela V.1. Parâmetros elétricos dos testes realizados e o desvio padrão das medições.....	57
Tabela V.2. Valores de p do teste de hipóteses.....	57
Tabela V.3. Parâmetros elétricos e comprimentos do arco médios das soldagens MIG e com $\text{CaCO}_3$ e $\text{SiO}_2$ .....	77
Tabela V.4 Resultados de p-value dos testes de hipóteses.....	77
Tabela V.5 Energia de ionização de alguns elementos neutros.....	91

**LISTA DE EQUAÇÕES**

Equação 4.1.....	51
Equação 4.2.....	51
Equação 4.3.....	53
Equação 5.1.....	81

## LISTA DE NOTAÇÕES

%	Porcentagem
$\alpha$	Constante ligada ao aquecimento do arame pelo arco elétrico
$\beta$	Constante ligada ao aquecimento do arame por efeito Joule
$\rho$	Resistividade elétrica do arame
<	Menor
$\mu$ s	Microsegundos
A	Ampere
A	Área da seção transversal do arame
A- EBW	<i>Activated Electron Beam Welding</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC/DC	Corrente alternada/corrente contínua
$Al_2O_3$	Óxido de alumínio
$AlF_3$	Fluoreto de alumínio
A-MIG	Soldagem MIG ativada por fluxo
Ar	Argônio
Ar-CO <sub>2</sub>	Mistura dos gases argônio e dióxido de carbono
Ar-O <sub>2</sub>	Mistura dos gases argônio e oxigênio
A-TIG	Soldagem TIG ativada por fluxo
AWS	American Welding Society
$CaCl_2$	Cloreto de cálcio
$CaCO_3$	Carbonato de cálcio
$CaF_2$	Fluoreto de cálcio
CaO	Óxido de Cálcio
CC+	Corrente contínua positiva
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
$Cr_2O_3$	Óxido de cromo III
d	Comprimento da área com fluxo
DBCP	Distância do bico de contato à peça
Demet	Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG
EBW	<i>Electron Beam Weld</i>

FB-TIG	Flux-Bounded TIG
$F_{cc}$	Fator de curto-circuito
$Fe_2O_3$	Óxido de ferro III
g	Gramas
$g/m^2$	Gramas por metro quadrado
g/min	Gramas por minuto
GMAW	Gas Metal Arc Welding
$H_0$	Hipótese nula
$H_1$	Hipótese alternativa
He	Hélio
Hz	Hertz
I	Corrente
$I_{arc}$	Corrente do arco
$I_{curto}$	Corrente de curto-circuito
KCl	Cloreto de potássio
$KClO_4$	Perclorato de potássio
kd	Taxa de diminuição da corrente de soldagem na fonte
KJ/mm	Kilo Joule por milímetro
ks	Taxa de crescimento da corrente de soldagem na fonte
L/min	Litros por minuto
$l_a$	Comprimento do arco elétrico
LRSS	Laboratório de Robótica, Simulação e Soldagem
m/min	Metro por minuto
mA	Miliampere
MAG	Metal Active Gas
$m_{CaCO_3}$	Massa de $CaCO_3$
$MgCO_3$	Carbonato de magnésio
MIG	Metal Inert Gas
mm	Milímetros
mm/min	Milímetros por minuto
mm/s	Milímetros por segundo
$MM_{CaCO_3}$	Massa molar de $CaCO_3$

ms	Milisegundo
NaF	Fluoreto de sódio
$n_{\text{CaCO}_3}$	Número de moles de $\text{CaCO}_3$
$n_{\text{CO}_2}$	Número de moles de $\text{CO}_2$
$\text{O}_2$	Oxigênio
PA	Pureza analítica
PAW	Plasma Arc Welding
$\text{SiO}_2$	Dióxido de silício
T	Período de transferência por curto-circuito
$t_a$	Tempo de arco aberto
$t_{\text{cc}}$	Tempo de curto-circuito
TIG	Tungsten Inert Gas
$\text{TiO}_2$	Dióxido de titânio
U	Tensão
$U_{\text{arc}}$	Tensão do arco
$U_{\text{curto}}$	Tensão de curto-circuito
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
v	Vazão
V	Volts
$V_{\text{CO}_2 \text{ no CaCO}_3}$	Volume de $\text{CO}_2$ oriundo da decomposição de $\text{CaCO}_3$
$V_{\text{CO}_2 \text{ no gás}}$	Volume de $\text{CO}_2$ presente no gás de proteção
Vel	Velocidade de soldagem
$V_{\text{gás}}$	Volume do gás de proteção



## RESUMO

Um dos processos de união de metais mais utilizados é a soldagem MIG/MAG, que é caracterizada por uma alta produtividade e facilidade de automação. Uma nova variante do processo MIG/MAG utiliza fluxos ativos na soldagem, neste trabalho denominada A-MIG, e apresenta potencial para modificar as características operacionais da soldagem e o perfil do cordão de solda. Os recursos necessários para a soldagem A-MIG são os mesmos do processo MIG/MAG convencional, com uma única adaptação que é a aplicação de uma fina camada de fluxo sobre a região a ser soldada. Com o principal objetivo de verificar a influência do uso de diferentes fluxos nas características operacionais da soldagem A-MIG de um aço inoxidável austenítico, o presente trabalho realizou, inicialmente, testes com seis diferentes candidatos a fluxos com transferência metálica por curto-circuito. Destes testes foram selecionados dois fluxos que apresentaram maior capacidade de afetar as condições de soldagem e estes foram avaliados em transferência por queda livre com a fonte operando em corrente constante. Os resultados demonstram que a maioria dos fluxos utilizados apresentam comportamento ativo na soldagem provocando alterações nas características elétricas do processo e no cordão de solda. Alguns dos efeitos observados com o uso desses fluxos na soldagem A-MIG, em comparação ao processo sem fluxo, foram alterações na tensão e corrente do arco, na frequência da transferência metálica e aumento de luminosidade do arco elétrico. Entre os compostos testados, a sílica e o carbonato de cálcio foram os que apresentaram maior capacidade de alterar as condições de soldagem.

Palavras-chave: MIG/MAG; Fluxo ativo; Características operacional da soldagem; Transferência metálica.

## ABSTRACT

MIG/MAG welding is one of the most commonly used metal joining processes, being characterized by high productivity and ease of automation. A new variant of the MIG/MAG process that uses active fluxes, called A-MIG in a dissertation, presents potential to modify the operational characteristics of the weld and the profile of the weld bead. A-MIG welding basically requires the same resources used in conventional MIG/MAG process except for the application of a thin layer of flux over the region to be welded. In order to verify the influence of different fluxes on the operational characteristics of A-MIG welding of an austenitic stainless steel, initial welding trials with six different flux candidates were performed with short-circuit metal transfer. Two fluxes that presented stronger capacity to affect welding conditions were selected from these trials and evaluated in free flight metal transfer trials with constant current operation. The results show that most of the used fluxes can present active behavior in MIG welding of stainless steels, causing changes in process electrical characteristics and weld bead shape. Some of the effects caused by these fluxes were changes in arc voltage and current, the metal transfer frequency and higher arc luminosity. Among the tested flux candidates, silica and calcium carbonate were those that more strongly affected the welding conditions.

Keywords: MIG/MAG; Active fluxes; Welding operational characteristics; Metal transfer.

## 1 INTRODUÇÃO

A soldagem MIG/MAG é um dos processos de união mais utilizados na indústria devido a vantagens como a alta produtividade aliada à capacidade de ser facilmente automatizado e a possibilidade de produzir soldas de boa qualidade de diferentes ligas e em diferentes posições. Porém, como todo processo, este também possui desvantagens, sendo uma delas a alta dependência da correta regulagem dos parâmetros de soldagem e a grande influência de variações destes na estabilidade do processo e, conseqüentemente, no formato do cordão de solda.

Buscando otimizar o processo, empresas fabricantes de fontes para soldagem têm desenvolvido nos últimos anos equipamentos com controle eletrônico com capacidade de controle da transferência metálica e de outros aspectos do processo. Entretanto, apesar do custo de aquisição destas fontes ter reduzido, elas ainda demandam de um alto investimento. Estas ainda tendem a ser pouco robustas para a área industrial e a possuir controles de regulagem complexa para o soldador. Assim, o estudo de técnicas alternativas que permitam controlar as características operacionais da soldagem MIG apresenta interesse.

Uma técnica desenvolvida inicialmente na década de 1960 para o processo TIG é a soldagem com fluxo ativo. Esta se baseia na aplicação de uma fina camada de fluxo sobre a superfície da peça a ser soldada sendo, assim, um método de fácil adaptação e baixo custo. A principal vantagem da soldagem TIG com fluxo ativo (A-TIG) é um aumento considerável na penetração do cordão de solda. Mais recentemente, a técnica com fluxo ativo passou a ser aplicada também em outros processos como na soldagem a plasma, feixe de elétrons e MIG/MAG. Em particular para este último processo, as informações contidas na literatura sobre a utilização de fluxo ativo são ainda limitadas, embora o processo já tenha sido estudado em diferentes materiais como ligas de magnésio, em aço médio carbono e ligas de alumínio.

A maior parte dos trabalhos em A-MIG concentraram-se no formato do cordão, possivelmente, influenciados pelos resultados da soldagem A-TIG. Contudo, esses

trabalhos mostraram variações relativamente pequenas de penetração. Por outro lado, muito pouco foi investigado sobre o efeito dos fluxos nos aspectos operacionais da soldagem e na sua estabilidade.

Um aspecto potencialmente relevante do uso de fluxos na soldagem MIG/MAG é a possibilidade de afetar as características operacionais da soldagem, incluindo a própria transferência de metal. Neste contexto, a utilização de fluxos na soldagem A-MIG pode ser uma opção atraente para alterar características do processo de forma simples e, além disto, pode ser uma forma interessante de avaliar a influência de perturbações no processo pela presença de alguma substância. Até o presente, poucos trabalhos investigaram o efeito do uso de fluxos nos aspectos operacionais da soldagem e, basicamente, não há nenhum estudo envolvendo a soldagem A-MIG de aços inoxidáveis austeníticos com foco nas características operacionais da soldagem, material este mais intensamente estudado na soldagem A-TIG.

Este projeto envolveu o estudo da influência de diferentes fluxos nos aspectos operacionais da soldagem do aço inoxidável austenítico AISI 304L por meio de avaliações de parâmetros derivados da tensão e corrente de soldagem. Assim como, a investigação do efeito de fluxos na transferência metálica por contato e por queda livre. Também foram realizadas filmagens de alta velocidade para o estudo do arco elétrico e avaliação do formato do cordão de solda.

## **2 OBJETIVOS**

### **Objetivo Geral**

Avaliar a influência do uso de fluxo ativo nas características operacionais da soldagem MIG/MAG de um aço inoxidável austenítico AISI 304L.

### **Objetivos Específicos**

- Avaliar diferentes compostos como possíveis candidatos a fluxos para a soldagem A-MIG/MAG de aço inoxidável austenítico e selecionar os mais promissores;
- Estudar mudanças nas características operacionais do processo com transferência por contato e por queda livre;
- Verificar mudanças no formato do cordão com os fluxos selecionados;
- Verificar mudanças no arco elétrico na soldagem com fluxos.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Soldagem MIG/MAG

Dos diversos processos de soldagem existentes, o processo MIG/MAG é um dos mais utilizados no mundo. Segundo a *American Welding Society (AWS)*, consiste em um processo de soldagem que utiliza um arco elétrico entre um eletrodo/arame contínuo e a poça de fusão sob uma proteção gasosa (O'BRIEN, 2004).

O termo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) corresponde à terminologia americana e é a nomenclatura mais geral que pode ser utilizada para definir esse processo de soldagem, sem distinção de acordo com o tipo de gás de proteção utilizado, que pode ser um gás ativo ou inerte ou mistura destes. No entanto, a nomenclatura mais utilizada no Brasil é europeia que designa o processo com gás ativo como MAG (*Metal Active Gas*) e com gás inerte como MIG (*Metal Inert Gas*) (O'BRIEN, 2004). No presente trabalho o processo será referido como MIG/MAG ou eventualmente MIG.

A soldagem MIG/MAG, normalmente, é realizada de forma semiautomática com alimentação do arame mecanizada. A manutenção do arco é garantida pela alimentação contínua do arame e o comprimento do arco é, em princípio, mantido aproximadamente constante pelo sistema (SCOTTI; PONOMAREV, 2008). Na Figura 3.1 é ilustrado um sistema de soldagem MIG/MAG e seus componentes.

Destacam-se como vantagens da soldagem MIG/MAG em comparação com o processo de eletrodo revestido: a alta produtividade; possibilidade de ser mecanizada ou automatizada; grande versatilidade de materiais e espessuras aplicáveis; ausência de operações de remoção de escória e maior facilidade de uso (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2014).

Dentre as desvantagens do processo podem ser citadas: a grande sensibilidade à variação dos parâmetros elétricos de operação do arco de soldagem, além da necessidade de um ajuste rigoroso de parâmetros para se obter um determinado conjunto de características

para o cordão de solda; o maior custo dos equipamentos, em comparação ao processo de eletrodo revestido; e, menor variedade de consumíveis (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2014).

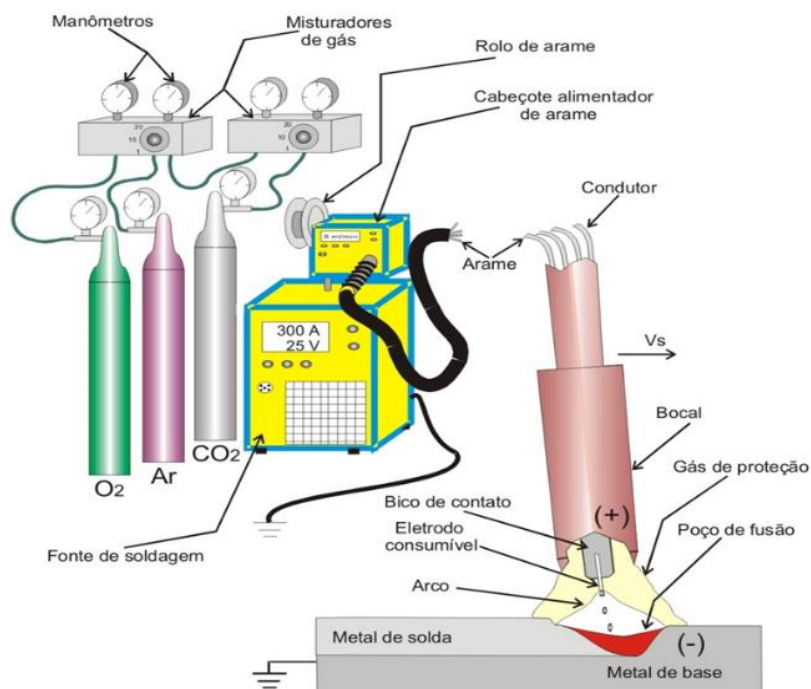


Figura 3.1 Equipamentos para soldagem MIG/MAG.  
Fonte: Adaptado de Barra (2003)

Para maiores detalhes do processo de soldagem recomenda-se o acesso à literatura (BRACARENSE, 2003; MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2014; MODENESI et al., 2011; O'BRIEN, 2004; REZENDE et al., 2011; SCOTTI; PONOMAREV, 2008; SUBAN; TUŠEK, 2003)

### 3.1.1 Soldagem MIG/MAG de Aços Inoxidáveis Austeníticos

Aços inoxidáveis austeníticos possuem estrutura monofásica austenítica, que é mantida ao longo de uma ampla gama de temperaturas, inclusive à ambiente. São aços com alta resistência à corrosão aliada a boa resistência mecânica. O aço do tipo AISI 304 é considerado o aço inoxidável austenítico padrão, a partir do qual outros tipos são derivados com alterações de sua composição química básica.

Muitas de suas aplicações envolvem a soldagem como processo de fabricação e/ou manutenção, tais como: confecção de tanques químicos, aplicações estruturais, equipamentos de cozinha e artefatos de decoração. Estes aços podem ser soldados por todos os processos de soldagem comercialmente disponíveis com ou sem adição de metal de adição. Existem arames disponíveis para a maioria da classe austenítica, sendo o aço padrão AISI 304, geralmente, soldado com o material de enchimento tipo 308 (O'BRIEN, 2004).

Devido às propriedades físicas dos aços inoxidáveis austeníticos, seu comportamento de soldagem pode ser diferente do comportamento de outros materiais. Por exemplo, o aço inoxidável austenítico possui baixa condutividade térmica ( $26 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ) em comparação ao aço baixo carbono ( $50 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ) e ao alumínio ( $347 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ), o que acarreta em um cordão de solda mais largo no aço inoxidável austenítico do que nos demais, para um mesmo aporte térmico (O'BRIEN, 2004). Portanto, a entrada de calor necessária para alcançar a mesma penetração no aço inoxidável austenítico é consideravelmente reduzida em comparação a esses outros materiais.

Em contraste, o coeficiente de expansão térmica da austenita é 30 a 40% maior do que o da ferrita, o que pode resultar em aumentos na distorção e na tensão residual devido à soldagem (ASM INTERNATIONAL, 1993). Sugestões para controlar as distorções na soldagem são: restringir a movimentação da chapa a ser soldada utilizando sargentos / gabaritos, minimizar o número de passes, balancear as soldas em torno do eixo neutro e utilizar juntas que requeiram o mínimo de material depositado (CARVALHO et al., [s.d.]).

Na proteção gasosa da soldagem MIG/MAG de aços inoxidáveis, uma baixa porcentagem de oxigênio ( $\text{O}_2$ ) ou dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) é muitas vezes necessária no argônio (Ar) para melhorar a estabilidade do arco e o molhamento pelo metal fundido. Os níveis típicos são 2% de  $\text{O}_2$  ou 3% de  $\text{CO}_2$  (CUNAT, 2008). A Tabela III.1 exibe parâmetros de tensão e corrente recomendados de acordo com o diâmetro do arame e a transferência metálica desejada.



Tabela III.1 Parâmetros da soldagem MIG/MAG de aços inoxidáveis austeníticos.

Diâmetro do arame (mm)	Corrente de soldagem (A)		Tensão de soldagem (V)	
	Curto-circuito	Spray	Curto-circuito	Spray
0,8	60 - 80	140 - 210	15 - 17	25 - 28
1,0	80 - 120	180 - 250	16 - 18	26 - 29
1,2	120 - 150	220 - 290	17 - 20	27 - 30

Fonte: Cunat (2008) adaptada.

Ademais, aços inoxidáveis austeníticos submetidos a soldagem são susceptíveis à fissuração na solidificação e à corrosão intergranular. Mas, como o foco da presente pesquisa não envolve o estudo da metalurgia da soldagem do aço, não serão discutidos os possíveis defeitos de soldagem dos aços inoxidáveis austeníticos.

### 3.1.2 Transferência Metálica

A transferência metálica na soldagem MIG/MAG envolve a passagem do metal fundido da ponta do eletrodo para a poça de fusão. O modo como a transferência ocorre é muito importante, pois afeta as características do processo e sua aplicabilidade. Alguns dos fatores que controlam o modo como a transferência do metal líquido ocorre são: a intensidade, polaridade e tipo de corrente; a tensão de soldagem; a composição do arame e do gás de proteção; e o diâmetro e a extensão do eletrodo (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2014)

Ao longo das últimas décadas diversas classificações do modo de transferência metálica foram propostas. De forma sucinta, existem três modos básicos e distintos de transferência metálica: curto-circuito, globular e spray (O'BRIEN, 2004; SCOTTI; PONOMAREV; LUCAS, 2012). Cada um desses modos são subclassificados de acordo com a faixa de corrente / tensão e característica da transferência. A Figura 3.2 apresenta de forma esquemática as faixas de tensão e corrente de soldagem típicas para cada modo de transferência e na Figura 3.3 é possível verificar a sequência de transferência de metal de cada tipo.

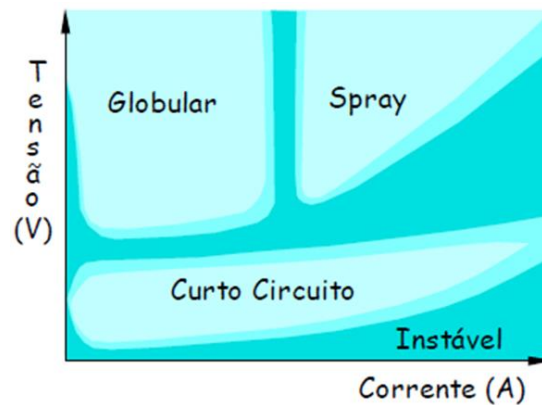


Figura 3.2 Modos de transferência básicos em soldagem MIG/MAG com gás rico em argônio.  
Fonte: (MODENESI, 2015)

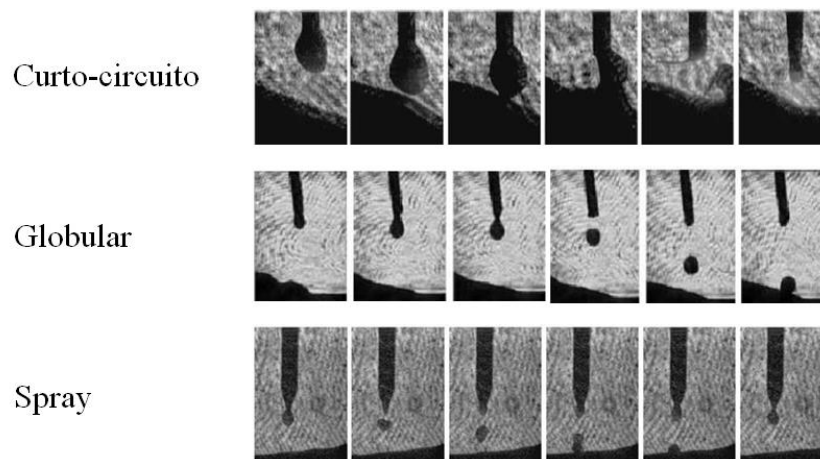


Figura 3.3 Quadros retirados de filmagem de alta velocidade mostrando a sequência típica de eventos nos diferentes modos de transferência.  
Fonte: (MODENESI, 2015)

A transferência por curto-circuito é comumente usada com baixos valores de tensão e corrente de soldagem. É utilizada para soldagens que requerem baixa energia de soldagem, como na soldagem fora da posição plana e de chapas finas. Forma-se uma gota de metal fundido na ponta do eletrodo que é transferida para a poça de fusão quando atinge um diâmetro suficiente para tocar a poça, o que causa um curto-circuito e extingue o arco elétrico. Com a ruptura da ligação entre o arame e a poça de fusão, o arco é reaberto, com a transferência de metal ocorrendo durante os curtos. A ocorrência dos curtos-circuitos leva a uma instabilidade relativamente elevada do processo com grande geração de respingos. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2014)

A transferência metálica globular ocorre com valores de tensão e corrente acima dos praticados para curto-circuito, resultando em um arco mais estável do que no tipo anterior. A passagem de metal fundido da ponta do eletrodo para a poça de fusão é controlada pela ação da gravidade. E, geralmente, as gotas de metal líquido são transferidas com diâmetro igual ou maior do que o do eletrodo. (SCOTTI; PONOMAREV, 2008)

Na transferência metálica por spray, os valores de tensão e corrente são ainda maiores e o tamanho das gotas, geralmente, é menor do que o diâmetro do eletrodo. Esse tipo de transferência é controlado por forças eletromagnéticas e apresenta um arco elétrico bastante estável, com pouca ou nenhuma geração de respingos e uma alta taxa de transferência metálica. (IORDACHESCU; QUINTINO, 2008; MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2014)

### **3.1.3 O Arco Elétrico de Soldagem**

Segundo Guile (1971) *apud* Modenesi (2015, p. 7) o arco elétrico é "uma descarga de eletricidade entre eletrodos em um gás ou vapor (gerado a partir dos eletrodos) que tem uma queda de tensão junto ao cátodo da ordem do potencial de excitação do vapor do eletrodo (isto é, da ordem de 10 V) e na qual a corrente pode ter praticamente qualquer valor superior a um valor mínimo que é de cerca de 100 mA".

O arco elétrico de soldagem é composto basicamente por três regiões distintas: a coluna de plasma, a região de queda anódica e a região de queda catódica (LANCASTER, 1986). A coluna de plasma corresponde a maior parte do arco elétrico sendo composta por partículas neutras (moléculas e átomos), íons e elétrons livres, estes sendo responsáveis pela passagem da corrente elétrica entre os eletrodos. A região catódica fica entre o cátodo e a coluna de plasma e é nesta região que é gerada a maioria dos elétrons responsáveis pela condução da corrente elétrica no arco. Na região de queda anódica, há uma maior concentração de elétrons (cargas negativas) que é responsável pela ocorrência de uma queda de tensão nesta região, vide Figura 3.4. (SCOTTI; PONOMAREV, 2008)

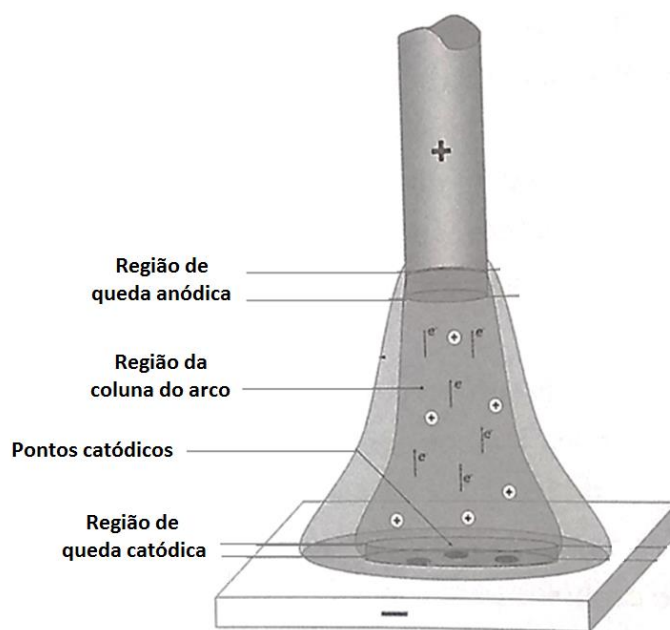


Figura 3.4 Regiões do arco elétrico da soldagem MIG/MAG (esquemático).  
Fonte: Scotti e Ponomarev (2008) adaptada.

O estudo do arco elétrico na soldagem não é trivial, principalmente, em processos com transferência metálica como o MIG/MAG. Neste caso, o arco elétrico é afetado por diversas variáveis e sua estabilidade é influenciada também pelo tipo de transferência do metal líquido. Cita-se alguns estudos sobre o arco, entre eles Ghosh *et al.* (2009) que estudaram as características do arco elétrico com transferência metálica por curto-circuito, spray e globular com corrente pulsada e Murphy (2015) que apresenta perspectivas futuras do estudo do arco elétrico. Um texto clássico e exaustivo sobre as características do arco elétrico e de outros aspectos físicos da soldagem a arco é o livro de Lancaster (1986).

A estabilidade do arco elétrico é atrelada a fatores como a tensão e a corrente de soldagem, a atmosfera do arco, o comprimento do arco, o tipo de transferência metálica e os metais envolvidos (KAH *et al.*, 2014). Em adição, inúmeros outros fatores, incluindo as características estáticas e dinâmicas da fonte de soldagem, o estado de conservação da fonte e das ligações elétricas, podem influenciar na operação e estabilidade do arco (MODENESI, 2015).

Outro fator que afeta as características do arco elétrico na soldagem é a presença de vapores metálicos oriundos da vaporização de metais do arame de soldagem (HERTEL *et al.*, 2017). Por exemplo, esses vapores podem causar o resfriamento do arco pelo aumento da emissão radiativa e alterar a condutividade elétrica do mesmo. Todos esses efeitos provocam mudanças na transferência de energia e corrente para a peça de trabalho (MURPHY, 2010).

### **3.1.4 Modos de Avaliação da Estabilidade da Soldagem**

Segundo Modenesi e Nixon (1994), para o processo de soldagem MIG/MAG operar de maneira estável pelo menos dois requisitos básicos devem ser satisfeitos: 1) A velocidade média de fusão do arame tem que ser igual à velocidade média de alimentação do arame, e 2) O metal de adição fundido deve ser transferido para a poça de fusão causando o mínimo de perturbações no processo.

São exemplos de acontecimentos relacionados a um arco e processo de soldagem instáveis, a ocorrência de frequente extinção do arco elétrico, transferência de metal irregular ou para fora da poça de fusão e variações inesperadas do comprimento do arco ou da sua orientação (MODENESI, 2015).

Caracterizar a estabilidade do processo de soldagem MIG/MAG é subjetivo e pode ser em função de diversos fatores. Ao estudar o processo é necessário delimitar os critérios de estabilidade a serem considerados. Na literatura estão descritas diversas técnicas de avaliação da estabilidade da soldagem, dentre elas, as mais difundidas envolvem o monitoramento da tensão e corrente de soldagem; a quantificação do nível de respingos e fumos gerados; o estudo da transferência metálica e do arco com câmeras de alta velocidade; estudo da emissão acústica e da luminosidade gerada pelo arco elétrico. São exemplos de trabalhos que envolvem esses métodos (COSTA, 2014; MENESES; GOMES; SCOTTI, 2014; SANTOS *et al.*, 2017; KANG *et al.*, 2003; MODENESI *et al.*, 2011; MURPHY, 2010, 2015; ROCA *et al.*, 2007; SUBAN; TUŠEK, 2003).

O método de monitoramento dos sinais elétricos de tensão e corrente fornece inúmeras informações que podem ser utilizadas para caracterizar a estabilidade do processo. Geralmente, a aquisição do sinal de tensão é obtida pela diferença de potencial entre o bico de contato e a peça, e o sinal de corrente pelo cabo de alimentação da fonte. Através do uso de softwares específicos pode-se processar os dados coletados e obter-se diversas informações como valores individuais e médios de tensão e corrente, tempos de transferência do metal líquido, resistência do eletrodo, entre outros.

Através de oscilogramas de tensão e corrente analisa-se o comportamento do processo ao longo do tempo, assim como, é possível fazer inferências sobre o modo de transferência metálica, como pode ser observado na Figura 3.5. As quedas de tensão na figura indicam a extinção do arco devido a transferência por curto-circuito.

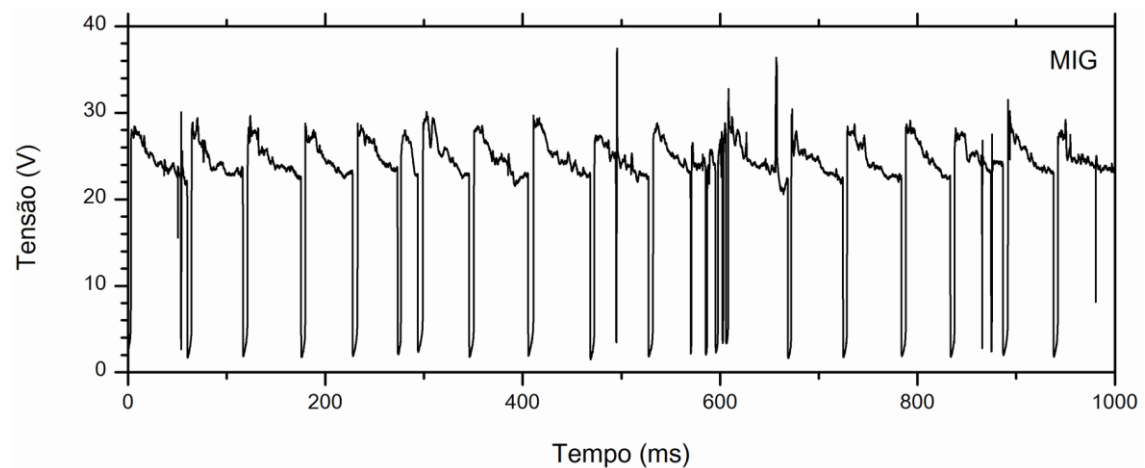


Figura 3.5 Oscilograma da tensão de soldagem de uma solda MIG.  
Fonte: Ferreira Neto *et al* (2016)

## 3.2 Soldagem Ativada por Fluxos

A técnica de soldagem ativada por fluxos consiste na aplicação de uma fina camada de fluxo sobre a superfície do metal a ser soldada. O fluxo nessa técnica é composto por óxidos, fluoretos e cloretos em suspensão em um solvente, geralmente, acetona, metanol ou etanol (MODENESI, 2013). Na literatura é relatado desde o uso de fluxos com composição química simples de apenas um componente, como o uso combinado de mais

de um composto. Além disto, diversos trabalhos não revelam a composição do fluxo utilizado.

Na maior parte dos trabalhos publicados é feita a mistura do composto (óxidos e/ou halogênios) com um solvente e é formada uma pasta, que é passada sobre a superfície por um pincel (AZEVEDO; FERRARESI; FARIAS, 2006; TANAKA et al., 2000), outros relatam o uso de spray (RUAN et al., 2012), e, um terceiro método de aplicação é proposto por Modenesi; Apolinário; Pereira (2000) em que uma massa conhecida de fluxo em pó é depositada em uma área delimitada através do uso de uma máscara. O que possibilita o controle e conhecimento da densidade de fluxo utilizada. Sendo, justamente, a falta do conhecimento da quantidade de fluxo depositada nos outros dois métodos (pincel e spray) a principal desvantagem deles. Em ambos os procedimentos o solvente evapora após ser adicionado na superfície, restando apenas o fluxo em pó.

### 3.2.1 Soldagem A-TIG

Na década de 60 no *Paton Welding Institute*, foi criada uma variante que possibilitou o aumento da produtividade do processo com a aplicação de fluxos, conhecida como A-TIG. O processo A-TIG consiste na aplicação de uma fina camada de fluxo sobre a superfície do metal a ser soldado pelo processo TIG, como ilustrado na Figura 3.6. Durante a soldagem, devido ao calor do arco elétrico o fluxo é fundido e, eventualmente, vaporizado. O que provoca alterações na poça de fusão e pode resultar em um aumento significativo da penetração do cordão de solda. (AZEVEDO; FERRARESI; FARIAS, 2009; MODENESI; APOLINÁRIO; PEREIRA, 2000)

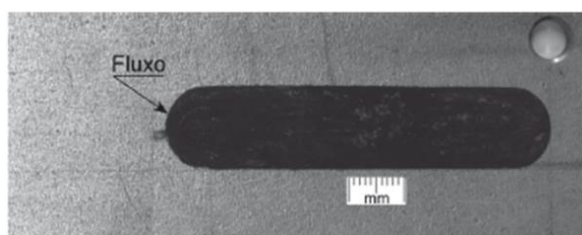


Figura 3.6 Superfície do corpo de prova após a deposição da camada de fluxo.  
Fonte: (MODENESI, 2013)

Modenesi juntamente com colaboradores (2000; 2013) verificaram o aumento da penetração na soldagem A-TIG de aços inoxidáveis austeníticos (Figura 3.7) com a utilização de diversos fluxos de um componente simples como  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{AlF}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{KClO}_4$ , entre outros. Da mesma forma, Tseng e Lin (2014) também confirmaram aumento da penetração com uso de  $\text{SiO}_2$ . Em ambos os estudos, o uso de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  como fluxo não resultou em aumento na penetração em comparação à soldagem TIG convencional para os aços inoxidáveis austeníticos. O que indica que certos compostos podem apresentar comportamento ativo, causando mudanças no aspecto operacional do processo e/ou no perfil do cordão de solda e outros apresentarem comportamento inativo, não provocando alterações na soldagem.

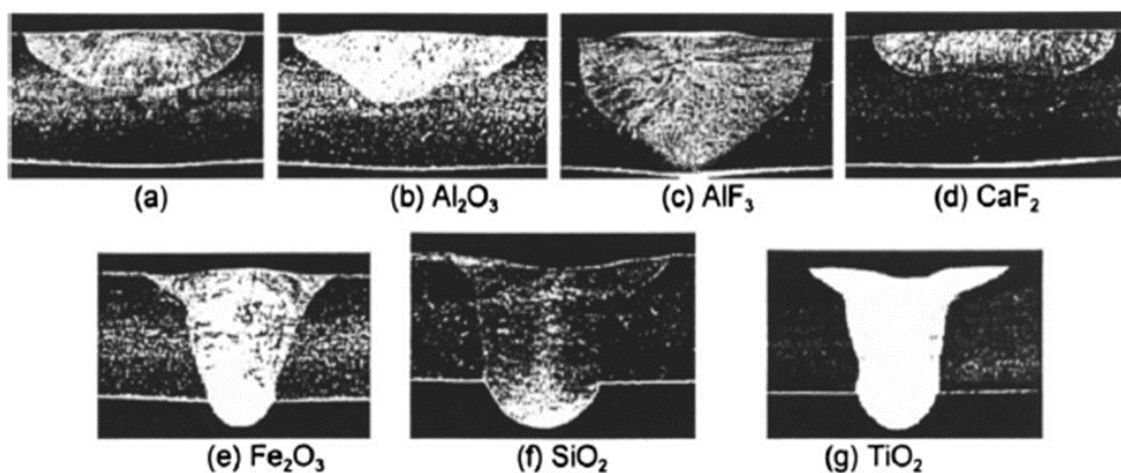


Figura 3.7 Seções transversais dos cordões de solda em placas de 5 mm do aço AISI 304 para: (a) TIG e (b a g) A-TIG.

Fonte: (MODENESI; APOLINÁRIO; PEREIRA, 2000)

Dentre as vantagens do processo A-TIG em relação ao processo TIG convencional estão: o aumento da penetração do cordão de solda, o que possibilita a soldagem em único passe para espessuras superiores às conseguidas no processo convencional; o aumento da produtividade e possibilidade de aumento na velocidade de soldagem para um mesmo nível de corrente (devido ao aumento da densidade de corrente no processo A-TIG); e a redução da distorção angular das chapas (AZEVEDO; FERRARESI; FARIAS, 2006; KUO; TSENG; CHOU, 2011; MODENESI, 2013; MODENESI; APOLINÁRIO; PEREIRA, 2000).



Como todo processo, existem também desvantagens da versão ativada em comparação a convencional. Uma delas é a propensão à formação de escória sobre o cordão de solda, o que pode prejudicar o acabamento superficial. Além disto, produtos indesejáveis oriundos de interações entre o fluxo e o metal líquido podem resultar em contaminação e/ou fragilização do metal de solda (MODENESI; APOLINÁRIO; PEREIRA, 2000; PASKELL; LUNDIN; CASTNER, 1997). Outra desvantagem é o indício de maior variabilidade da tensão de soldagem, o que reduz a estabilidade do arco e reflete em perda de qualidade do aspecto visual dos cordões de solda, como relatado por (MODENESI et al., 2013) e que foi associado à heterogeneidade do fluxo sobre a superfície da chapa.

Ao longo dos anos com o avanço dos estudos da soldagem A-TIG, diversos mecanismos foram propostos na literatura para explicar a atuação dos fluxos no processo. Assim como, sobre a forma como estes modificam a penetração do cordão de solda e as características do arco de soldagem. O principal mecanismo citado na literatura como responsável pelas modificações no formato do cordão dessa soldagem é o Efeito Marangoni. Seguido pela constrição do arco elétrico.

O efeito é conhecido como Marangoni em homenagem ao cientista do século XIX, Carlo Marangoni (SNOW, 2002). Porém, foi em 1982 que Heiple e Roper propuseram que gradientes de tensão superficial são a força motriz dominante no fluxo de metal líquido na soldagem TIG. E que estes gradientes podem ser drasticamente alterados com pequenas variações de certos elementos químicos, modificando fortemente a penetração do cordão de solda (HEIPLE; BURGARDT, 1993).

A tensão superficial é dependente, além outros fatores, da temperatura. Assim, gradientes de tensão superficial existem na soldagem devido aos grandes gradientes térmicos presentes na poça de fusão. Para metais puros e muitas ligas, a tensão superficial decresce com o aumento da temperatura, ou seja, o coeficiente térmico de tensão superficial ( $dg/dT$ ) é negativo (Figura 3.8A). Com a maior temperatura no centro da poça a tensão superficial será menor no centro e maior nas bordas da poça de fusão. Devido ao gradiente de tensão superficial o fluxo convectivo será do centro para as bordas, gerando cordões

mais largos e com pequena profundidade, como ilustrado Figura 3.9a (C.R. HEIPLE AND P. BURGARDT, 1993).

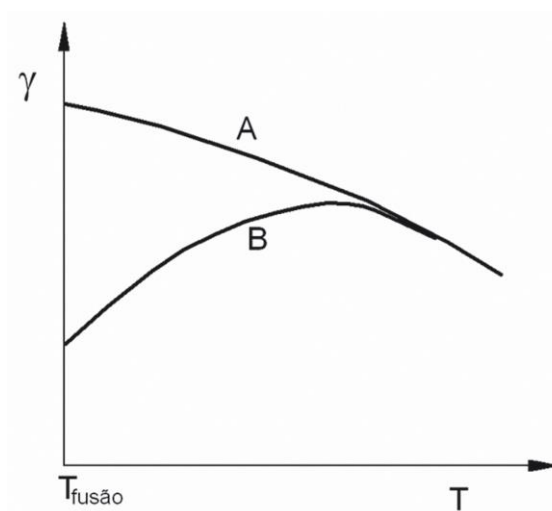


Figura 3.8 Curvas esquemáticas de variação da tensão superficial com a temperatura em um metal líquido: A) Material de alta pureza e B) material contaminado com elemento tensoativo.

Fonte: (MODENESI, 2013)

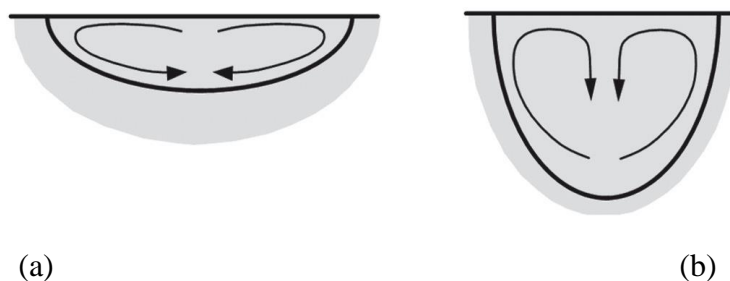


Figura 3.9 Fluxo de metal líquido induzido na poça de fusão para (a)  $dg/dT < 0$  e (b)  $dg/dT > 0$ .  
Fonte: (MODENESI, 2013)

Na soldagem, a segregação de uma quantidade muito pequena de certos elementos tensoativos, como o enxofre e o oxigênio, no topo da poça de fusão pode mudar a temperatura de dependência da tensão superficial do metal líquido, o que faz com que com o acréscimo da temperatura ocorra o aumento da tensão superficial (Figura 3.8B). Com o coeficiente térmico de tensão superficial positivo, a tensão superficial será maior no centro da poça e, devido ao gradiente, o fluxo convectivo será das bordas para o centro, gerando cordões mais profundos (Figura 3.9b) com as mesmas condições de soldagem (HEIPLE; BURGARDT, 1993; MODENESI, 2013).

No processo A-TIG o uso de diversos óxidos simples na soldagem de aços inoxidáveis e outras ligas provocam a redução da largura e o aumento da penetração do cordão de solda de forma similar ao provocado pelo Efeito Marangoni descrito anteriormente. Essas mudanças na convecção do metal líquido na soldagem de aços inoxidáveis austeníticos com o uso de óxidos como fluxo, foram evidenciados por filmagem da poça de fusão (MODENESI, 2013; ZHANG; PAN; KATAYAMA, 2011).

Outro mecanismo proposto na literatura é da constrição do arco elétrico por elementos presentes em certos fluxos. Encontra-se referências sobre a constrição do arco no processo A-TIG pelos mecanismos de constrição química e constrição mecânica. Ambas, partem da teoria de que certos fluxos provocam o estreitamento do arco elétrico e, com isso, aumenta-se a densidade de corrente sobre a poça de fusão, por consequência, ocorre o aumento da penetração.

Na constrição química, íons de elementos eletronegativos como flúor, oxigênio e cloro presentes nos fluxos concentram-se na parte externa (mais fria e menos energética) do arco elétrico na forma de átomos dissociados (HOWSE; LUCAS, 2000). Esses átomos capturam elétrons nessa região tornando-se ânions, o que faz com que a passagem elétrica concentre no centro da coluna de plasma do arco. Como no centro da coluna a temperatura é maior, átomos dos vapores metálicos são mais facilmente ionizados para a forma de cátions (cedem elétrons para o arco), facilitando a passagem da corrente elétrica. Com uma menor área de atuação do arco (Figura 3.10) a densidade de corrente do ânodo aumenta, resultando em maior força do arco sobre a poça de fusão e, por consequência, aumento da penetração. (HOWSE; LUCAS, 2000; MODENESI; APOLINÁRIO; PEREIRA, 2000; PANDOLFI, 2016)

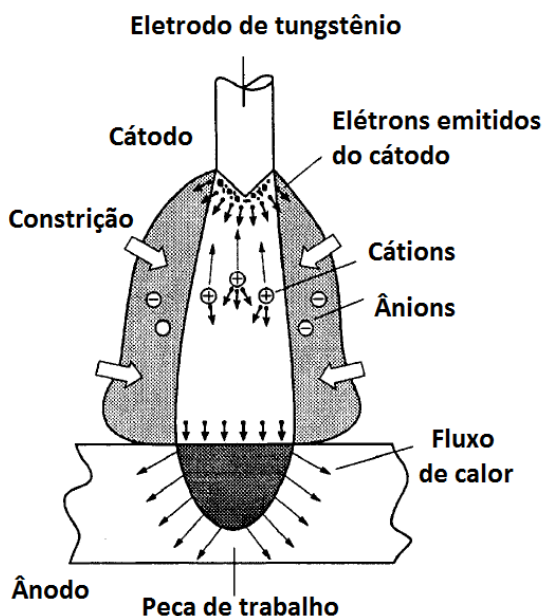


Figura 3.10 Constrição do arco elétrico por elementos eletronegativos.  
 Fonte: Adaptado de (HOWSE; LUCAS, 2000).

Na constrição mecânica do arco considera-se que devido a menor condutividade elétrica e térmica dos óxidos em comparação ao metal ao metal base, o fluxo tem papel isolante restringindo e direcionando a área de atuação do arco elétrico (AZEVEDO; FERRARESI; FARIAS, 2010). Por consequência, a densidade do arco no ponto anódico é aumentada e como resultado ocorre o incremento da penetração.

Além destes mecanismos, é proposto a ação do fluxo na alteração das forças eletromagnéticas do arco, conhecidas como Forças de Lorentz. Essa força atua em direção ao centro da poça de fusão no sentido do fluxo de corrente, interferindo no fluxo de metal líquido na poça (JAYAKRISHNAN; CHAKRAVARTHY, 2017) e tornando-se mais intensa quanto maior o grau de constrição da raiz do arco elétrico (WOODS; MILNER, 1971). Desse modo, na soldagem A-TIG, desde que o raio do ânodo seja menor do que na soldagem convencional, espera-se que o componente axial da força eletromagnética aumente, resultando em um fluxo de metal líquido interno mais forte da superfície ao fundo da poça da solda, provocando considerável aumento da penetração (OSTROVSKII, 1977 apud AZEVEDO; FERRARESI; FARIAS, 2006)

Com o uso de fluxos pode-se ter o efeito combinado das forças atuantes na soldagem. Por exemplo, simulações realizadas por Berthier et al, (2010) indicam que quando o coeficiente térmico de tensão superficial é negativo a Força de Lorentz será a força resultante com maior influência na penetração do cordão de solda (Figura 3.11). Enquanto que, com o coeficiente de tensão superficial positivo (como na soldagem A-TIG), o Efeito de Marangoni será mais forte e as Forças de Lorentz terão menor influência na penetração da solda.

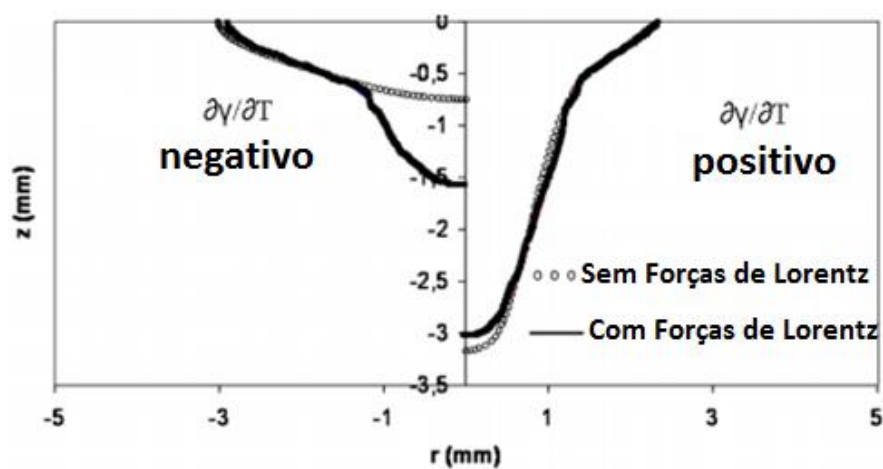


Figura 3.11 Simulação do cordão de solda com o coeficiente térmico de tensão superficial negativo e positivo com e sem as Forças de Lorentz.

Fonte: (BERTHIER *et al.*, 2010)

### 3.2.2 Soldagem A-MIG

Do mesmo modo que na soldagem A-TIG, o processo MIG/MAG com fluxo ativo baseia-se na simples aplicação de uma fina camada de fluxo na superfície do metal antes da soldagem, usando essencialmente, os mesmos recursos da soldagem MIG/MAG convencional (Figura 3.12). Porém, ao contrário da vasta bibliografia disponível para o processo A-TIG, os estudos com fluxo na soldagem MIG/MAG ainda são poucos.

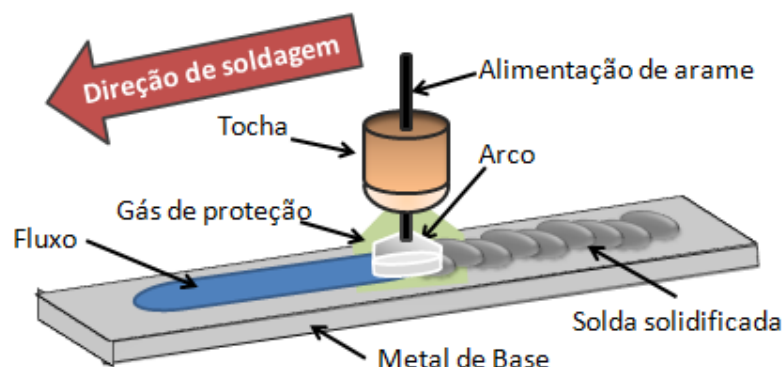


Figura 3.12 Representação da soldagem A-MIG de um corpo de prova em que foi depositado uma camada de fluxo ativo.

Fonte: (FERREIRA NETO, 2017)

Na soldagem A-MIG de chapas do aço SAE 1020 utilizando como fluxos  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{MgCO}_3$ , foi observado aumento da penetração e redução da distorção angular em comparação a condição sem fluxo nos parâmetros de soldagem utilizados (HUANG, 2010). Ferreira Neto (2017), estudando o mesmo aço com nove tipos de fluxos simples, verificou mudanças nos aspectos operacionais na soldagem A-MIG como alterações na tensão e corrente de soldagem, no fator de curto-circuito e nos aspectos geométricos do cordão de solda.

No estudo da aplicação de  $\text{KCl}$ ,  $\text{TiO}_2$  e  $\text{CaCl}_2$  como fluxos na soldagem da liga de magnésio AZ61 e verificou-se que os fluxos podem alterar o tamanho das gotas de metal líquido, a geração de respingos e a corrente de soldagem (ZHANG; CAO, 2012). Observou-se que para a liga estudada, o composto  $\text{KCl}$  aumentou a corrente e o  $\text{CaCl}_2$  reduziu o seu valor, enquanto que, com o uso de  $\text{TiO}_2$  não houve variação em comparação à soldagem sem fluxo.

Ruan et al. (2012) estudaram a soldagem A-MIG da liga de alumínio 6082-T6 com duplo arame e uso de  $\text{SiO}_2$  como fluxo. Constataram aumento da penetração e que o uso desse fluxo não alterou as propriedades de resistência à tração e microdureza da solda.

Já na avaliação da penetração da soldagem A-MIG de um aço inoxidável AISI 304 com o uso dos fluxos  $\text{MgCO}_3$  e  $\text{TiO}_2$ , Patel, T. e Patel, K. (2015) analisaram também a influência dos valores de corrente, tensão e velocidade de soldagem na penetração.

Concluíram que tanto o uso de fluxo como a variação dos parâmetros testados podem influenciar na penetração da solda e que o uso do  $\text{MgCO}_3$  como fluxo foi mais eficiente do que o uso de  $\text{TiO}_2$  no aumento de penetração.

A maior parte dos trabalhos em A-MIG concentram-se no formato do cordão, possivelmente, influenciados pelos estudos de soldagem A-TIG. Contudo, os resultados sugerem variações relativamente pequenas de penetração, como pode ser verificado na Figura 3.13. Por outro lado, muito pouco foi investigado sobre o efeito dos fluxos nos aspectos operacionais da soldagem, assim como, na estabilidade do processo e no modo de transferência metálica.

Estudos como o de Ferreira Neto (2017) e Zhang e Cao (2012) evidenciam que certos fluxos provocam mudanças nas características operacionais do processo. No entanto, ainda não existe uma análise mais abrangente para os aços inoxidáveis austeníticos, com os quais a maioria dos estudos de A-TIG foram realizados. Outro tópico carente de informações é sobre o mecanismo de atuação do fluxo na soldagem A-MIG. Apesar de autores com a visão de A-TIG e da análise do cordão, insistirem em justificar o efeito do fluxo na soldagem A-MIG por fenômenos como o Efeito Marangoni, acredita-se que este efeito seja pequeno nesse processo.

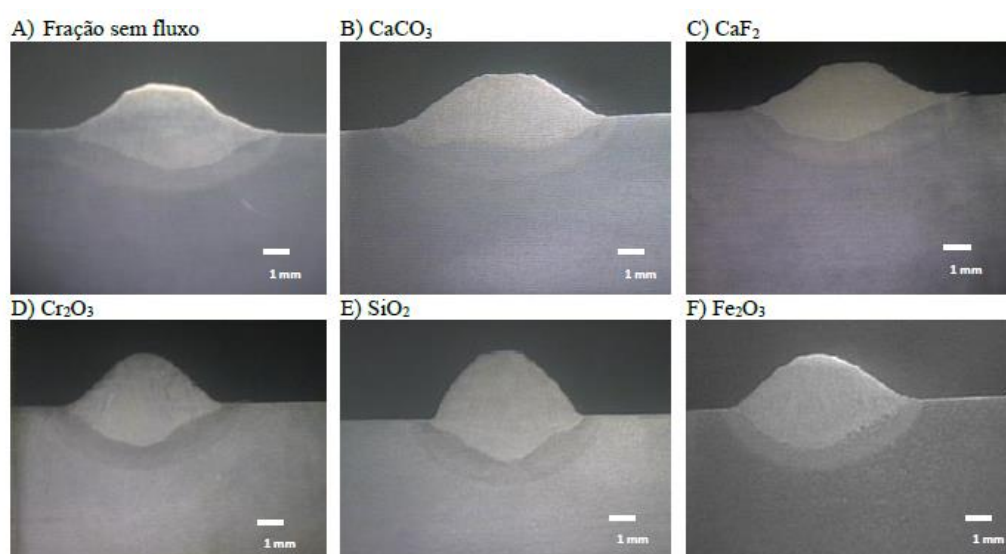


Figura 3.13 Macrografias das seções transversais de cordões MIG e A-MIG com diferentes fluxos.

Fonte: (FERREIRA NETO et al., 2016)

### 3.2.3 Outros Processos com Fluxo Ativo

Com a popularidade do processo A-TIG a técnica também foi aplicada em outros processos como na soldagem a plasma e feixe de elétrons, além do citado A-MIG. A soldagem à plasma (PAW) é um processo similar ao TIG. Porém, dotado de um bico que restringe o arco e torna a densidade de corrente muito maior. A aplicação de fluxos nesse processo aumenta a penetração e a área fundida (HOWSE; LUCAS, 2000). No entanto, esse incremento é menor do que no A-TIG (Figura 3.14). São exemplos de trabalhos sobre a soldagem a plasma ativada por fluxo (HOWSE; LUCAS, 2000; KUO; SUN; PAN, 2001; SUN; SONG; ZHANG, 2008; TANAKA; LOWKE, 2007).

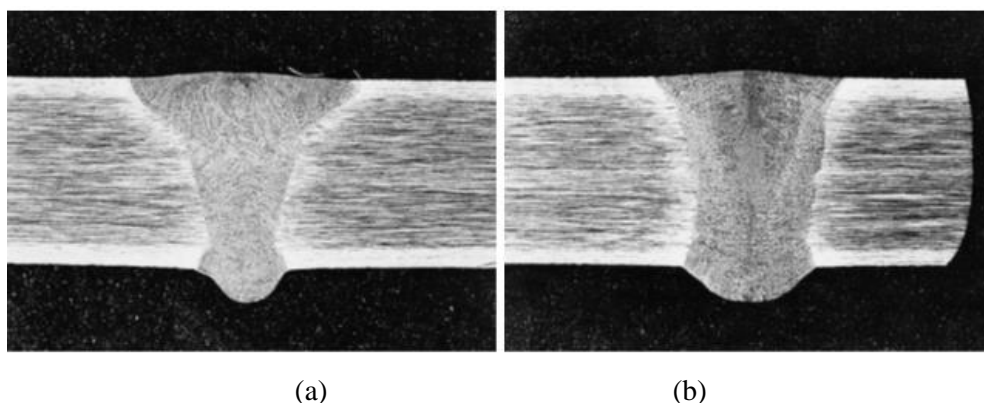


Figura 3.14 Sessões da soldagem (a) PAW e (b) A-PAW com as mesmas condições de soldagem: Aço inoxidável AISI 316L de 6mm de espessura soldado com energia de soldagem de 1,34 KJ/mm.

Fonte: (HOWSE; LUCAS, 2000)

Outro processo é a soldagem por feixes de elétrons ativada com fluxos, com o termo do processo convencional em inglês *Electron Beam Weld* (EBW). Na soldagem de um aço inoxidável austenítico AISI 316L, Howse; Lucas (2000) verificaram pequeno aumento de penetração nas condições utilizadas. Porém, Zhang; Fan; Katayama (2006), utilizando o aço inoxidável austenítico AISI 304 com fluxos averiguou incremento superior a 100% da penetração (Figura 3.15). Foi demonstrado que o efeito dos fluxos depende dos parâmetros de soldagem e do tipo de fluxo de ativação, quando comparado soldas do aço AISI 304 realizadas por EBW no modo de condução e no modo *keyhole*. E que houve um ganho de penetração significativo quando a soldagem por feixe de elétrons foi realizada em modo de condução (ZHANG; FAN; KATAYAMA, 2006).



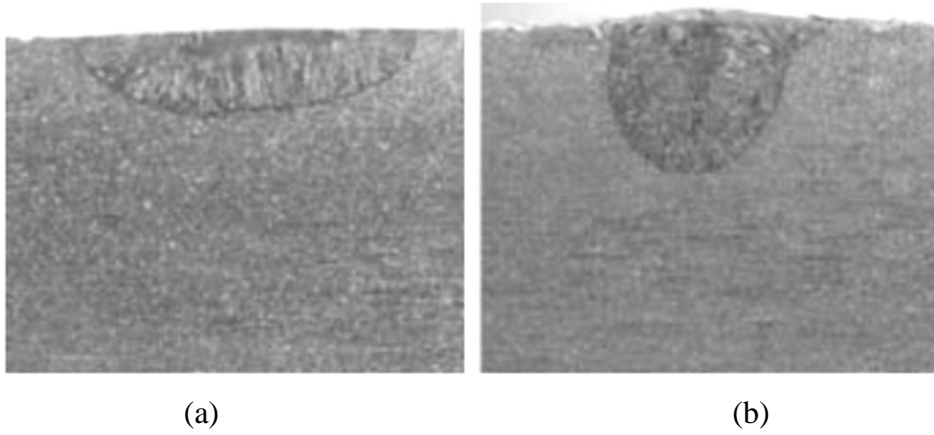


Figura 3.15 Sessões da soldagem (a) EBW e (b) A-EBW com as mesmas condições de soldagem.

Fonte: (ZHANG; FAN; KATAYAMA, 2006)

## 4 METODOLOGIA

Neste capítulo encontra-se o detalhamento da metodologia utilizada para o desenvolvimento do presente estudo. Com o principal objetivo de verificar a influência do uso de diferentes compostos candidatos a fluxo na soldagem MIG/MAG de um aço inoxidável austenítico, inicialmente foram realizados testes com a fonte operando em tensão constante. Nesses testes foi avaliada a influência do uso de fluxos nas características operacionais do processo e no perfil do cordão de solda com o metal líquido sendo transferido pelo modo de curto-circuito. Posteriormente, foram realizados ensaios com a fonte operando em modo de corrente constante utilizando dois fluxos selecionados na etapa inicial, baseando-se em resultados de atuação mais ativa no processo. Foi avaliado o efeito dos dois fluxos no processo com arco aberto, através da transferência metálica globular e spray. Analisando-se os sinais elétricos, perfil do cordão e características do arco elétrico.

### 4.1 Materiais

Foram utilizadas amostras do aço inoxidável austenítico AISI 304L doadas pela Aperam South America de Timóteo, Minas Gerais. Foram recebidas amostras nas dimensões de 6,20 x 50 x 200 mm e 6,20 x 100 x 200 mm. A composição química das amostras, informada pela empresa, é exibida na Tabela IV.1.

Tabela IV.1 Composição química da amostra do aço AISI 304L, em peso percentual.

C	Cr	Ni	Mn	Si	Co	Cu	Mo	V	P	S
0,026	18,25	8,04	1,28	0,46	0,17	0,10	0,06	0,047	0,035	0,001

Fonte: Aperam (2016)

Os candidatos a fluxos testados foram o óxido de cromo III ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), óxido de ferro III ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), fluoreto de sódio ( $\text{NaF}$ ), fluoreto de cálcio ( $\text{CaF}_2$ ) e fluoreto de alumínio ( $\text{AlF}_3$ ). Os fluxos são óxidos e fluoretos de pureza analítica (PA) disponíveis no Laboratório de Robótica, Simulação e Soldagem (LRSS). Todos os fluxos utilizados apresentavam granulometria

ajustada para < 200 mesh. A escolha dos fluxos utilizados foi baseada no uso destes compostos em trabalhos anteriores de A-TIG e A-MIG de aços e ligas, principalmente, em aços inoxidáveis (MODENESI, 2000; HOWSE, 2000; PANDOLFI, 2016; FERREIRA NETO, 2017; PATEL E PATEL, 2015; HUANG, 2010).

Na soldagem, o arame utilizado foi o arame AWS A5.9 ER308LSi com 1,2 mm de diâmetro, com composição química apresentada na Tabela IV.2. Para proteção da poça de fusão e região do arco foi utilizado gás de proteção comercial do tipo Ar-2,5%CO<sub>2</sub>.

Tabela IV.2 Composição química especificada do arame AWS A5.9 ER308LSi, em peso percentual.

C	Cr	Ni	Mn	Si	S	P
≤0,08	19,5-22	9-11	1-2,5	0,25-0,6	≤0,03	≤0,03

Fonte: ESAB (2005)

Ao longo do desenvolvimento do trabalho foram utilizados também outros insumos como acetona PA, lixas de 80, 120, 200, 400, 600 mesh, reativo de metalografia Marble, algodão, papel toalha, fita adesiva e papel alumínio.

## 4.2 Equipamentos

Todas as soldagens foram feitas com uma fonte multiprocessos transistorizada no secundário modelo Inversal 300 da IMC Soldagem com alimentador de arame STA-20 e tocha refrigerada TBI 511, com conduíte metálico. Para aferição da vazão do gás de proteção foi utilizado um fluxômetro de bocal para misturas de Ar-CO<sub>2</sub>.

Em todos os ensaios, a tocha permaneceu estática e o deslocamento do corpo de prova foi realizado por uma base de cobre presa a um dispositivo mecanizado com controle de velocidade (tartaruga). Para minimizar a distorção dos corpos de prova do aço inoxidável austenítico durante a soldagem, estes foram presos em um gabarito por parafusos (Figura 4.1) desenvolvido para este trabalho.

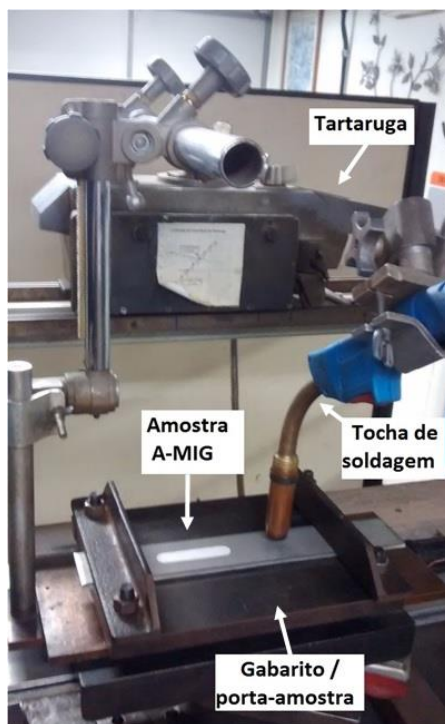


Figura 4.1 Sistema de soldagem e gabarito.  
Fonte: Adaptada de (BRITO, 2017).

A distribuição granulométrica dos fluxos foi determinada pelo equipamento de espalhamento a laser CILAS 1067 do Laboratório de Hidrometalurgia do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG, com o uso de água destilada como diluente. Os relatórios da distribuição dos mesmos serão apresentados no Apêndice A ao final da dissertação. Nos casos em que o fluxo apresentou granulometria superior a 200 mesh, o mesmo foi moído com o auxílio de um graal de ágata.

Para os testes de soldagem, o fluxo foi depositado sobre o metal base em uma área de 1000 mm<sup>2</sup> delimitada por uma máscara de fita adesiva. Esta máscara foi cortada com uma ferramenta desenvolvida no LRSS para trabalhos anteriores do processo A-TIG (COLEN NETO, 2012). A pesagem dos fluxos foi realizada com uma balança analítica digital da marca Bioprecisa, modelo FA2104N, com precisão de quatro casas decimais.

Nas soldagens com tensão constante, os sinais elétricos de tensão e corrente foram coletados utilizando um dispositivo de aquisição de dados DT9812 da DataTranslation (USA) com taxa de aquisição de 10000 Hz. O condicionamento dos sinais foi feito pelo equipamento TC-1 da IMC Soldagem com um sensor dedicado de efeito Hall para a

medição da corrente. E o controle do sistema de aquisição de dados foi realizado com software QuickDAD instalado em um computador.

Nos ensaios com corrente constante foi utilizado sistema de aquisição de dados do tipo SAP V4 da IMC Soldagem e software correspondente, com taxa de aquisição de 5000 Hz (taxa máxima obtida pelo equipamento). Este sistema foi usado por permitir a aquisição simultânea da corrente e tensão de soldagem juntamente com a velocidade de alimentação de arame. As análises dos sinais elétricos de todas as soldagens realizadas foram feitas com o software SINAL desenvolvido no LABEND-LRSS.

Foi montado um sistema para a projeção do arco e medição de seu comprimento em uma tela por lente com ampliação conhecida (11,8 vezes). Foi utilizada uma lente biconvexa em um sistema com liberdade de regulagem da distância focal e as imagens eram projetadas em papel milimetrado. Um esquema do aparato de projeção desenvolvido pode ser verificado na Figura 4.2.

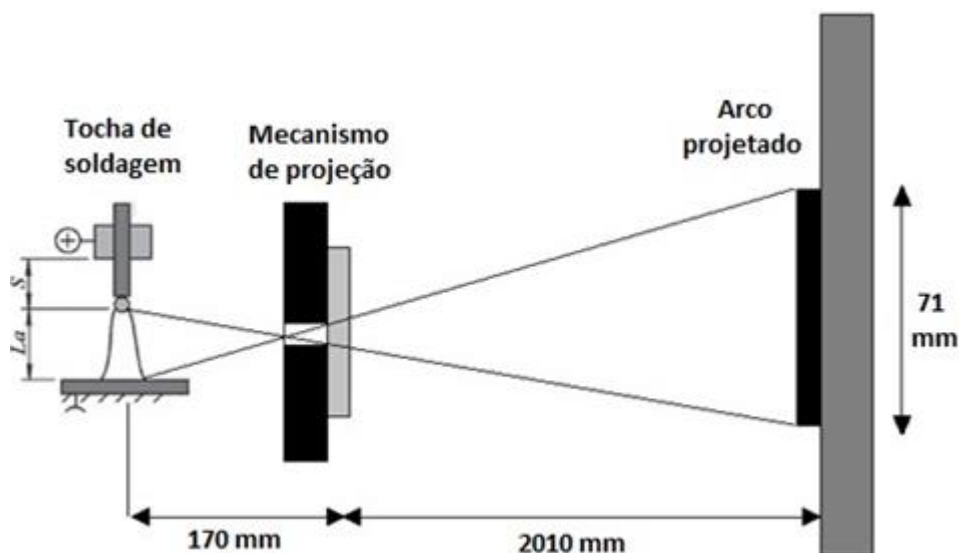


Figura 4.2 Representação do sistema de projeção do arco elétrico.  
Fonte: Adaptada de (BRITO, 2017).

As filmagens realizadas durante as soldagens para estudo do arco elétrico foram feitas com o uso de uma câmera comum e de uma câmera de alta velocidade Phantom. Imagens extraídas das filmagens foram tratadas e analisadas com os softwares XnView e Image J.

Para registro das macrografias foi utilizada uma câmera Canon Digital Rebel XTi montada em um sistema com tripé e base para as amostras. A preparação das amostras para esse fim englobou o uso de uma cortadora Arotec COR, embutidora metalográfica a quente EM30D e uma lixadeira Arotec.

## 4.3 Procedimento Experimental

### 4.3.1 Introdução

A metodologia do trabalho foi sistematizada de acordo com os objetivos e necessidades de cada etapa da experimentação. Como pode ser verificado na Figura 4.3, para a realização das soldagens do primeiro bloco de testes a fonte operou no modo de tensão constante. Já no segundo bloco, para melhor caracterizar o efeito do fluxo em um dado valor de corrente de soldagem, os testes foram realizados com a fonte operando em corrente constante. O detalhamento do procedimento experimental é apresentado nas subseções seguintes.

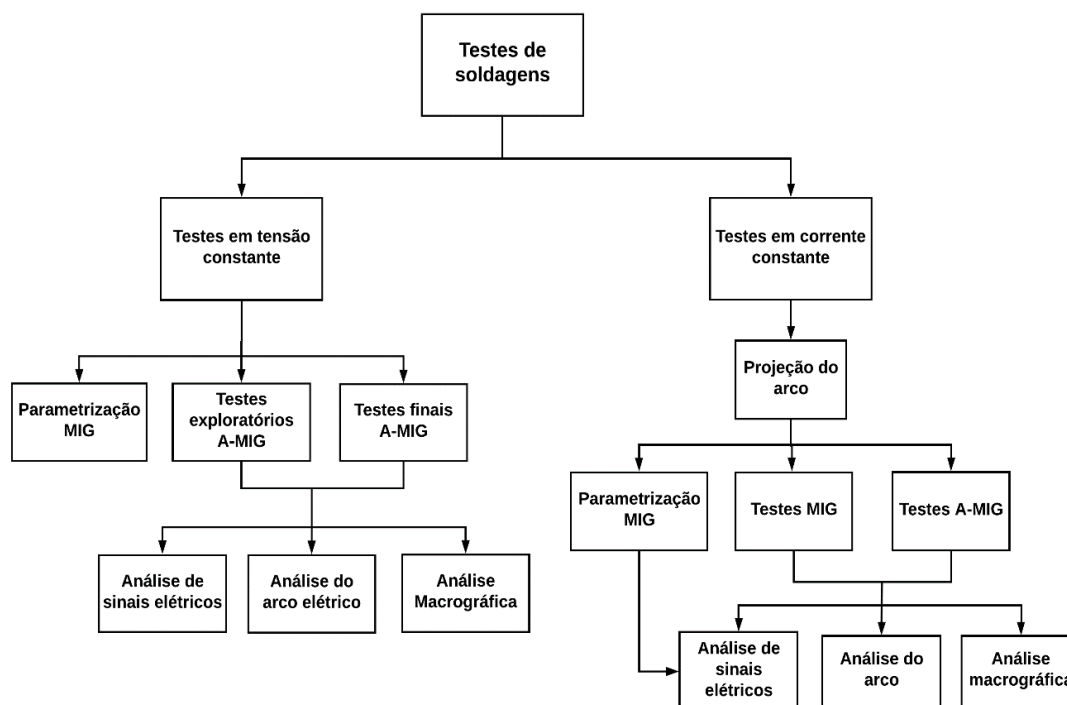


Figura 4.3 Histograma do procedimento experimental.

### 4.3.2 Preparação dos Corpos de Prova

Previamente às soldagens, todos os corpos de prova MIG foram preparados seguindo as etapas de 1 a 3 da listagem abaixo e os corpos de prova A-MIG atendendo as etapas de 1 a 8. Os fluxos foram preparados e aplicados com base na metodologia utilizada em trabalhos anteriores de soldagem A-MIG e A-TIG (MODENESI ET AL, 2000; HUANG, 2010; ZHANG e CAO, 2012; RUAN ET AL, 2012; FERREIRA, 2017). No presente trabalho, isto envolveu as seguintes etapas:

1. Desempeno dos corpos de prova;
2. Lavagem do corpo de prova com bucha, detergente e água corrente;
3. Limpeza da superfície do corpo de prova com acetona PA;
4. Preparação da máscara;
5. Utilização da máscara sobre a superfície para a aplicação do fluxo;
6. Pesagem do fluxo em balança analítica;
7. Aplicação do fluxo e sua adesão com acetona; e,
8. Retirada da máscara.

As chapas de aço inoxidável austenítico apresentavam distorções oriundas do processo de corte. Por isto, precisaram serem aplainadas antes da soldagem. O desempenho foi realizado por meio de martelamento das chapas. Após os corpos de prova foram lavados esfregando-se com uma bucha contendo detergente, com o intuito de retirar impurezas e possíveis resíduos de óleo. Em seguida, foram enxaguadas com água corrente e secas em ambiente limpo.

A máscara para delimitação da deposição de fluxo foi feita cortando um pedaço de fita adesiva com a utilização de um dispositivo de corte com a área padronizada de 1000 mm<sup>2</sup>. Depois de colada a máscara na superfície do corpo de prova, uma massa de 0,1000 g de fluxo em pó era colocada em seu interior e 3 a 4 gotas de acetona eram adicionadas para facilitar o espalhamento e a fixação do fluxo. Após evaporação da acetona, a máscara era retirada e o corpo de prova estava pronto para a soldagem, como esquematizado na Figura 4.4.

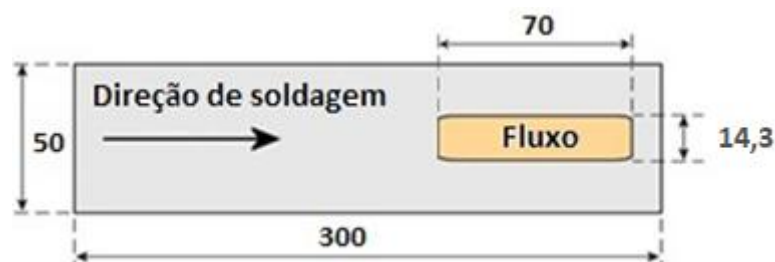


Figura 4.4 Desenho esquemático da superfície do corpo de prova com o fluxo (em mm).

### 4.3.3 Testes de Soldagem com Tensão Constante

Inicialmente, foi feita a parametrização do processo MIG/MAG convencional. Essa etapa envolveu a confecção de cordões em corpos de prova sem fluxo com tensões de 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28 e 32 V. Após selecionada a tensão de referência de acordo com o critério de maior estabilidade da soldagem com transferência por curto-circuito, foram feitos cordões em diferentes velocidades de deslocamento (30, 40 e 50 cm/min) e vazões do gás de proteção Ar-2,5% CO<sub>2</sub> (10, 12 e 15 L/min). Os demais parâmetros como velocidade de alimentação, DBCP e indutância foram mantidos fixos em todos os testes, vide apresentado na Tabela IV.3.

Em todos os ensaios desse trabalho a verificação da vazão do gás de proteção foi realizada antes do início das soldagens e em intervalos entre as soldagens com o uso de um fluxômetro de bocal para misturas de Ar-CO<sub>2</sub>, também conhecido como bibímetro. A distância do bico de contato à peça (DBCP) de 15 mm era regulado antes de todas as soldagens com o auxílio de um padrão de distância aferido com esse comprimento. Também foram feitas verificações periódicas da velocidade de deslocamento da tartaruga.

Após a definição dos parâmetros do processo foram feitos testes preliminares com oito candidatos a fluxos (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaCO<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, NaF, CaF<sub>2</sub> e AlF<sub>3</sub>). Destes, foram selecionados seis compostos para os testes finais. Em todos os testes com tensão constante os parâmetros de soldagem foram mantidos fixos, segundo valores indicados na Tabela V.3. A exemplo da metodologia utilizada por Modenesi et al (2013), em todas as amostras A-MIG a soldagem se iniciou na região sem fluxo em direção à região com fluxo, como



ilustrado na Figura 4.4. Em todas as condições foi depositado apenas um cordão sobre chapa em cada corpo de prova e foram soldados pelo menos dois corpos de prova para cada condição testada. Ademais, a sequência de execução das soldagens e de suas réplicas ocorreram de forma aleatória, sendo realizado sorteio para tal.

Tabela IV.3 Parâmetros de soldagem mantidos fixos nos testes com e sem fluxo com tensão constante.

Parâmetros de soldagem	Configuração
Tensão	18 V
Tipo de corrente	CC+
Indutância	$K_s = 5$ e $k_d = 5$
Gás de proteção e sua vazão	Ar-2,5%CO <sub>2</sub> , 15 L/min
Velocidade de alimentação do arame	5 m/min
Velocidade de deslocamento da tocha	40 cm/min
Distância do bico de contato à peça	15 mm
Orientação do eletrodo	Perpendicular ao plano da mesa

Nota:  $k_s$  e  $k_d$  correspondem, respectivamente, à taxa de crescimento e diminuição da corrente de soldagem na fonte.

Após a avaliação das soldagens realizadas com os fluxos, foram realizadas novas soldagens com filmagem de alta velocidade para observação do comportamento do arco e da transferência metálica no processo MIG e A-MIG (CaCO<sub>3</sub> e SiO<sub>2</sub>). A câmera foi posicionada em direção ao arco de soldagem e foi usado como lente um vidro comum. As filmagens foram feitas com resolução de 768 x 768 pixels e uma taxa em 2500 quadros por segundo, com um tempo de exposição de 20  $\mu$ s em cada quadro.

#### 4.3.4 Testes de Soldagem com Corrente Constante

Na segunda fase da pesquisa foram realizados testes com os dois fluxos de melhor desempenho selecionados na etapa anterior. As únicas diferenças nos parâmetros utilizados nesses ensaios foram o uso de corrente constante ao invés da tensão constante, a distância do bico de contato à peça que de 15 mm passou para 25 mm (para maior grau de liberdade da regulagem do comprimento do arco sem fundir o bico de contato) e passou-se a controlar o comprimento do arco, vide Tabela IV.4.

Igualmente aos testes anteriores, em todas as condições foi depositado apenas um cordão sobre chapa em cada corpo de prova e foram soldados pelo menos dois corpos de prova para cada condição testada. Sendo regularmente conferidos o DBCP, a vazão do gás de proteção e a velocidade de deslocamento da soldagem. E tendo todas as soldagens sido realizadas em sequência aleatória mediante sorteio.

Tabela IV.4 Parâmetros de soldagem mantidos fixos nos testes com e sem fluxo com corrente constante.

Parâmetros de soldagem	Configuração
Correntes	160, 190, 200, 215, 230, 250 A
Tipo de corrente	CC+
Gás de proteção e sua vazão	Ar-2,5%CO <sub>2</sub> , 15 L/min
Distância do bico de contato à peça	25 mm

Uma variável controlada durante o processo sem fluxo de todas as amostras foi o comprimento do arco ( $l_a$ ) regulado em 6 mm. Para que o  $l_a$  permanecesse constante no valor definido, foram efetuados medições e controle de seu comprimento durante as soldagens. Esse controle foi possível com a projeção do arco elétrico e regulagem dinâmica da velocidade de alimentação. Entretanto, é necessário ressaltar que nos testes com fluxo o  $l_a$  era controlado em 6 mm na região inicial do corpo de prova sem a presença de fluxo, e, após a entrada do arco elétrico na região com fluxo, não se realizavam alterações nesse comprimento, mantendo-o livre para flutuações devido à interferência do fluxo. Após a entrada do arco no fluxo eram realizadas medições do novo comprimento do arco.

A determinação do comprimento do arco elétrico durante a soldagem é uma tarefa complexa e propensa a erros por parte do avaliador, principalmente, para condições de soldagem em que a transferência metálica é globular. Essa dificuldade é relatada por Egerland (2015), em seu artigo de revisão sobre a determinação do comprimento do arco elétrico. No modo globular isto deve-se ao constante crescimento da gota e, conseqüente, diminuição do comprimento do arco, até o seu destacamento. Por esse motivo, as medições deste trabalho foram realizadas logo após o destacamento da gota, sempre que

possível para a condição globular. O valor do  $l_a$  foi calculado usando-se a semelhança de triângulos.

#### 4.4 Análise dos Sinais Elétricos

A análise dos sinais de tensão e corrente de soldagem foi realizada através do software SINAL. No estudo destes sinais foram descartados os intervalos de início e fim de soldagem, assim como o de transição MIG/A-MIG para as amostras com fluxo. Nos oscilogramas das soldagens em tensão constante foram descartados os 3 s iniciais e os 3 s finais. Nas amostras com fluxo foram descartados, além dos intervalos citados, 2 s antes e 2 s após a entrada do arco elétrico no fluxo. Nas soldagens em corrente constante, na região inicial sem fluxo, foram feitas as regulagens do comprimento do arco elétrico, descartou-se o tempo necessário para tal, que na maioria dos casos foi de 10 s. Os demais intervalos desconsiderados (transição MIG/A-MIG e fim de solda) foram os mesmos dos ensaios anteriores.

Para cada condição de interesse, foram calculados os valores médios de corrente e tensão de soldagem com seus desvios padrões. Para as soldagens com transferência por curto-circuito foram calculados também o período médio de transferência por curto-circuito ( $T$ ), tempo de arco aberto ( $t_a$ ), tensão ( $U_{arc}$ ) e corrente ( $I_{arc}$ ) do arco e tensão ( $U_{curto}$ ) e corrente ( $I_{curto}$ ) de curto-circuito. Outros parâmetros como o tempo de curto-circuito ( $t_{cc}$ ) e o fator de curto-circuito ( $F_{cc}$ ), que estão ilustrados na Figura 4.5 foram calculados, Equações 4.1 e 4.2, respectivamente. (MODENESI et al., 2011; MODENESI; AVELAR, 1999).

$$t_{cc} = T - t_a \quad (4.1)$$

$$F_{cc} = \frac{t_{cc}}{T} * 100 \quad (4.2)$$

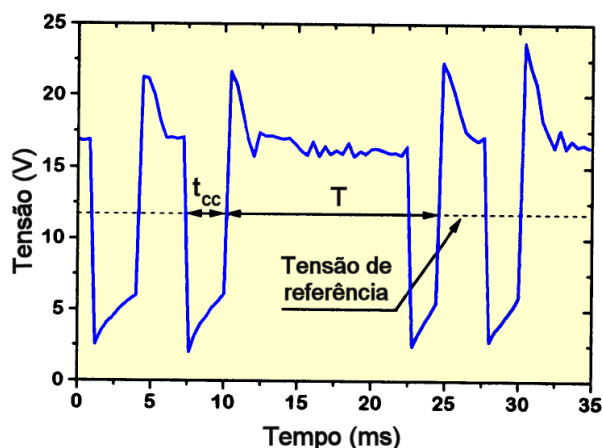


Figura 4.5 Indicação do tempo de curto-circuito ( $t_{cc}$ ) e do período ( $T$ ) em um oscilograma de tensão.

Fonte: Adaptado de (MODENESI; AVELAR, 1999)

Uma abordagem adotada para analisar o efeito dos fluxos em determinados parâmetros foi calcular a diferença entre os valores do parâmetro considerado na condição com fluxo e na condição sem fluxo. Esta diferença foi indicada, nos gráficos deste trabalho, pelo símbolo de delta ( $\Delta$ ).

Para as soldagens com transferência por queda livre foram determinadas as médias de tensão e corrente com seus desvios padrões, e a velocidade de alimentação do arame.

#### 4.5 Avaliação do Perfil do Cordão de Solda

A qualidade do cordão de solda com os diferentes fluxos e condições de soldagem foi avaliada em função da análise do aspecto visual e medições do perfil geométrico do cordão. Para tal, não foram utilizadas as regiões de início / fim do cordão e nem da região de transição MIG / A-MIG.

Nos testes com tensão constante, foram retiradas duas amostras na seção transversal de cada corpo de prova, resultando em quatro medições por condição MIG e A-MIG. No entanto, nos testes de corrente constante, devido ao grande número de amostras (40) foi limitada a retirada de uma amostra da seção transversal de cada corpo de prova, sendo assim em média, 2 amostras por condição e algumas 3.

A preparação para a macrografia envolveu o corte das amostras MIG e A-MIG em regiões representativas, o embutimento a quente com baquelite, lixamento manual e ataque químico com o reativo Marble. Após o registro das macrografias por câmera fotográfica, as imagens foram analisadas e as medições das dimensões dos cordões foram feitas com o software Image J. Foram determinados: a largura, a penetração máxima, o reforço máximo, área total do cordão, área fundida, área depositada, diluição e ângulos de molhamento interno e externo dos dois lados do cordão. Algumas dessas medições estão representadas na Figura 4.6.

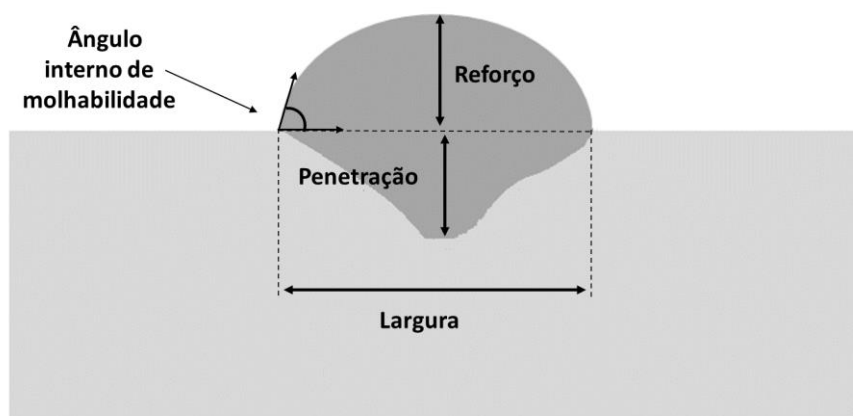


Figura 4.6 Medição das dimensões do cordão de solda.

#### 4.6 Análise Estatística

Avaliações estatísticas como cálculo de médias aritméticas e desvios padrão foram aplicadas em todo o trabalho. Uma convenção adotada em todas as avaliações de médias e desvios das condições MIG, foi agrupar todos os resultados referentes às partes soldadas sem a aplicação de fluxos de cada condição, o que engloba tanto cordões feitos totalmente sem fluxo quanto metades sem fluxo das soldagens A-MIG. Nas partes com fluxo foram confeccionados tanto as médias e desvios entre as amostras de cada condição quanto a média de todas as amostras com fluxo, independente da condição, essa última denominada nas tabelas como A-MIG.

A normalidade dos dados foi verificada com o teste Shapiro-Wilk. Foram realizados testes de hipótese para avaliar a igualdade destes resultados obtidos durante a soldagem sem fluxo (MIG) com os resultados do conjunto de testes com todos os fluxos (A-MIG) e, também, com os resultados individuais de cada um dos fluxos. O nível de significância ( $\alpha$ ) utilizado foi de 0,05. A hipótese nula ( $H_0$ ) considerada foi que a média de cada parâmetro analisado na condição MIG fosse igual à da A-MIG ou de cada fluxo individual. Como hipótese alternativa ( $H_1$ ) foi considerado que as médias são diferentes e que o fluxo tem efeito sobre o parâmetro. Nos casos em que o valor-p  $\leq \alpha$ , rejeita-se  $H_0$  e considera-se  $H_1$ .

$H_0: x_{MIG} = X_{A-MIG}$  Fluxo não apresentou comportamento ativo no parâmetro avaliado

$H_1: x_{MIG} \neq X_{A-MIG}$  Fluxo apresentou comportamento ativo no parâmetro avaliado

Devido a dispersão dos resultados das amostras com fluxo, optou-se por utilizar o desvio padrão ponderado para a construção dos gráficos. O desvio ponderado ( $S$ ) é utilizado para dados agrupados em classes onde a frequência absoluta simples é considerada como o fator ponderador. Somasse a diferença entre as medições individuais ( $x_i$ ) e a média ( $\bar{X}$ ) vezes o número de amostras para dado fluxo ( $f_i$ ), dividido pelo número total de amostras com fluxo menos o número de fluxos, vide Equação 4.3.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 f_i}{\sum f_i - 1}} \quad (4.3)$$

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Nesse capítulo será apresentada e discutida a influência de fluxos nas soldagens do aço inoxidável AISI 304L em diferentes condições, englobando transferências metálicas por contato e por voo livre, em comparação ao processo MIG/MAG sem fluxo. De forma geral, o efeito do fluxo foi avaliado em função de alterações nos aspectos operacionais do processo, da regularidade da transferência metálica, do aspecto do arco elétrico e da morfologia do cordão de solda.

### **5.1 Soldagem com Tensão Constante**

O principal objetivo dos ensaios que serão abordados nessa sessão foi avaliar quais dos candidatos a fluxos escolhidos apresentariam comportamento ativo na soldagem de um aço inoxidável austenítico. Para isto, optou-se inicialmente por testar os compostos em soldagens com transferência por curto-circuito por: (1) esse tipo de transferência apresentar sinais de corrente e tensão característicos que permitem avaliar de forma relativamente simples alterações no processo e (2) apresentar operação alternada com arco e em curto-circuito que, em princípio, permitiria avaliar possíveis efeitos do fluxo nestes momentos. Um dos resultados esperados desses testes é a possibilidade de selecionar um número limitado de fluxos com maior efeito ativo para que fossem realizados testes complementares. Para isto, as análises foram divididas em termos de aspectos operacionais, análise visual do arco elétrico e perfil do cordão de solda.

#### **5.1.1 Influência dos Fluxos nos Aspectos Operacionais**

Optou-se por utilizar os resultados da análise dos sinais elétricos de tensão e corrente, juntamente com seus desvios-padrão, como principal meio de avaliação do efeito dos fluxos na soldagem A-MIG do aço inoxidável AISI 304L. Nessa subseção serão apresentados rapidamente os resultados dos testes preliminares e, em seguida, com maiores detalhes os resultados dos testes finais.

### **Parametrização da Soldagem e Testes Exploratórios**

Nos ensaios de parametrização da soldagem MIG/MAG convencional foram feitos testes com tensões reguladas na fonte entre 14 e 32 V. Para tensões inferiores a 18 V houve aumento no fator de curto-circuito, porém o processo ficou muito instável, com extinções frequentes do arco elétrico. Para tensões acima de 18 V, o fator de curto-circuito decaiu e a transferência passou a ser mista com curtos-circuitos e intervalos de arco aberto, possivelmente sem transferência metálica. O processo passou a ser totalmente com arco aberto (transferência globular) acima de 25 V. Assim, foi selecionada para os testes seguintes, a tensão de 18 V, pois, com esta, o processo apresentou o maior fator de curto-circuito com uma estabilidade adequada.

Após a definição dos parâmetros do processo foram feitos testes preliminares com oito candidatos a fluxos ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{NaF}$ ,  $\text{CaF}_2$  e  $\text{AlF}_3$ ). Destes, foram selecionados, para os testes finais, seis fluxos ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{CaF}_2$ ). Foram eliminados  $\text{NaF}$  e  $\text{AlF}_3$  por não provocarem alterações sensíveis nos sinais elétricos das soldagens e nem na geometria do cordão, sendo considerado que estes compostos não apresentaram comportamento ativo nas condições testadas.

### **Testes Finais**

A Figura 5.1 apresenta um oscilograma de tensão de um ensaio A-MIG, onde é possível identificar as regiões da soldagem sem fluxo (MIG), uma região intermediária de transição MIG / A-MIG e a região com fluxo (A-MIG).



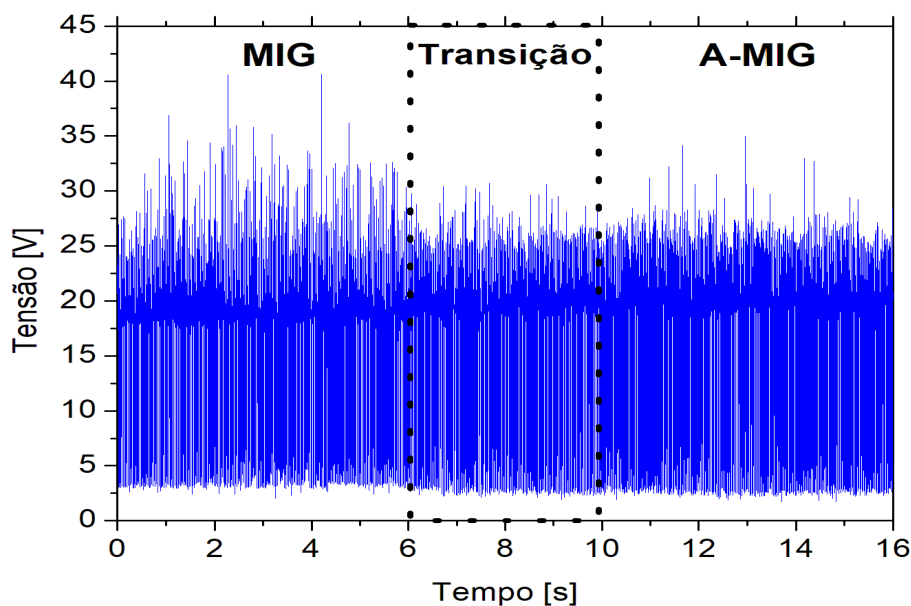


Figura 5.1 Oscilograma de tensão de uma soldagem MIG e A-MIG com aplicação de  $\text{SiO}_2$  como fluxo.

Resultados da análise dos parâmetros elétricos medidos nos ensaios estão na Tabela V.1. Foram realizados testes de hipótese para avaliar a igualdade destes resultados obtidos durante a soldagem sem fluxo (MIG) com os resultados do conjunto de testes com todos os fluxos (A-MIG) e, também, com os resultados individuais com cada um dos fluxos. O nível de significância ( $\alpha$ ) utilizado foi de 0,05. A hipótese nula ( $H_0$ ) considerada foi que a média de cada parâmetro analisado na condição MIG fosse igual à da A-MIG ou de cada fluxo individual. Como hipótese alternativa ( $H_1$ ) foi considerado que as médias são diferentes e que o fluxo tem efeito sobre o parâmetro. Nos casos em que o valor- $p \leq \alpha$ , rejeita-se  $H_0$  e considera-se  $H_1$ . Na Tabela V.2, encontram-se os resultados dos testes de hipótese. Como o processo operou em modo de tensão constante e a mesma era imposta pelo equipamento, não eram esperadas variações nesse parâmetro e, por isso, o mesmo não foi submetido ao teste de hipótese.

O teste de hipótese indica que os fluxos afetaram com significância a corrente e tensão do arco, o fator de curto-circuito e a soma das quedas anódica e catódica. Observa-se que o  $\text{CaCO}_3$  foi o fluxo que mais afetou as características operacionais do processo, seguido pelo  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiO}_2$ .

Tabela V.1 Parâmetros elétricos dos testes realizados e o desvio padrão das medições.

Parâmetro		MIG	A-MIG	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	CaF <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	
Tensão	(V)	Média	16,9	16,9	16,8	16,9	16,9	16,8	16,9	16,9
		Desvio	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
Corrente	(A)	Média	160,5	162,3	166,0	163,4	160,9	163,5	157,4	164,4
		Desvio	2,3	4,0	5,8	2,5	1,9	4,3	1,3	4,4
Fator de curto-circuito	(%)	Média	21,3	21,7	23,3	14,6	20,1	22,2	27,5	23,4
		Desvio	0,5	4,6	0,4	0,6	0,4	0,2	0,2	0,8
Tensão do arco	(V)	Média	20,2	20,4	20,6	19,0	20,0	20,4	21,5	20,6
		Desvio	0,1	0,9	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Corrente do arco	(A)	Média	154,6	156,5	160,7	160,1	155,1	158,5	148,3	158,7
		Desvio	2,3	5,5	5,5	2,6	1,9	4,5	2,4	4,1
Tensão de curto-circuito	(V)	Média	4,4	4,4	4,3	4,5	4,4	4,3	4,6	4,5
		Desvio	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,0	0,2	0,1
Corrente de curto-circuito	(A)	Média	181,9	182,5	183,6	182,9	183,4	181,2	181,3	182,9
		Desvio	2,5	2,9	6,4	2,8	1,3	3,6	1,6	4,8
Soma da queda anódica e catódica	(V)	Média	15,1	15,4	15,6	14,6	15,0	15,5	16,3	15,6
		Desvio	0,1	0,6	0,2	0,6	0,1	0,1	0,2	0,1

Tabela V.2 Valores de p do teste de hipóteses.

	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	CaF <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>
Corrente	0,041	0,048	0,372	0,176	0,074	0,070
Fator de curto-circuito	0,034	7E-05	0,088	0,124	0,002	0,050
Tensão do arco	0,032	2E-04	0,027	0,086	1E-04	0,002
Corrente do arco	0,041	0,009	0,492	0,149	0,001	0,022
Tensão de curto-circuito	0,082	0,121	0,253	0,422	0,342	0,147
Corrente de curto-circuito	0,334	0,467	0,120	0,433	0,317	0,282
Soma da queda anódica e catódica	0,182	0,011	0,017	0,050	0,001	0,044

Para visualização mais direta do efeito dos fluxos no processo, foram calculadas as diferenças entre os parâmetros das condições com fluxo e os das condições sem fluxo (A-MIG – MIG). Além disto, para representar a variabilidade de cada parâmetro nas condições com fluxo, foi utilizado o desvio padrão ponderado, como descrito na metodologia (seção 4.6).

A Figura 5.2 mostra que existe uma tendência das diferenças de fator de curto-circuito acompanharem as variações de tensão no período de arco. Verifica-se, por exemplo, com o uso da sílica, que o fluxo provocou um aumento na tensão do arco, juntamente, com o aumento do fator de curto-circuito (+ 29%). Essa relação entre as variações de tensão do arco com as variações na intensidade de curtos-circuitos pode ser explicada considerando

que, com o arco apresentando uma tensão maior do que a fornecida pelo equipamento, possivelmente, ocorrerá uma diminuição em seu comprimento ( $la$ ). Com um menor  $la$  a gota contida na ponta do eletrodo tocará a poça de fusão em um tempo menor, resultando em um maior número de curtos-circuitos. Isto vem de encontro com a redução do tempo de arco aberto e aumento do tempo de curto, vide Figura 5.3. Outra mudança provocada pelo  $SiO_2$  foi a redução da corrente tanto de soldagem quanto do arco (Figura 5.4). Este resultado é condizente com o aumento da tensão, dado que, com uma maior tensão disponível a corrente requerida para manutenção do arco será menor.

As mesmas relações de tensão do arco, fator de curto-circuito e corrente se aplicam para o carbonato de cálcio, porém de modo inverso, isto é, o que aumentou com o  $SiO_2$  reduziu com o  $CaCO_3$  e vice-versa. Com os demais fluxos algumas alterações nas características do processo foram significantes, porém, as mudanças tenderam a ser mais sutis do que com esses fluxos citados.

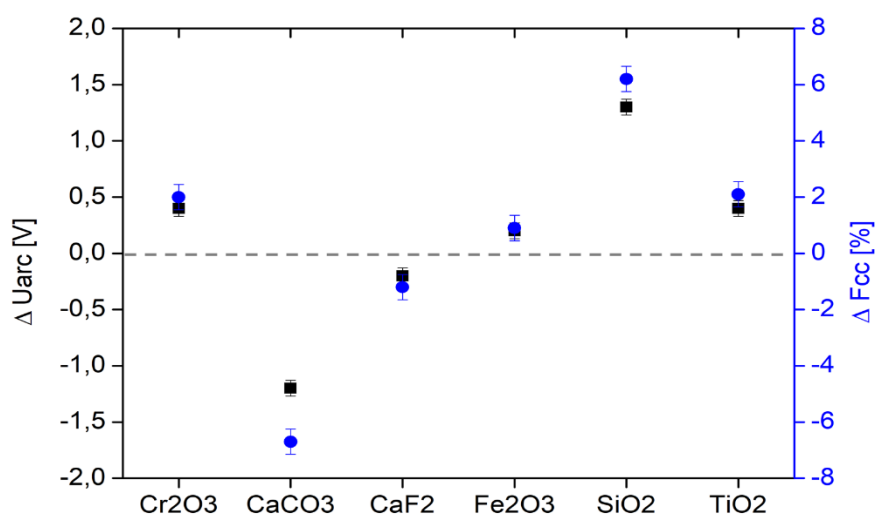


Figura 5.2 Diferença da tensão do arco elétrico ( $U_{arc}$ ) e do fator de curto-circuito ( $F_{cc}$ ) nas soldagens A-MIG em relação à MIG.

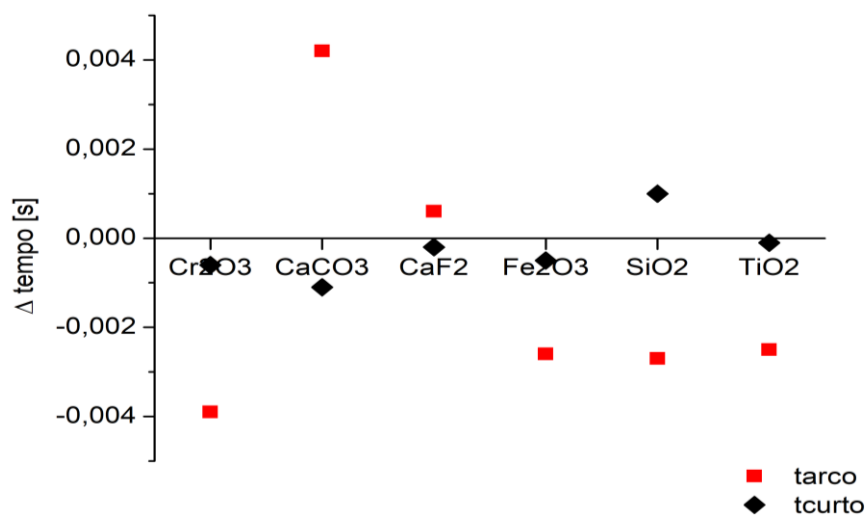


Figura 5.3 Diferença nos tempos de arco aberto (tarco) e em curto-circuito (tcurto) do processo A-MIG em relação à MIG.

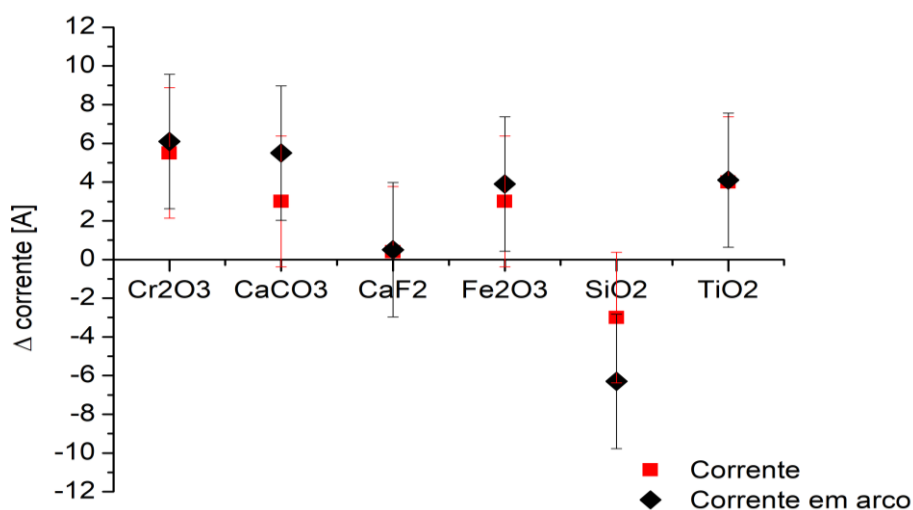


Figura 5.4 Diferença da corrente média de soldagem e da corrente no período de arco das amostras A-MIG em relação à MIG.

Diferentemente do observado nos períodos de arco aberto, nos de curto-circuito não houveram mudanças significativas com o uso de nenhum dos fluxos (Tabela V.2). Isto sugere que, após estabelecido o contato eletrodo / poça de fusão, a presença de fluxo, não interfere nas características operacionais do processo.

Uma constatação feita com a análise dos oscilogramas de tensão é da falta de regularidade da transferência metálica em alguns trechos de certas amostras na região com fluxo, sendo identificados períodos com maior ou menor frequência de transferência ao longo da soldagem. Na Figura 5.5 é possível visualizar que a transferência, com o CaCO<sub>3</sub>, ocorre

de forma menos regular, com diferentes períodos de duração. De forma similar, na soldagem com  $\text{SiO}_2$ , apesar do Fcc médio ter aumentado, houveram intervalos nos oscilogramas em que o período de transferência foi maior do que no restante da amostra. Porém, com esse fluxo, a variação foi menor do que no anterior.

Uma possível explicação para o comportamento irregular é que, com a metodologia utilizada, sem a adição de algum composto que promovesse maior adesão da camada de fluxo sobre a superfície metálica, os fluxos foram parcialmente expulsos da região soldada pela ação dos jatos de plasma e do gás de proteção. Assim, atribui-se parte do comportamento variável na região com fluxo de algumas amostras ao desprendimento do fluxo, ocasionando redução do efeito do mesmo devido à redução ou eliminação de sua presença em alguns intervalos. Isto refletiu diretamente nos sinais elétricos e, também, no aspecto superficial do cordão de solda que será apresentado posteriormente.

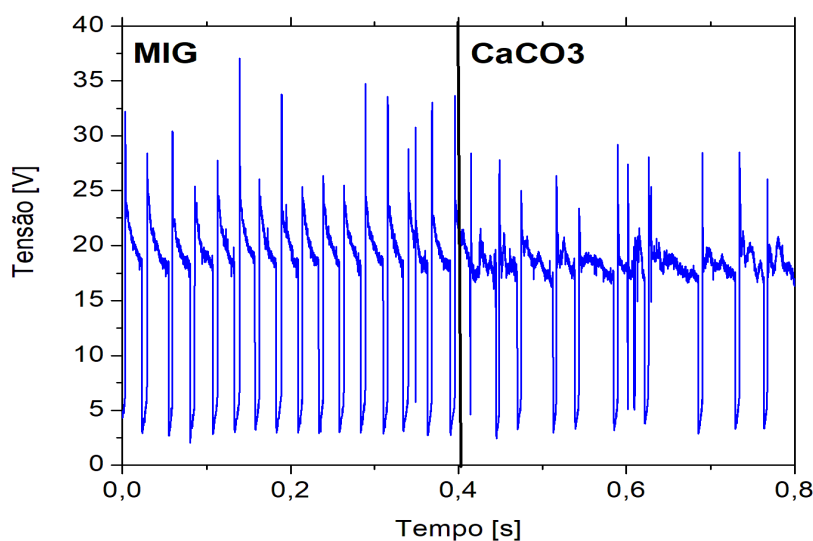


Figura 5.5 Detalhe da transferência por curto-circuito no oscilograma de tensão da soldagem MIG e da soldagem A-MIG com  $\text{CaCO}_3$ .

Uma outra modificação provocada por alguns fluxos foi na redução dos valores da tensão de reignição do arco após curtos-circuitos, como mostrado na Figura 5.6. A Figura 5.7 apresenta alguns histogramas dessa tensão para a soldagem MIG e A-MIG, verifica-se de forma geral a redução das tensões de pico e também do número de ocorrências desses picos com os fluxos comparados à soldagem MIG, exceto com o  $\text{CaF}_2$ . Essa redução da

tensão de reignição sugere uma maior facilidade em restabelecer o arco elétrico após sua extinção, característica essa, favorável para a estabilidade do processo.

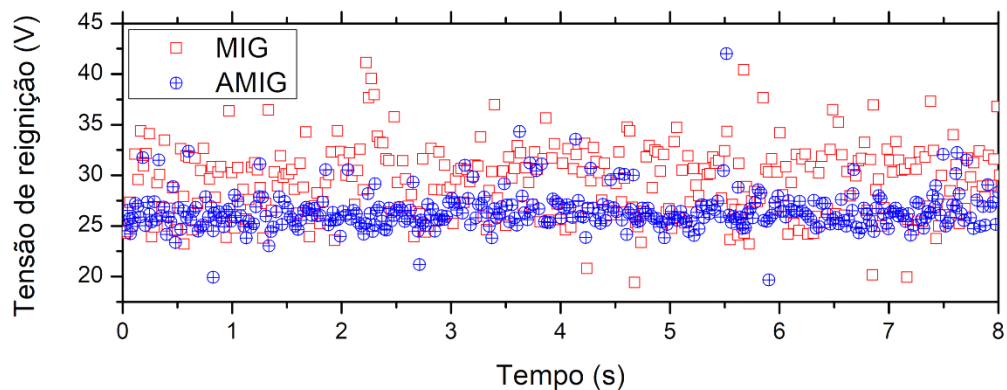


Figura 5.6 Tensão de reignição da soldagem MIG e A-MIG com  $\text{SiO}_2$ .

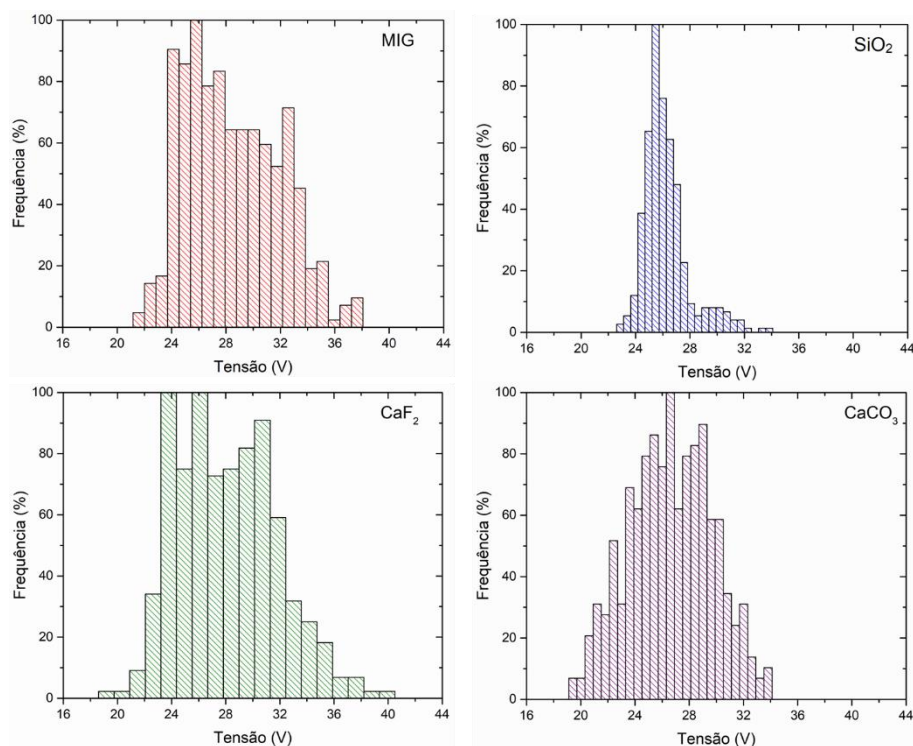


Figura 5.7 Histogramas da tensão de reignição na soldagem MIG e A-MIG.

Outra forma de avaliar a estabilidade da soldagem é através da análise de gráficos da tensão em função da corrente. Como exibido na Figura 5.8, os gráficos apresentam dois conjuntos de pontos, a nuvem inferior corresponde à ocorrência de curtos-circuitos e a superior à operação com arco. Considerando que, quanto menos dispersos os dados estiverem nos conjuntos, maior deve ser a estabilidade, observa-se que, em comparação

ao processo MIG convencional, o uso do  $\text{CaCO}_3$  aumentou a dispersão dos pontos representativos da operação com arco aberto, o que pode estar relacionado ao comportamento não regular do arco e da transferência metálica.

A análise geral da estabilidade da soldagem com o uso dos fluxos não é simples. Por exemplo, com os compostos que tiveram maior atuação no processo ( $\text{SiO}_2$  e  $\text{CaCO}_3$ ), notam-se alterações nos sinais elétricos que podem ser associadas tanto com ganho como com perda de estabilidade. No caso da sílica, são alterações positivas a ausência da terceira nuvem de pontos observada no gráfico MIG (Figura 5.8); a maior regularidade de transferência, dada pelo menor desvio padrão do período de transferência; e a redução dos valores da tensão de reignição, o que sugere uma maior facilidade para a reabertura do arco elétrico após os curtos-circuitos e pode contribuir para um processo mais estável. Por outro lado, nas condições testadas com esse fluxo, também se observou um maior nível de respingos gerados no processo, o que é um indicativo de instabilidade.

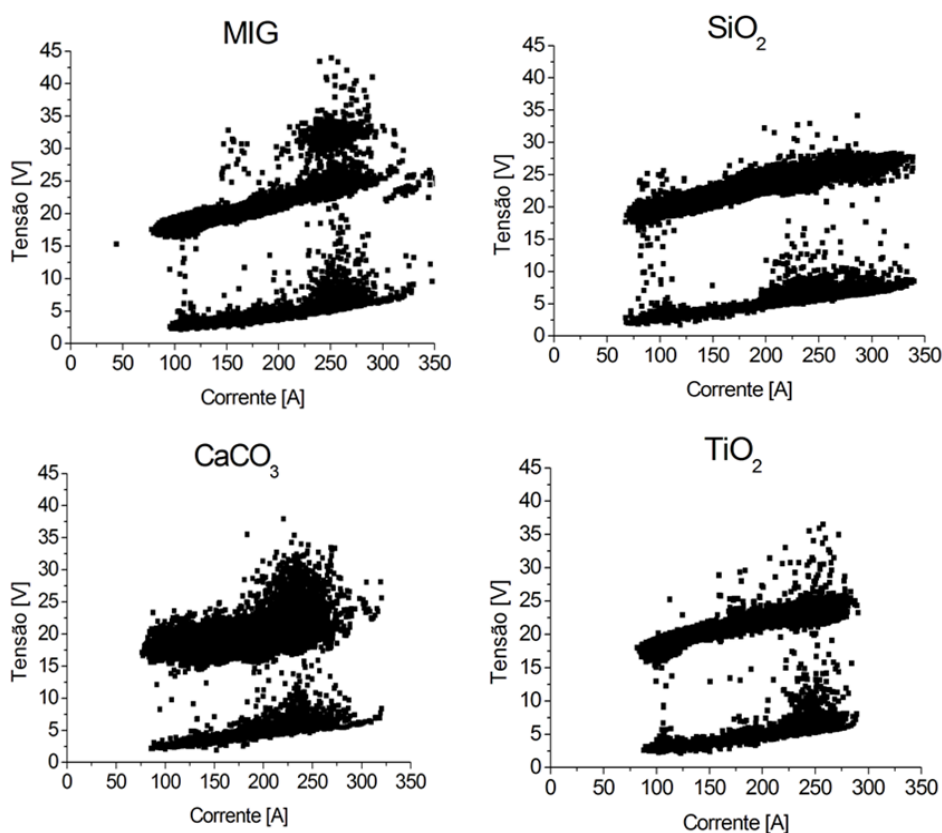


Figura 5.8 Gráficos da tensão pela corrente das soldagens MIG e A-MIG com diferentes fluxos e mesma condição de soldagem.

### 5.1.2 Filmagem do Processo

A análise das filmagens de alta velocidade dos testes de soldagem mostra alterações no aspecto do arco provocadas pelo uso dos fluxos como o aumento de sua luminosidade e mudanças no seu formato e direção. A Figura 5.9 apresenta uma imagem da abertura do arco e duas de momentos posteriores da soldagem MIG que podem ser tomados para comparação com as imagens obtidas na soldagem com fluxo. O arco, na sua reignição, apresenta um aspecto mais largo do que o usual, mostrando, em alguns casos indícios de jatos de plasma a partir da poça de fusão. Pequenas projeções, possivelmente respingos, são observadas em quase todos os quadros. A geração de respingos é inerente ao processo de soldagem com transferência por contato e o momento de abertura do arco ao final do curto é conhecido como um dos de geração de respingos do processo (ERSOY; HU; KANNATEY-ASIBU, 2008; KANG et al., 2003). A condição que apresentou maior geração de projeções foi com o uso da sílica.



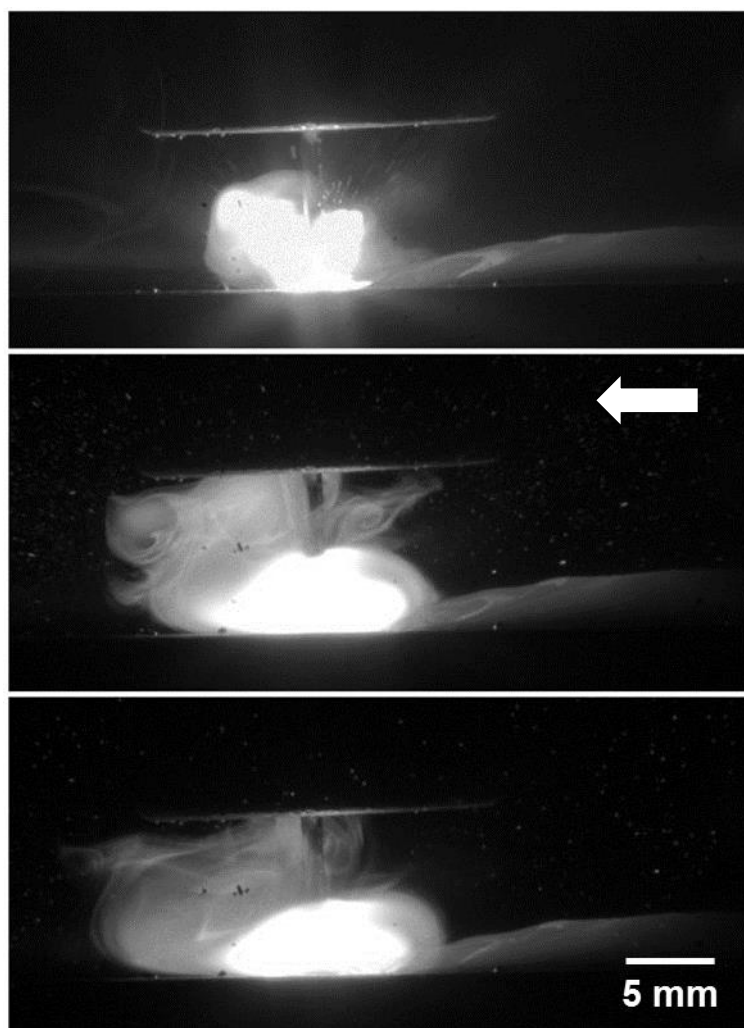


Figura 5.9 Imagens do arco elétrico na soldagem MIG. A primeira imagem marca a reabertura do arco após um curto-circuito e as demais foram tiradas em intervalos de 0,8 ms. A direção de soldagem é indicada pela seta no canto direito da segunda imagem.

Com o  $\text{CaCO}_3$ , na abertura do arco ao final de um curto-circuito (Figura 5.9), parece ocorrer uma maior geração de projeções e o arco tende a envolver mais o eletrodo. Frequentemente, ocorrem algumas explosões que podem estar associadas com a liberação de gases no processo, como exibido na Figura 5.10. Uma hipótese é da liberação de  $\text{CO}_2$  oriunda da decomposição do fluxo. No entanto não se tem elementos suficientes para provar esta suposição.

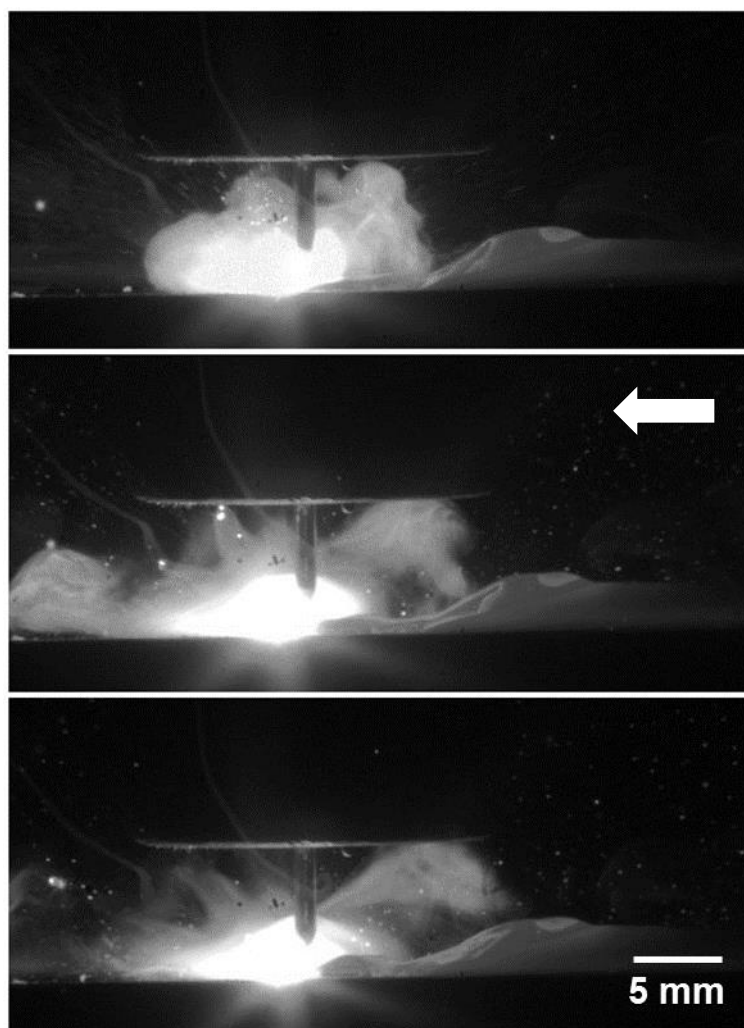


Figura 5.10 Imagens do arco elétrico na soldagem com  $\text{CaCO}_3$ . A primeira imagem marca a reabertura do arco após um curto-circuito e as demais foram tiradas em intervalos de 0,8 ms. A direção de soldagem é indicada pela seta no canto direito da segunda imagem.

Na soldagem com fluxo percebe-se em várias imagens da filmagem, a projeção de uma série de partículas à frente do arco. Estas foram associadas à expulsão do fluxo pelo jato de plasma e gás de proteção como mencionado na seção anterior.

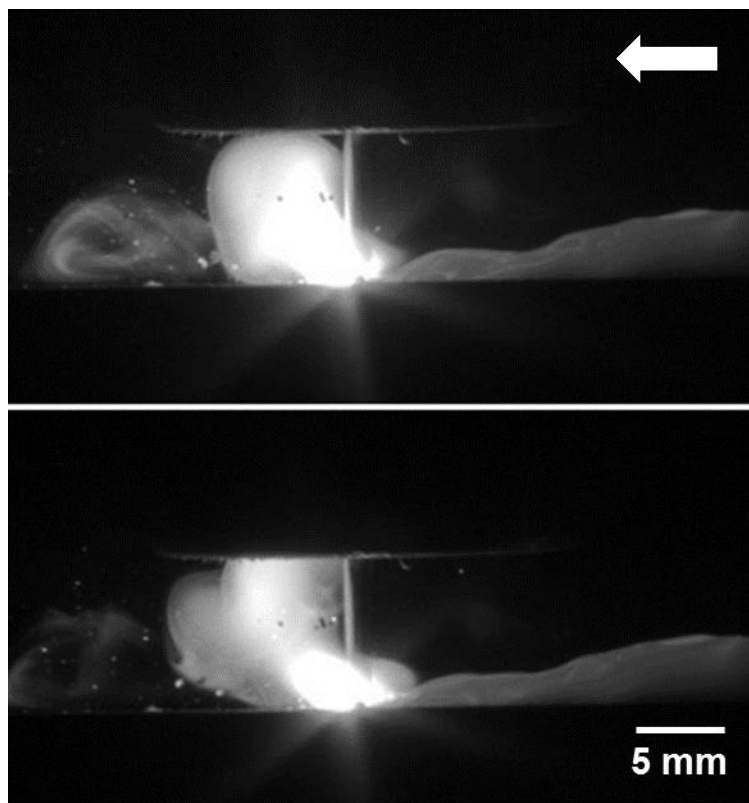


Figura 5.11 Imagens do arco elétrico na soldagem com  $\text{CaCO}_3$  evidenciando o que parece ser explosões no arco elétrico. A imagem superior corresponde ao tempo de 138,20 ms e a inferior a 138,28 ms. A direção de soldagem é indicada pela seta no canto direito da primeira imagem.

Imagens do arco na presença de sílica são mostradas na Figura 5.12. Durante as soldagens com esse fluxo foi observado uma maior variabilidade do formato do arco e uma deflexão do arco em direção contrária da direção de soldagem. Efeito similar é relatado em trabalhos de A-TIG do aço AISI 304 (Modenesi et al., 2000, e Pandolfi, 2016). Pandolfi (2016) investigou a ocorrência de constrição mecânica do arco provocada por fluxos e não observou mudança significativa na largura do arco com diferentes fluxos, mas, com a sílica, observou a deflexão na direção contrária à de soldagem (Figura 5.13).

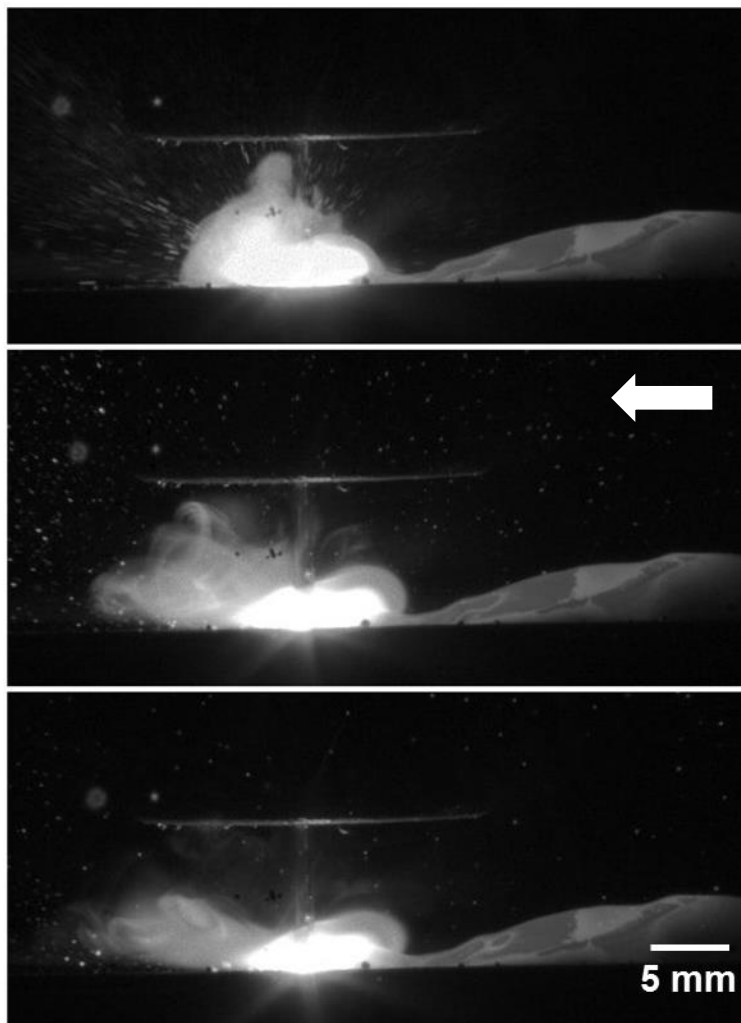


Figura 5.12 Imagens do arco elétrico na soldagem com  $\text{SiO}_2$ . A primeira imagem marca a reabertura do arco após um curto-circuito e as demais foram tiradas em intervalos de 0,8 ms. A direção de soldagem é indicada pela seta no canto direito da segunda imagem.

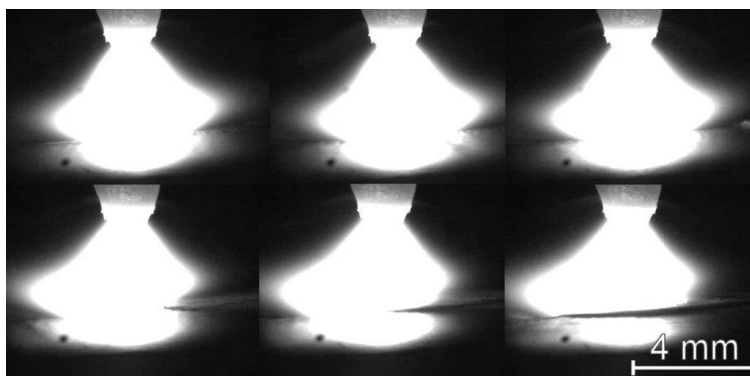


Figura 5.13 Imagens da região do arco filmada de lado durante um teste com fluxo de  $\text{SiO}_2$ . As três imagens superiores correspondem à região do cordão sem fluxo (TIG) e as três inferiores, com fluxo (A-TIG). O sentido de soldagem é da esquerda para a direita.

Fonte: (PANDOLFI, G. S; RODRIGUES, F. G; MODENESI, 2016)

Nas filmagens do processo sem fluxo e com o uso da sílica nota-se a existência de pontos brilhantes e móveis entre a raiz do arco elétrico e a poça de fusão. Este efeito é mais evidente, principalmente, para a soldagem com  $\text{SiO}_2$ , como pode ser visto na Figura 5.14. O fenômeno é mais visível em momentos em que a gota de metal líquido apresenta um tamanho considerável e reduz o comprimento do arco. Estes parecem ser pontos catódicos formados sobre partículas de óxido na poça de fusão. Esses pontos não foram observados na filmagem com o uso do carbonato de cálcio.

Na soldagem MIG convencional, pontos catódicos são comumente observados na borda dianteira da poça de fusão<sup>1</sup>. A presença destes pontos no interior da poça pode ser um fator que contribui para a deflexão do arco com o uso de  $\text{SiO}_2$ .

Na soldagem A-TIG, a deflexão do arco com o uso da sílica é atribuída a sua atuação como uma barreira para o arco. Por ser um óxido não metálico refratário a sua presença sobre a superfície age como um isolante (LI et al., 2007) e o arco apresentaria uma deflexão para trás em direção ao metal líquido com menor presença do fluxo. De forma alternativa, a presença de pontos catódicos na superfície da poça de fusão sugere que, na soldagem A-MIG, partículas de fluxo sobre o metal líquido atuem como locais para emissão de elétrons para o arco. Assim, o arco tenderia a defletir para sobre a poça devido aos pontos de maior facilidade de emissão de elétrons presentes na poça.

---

<sup>1</sup> Nota: Ver, por exemplo:

<[https://sites.ualberta.ca/~ccwj/videos/pages/Intro%20High%20Speed/01\\_Fundamental%20GMAW%20Metal%20Transfer%20Modes/GMAW\\_Steel\\_85Ar-15CO2\\_Spray\\_001/](https://sites.ualberta.ca/~ccwj/videos/pages/Intro%20High%20Speed/01_Fundamental%20GMAW%20Metal%20Transfer%20Modes/GMAW_Steel_85Ar-15CO2_Spray_001/)>.

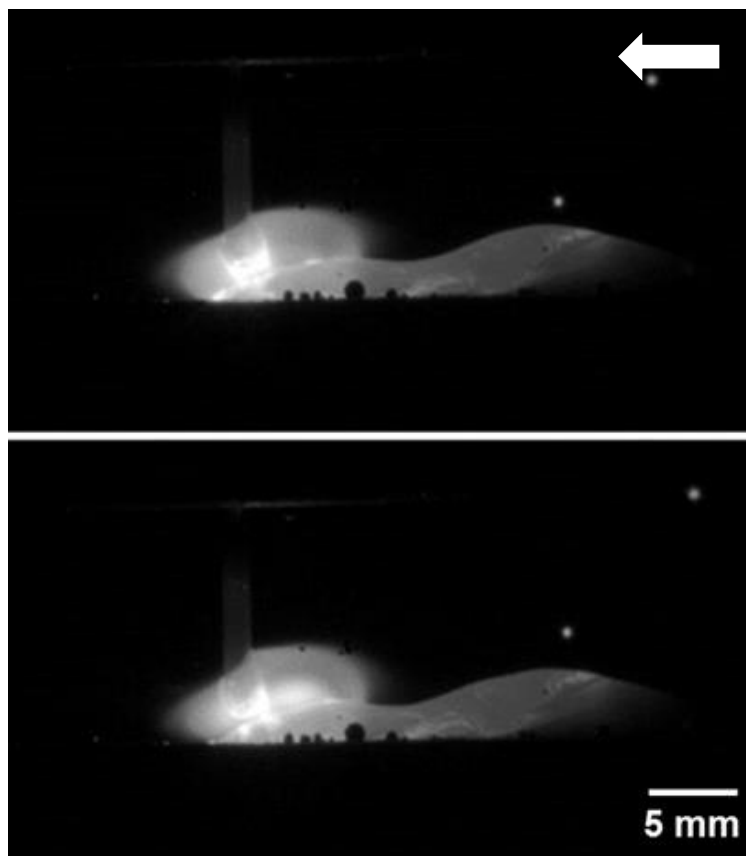


Figura 5.14 Imagens do arco elétrico na soldagem com  $\text{SiO}_2$  evidenciando manchas catódicas sobre a poça de fusão. A imagem superior corresponde ao tempo de 405,60 ms e a inferior a 407,60 ms. A direção de soldagem é indicada pela seta no canto direito da primeira imagem.

### 5.1.3 Efeito dos Fluxos no Perfil do Cordão de Solda

A aplicação de fluxos na soldagem MIG também causou alterações no perfil do cordão de solda do aço inoxidável AISI 304L. O efeito foi mais significativo nas amostras com aplicação de óxidos e menor nas amostras com fluoretos. A Figura 5.15 exhibe a superfície de um cordão A-MIG com aplicação de  $\text{SiO}_2$ , onde chama a atenção a redução da largura imediatamente após o início da região com fluxo. Este fenômeno foi observado em todas as soldas feitas com fluxo, com exceção dos fluoretos. Nota-se também o aumento da quantidade de respingos sobre a chapa.

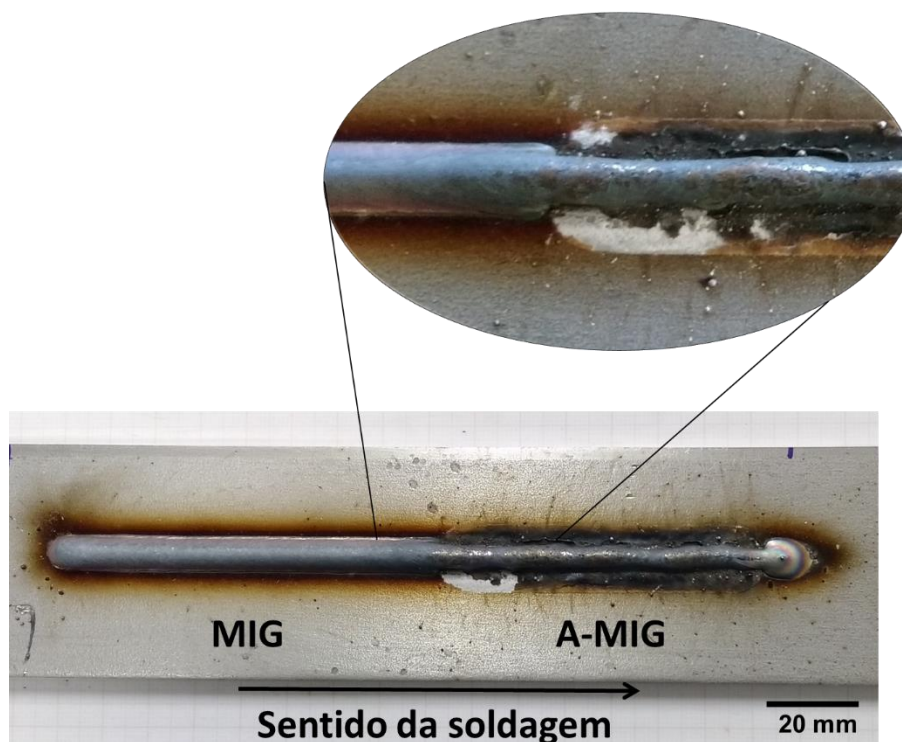


Figura 5.15 Cordão de uma soldagem A-MIG com  $\text{SiO}_2$  como fluxo e detalhe exibindo diferença no aspecto do cordão na soldagem A-MIG e MIG.

A Figura 5.16 apresenta a macrografia de um cordão de cada condição. Na presença dos óxidos, o cordão apresentou um formato mais arredondado e um perfil de penetração mais suave – com menor evidência de penetração em “dedo” – e, eventualmente com a penetração máxima mais afastada do centro, exceto para o  $\text{CaF}_2$ . Foi constatada uma maior variabilidade do formato dos cordões de solda ao longo dos mesmos e entre as amostras de mesmo fluxo. Na soldagem MIG e com  $\text{CaF}_2$ , a variabilidade do formato do cordão foi significativamente menor.

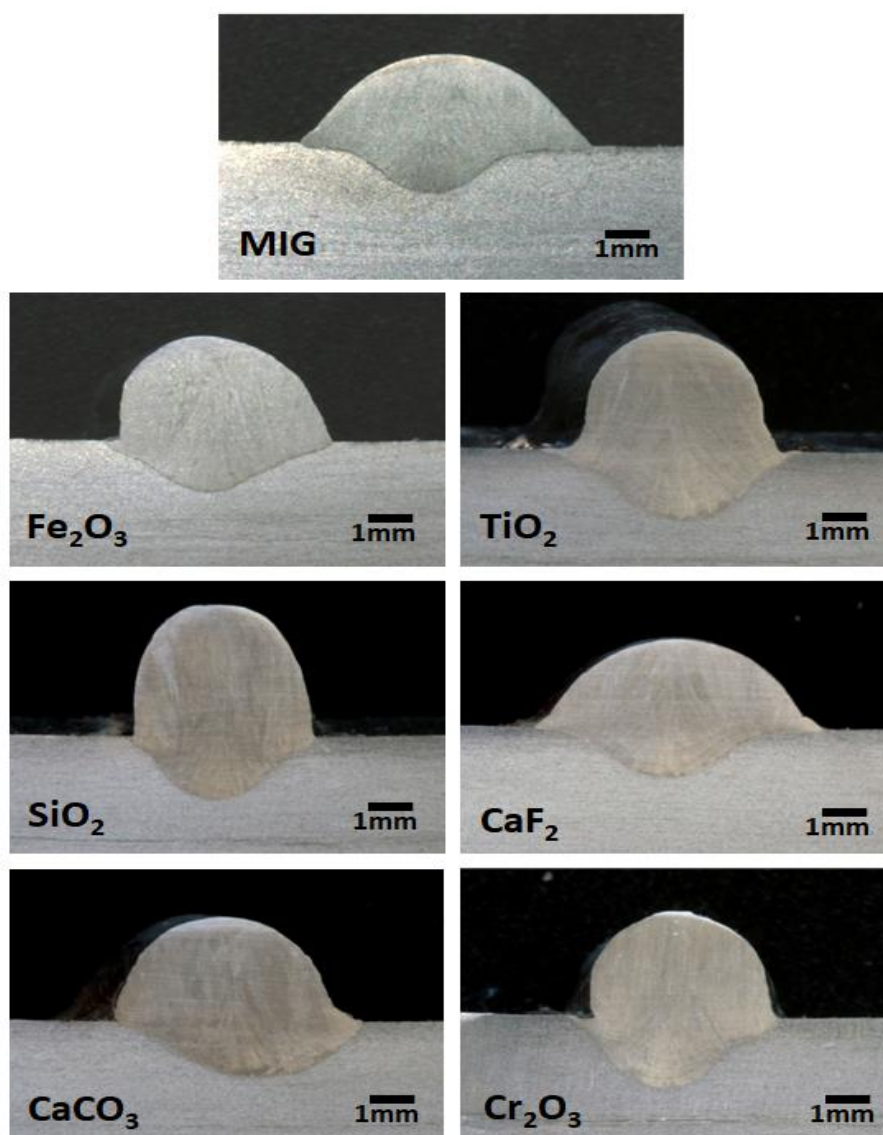


Figura 5.16 Macrografias de soldas MIG e A-MIG realizadas com parâmetros de soldagem iguais.

Diferenças mais significativas de largura em relação à dos cordões feitos sem fluxo foram obtidas com o uso de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{CaCO}_3$  (Figura 5.17). É comum o relato de redução da largura do cordão pelo uso de fluxos, inclusive pela sílica. Ramkumar et al. (2015) avaliaram a soldagem A-TIG de um aço inoxidável superaustenítico AISI 904L com  $\text{SiO}_2$  e verificaram a redução de quase pela metade da largura do cordão com o uso do fluxo em comparação a soldagem TIG convencional para a mesma corrente. Resultados semelhantes foram relatadas por outros autores (KUMAR, 2017; VASANTHARAJA; VASUDEVAN, 2012), que associam essa redução à possível constrição do arco elétrico provocada pelo fluxo devido à sua propriedade elétrica isolante.



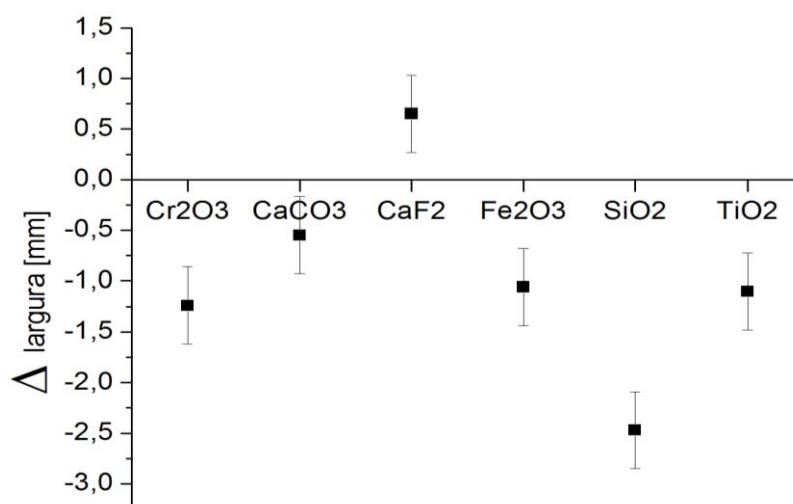


Figura 5.17 Diferença da largura das amostras A-MIG em relação ao MIG.

Diferentemente do grande aumento de penetração reportado na soldagem A-TIG, da ordem de até 300% para o aço inoxidável AISI 304 (MODENESI; APOLINÁRIO; PEREIRA, 2000), na soldagem A-MIG as diferenças de penetração provocadas pelos fluxos são pequenas (Figura 5.18), tendo incremento máximo no presente trabalho de 21% com o uso de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Contudo, baseando-se em relatos de outros trabalhos de A-MIG, como por exemplo, da soldagem de uma liga de magnésio com uso de SiO<sub>2</sub> com a obtenção de um aumento da penetração máxima de 26% (RUAN et al., 2012), não se esperava grandes mudanças nessa característica do cordão. No que diz respeito ao reforço do cordão, o incremento médio geral foi de 11% chegando a 26% para a sílica. O aumento da diluição foi de 8% para o conjunto e de 13% para os fluxos TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaCO<sub>3</sub> e Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

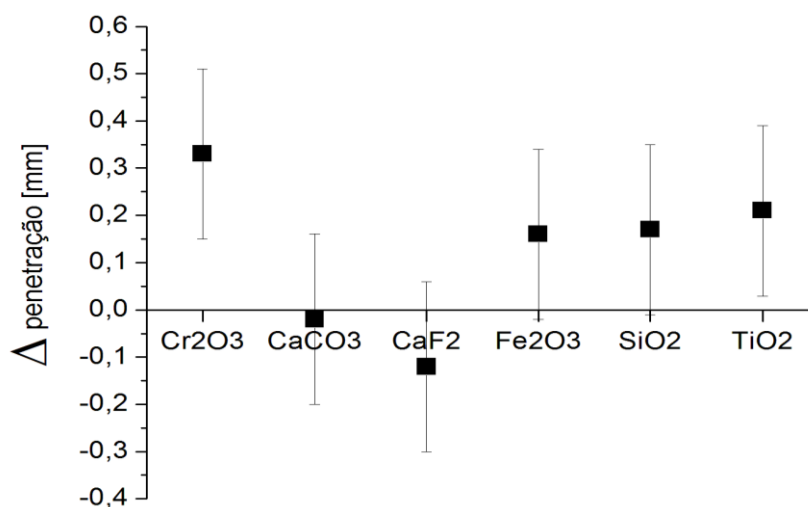


Figura 5.18 Diferença da penetração das amostras A-MIG em relação ao MIG.

Um fator que talvez possa estar relacionado com as modificações no formato do cordão na soldagem A-MIG, pode ser a molhabilidade do cordão. A molhabilidade pode ser avaliada através do ângulo de molhabilidade ( $\theta$ ) formado entre a superfície sólida e o plano tangencial à superfície do cordão depositado (NUNES et al., 2015). A Figura 5.19 exhibe a relação entre a largura e o ângulo de molhamento das soldagens MIG e A-MIG. Em comparação à soldagem convencional, houve aumento médio deste ângulo de 83% para o SiO<sub>2</sub> e na média de 38% para as condições de soldagem A-MIG. Considera-se que o líquido tende a molhar a superfície quando  $\theta < 90^\circ$  e o oposto, quando  $\theta > 90^\circ$ . Assim, quanto menor este ângulo, melhor será o molhamento, o que pode justificar as variações no formato do cordão, principalmente para o caso das soldas feitas com o fluxo SiO<sub>2</sub> que apresentaram maior  $\theta$  (menor molhabilidade) e cordões mais estreitos.

Por outro lado, deve-se considerar que, como as velocidades de alimentação e soldagem foram sempre as mesmas, a menos das perdas por respingos, as áreas de deposição devem ser similares. Assim, uma menor largura favorece um maior reforço e maior ângulo de molhamento.

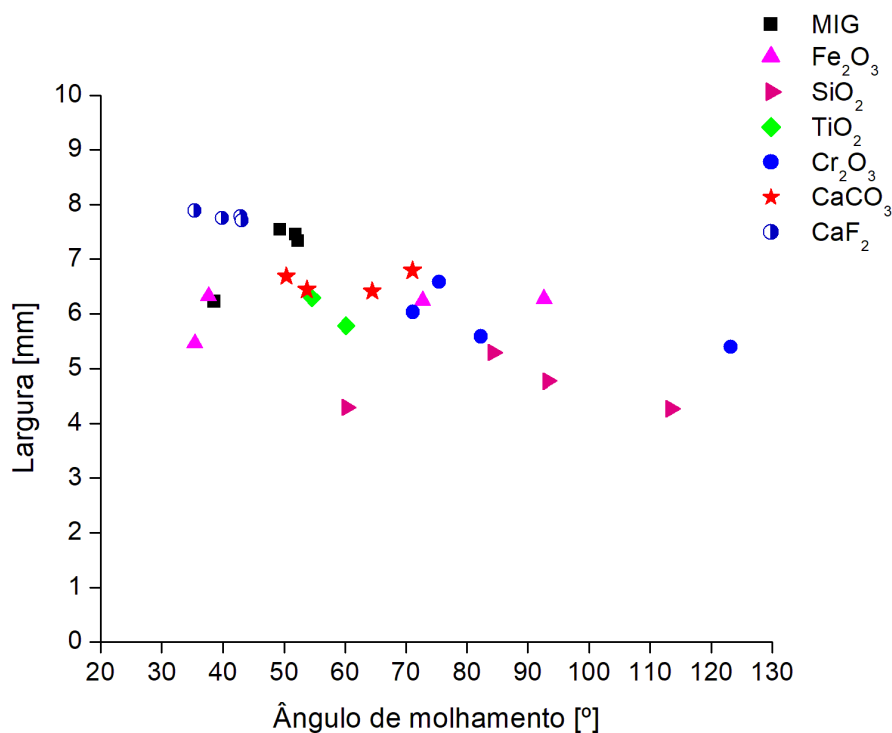


Figura 5.19 Largura em função do ângulo de molhamento interno médio das soldagens.

## 5.2 Soldagem com Corrente Constante

Após identificar que o carbonato de cálcio e a sílica foram os fluxos que apresentaram um comportamento mais ativo na soldagem com transferência por contato, foram realizados testes complementares com o intuito de avaliar a influência desses fluxos na soldagem com transferência por queda livre. O critério de escolha foi baseado na avaliação quantitativa e qualitativa em termos de alterações provocadas nas características operacionais e no formato do cordão em relação à soldagem MIG convencional. Para caracterização do efeito dos fluxos em valores controlados de corrente, as soldagens nessa etapa foram realizadas com a fonte operando em modo de corrente constante na faixa entre 160 e 250 A. Da mesma forma que no conjunto anterior de testes, as análises dos resultados foram divididas em termos de aspectos operacionais, aspectos visuais do arco elétrico e do perfil geométrico do cordão de solda.

### 5.2.1 Influência dos Fluxos nos Aspectos Operacionais

A Figura 5.20 apresenta o oscilograma de tensão de um dos testes com corrente de 200 A e mostra a queda de tensão que ocorre na soldagem ao entrar na região com  $\text{CaCO}_3$ . Esta queda de tensão foi acompanhada por uma maior variabilidade da mesma como realçado na Figura 5.21 que mostra valores do desvio padrão da tensão em grupos de 100 medidas consecutivas. O desvio padrão médio no intervalo com a soldagem MIG foi de 0,31 V, enquanto que na região da soldagem com fluxo foi de 0,53 V. Essa diferença do desvio padrão sugere uma maior instabilidade do processo quando o fluxo esteve presente.

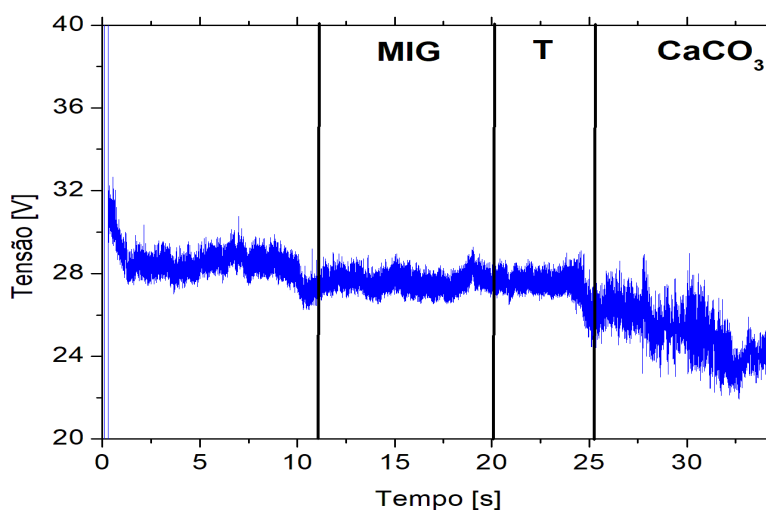


Figura 5.20 Oscilograma da tensão de um teste a 200 A. As linhas delimitam a região inicial de acerto do comprimento do arco, a região MIG, a de transição e a com adição de  $\text{CaCO}_3$ .

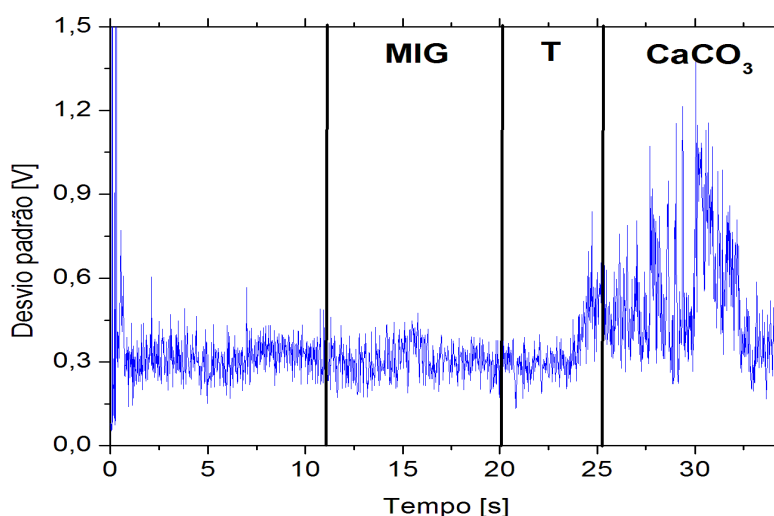


Figura 5.21 Oscilograma do desvio padrão da tensão calculado para grupos de 100 medidas para o teste da Figura 5.20.

Com o uso da sílica ocorre um aumento da tensão do arco (Figura 5.22) e a dispersão dos valores de tensão é reduzida (Figura 5.23) em comparação à soldagem com  $\text{CaCO}_3$ . Neste teste a média do desvio padrão MIG foi de 0,24 V e da condição com  $\text{SiO}_2$  de 0,22 V, ou seja, não parece haver diferença significativa na dispersão deste parâmetro. A diferença no valor do desvio padrão na região sem fluxo deste teste com o teste com  $\text{CaCO}_3$ , provavelmente, é devido à alguma variação do comprimento do arco entre os testes, que era ajustado através da velocidade de alimentação.

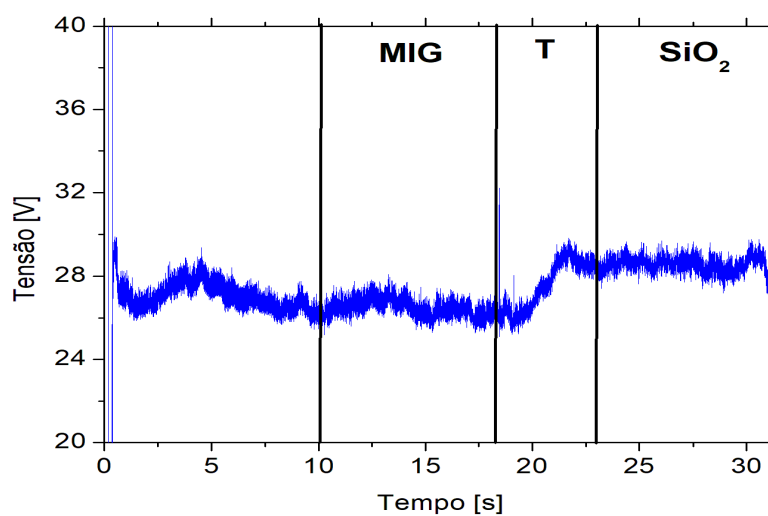


Figura 5.22 Oscilograma da tensão de um teste a 200 A. A linha tracejada delimita a região sem fluxo da com adição de  $\text{SiO}_2$ .

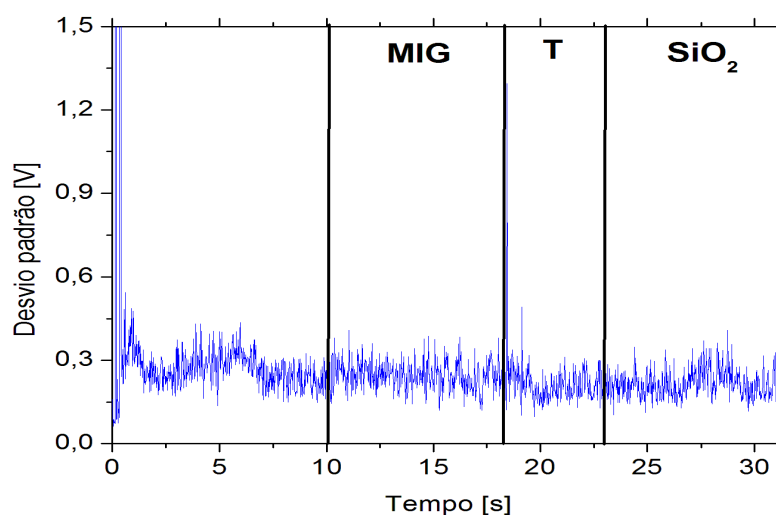


Figura 5.23 Oscilograma do desvio padrão da tensão calculado para grupos de 100 medidas para o teste da Figura 5.22.

A Tabela V.3 apresenta os valores dos parâmetros elétricos de soldagem e do comprimento do arco e a Tabela V.4 o resultado do teste de hipótese dos parâmetros comparando o processo MIG com os fluxos de forma individual, assim como foi feito nos testes com tensão constante ( $\alpha = 0,05$ ). O teste sugere que os dois fluxos modificaram de forma significativa ( $p < \alpha$ ) a tensão e a corrente de soldagem, e, para o  $\text{CaCO}_3$  o valor de  $p$  do comprimento do arco ficou bem próximo ao limite para ser considerado que o fluxo teve efeito nesse parâmetro também.

Tabela V.3 Parâmetros elétricos e comprimentos do arco médios das soldagens MIG e com  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{SiO}_2$ .

Corrente regulada (A)	Processo	Corrente (A)		Tensão (V)		Velocidade de alimentação (m/min)		Comprimento do arco (mm)	
		Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
160	MIG	160,3	0,6	26,8	0,6	4,6	0,1	6,0	0,0
	$\text{CaCO}_3$	160,8	1,1	27,0	0,8	4,4	0,1	4,7	0,9
	$\text{SiO}_2$	160,0	0,1	25,6	4,4	4,6	0,1	6,2	1,3
190	MIG	190,4	3,6	26,9	0,4	6,0	0,1	6,0	0,0
	$\text{CaCO}_3$	189,4	0,8	25,1	0,7	6,0	0,2	6,3	0,1
	$\text{SiO}_2$	188,6	0,1	29,7	0,5	5,9	0,1	6,3	0,0
200	MIG	198,6	0,4	27,1	0,4	6,4	0,2	6,0	0,0
	$\text{CaCO}_3$	198,9	0,8	24,9	0,1	6,5	0,3	5,5	0,2
	$\text{SiO}_2$	198,4	0,2	29,2	1,0	6,3	0,0	5,9	1,0
215	MIG	213,2	0,9	27,6	0,5	7,0	0,2	6,0	0,0
	$\text{CaCO}_3$	213,4	0,9	24,8	0,0	6,9	0,2	5,0	0,0
	$\text{SiO}_2$	213,5	1,3	30,6	0,4	6,9	0,3	5,9	0,7
230	MIG	228,2	1,1	28,4	0,5	7,6	0,1	6,0	0,0
	$\text{CaCO}_3$	228,5	0,5	25,9	1,2	7,7	0,1	5,5	0,5
	$\text{SiO}_2$	228,4	2,1	30,8	0,7	7,7	0,1	5,1	0,1
250	MIG	246,8	0,9	28,9	0,5	8,4	0,2	6,0	0,0
	$\text{CaCO}_3$	246,5	0,5	28,5	0,2	8,4	0,2	6,5	0,4
	$\text{SiO}_2$	246,8	1,1	31,3	0,2	8,4	0,2	6,1	0,6

Tabela V.4 Resultados de p-value dos testes de hipóteses.

Parâmetros	$\text{CaCO}_3$	$\text{SiO}_2$
Tensão	0,00005	0,00100
Corrente	0,02358	0,00070
Comprimento do arco	0,05273	0,35122
Velocidade de alimentação	0,35830	0,43134

A representação de alguns dos resultados dos testes com corrente constante são apresentados a seguir com os valores individuais plotados em gráficos de dispersão. Optou-se por esta representação, ao invés de se trabalhar com a média e o desvio padrão ponderado, devido a nestes testes terem sido variados tanto o tipo de fluxo quanto a corrente de soldagem. Novamente, os dados correspondem a diferença do processo com fluxo e o processo MIG.

O efeito dos fluxos sobre a tensão de soldagem é exibido nas Figura 5.24. Verifica-se uma queda de tensão em todas as correntes testadas com o uso de  $\text{CaCO}_3$ , sendo as maiores variações observadas para correntes entre 190 e 230A, com redução máxima 4,0 V e média de 1,6 V em comparação à condição sem fluxo. Já com o uso da sílica houve o acréscimo médio da tensão em 2,2 V.

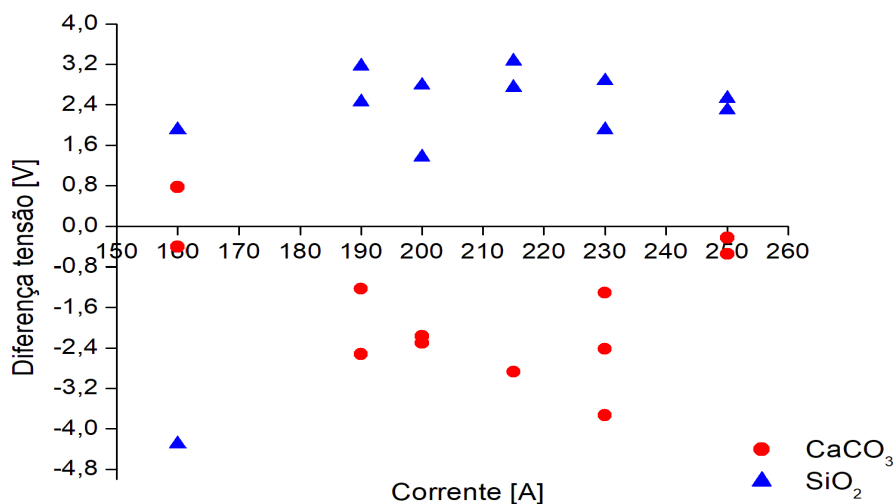


Figura 5.24 Diferença da tensão com o uso dos fluxos em função da corrente.

A redução de tensão observada em um teste com o  $\text{SiO}_2$  em 160 A é devido à ocorrência de curtos-circuitos que provocaram a queda da tensão média. Estes curtos-circuitos foram provocados pelo agarramento do arame no instante anterior (26s) seguido por uma aceleração da alimentação do arame, que foi quando ocorreram os curtos.

As quedas de tensão nas correntes entre 190 e 230 A com o uso de  $\text{CaCO}_3$  são acompanhadas por uma tendência de redução do comprimento do arco, como pode ser verificado na Figura 5.25. De forma oposta, com o emprego do  $\text{SiO}_2$  não houve efeito

significativo no  $l_a$  de acordo com o indicado pelo teste de hipóteses. Como o processo foi realizado com a fonte operando em corrente constante e a velocidade de alimentação não foi variada após a sua regulagem inicial, a variação da tensão e do comprimento do arco foram livres. Estes resultados indicam que os fluxos afetaram mais fortemente a operação da coluna do arco e/ou de sua região catódica (resultando nas alterações de tensão), mas parece ter tido um efeito menos significativo na região anódica e nas condições de fusão do arame.

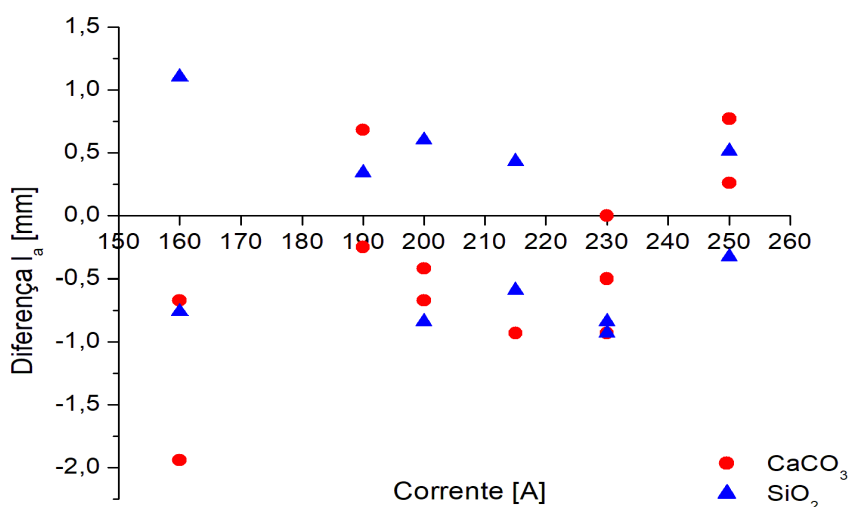


Figura 5.25 Diferença do comprimento do arco ( $l_a$ ) com o uso dos fluxos.

O uso de fluxo parece ter afetado de forma significativa a transferência do metal de adição, o que pode ser inferido pelas mudanças nos sinais de tensão mostrados na Figura 5.26 e Figura 5.27. Cada trecho dos oscilogramas das figuras apresenta dois períodos distintos e representativos de cada condição de soldagem.

No processo MIG, para a soldagem com corrente de 160 A os sinais de tensão são similares e característicos de transferência globular com gotas grandes. Para correntes superiores, nota-se uma tendência do tempo de transferência (caracterizado, nas condições de transferência globular, por um serrilhado no sinal de tensão) se reduzir. Este efeito, contudo, é retardado pela presença do fluxo  $\text{CaCO}_3$  que parece tender a fazer com que a transferência ocorra em um período maior e aumentar o tamanho das gotas sendo transferidas em um dado valor de corrente em comparação ao processo sem fluxo. Para a soldagem sem fluxo, os oscilogramas sugerem que a transição entre os modos de



transferência globular e spray ocorre entre 200 e 215 A. No entanto, essa transição é atrasada para o processo com  $\text{CaCO}_3$  iniciando-se em 230 A e não sendo finalizada até a corrente máxima testada (250 A). Nas correntes de 215 e 250 A houveram quedas de tensão para valores próximos a 15 V, que devem ter sido provocadas por gotas da transferência globular com tamanho elevado que provocaram a diminuição do valor do  $I_a$ , visto que, este fluxo tornou a soldagem mista entre globular e spray mesmo para altos valores de corrente.

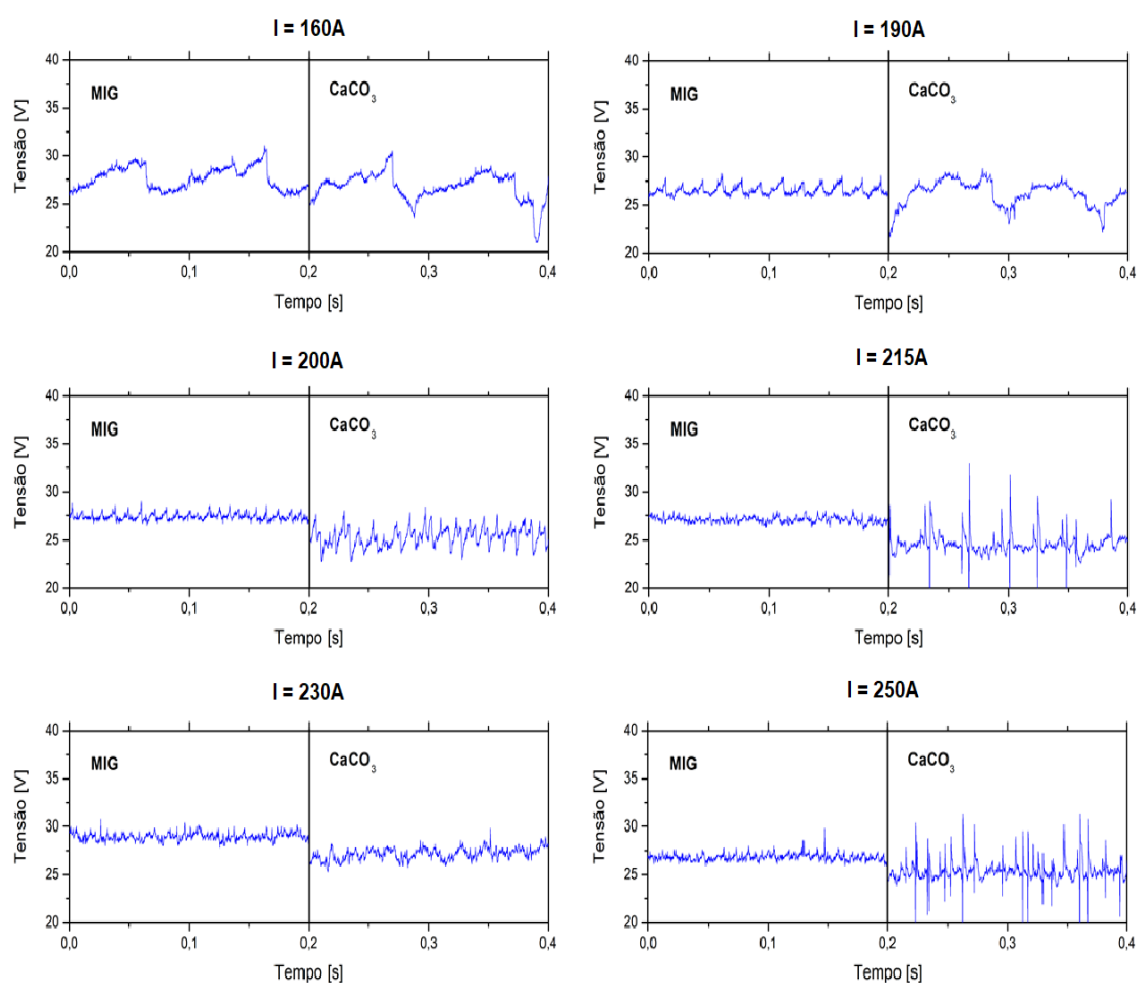


Figura 5.26 Comparação da variação da tensão de soldagem nas condições de operação sem fluxo (0 - 0,2 s) e com o fluxo  $\text{CaCO}_3$  (0,2 - 0,4 s) para correntes de 160 a 250 A.

Algumas considerações são feitas nos parágrafos a seguir sobre os possíveis efeitos do uso  $\text{CaCO}_3$  na operação do processo com base em duas hipóteses. A primeira é que, através da decomposição do  $\text{CaCO}_3$ , dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) é liberado podendo

aumentar o seu teor na atmosfera do arco elétrico e a segunda é de que o cálcio pode ser vaporizado e afetar o arco e a transferência de metal.

É conhecido que altos teores de CO<sub>2</sub> dificultam a transferência spray, favorecendo a transferência globular em altas correntes devido ao aumento da corrente de transição. Considerando a reação de decomposição do CaCO<sub>3</sub> (Equação 5.1), calculou-se através de um balanço de massa simples o volume desse gás gerado em condições normais de temperatura e pressão. Para tal cálculo foram utilizados dados do processo como massa de fluxo, composição e vazão do gás de proteção. O cálculo encontra-se no Apêndice B.



Supondo uma condição ideal sem perdas de fluxo sobre a superfície e que todo o CO<sub>2</sub> produzido seja incorporado ao gás de proteção, a decomposição do CaCO<sub>3</sub> nas condições utilizadas resultaria em um acréscimo de quase 1% de CO<sub>2</sub> no ambiente do arco, ou seja, o teor de CO<sub>2</sub> na proteção seria elevado para quase 3,5%. Mesmo com o aumento do teor de CO<sub>2</sub> o seu valor ainda é bem pequeno para justificar as alterações observadas no presente trabalho. Além disto, dificilmente, uma parte apreciável do CO<sub>2</sub> produzido atingirá a região superior do arco. Assim, espera-se que o seu efeito no arco e na transferência de metal seja desprezível.

Em decorrência da queda significativa de tensão que ocorre na soldagem com CaCO<sub>3</sub>, é sugerido que a contribuição de cátions de cálcio deve ser mais significativa do que o de um eventual aumento do teor de CO<sub>2</sub>, o que é reforçado ainda mais por se esperar um aumento de tensão no arco com uma maior presença deste gás. Assim, acredita-se que um fator importante na atuação deste fluxo é a vaporização e ionização no arco de parte de seu cálcio. Como já foi citado, na soldagem A-MIG de uma liga de magnésio, a presença de cátions de cálcio (Ca<sup>+</sup>, Ca<sup>++</sup>) foi associada a uma redução de forças eletromagnéticas que teriam estendido o período de transferência metálica e, conseqüentemente, favorecido a transferência globular em comparação ao processo MIG (ZHANG; CAO, 2012).

Outra hipótese que pode ser levantada quanto ao efeito da vaporização de cálcio no modo de transferência seria uma alteração da tensão superficial do metal líquido da ponta do eletrodo. Uma maior tensão superficial retém a gota de metal líquido na ponta do eletrodo por um maior período de tempo (SCOTTI; PONOMAREV, 2008), justificando assim, a transferência globular na presença de  $\text{CaCO}_3$ , mesmo com maiores valores de corrente. No entanto, não foram encontrados na literatura dados sobre a influência de vapores de cálcio sobre o metal líquido na ponta do eletrodo. Por outro lado, é de conhecimento que a presença de cálcio na poça de fusão tende a aumentar a tensão superficial, o que é atribuído à remoção pelo cálcio de oxigênio e enxofre (elementos tensoativos) do metal líquido (MILLS; KEENE, 1990). Porém, acredita-se pouco provável que íons do cálcio possam atingir a ponta do eletrodo, sendo mais plausíveis as outras hipóteses apresentadas.

Com a sílica o comportamento da transferência metálica foi sem grandes alterações no modo de transferência do metal líquido em comparação ao processo MIG, como pode ser verificado na Figura 5.27. Como nos testes com a transferência por curto-circuito foi verificado aumento da tensão do arco e da frequência da transferência, possivelmente, nos testes com transferência por queda livre este fluxo pode também ter aumentado um pouco a frequência da transferência, uma vez que, gerou aumento da tensão de soldagem. Porém, devido a dificuldade em se avaliar a frequência de transferência no modo spray não foi possível quantificar isto no presente trabalho.

Nestes testes, foram mantidos livres a tensão e o comprimento do arco, sendo o  $l_a$  determinado pelo balanço das velocidades de alimentação e fusão do arame. Como com o uso da sílica, observou-se um aumento da tensão em alteração significativa no  $l_a$ . Assim, os resultados indicam que o fluxo não afetou a fusão do arame, mas afetou alguma característica do arco. Considerando que esta alteração pode ocorrer na coluna do arco ou nas suas regiões de queda e que, nos testes com transferência por curto-circuito, determinou-se um aumento na soma das tensões das quedas anódica e catódica (Tabela V.1), o aumento observado na tensão deve estar associado às regiões de queda. Uma possibilidade seria a maior dificuldade na passagem da corrente do arco para o metal base

pela presença da sílica, de forma similar ao indicado na literatura para a soldagem A-TIG (LOWKE; TANAKA; USHIO, 2005; RAMKUMAR et al., 2015).

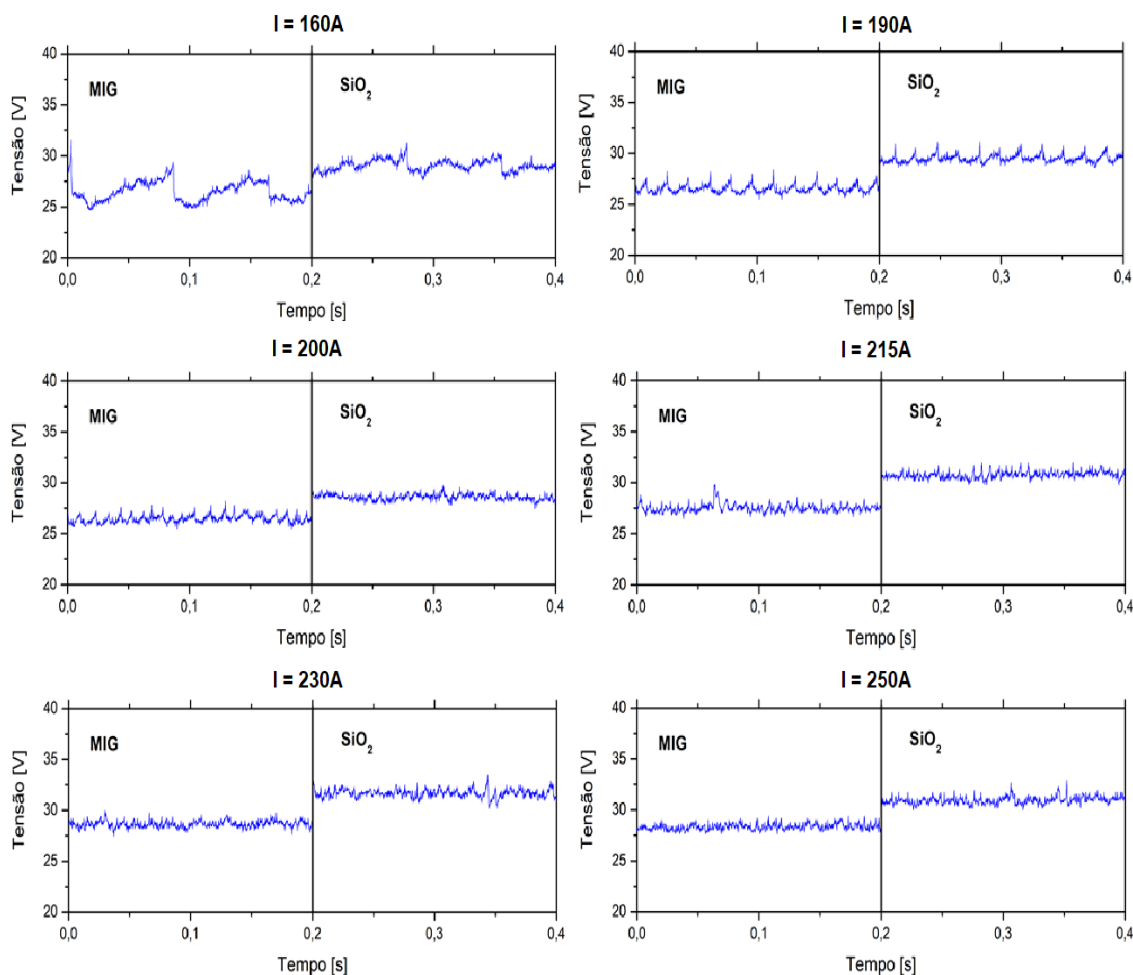


Figura 5.27 Comparação da variação da tensão de soldagem nas condições de operação sem fluxo (0 - 0,2 s) e com o fluxo SiO<sub>2</sub> (0,2 - 0,4 s) para correntes de 160 a 250 A.

### 5.2.2 Filmagem do Processo

A Figura 5.28 apresenta imagens da filmagem da soldagem MIG com corrente constante. Verifica-se um arco com formato de sino bem definido e com poucas variações ao longo da soldagem. Para visualizar o efeito dos fluxos no arco deve-se tomar essa figura para comparação com as seguintes.

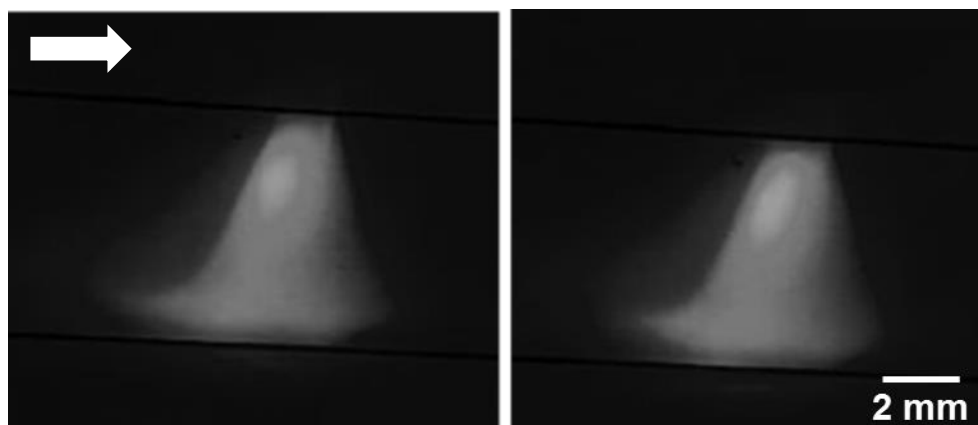


Figura 5.28 Imagens do arco elétrico da soldagem MIG a 190A. A direção de soldagem é indicada pela seta.

Durante a soldagem com carbonato de cálcio, foi observado que ao entrar na região com fluxo o arco tornava-se mais luminoso, como é exibido na Figura 5.29, o que pode ser um indício da presença de cátions de cálcio no mesmo. A presença destes íons foi determinada experimentalmente por Zhang e Cao (2012) que associaram a incorporação desses cátions ao aumento do período de transferência metálica e, conseqüente, favorecimento da transferência globular em comparação ao processo MIG.

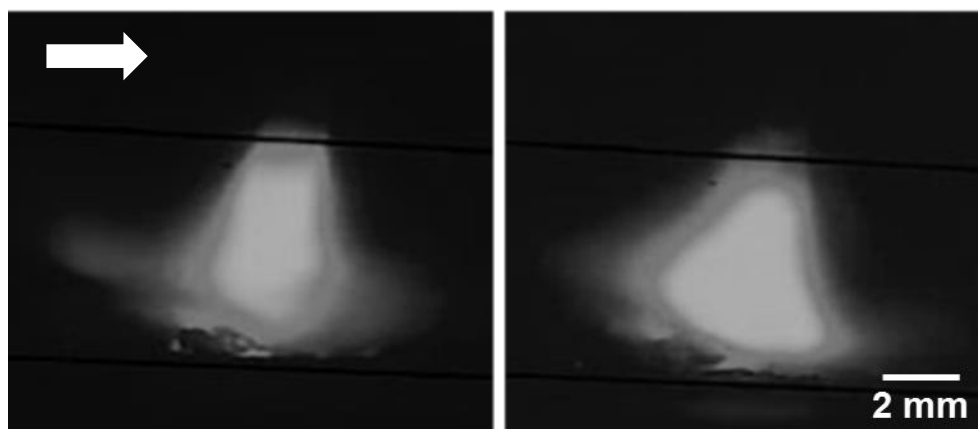


Figura 5.29 Imagens do arco elétrico da soldagem A-MIG com  $\text{CaCO}_3$  a 190A. A direção de soldagem é indicada pela seta.

De forma semelhante, na soldagem com o emprego da sílica houve um aumento da luminosidade do arco elétrico (Figura 5.30), porém em menor intensidade do que o  $\text{CaCO}_3$ . Com a sílica foi observada a deflexão do arco elétrico e a diminuição de sua largura em relação à das outras condições (MIG e  $\text{CaCO}_3$ ).

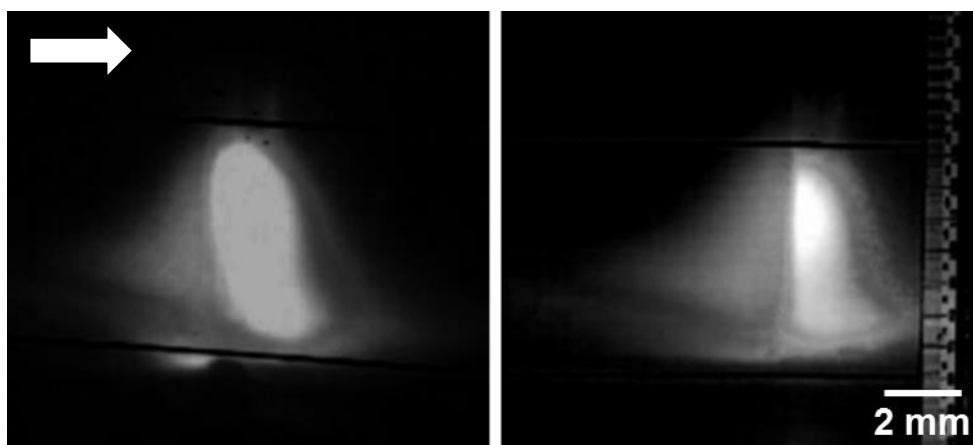


Figura 5.30 Imagens do arco elétrico da soldagem A-MIG com  $\text{SiO}_2$  a 190A. A direção de soldagem é indicada pela seta.

### 5.2.3 Efeito dos Fluxos no Perfil do Cordão de Solda

A Figura 5.31 apresenta macrografias representativas de cada condição testada. Nas amostras MIG é observado que, conforme se aumenta a corrente, o perfil de penetração assume formato mais estreito e profundo, conhecido como penetração em dedo, característico da soldagem com transferência por spray (O'BRIEN, 2004). Na soldagem com o carbonato de cálcio o cordão assume um formato mais arredondado e este perfil de penetração em dedo não é observado, exceto para a corrente de 215 A em que, provavelmente, a amostra foi cortada em uma região com pouca presença de fluxo. O motivo para tal diferença, possivelmente, está relacionado com a mudança no modo de transferência provocada por este fluxo. Como o perfil em dedo é típico da transferência spray ele não foi pronunciado devido a transferência metálica em sua maioria ter sido de modo globular com o  $\text{CaCO}_3$ .

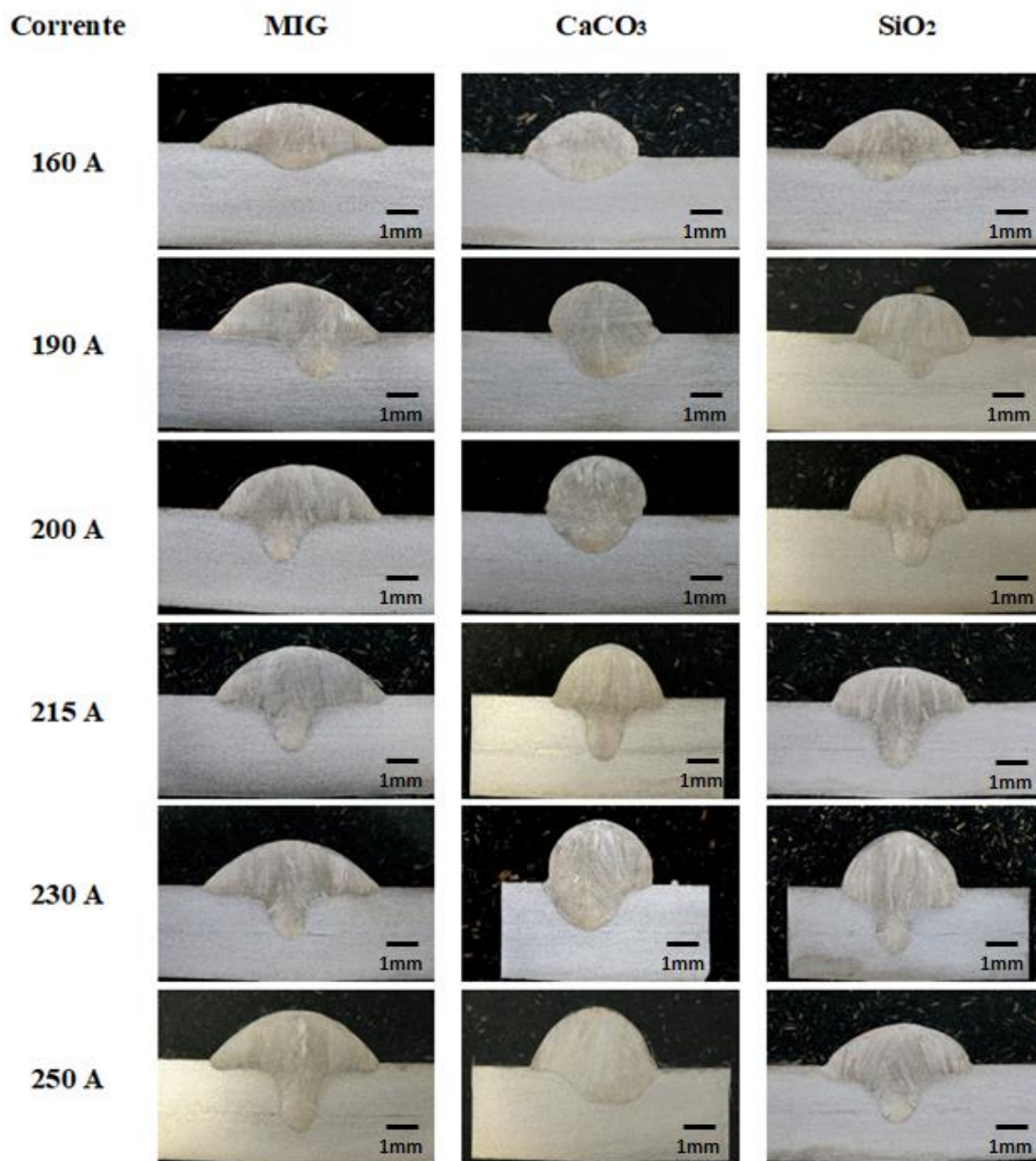


Figura 5.31 Macrografias de soldas MIG e A-MIG nas diferentes correntes testadas.

A adição da sílica não modificou a forma do cordão mantendo-o similar ao da soldagem MIG. Este fluxo, contudo, causou uma redução da largura (Figura 5.32) e aumentos da penetração (Figura 5.33) e da diluição (Figura 5.34). O aumento da penetração com a utilização de SiO<sub>2</sub> pode estar associado a incorporação de oxigênio derivado do fluxo na poça de fusão, sendo justificado pelo Efeito Marangoni. Uma vez que, na soldagem a segregação de uma quantidade muito pequena de certos elementos tensoativos, como o oxigênio, no topo da poça de fusão pode mudar a temperatura de dependência da tensão

superficial do metal líquido. Fazendo com que ao aumentar a temperatura ocorra o aumento da tensão superficial e torna o coeficiente térmico de tensão superficial positivo. Com isto, a tensão superficial será maior no centro da poça e, devido ao gradiente, o fluxo convectivo será das bordas para o centro, gerando cordões mais profundos.

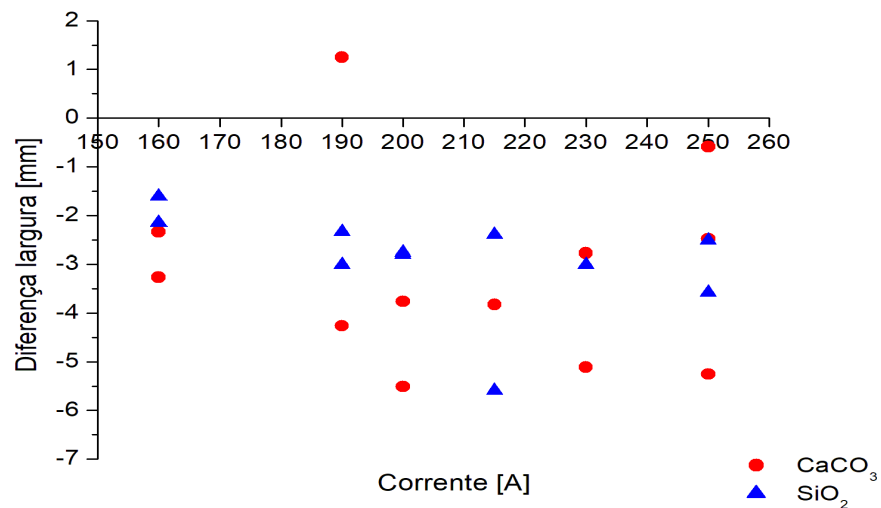


Figura 5.32 Diferença da largura do cordão entre as soldagens com o uso de  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{SiO}_2$  e a soldagem MIG.

Com o carbonato de cálcio a penetração máxima foi menor, possivelmente pelo modo de transferência, e com a sua posição tendendo a ficar deslocada do centro, de forma similar à observada nos cordões obtidos com transferência por curto-circuito.

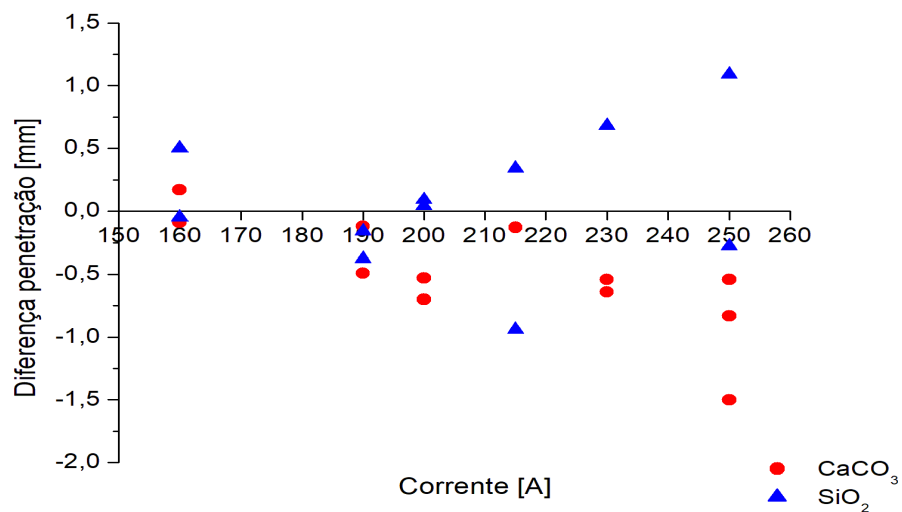


Figura 5.33 Diferença da penetração do cordão entre as soldagens com o uso de  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{SiO}_2$  e a soldagem MIG.



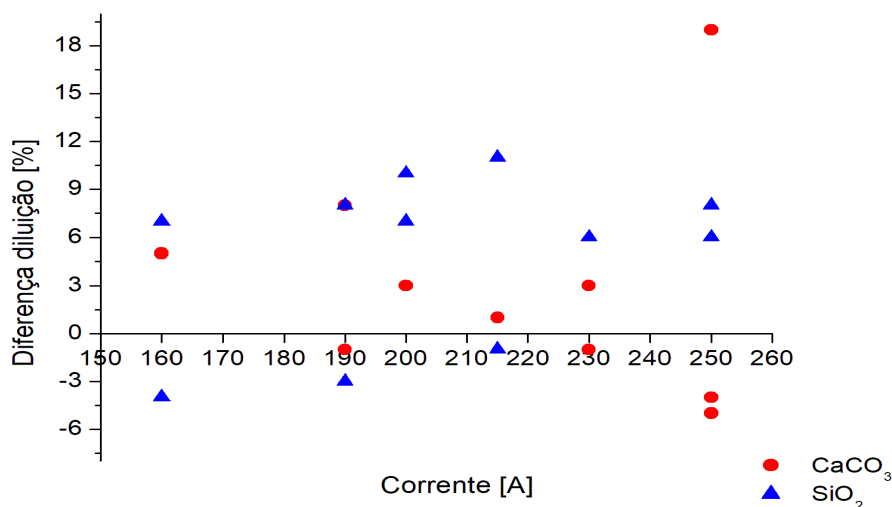


Figura 5.34 Diferença da diluição do cordão entre as soldagens com o uso de  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{SiO}_2$  e a soldagem MIG.

### 5.3 Considerações Finais

Como apresentado na revisão bibliográfica (Seção 3.2.1), o mecanismo de atuação dos fluxos na soldagem A-TIG é discutido em torno de teorias que explicam, principalmente, alterações no formato do cordão de solda. O mecanismo mais aceito é o do Efeito Marangoni que diz que devido ao aumento do teor de elementos tensoativos na poça de fusão que alteram a tensão superficial do metal líquido provocando mudanças em seu sentido de convecção, e conseqüentemente, aumento da penetração (FUJII et al., 2008; LOWKE; TANAKA; USHIO, 2005; LU et al., 2003; MODENESI, 2013; SÁNDOR et al., 2013; WANG, 2014; XU et al., 2007).

Outros defendem que a presença de íons de elementos eletronegativos como o flúor e o cloro provocam a constrição química do arco elétrico aumentando a sua densidade de corrente do arco (HOWSE; LUCAS, 2000; LECONTE *et al.*, 2007). Uma outra vertente consiste na constrição mecânica do arco elétrico provocada por fluxos com características isolantes, como a sílica (LOWKE; TANAKA; USHIO, 2005).

No entanto, apesar de poucos pesquisadores terem investigado a soldagem A-MIG e a maioria manterem o foco nos mecanismos citados acima, acredita-se que os mesmos não se apliquem de forma tão intensa no processo A-MIG. Um dos motivos para isso é a

significativa diferença entre as condições de operação dos arcos TIG e o MIG, que vai desde o mecanismo de emissão de elétrons, a ocorrência de transferência metálica pelo arco e a outras que tornam o segundo processo mais instável e complexo do que o primeiro. Não se pode desconsiderar que os mecanismos descritos para a soldagem A-TIG ocorram no processo A-MIG. Contudo, deve-se destacar que estes, provavelmente, ocorrem de forma combinada e, possivelmente, alguns ocorrem em menor intensidade do que no processo A-TIG. Assim como, pode haver a possibilidade de outros fenômenos também atuarem na soldagem A-MIG. Acredita-se, assim, que ainda são necessárias maiores investigações para melhor elucidar o mecanismo de atuação dos fluxos na soldagem A-MIG.

Um fator que parece relevante para entender os resultados obtidos na soldagem A-MIG é a incorporação de vapores metálicos no arco elétrico. Resultados experimentais e de simulação numérica indicam que a presença de vapores metálicos no arco da soldagem MIG/MAG aumenta a condutividade elétrica do arco, o que facilita a passagem da corrente elétrica e tende a reduzir a tensão do arco. Por outro lado, esses vapores são responsáveis pelo aumento da emissão de radiação eletromagnética pelo arco que gera uma queda de temperatura no eixo central do arco na ordem de 5000 K, o que tende a elevar a tensão do arco. Assim, o valor final da tensão do arco depende, entre outros fatores, do balanço entre as diferentes alterações provocadas pelos vapores metálicos no arco. (MURPHY, 2013, 2015; SCHNICK et al., 2010)

Análises da espectroscopia do arco realizadas por Zhang e Cao (2012) indicam que átomos e cátions de cálcio ( $\text{Ca}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ) foram incorporados ao arco elétrico quando o fluxo  $\text{CaCl}_2$  foi utilizado na soldagem A-MIG de uma liga de magnésio. Os autores relatam que era esperado que a presença de cátions de cálcio no arco gerasse aumento na corrente de soldagem por ser um elemento de baixa energia de ionização, o que contribui para aumentar a condutividade elétrica do arco. Contudo, ocorreu um decréscimo da corrente, este foi atribuído à presença de íons de cloro ( $\text{Cl}^-$ ) que interferem negativamente na condutividade elétrica do arco. Os autores ainda associaram ao uso do  $\text{CaCl}_2$  com um aumento no período da transferência metálica globular e, conseqüentemente, com a maior dificuldade de desprendimento da gota da extremidade do arame. Os mesmos autores

elucidam que com a presença do fluxo ocorre uma possível redução das forças eletromagnéticas estendendo o período de transferência metálica. Esta poderia explicar a redução da frequência de transferência observada no presente trabalho com o uso de  $\text{CaCO}_3$ .

Resultados de simulação computacional da atuação de vapores metálico no arco MIG/MAG indicam que a perda de temperatura no eixo central do arco resulta em perda de penetração (Figura 5.35), de forma que, sem a presença desses vapores, a penetração no processo seria maior. A maior concentração de vapor metálico nessa região é responsabilizada pela queda de temperatura verificada devido a intensa emissão de radiação eletromagnética (MURPHY, 2013; SCHNICK et al., 2010).

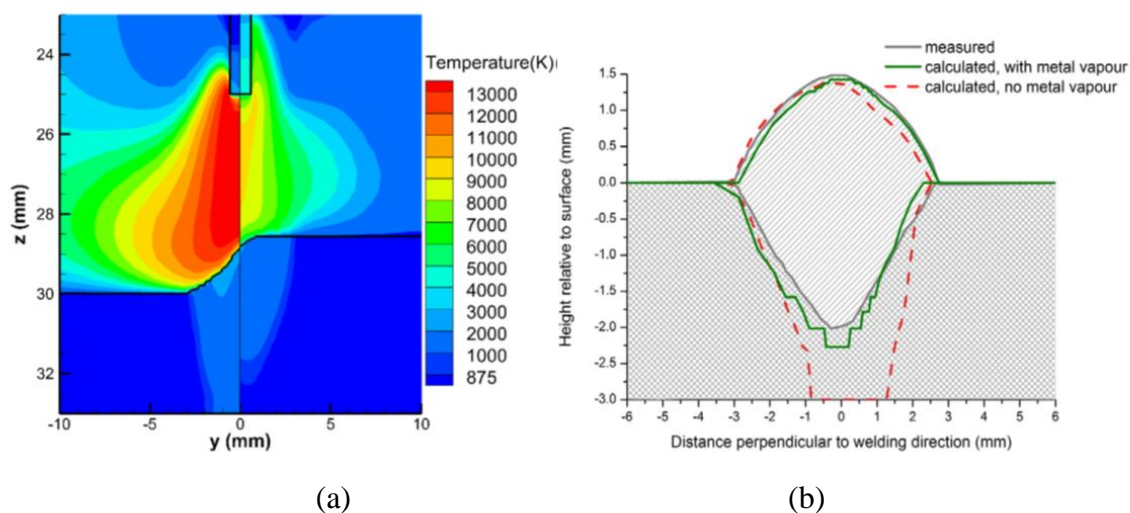


Figura 5.35 Comparação da distribuição da temperatura no plano  $x=0$  do arco (a) negligenciando (esquerda) e incluindo (direita) a influência do vapor de alumínio; e (b) comparação da seção transversal da solda medida (cinza), calculado incluindo (verde) e negligenciando (vermelha) a influência do vapor de alumínio. (MURPHY, 2013)

Os fluxos utilizados no presente trabalho são formados por elementos facilmente ionizáveis, como pode ser verificado na Tabela V.5. São indícios da presença de vapores metálicos no arco elétrico na soldagem A-MIG deste trabalho o aumento da luminosidade do arco.

Tabela V.5 Energia de ionização de alguns elementos neutros.

Elemento	Energia de ionização [eV]
	Elemento neutro (V1)
Na	5,139
Al	5,986
Ca	6,113
Cr	6,766
Ti	6,828
Fe	7,902
O	13,618
F	17,422

Fonte: National Bureal of Standards (2014) *apud* Modenesi (2015)

A ausência de comportamento ativo na soldagem A-MIG com os fluoretos (NaF, AlF<sub>3</sub> e CaF<sub>2</sub>) não era inicialmente esperada, principalmente, nos fluxos NaF e CaF<sub>2</sub>, que são compostos por metais de facilmente ionizáveis. Este resultado foi diferente do observado por Ferreira Neto (2017) que encontrou um efeito significativo do CaF<sub>2</sub> nas características operacionais e no formato do cordão na soldagem MIG de aço carbono. No momento, a razão para esta diferença de comportamento não é clara.

Um aspecto relevante é a baixa aderência dos fluoretos na superfície das chapas do aço inoxidável. Esses apresentavam uma menor aderência na superfície do que os demais fluxos e após os testes era perceptível, sobre a superfície da chapa, resíduos dos fluxos expulsos pelo arco elétrico. Pode-se considerar, então, a essa perda de fluxo durante a soldagem, como sendo um motivo relevante da ausência de comportamento ativo desses fluxos na soldagem A-MIG. O CaF<sub>2</sub> apresentou a maior aderência entre os três fluoretos, o que pode explicar o seu comportamento um pouco mais ativo do que os demais. Ferreira Neto (2017) também relata a baixa coesão do NaF na superfície do aço carbono.

Um aumento da tensão similar ao encontrado neste trabalho com o uso de SiO<sub>2</sub> como fluxo, é relatado no processo A-TIG (MODENESI; APOLINÁRIO; PEREIRA, 2000), o que sugere que o aumento de tensão provocado por esse fluxo pode ser independente do processo de soldagem. O efeito da sílica na tensão do arco é associado por pesquisadores (LOWKE; TANAKA; USHIO, 2005; RAMKUMAR et al., 2015) ao aumento da resistência elétrica provocada por esse fluxo. Por ser um óxido não metálico a presença

do mesmo sobre a superfície age como um isolante que dificulta o transporte de elétrons entre o eletrodo e o metal base e, com isso, gera um aumento na tensão do arco (LI et al., 2007). Com a constrição do arco elétrico devido a este efeito isolante, no centro do arco as temperaturas atingidas seriam maiores, o que seria suficiente para fundir a sílica nessa região de modo que a corrente elétrica poderia penetrar a poça de fusão e peça de trabalho (LOWKE; TANAKA; USHIO, 2005).

As alterações das características operacionais provocadas pelos fluxos indicam que estes, possivelmente, afetaram mais fortemente as características da coluna do arco e/ou de sua região catódica, inclusive nas condições de emissão de elétrons.

Por fim, ressalta-se que o intuito deste trabalho foi de verificar as mudanças causadas pelos fluxos em condições pensadas para a soldagem MIG. Não tendo como objetivo otimizar as condições para o processo A-MIG. Provavelmente, fazendo uma parametrização específica para cada fluxo seja alcançada uma condição de soldagem mais regular.

## 6 CONCLUSÕES

O presente trabalho, inicialmente, avaliou a aplicação de diferentes candidatos a fluxos ativos na soldagem A-MIG de um aço inoxidável austenítico AISI 304 com transferência metálica por curto-circuito. Posteriormente, foram realizados testes com os dois fluxos de comportamento mais destacados que foram aplicados em soldagens com transferência globular e spray. O desempenho dos fluxos foi avaliado em termos de modificações nas características operacionais da soldagem, em alterações no arco elétrico e no formato do cordão de solda. As principais conclusões do trabalho foram:

- Com exceção dos fluoretos, todos os fluxos avaliados afetaram de forma ativa o processo de soldagem. Os fluxos que modificaram o processo de forma mais intensa foram o carbonato de cálcio e a sílica;
- Em todas as condições testadas, o  $\text{CaCO}_3$  provocou queda de tensão do arco e o  $\text{SiO}_2$  gerou aumento da tensão;
- Com o uso de  $\text{CaCO}_3$ , a frequência da transferência metálica é reduzida tanto em curto-circuito quanto por queda livre e a transição para a transferência spray é dificultada. De forma contrária, com a utilização do  $\text{SiO}_2$  houve um aumento na frequência da transferência metálica;
- Os fluxos também afetam o aspecto do arco aumentando a sua luminosidade e modificando seu formato, o que foi atribuído à vaporização e ionização de componentes dos fluxos;
- Com base nos resultados há indícios de que os fluxos afetam a queda catódica e que partículas de fluxo possam atuar como fonte emissora de elétrons para o arco pelo mecanismo de pontos catódicos;
- Os fluxos modificam o formato do cordão de soldagem alterando suas características como largura, penetração e reforço.

## 7 SUGETÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho teve um carácter exploratório da técnica ainda pouco conhecida soldagem A-MIG. Foi verificado que a aplicação de fluxos na soldagem MIG/MAG pode provocar mudanças no arco eléctrico e no formato do cordão de solda. Com base nos seus resultados, sugere-se como trabalhos futuros:

- Na soldagem com transferência por curto-circuito, parametrizar o processo A-MIG de acordo com o fluxo utilizado, estudando o processo para diferentes valores de velocidade de alimentação de arame, velocidade de soldagem e outros parâmetros. Esta análise permitirá comparar o processo com e sem fluxo para condições otimizadas de operação para cada caso;
- Avaliar o potencial para reduzir a vazão de gás de proteção na soldagem com o uso de fluxos;
- Verificar a aplicação de outros fluxos no processo em arco aberto e a possibilidade de redução da corrente de transição globular-spray;
- Filmar a soldagem com transferência por queda livre com uma câmara de alta velocidade;
- Verificar se é incorporado carbono no metal fundido com o uso de  $\text{CaCO}_3$  como fluxo;
- Realizar análise com espectroscopia ótica para comprovar presença de íons derivados dos fluxos no arco eléctrico;
- Investigar os mecanismos atuantes na soldagem A-MIG, assim como, as interações dos componentes do fluxo com o arco eléctrico e a poça de fusão.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook Volume 6 -Welding Brazing and Soldering**. v. 6, 1993.

AZEVEDO, A. G. L. DE; FERRARESI, V. A.; FARIAS, J. P. Soldagem de um Aço Inoxidável Ferrítico com o Processo A-TIG. **Soldagem & Inspeção**, v. 14, n. 1, p. 2–9, 2009.

AZEVEDO, A. G. L. DE; FERRARESI, V. A.; FARIAS, J. P. Uma Revisão sobre o Processo de Soldagem A-TIG. In: **Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**. *Anais...*Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2006.

BALSAMO, P. S. S. **Desenvolvimento de um Sistema Sinérgico não Linear para Soldagem MIG Pulsado de Aço Inoxidável**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2000, 204p. (Tese de doutorado).

BERTHIER, A. et al. Physical and Chemical Mechanisms Occuring during A-TIG Welding: Comparison between Experimental Investigations and Simulations. **Materials Science Forum**, v. 638–642, p. 3643–3648, 2010.

BRACARENSE, A. Q. **Gas Metal Arc Welding Guide**. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/artigos/processos-de-soldagem/423-gas-metal-arc-welding.html>>. Acesso em: 20 jun. 2017.

BRITO, L. G. **Análise da Influência dos Fluxos SiO<sub>2</sub> e CaCO<sub>3</sub> sobre a Geometria do Cordão em Soldagem A-GMAW**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2017, 78p. (Monografia).

CARVALHO, M. J. de; et al. **Coletânea de Informações Técnicas – Aço Inoxidável: Manual Técnico de Soldagem do Aço Inox**. Núcleo Inox. [s.l: s.n.]. p. 70.

COSTA, T. F.; BENEDETTI FILHO, E.; 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**. vol.17, n.4, p.356-368, 2012.

CUNAT, P-J. Working with Stainless Steels. Paris: **EDP Sciences and Euro Inox**, 2008.



EGERLAND, S. A Contribution to Arc Length Discussion. **Soldagem & Inspeção**. vol.20, n.3, p. 367-380, 2015.

ERSOY, U.; HU, S. J.; KANNATEY-ASIBU, E. Observation of Arc Start Instability and Spatter Generation in GMAW. **Welding Journal**, v. 87, p. 51s–56s, 2008.

ESAB. **Apostila de Soldagem MIG/MAG**. Rev. 25 Jan de 2005. Disponível em:<[http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev0\\_apostilasoldagemmigmag\\_low.pdf](http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev0_apostilasoldagemmigmag_low.pdf)>. Acesso em: 12 Set 2016.

FERREIRA NETO, J. R. **Estudo do Efeito de Fluxos em Aspectos Operacionais da Soldagem MIG/MAG**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2017, 100p. (Dissertação de mestrado).

FERREIRA NETO, J. R. et al. **Uma Avaliação da Soldagem MIG/MAG com Fluxos**. In: XLII CONSOLDA – CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM. *Anais...*Belo Horizonte: Associação Brasileira de Soldagem, 2016.

FUJII, H. et al. Development of an Advanced A-TIG (AA-TIG) Welding Method by Control of Marangoni Convection. **Materials Science and Engineering A**, v. 495, n. 1–2, p. 296–303, 2008.

GHOSH, P. K. et al. Arc Characteristics and Behaviour of Metal Transfer in Pulsed Current GMA Welding of Stainless Steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, p. 1262–1274, 2009.

GUILLE, A.E. Arc-electrode Phenomena. **PROC. IEEE, IEEE**, v. 118, n. 9R, p. 1131-1154, Set 1971.

HEIPLE, C. R.; BURGARDT, P.; EG&G Rocky Flats. **Fluid Flow Phenomena during Welding**. ASM Handbook Volume 6, Welding, Brazing, and Soldering (ASM International), v. 6, p. 20–24, 1993.

HERTEL, M. et al. The Role of Metal Vapour in Gas Metal Arc Welding and Methods of Combined Experimental and Numerical Process Analysis. **Plasma Chemistry and Plasma Processing**, v. 37, n. 3, p. 531–547, 2017.

HOWSE, D. S.; LUCAS, W. Investigation into Arc Constriction by Active Fluxes for Tungsten Inert Gas Welding. **Science and Technology of Welding and Joining**, 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.
- INFOSOLDA. **Apostila MIG-MAG**. Disponível em: <[http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/Artigos/processos\\_solda/mig-mag.pdf](http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/Artigos/processos_solda/mig-mag.pdf)>. Acesso em: 10 Set 2016.
- IORDACHESCU, D.; QUINTINO, L. Steps Toward a New Classification of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 202, n. 1–3, p. 391–397, 2008.
- JAYAKRISHNAN, S.; CHAKRAVARTHY, P. Flux Bounded Tungsten Inert Gas Welding for Enhanced Weld Performance - A Review. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 28, p. 116–130, 2017.
- KAH, P. et al. Usability of Arc Types in Industrial Welding. **International Journal of Mechanical and Materials Engineering**, v. 9, n. 15, p. 1–12, 2014.
- KANG, M. J. et al. Spatter Rate Estimation in the Short-Circuit Transfer Region of GMAW. **Welding Journal**, v. 82, n. 9, p. 238s–247s, 2003.
- KUMAR, V. Effect of Flux Powder SiO<sub>2</sub> for the Welding of 304-Austenitic Stainless Steel using Gas Tungsten Arc Welding. **International Journal of Engineering, Science and Technology**, v. 9, n. 1, p. 34–45, 2017.
- KUO, C. H.; TSENG, K. H.; CHOU, C. P. Effect of Activated TIG Flux on Performance of Dissimilar Welds between Mild Steel and Stainless Steel. **Key Engineering Materials**, v. 479, p. 74–80, 2011.
- KUO, M.; SUN, Z.; PAN, D. Laser Welding with Activating Flux. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 6, n. 1, p. 17–22, 2001.
- LANCASTER, J. F. **The Physical of Welding**. Oxford: PERGAMON PRESS, 1986.
- LECONTE, S. et al. Effects of Flux Containing Fluorides on TIG Welding Process. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 12, n. 2, p. 120–126, 2007.
- LI, Q. MING; et al. Effect of Activating Flux on Arc Shape and Arc Voltage in Tungsten Inert Gas Welding. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)**, v. 17, p. 486–490, 2007.

LOWKE, J. J.; TANAKA, M.; USHIO, M. Mechanisms Giving Increased Weld Depth Due to a Flux. **Journal of Physics D: Applied Physics**, 2005.

LU, S. et al. Mechanism and Optimization of Oxide Fluxes for Deep Penetration in Gas Tungsten Arc Welding. **Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science**, v. 34 A, n. 9, 2003.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

MENESES, V. A.; GOMES, J. F. P.; SCOTTI, A. The Effect of Metal Transfer Stability (Spattering) on Fume Generation, Morphology and Composition in Short-Circuit MAG Welding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 214, n. 7, p. 1388–1397, 2014.

MILLS, K. C.; KEENE, B. J. Factors Affecting Variable Weld Penetration. **International Materials Reviews**, v. 35, n. 4, p. 185–216, 1990.

MODENESI, P. J. A Química da Formação do Cordão na Soldagem TIG. **Soldagem & Inspeção**, v. 18, n. 3, p. 287–300, 2013.

MODENESI, P. J. et al. Efeito da Densidade do Fluxo e da Presença de Aditivos na Soldagem ATIG de Aço Inoxidável Austenítico. **Soldagem & Inspeção**, 2013.

MODENESI, P. J. et al. Estudo de Alguns Parâmetros Básicos da Soldagem GMAW com Transferência por Curto-Circuito. **Soldagem & Inspeção**, v. 16, n. 1, p. 12–21, 2011.

MODENESI, P. J. **Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais. Apostila da disciplina de Física da Soldagem, 2015.

MODENESI, P. J.; APOLINÁRIO, E. R.; PEREIRA, I. M. TIG Welding with Single-Component Fluxes. **Journal of Materials Processing Technology**, 2000.

MODENESI, P. J.; AVELAR, R. C. D. The Influence of Small Variations of Wire Characteristics on Gas Metal Arc Welding Process Stability. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 86, p. 226–232, 1999.

MODENESI, P. J.; NIXON, J. H. Arc Instability Phenomena in GMA Welding. **Welding Journal**, v. 73, p. S219–S224, 1994.

MURPHY, A. B. A Perspective on Arc Welding Research: The Importance of the Arc, Unresolved Questions and Future Directions. **Plasma Chemistry and Plasma Processing**, v. 35, n. 3, p. 471–489, 2015.

MURPHY, A. B. Influence of Metal Vapour on Arc Temperatures in Gas-Metal Arc Welding: Convection versus Radiation. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 46, p. 10pp, 2013.

MURPHY, A. B. The Effects of Metal Vapour in Arc Welding. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 43, p. 31pp, 2010.

NUNES, E. B. et al. Avaliação do Efeito da Energia de Soldagem na Deposição de Aço Inoxidável Superduplex pelo Processo Plasma Pó. **Soldagem & Inspeção**, v. 20, n. 2, p. 205–218, 2015.

O'BRIEN, A. **Welding Handbook- Welding Process, Part 1**. 9th. ed. Miami: American Welding Society, 2004. v. 2

PANDOLFI, G. S. **Avaliação da Ocorrência de Construção Mecânica do Arco na Soldagem A-TIG de Aços Inoxidáveis Austeníticos**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2016, 103p. (Dissertação de mestrado).

PANDOLFI, G. S; RODRIGUES, F. G; MODENESI, P. J. Avaliação da Ocorrência de Construção Mecânica do Arco na Soldagem A-TIG de Aços Inoxidáveis Austeníticos. **Soldagem & Inspeção**, v. 21, n. 4, p. 428–443, 2016.

PASKELL, T.; LUNDIN, C.; CASTNER, H. GTAW Flux Increases Weld Joint Penetration. **Welding Journal**, v. 76, n. 4, p. 57–62, 1997.

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**, v. 4, n. 5, p. 683–690, 2015.

RAMKUMAR, K. D. et al. Experimental Investigations on The SiO<sub>2</sub> Flux-Assisted GTA Welding of Super-Austenitic Stainless Steels. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2015.

REIS, R. I. **Anomalias na Velocidade de Fusão do Eletrodo na Soldagem GMAW**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2004, 167 p. (Tese de doutorado).

REZENDE, G. M. C. DE et al. Um Critério para Determinar a Regulagem da Tensão em Soldagem MIG/MAG por Curto-Circuito. **Soldagem & Inspeção**, v. 16, n. 2, p. 98–103, 2011.

ROCA, A. S. et al. New Stability Index for Short Circuit Transfer Mode in GMAW Process using Acoustic Emission Signals. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 12, n. 5, p. 460–466, 2007.

RUAN, Y. et al. Mechanical Properties and Microstructures of 6082-T6 Joint Welded by Twin Wire Metal Inert Gas Arc Welding with the SiO<sub>2</sub> Flux. **Materials and Design**, 2012.

SÁNDOR, T. et al. An Improved Theoretical Model for A-TIG Welding Based on Surface Phase Transition and Reversed Marangoni Flow. **Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science**, 2013.

SANTOS, E. dos. et al. On the Visualization of Gas Metal Arc Welding Plasma and the Relationship Between Arc Length and Voltage. **Applied Sciences**, v. 7, p. 11pp, 2017.

SCHNICK, M. et al. Modelling of Gas-Metal Arc Welding Taking Into Account Metal Vapour. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 43, n. 43, p. 11pp, 2010.

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

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V.; LUCAS, W. A Scientific Application Oriented Classification for Metal Transfer Modes in GMA Welding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 212, n. 6, p. 1406–1413, 2012.

SNOW, H. M. M. **Investigation of the Effect of a Surface Active Flux on the Microstructure and Properties of Gas Tungsten Arc Welds Made on a Superaustenitic Stainless**. Lehigh University, 2002.

SUBAN, M.; TUŠEK, J. Methods for the Determination of Arc Stability. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 143–144, n. 1, p. 430–437, 2003.

SUN, H.; SONG, G.; ZHANG, L. F. Effects of Oxide Activating Flux on Laser Welding of Magnesium Alloy. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 13, n. 4, p. 305–311, 2008.

- TANAKA, M. et al. Effects of Activating Flux on Arc Phenomena in Gas Tungsten Arc Welding. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 5, n. 6, p. 397–402, 2000.
- TANAKA, M.; LOWKE, J. J. Predictions of Weld Pool Profiles using Plasma Physics. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 40, p. R1–R23, 2007.
- 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, 2014.
- VASANTHARAJA P; VASUDEVAN, M. Studies on A-TIG Welding of Low Activation Ferritic/Martensitic (LAFM) Steel. **Journal of Nuclear Materials**, v. 421, p. 117–123, 2012.
- WANG, X. Three-dimensional Vision-based Sensing of GTAW: A review. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2014.
- WOODS, R. A.; MILNER, D. R. Motion in the Weld Pool in Arc Welding. **Welding Research Supplement**, p. 163–173, 1971.
- XU, Y. L. et al. Marangoni Convection and Weld Shape Variation in A-TIG Welding Process. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, 2007.
- ZHANG, R. H.; PAN, J. L.; KATAYAMA, S. The Mechanism of Penetration Increase in A-TIG Welding. **Frontiers of Materials Science**, 2011.
- ZHANG, R.; FAN, D.; KATAYAMA, S. Electron Beam Welding with Activating Flux. **Joining and Welding Research Institute Osaka University**, v. 35, n. 2, p. 19–22, 2006.
- ZHANG, Z. D.; CAO, Q. J. Study on metal transfer behaviour in metal inert gas arc welding with activating flux for magnesium alloy. **Science and Technology of Welding and Joining**, 2012.

## APÊNDICE A

Nas próximas páginas encontram-se os relatórios da distribuição granulométrica dos fluxos.

Ref da amostra	: HM12620172	Ultrasom	: 80	s (+durante)
Type of product	: SiO2	Concentração	: 130	
Client	: Luana	Diâmetro a 10%	: 1.16	mu
Comentários	: Amostra Sólida	Diâmetro a 50%	: 11.65	mu
Líquido	: Water (eau)	Diâmetro a 90%	: 42.08	mu
Agente dispersante	: Nenhum	Diâmetro médio	: 16.59	mu
Operador	: Ilda	Fraunhofer		
Empresa	:	Densidade/Fator	-----	
Localização	:	Superfície específica	-----	
Data : 18/05/2017	Hora : 14:28:39	Diluição automática	: Não / Não	
Índice med.	: 1928	Medida./Limp.	: 60/60/2	
		SOP : Incremento		

Valores cumulativos particulares

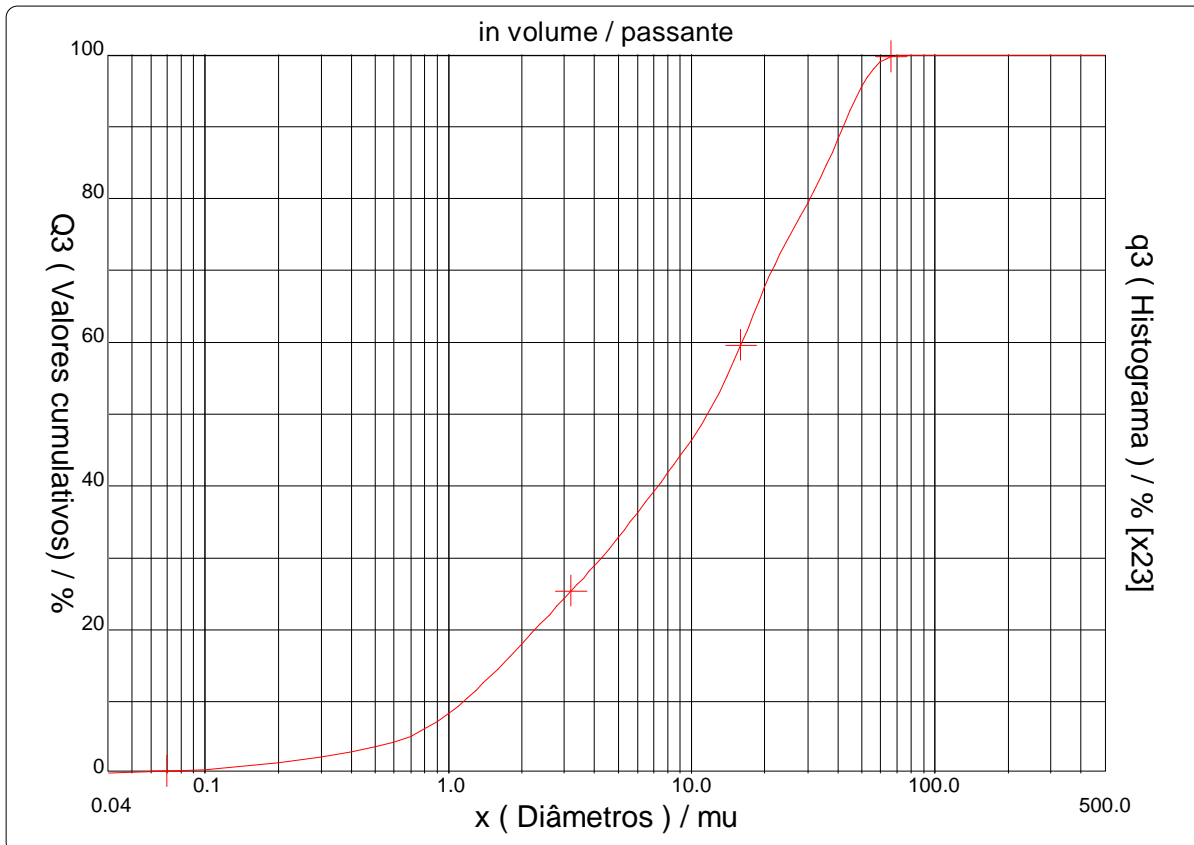
in volume / passante

x	1.00	5.00	10.00	15.00	20.00	30.00	38.00	45.00	56.00	75.00
Q3	8.25	32.79	46.32	57.43	67.55	79.30	86.44	92.29	98.04	100.00

x : diâmetro / mu    Q3 : valor cumulativo / %    q3 : Histograma / %

Porcentagem do usuário

%	100.0
Q3	71.00





Ref da amostra : HM12620172  
 Type of product : SiO2  
 Client : Luana  
 Comentários : Amostra Sólida  
 Líquido : Water (eau)  
 Agente dispersante : Nenhum  
 Operador : Ilda  
 Empresa :  
 Localização :  
 Data : 18/05/2017 Hora : 14:28:39  
 Índice med. : 1928

Ultrasom : 80 s (+durante)  
 Concentração : 130  
 Diâmetro a 10% : 1.16 mu  
 Diâmetro a 50% : 11.65 mu  
 Diâmetro a 90% : 42.08 mu  
 Diâmetro médio : 16.59 mu  
 Fraunhofer  
 Densidade/Fator : -----  
 Superfície específica : -----  
 Diluição automática : Não / Não  
 Medida./Limp. : 60/60/2  
 SOP : Incremento

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.03	0.25	0.50	1.39	2.27	2.98	3.60	4.31	5.13	6.12
q3	0.01	0.03	0.05	0.09	0.16	0.18	0.20	0.28	0.39	0.54
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	7.16	8.25	9.35	10.44	11.51	12.55	14.52	16.33	17.99	19.49
q3	0.64	0.75	0.84	0.91	0.97	1.02	1.07	1.12	1.15	1.14
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	20.86	22.12	23.27	24.34	25.34	26.27	27.17	28.03	28.87	30.10
q3	1.14	1.14	1.13	1.13	1.13	1.12	1.14	1.16	1.19	1.24
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	31.28	32.79	33.86	34.90	36.21	37.73	39.14	40.47	41.73	42.92
q3	1.27	1.32	1.34	1.37	1.38	1.38	1.38	1.40	1.42	1.43
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	44.07	46.32	48.53	50.75	52.98	55.22	57.43	59.62	61.74	63.77
q3	1.46	1.55	1.69	1.86	2.03	2.20	2.33	2.47	2.54	2.58
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	65.72	67.55	69.25	70.80	72.21	74.57	77.52	79.30	81.08	82.85
q3	2.62	2.59	2.53	2.42	2.31	2.06	1.89	1.88	2.01	2.12
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	84.63	86.44	88.23	90.76	92.29	95.48	96.93	98.04	99.00	99.46
q3	2.26	2.43	2.54	2.54	2.45	2.20	1.81	1.47	1.01	0.69
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	99.77	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.48	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu    Q3 : valor cumulativo / %    q3 : Histograma / %

Ref da amostra	: HM12720172	Ultrasom	: 80	s (+durante)
Type of product	: TiO2	Concentração	: 225	
Client	: Luana	Diâmetro a 10%	: 0.26	mu
Comentários	: Amostra Sólida	Diâmetro a 50%	: 2.45	mu
Líquido	: Water (eau)	Diâmetro a 90%	: 7.03	mu
Agente dispersante	: Nenhum	Diâmetro médio	: 3.08	mu
Operador	: Ilda	Fraunhofer		
Empresa	:	Densidade/Fator	-----	
Localização	:	Superfície específica	-----	
Data : 18/05/2017	Hora : 14:56:01	Diluição automática	: Não / Não	
Índice med.	: 1930	Medida./Limp.	: 60/60/2	
		SOP : Incremento		

Valores cumulativos particulares

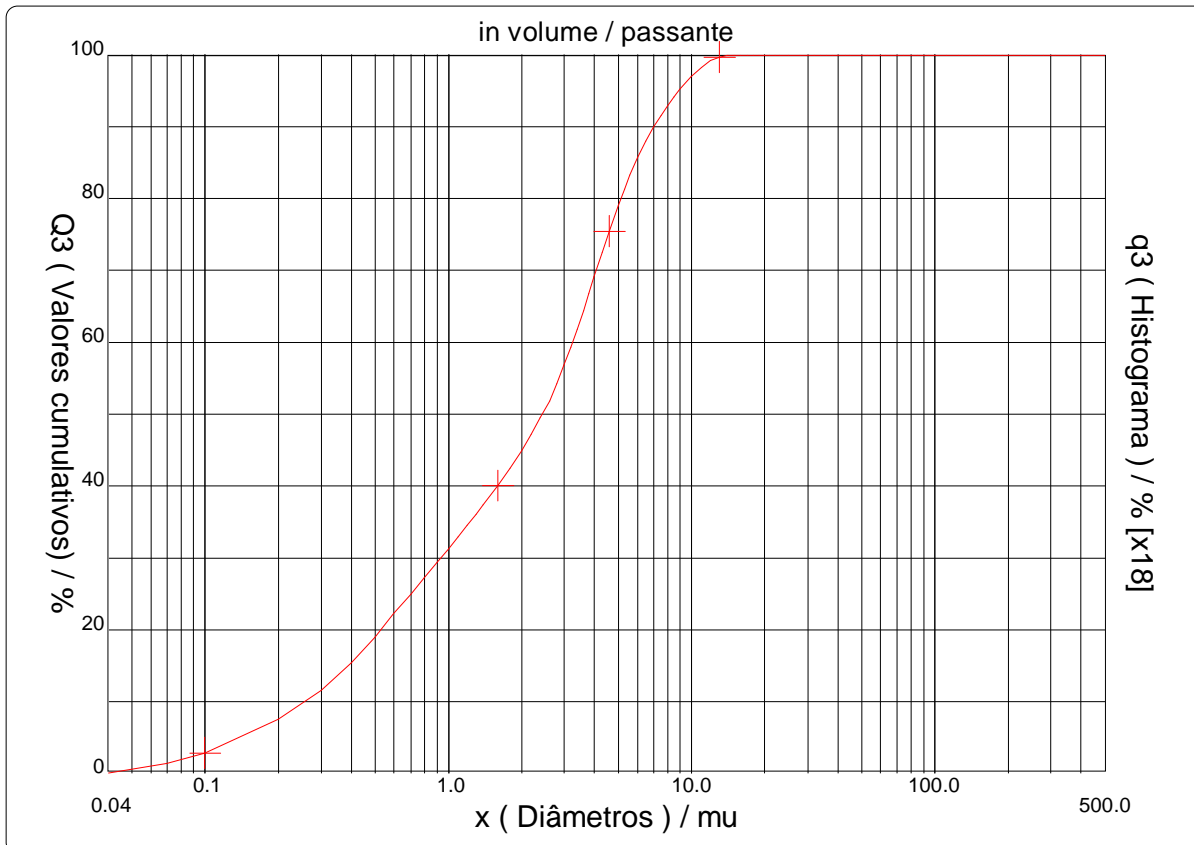
in volume / passante

x	1.00	5.00	10.00	15.00	20.00	30.00	38.00	45.00	56.00	75.00
Q3	31.26	78.99	97.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

x : diâmetro / mu    Q3 : valor cumulativo / %    q3 : Histograma / %

Porcentagem do usuário

%	100.0
Q3	15.00



Ref da amostra : HM12720172  
 Type of product : TiO2  
 Client : Luana  
 Comentários : Amostra Sólida  
 Líquido : Water (eau)  
 Agente dispersante : Nenhum  
 Operador : Ilda  
 Empresa :  
 Localização :  
 Data : 18/05/2017 Hora : 14:56:01  
 Índice med. : 1930

Ultrassom : 80 s (+durante)  
 Concentração : 225  
 Diâmetro a 10% : 0.26 mu  
 Diâmetro a 50% : 2.45 mu  
 Diâmetro a 90% : 7.03 mu  
 Diâmetro médio : 3.08 mu  
 Fraunhofer  
 Densidade/Fator : -----  
 Superfície específica : -----  
 Diluição automática : Não / Não  
 Medida./Limp. : 60/60/2  
 SOP : Incremento

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.07	1.30	2.83	7.53	11.56	15.35	18.95	22.14	24.91	27.29
q3	0.02	0.20	0.40	0.63	0.92	1.22	1.50	1.63	1.67	1.66
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	29.38	31.26	32.96	34.53	36.00	37.39	40.00	42.46	44.83	47.13
q3	1.65	1.66	1.66	1.68	1.71	1.74	1.82	1.94	2.09	2.24
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	49.45	51.81	54.23	56.70	59.27	61.82	64.33	66.77	69.12	72.42
q3	2.48	2.74	3.03	3.33	3.70	3.91	4.08	4.19	4.26	4.24
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	75.44	78.99	81.28	83.30	85.62	87.97	89.90	91.51	92.90	94.13
q3	4.16	3.95	3.65	3.41	3.12	2.73	2.42	2.17	2.00	1.88
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	95.22	97.00	98.30	99.18	99.65	99.90	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	1.77	1.57	1.27	0.94	0.55	0.31	0.13	0.00	0.00	0.00
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu    Q3 : valor cumulativo / %    q3 : Histograma / %

Ref da amostra : HM12820172  
 Type of product : CaCo3  
 Client : Luana  
 Comentários : Amostra Sólida  
 Líquido : Water (eau)  
 Agente dispersante : Nenhum  
 Operador : Ilda  
 Empresa :  
 Localização :  
 Data : 22/05/2017 Hora : 15:39:45  
 Índice med. : 1944

Ultrassom : 80 s (+durante)  
 Concentração : 137  
 Diâmetro a 10% : 4.73 mu  
 Diâmetro a 50% : 53.91 mu  
 Diâmetro a 90% : 140.81 mu  
 Diâmetro médio : 65.17 mu  
 Fraunhofer  
 Densidade/Fator : -----  
 Superfície específica : -----  
 Diluição automática : Não / Não  
 Medida./Limp. : 60/60/2  
 SOP : Incremento

Valores cumulativos particulares

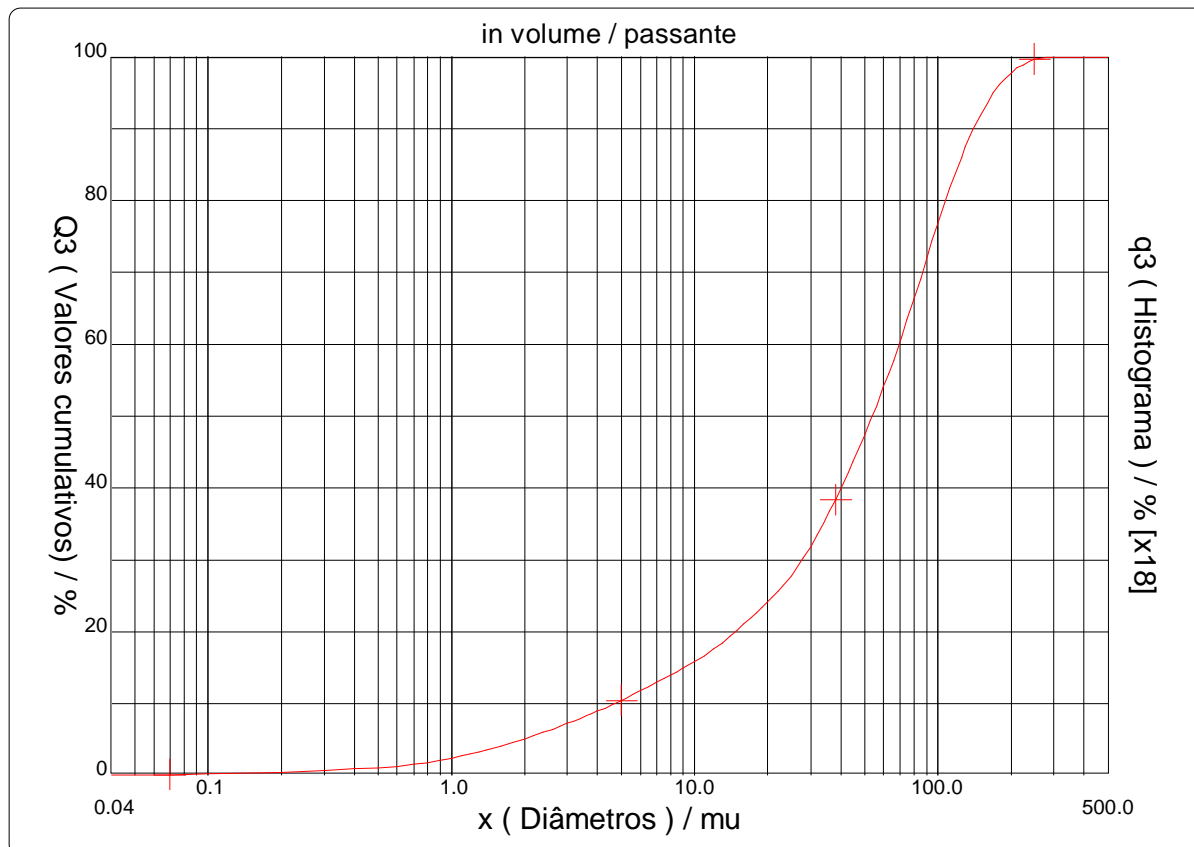
in volume / passante

x	1.00	5.00	10.00	15.00	20.00	30.00	38.00	45.00	56.00	75.00
Q3	2.39	10.38	15.75	20.17	24.07	31.78	38.33	43.72	51.39	63.34

x : diâmetro / mu    Q3 : valor cumulativo / %    q3 : Histograma / %

Porcentagem do usuário

%	100.0
Q3	300.00



Ref da amostra : HM12820172  
 Type of product : CaCo3  
 Client : Luana  
 Comentários : Amostra Sólida  
 Líquido : Water (eau)  
 Agente dispersante : Nenhum  
 Operador : Ilda  
 Empresa :  
 Localização :  
 Data : 22/05/2017 Hora : 15:39:45  
 Índice med. : 1944

Ultrasom : 80 s (+durante)  
 Concentração : 137  
 Diâmetro a 10% : 4.73 mu  
 Diâmetro a 50% : 53.91 mu  
 Diâmetro a 90% : 140.81 mu  
 Diâmetro médio : 65.17 mu  
 Fraunhofer  
 Densidade/Fator : -----  
 Superfície específica : -----  
 Diluição automática : Não / Não  
 Medida./Limp. : 60/60/2  
 SOP : Incremento

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.01	0.07	0.14	0.39	0.64	0.85	1.04	1.25	1.50	1.79
q3	0.00	0.01	0.01	0.02	0.04	0.05	0.06	0.08	0.11	0.15
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	2.09	2.39	2.68	2.97	3.25	3.52	4.05	4.56	5.05	5.52
q3	0.17	0.19	0.20	0.22	0.23	0.24	0.27	0.29	0.31	0.33
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	5.97	6.39	6.80	7.18	7.55	7.90	8.24	8.57	8.89	9.36
q3	0.35	0.35	0.37	0.37	0.38	0.39	0.40	0.41	0.42	0.44
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	9.81	10.38	10.80	11.20	11.71	12.32	12.89	13.42	13.92	14.40
q3	0.45	0.46	0.48	0.49	0.49	0.51	0.51	0.51	0.52	0.53
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	14.86	15.75	16.64	17.53	18.42	19.31	20.17	21.01	21.82	22.60
q3	0.54	0.57	0.63	0.68	0.74	0.80	0.83	0.87	0.89	0.91
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	23.34	24.07	24.80	25.52	26.26	27.78	30.16	31.78	33.43	35.08
q3	0.92	0.95	1.00	1.04	1.11	1.22	1.41	1.57	1.71	1.82
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	36.72	38.33	39.92	42.23	43.72	47.31	49.38	51.39	54.02	55.95
q3	1.92	1.99	2.08	2.14	2.19	2.28	2.38	2.44	2.55	2.65
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	57.84	60.93	63.34	66.27	69.08	71.76	74.29	76.67	81.67	85.99
q3	2.72	2.83	2.94	3.04	3.10	3.14	3.13	3.11	2.95	2.63
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	87.39	89.83	91.87	93.57	94.97	96.11	97.02	97.75	98.43	98.94
q3	2.39	2.20	1.98	1.76	1.55	1.34	1.13	0.95	0.78	0.62
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	99.40	99.59	99.91	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.45	0.31	0.19	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu    Q3 : valor cumulativo / %    q3 : Histograma / %

Ref da amostra : HM13020172  
 Type of product : Cr2 O3  
 Client : Luana  
 Comentários : Amostra Sólida  
 Líquido : Water (eau)  
 Agente dispersante : Nenhum  
 Operador : Ilda  
 Empresa :  
 Localização :  
 Data : 22/05/2017 Hora : 16:50:12  
 Índice med. : 1948

Ultrassom : 80 s (+durante)  
 Concentração : 141  
 Diâmetro a 10% : 0.32 mu  
 Diâmetro a 50% : 1.94 mu  
 Diâmetro a 90% : 6.47 mu  
 Diâmetro médio : 2.71 mu  
 Fraunhofer  
 Densidade/Fator : -----  
 Superfície específica : -----  
 Diluição automática : Não / Não  
 Medida./Limp. : 60/60/2  
 SOP : Incremento

Valores cumulativos particulares

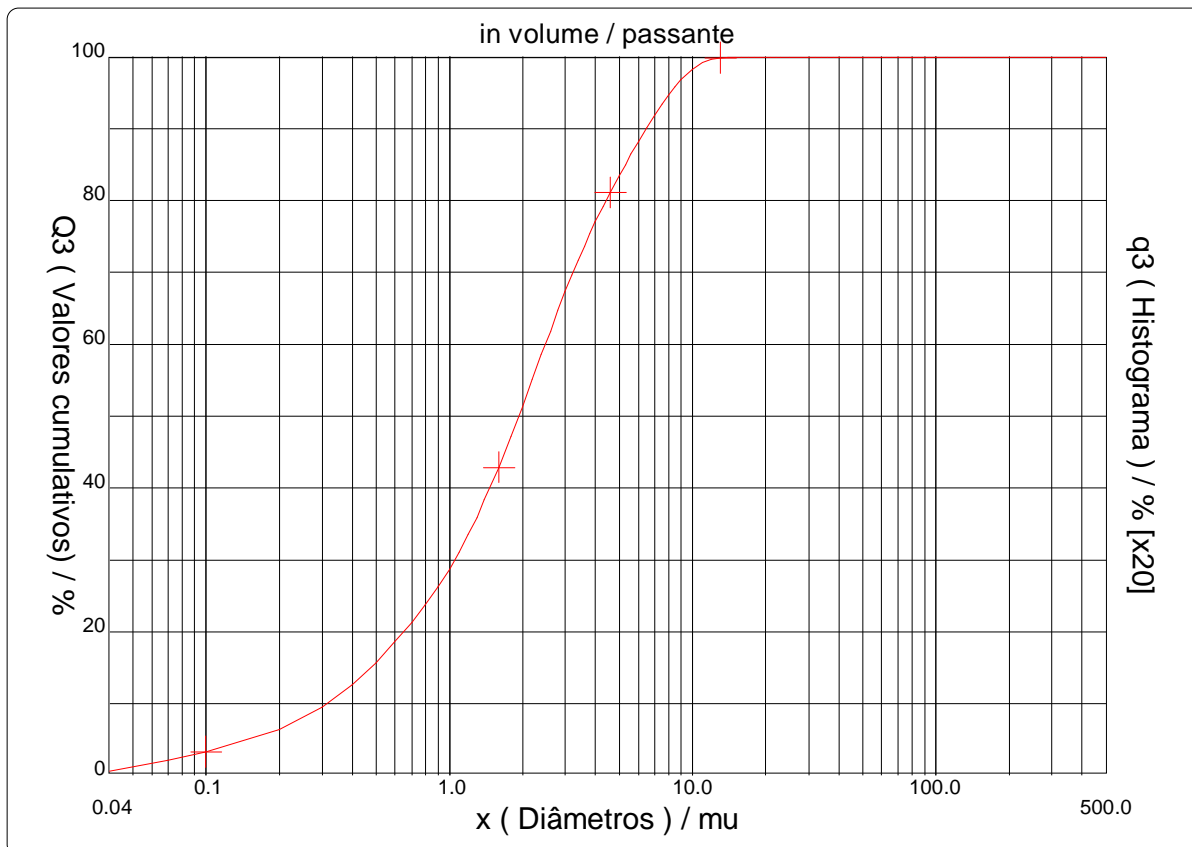
in volume / passante

x	1.00	5.00	10.00	15.00	20.00	30.00	38.00	45.00	56.00	75.00
Q3	28.63	83.45	98.26	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

x : diâmetro / mu    Q3 : valor cumulativo / %    q3 : Histograma / %

Porcentagem do usuário

%	100.0
Q3	15.00



Ref da amostra : HM13020172  
 Type of product : Cr2 O3  
 Client : Luana  
 Comentários : Amostra Sólida  
 Líquido : Water (eau)  
 Agente dispersante : Nenhum  
 Operador : Ilda  
 Empresa :  
 Localização :  
 Data : 22/05/2017 Hora : 16:50:12  
 Índice med. : 1948

Ultrassom : 80 s (+durante)  
 Concentração : 141  
 Diâmetro a 10% : 0.32 mu  
 Diâmetro a 50% : 1.94 mu  
 Diâmetro a 90% : 6.47 mu  
 Diâmetro médio : 2.71 mu  
 Fraunhofer  
 Densidade/Fator : -----  
 Superfície específica : -----  
 Diluição automática : Não / Não  
 Medida./Limp. : 60/60/2  
 SOP : Incremento

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.57	2.01	3.17	6.36	9.44	12.57	15.67	18.57	21.26	23.77
q3	0.19	0.24	0.31	0.44	0.72	1.03	1.32	1.51	1.65	1.78
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	26.21	28.63	31.07	33.51	35.91	38.27	42.84	47.17	51.23	55.06
q3	1.96	2.18	2.43	2.66	2.84	3.02	3.24	3.48	3.65	3.81
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	58.58	61.79	64.70	67.31	69.64	71.74	73.65	75.39	77.00	79.18
q3	3.83	3.80	3.72	3.58	3.42	3.28	3.17	3.05	2.97	2.86
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	81.13	83.45	85.01	86.44	88.18	90.13	91.85	93.37	94.69	95.83
q3	2.74	2.64	2.54	2.46	2.39	2.31	2.20	2.09	1.94	1.78
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	96.80	98.26	99.16	99.66	99.88	99.97	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	1.61	1.31	0.89	0.54	0.26	0.12	0.04	0.00	0.00	0.00
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu    Q3 : valor cumulativo / %    q3 : Histograma / %



# DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

## CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra : HM13120172	Ultrasom : 80 s (+durante)
Type of product : Fe2O3	Concentração : 144
Client : Golder	Diâmetro a 10% : 0.27 mu
Comentários : Amostra Sólida	Diâmetro a 50% : 0.49 mu
Líquido : TRITONX100	Diâmetro a 90% : 0.79 mu
Agente dispersante : Nenhum	Diâmetro médio : 0.52 mu
Operador : Ilda	Fraunhofer
Empresa :	Densidade/Fator -----
Localização :	Superfície específica -----
Data : 23/05/2017 Hora : 17:02:32	Diluição automática : Não / Não
Índice med. : 1968	Medida./Limp. : 60/60/2
	SOP : Incremento

Valores cumulativos particulares

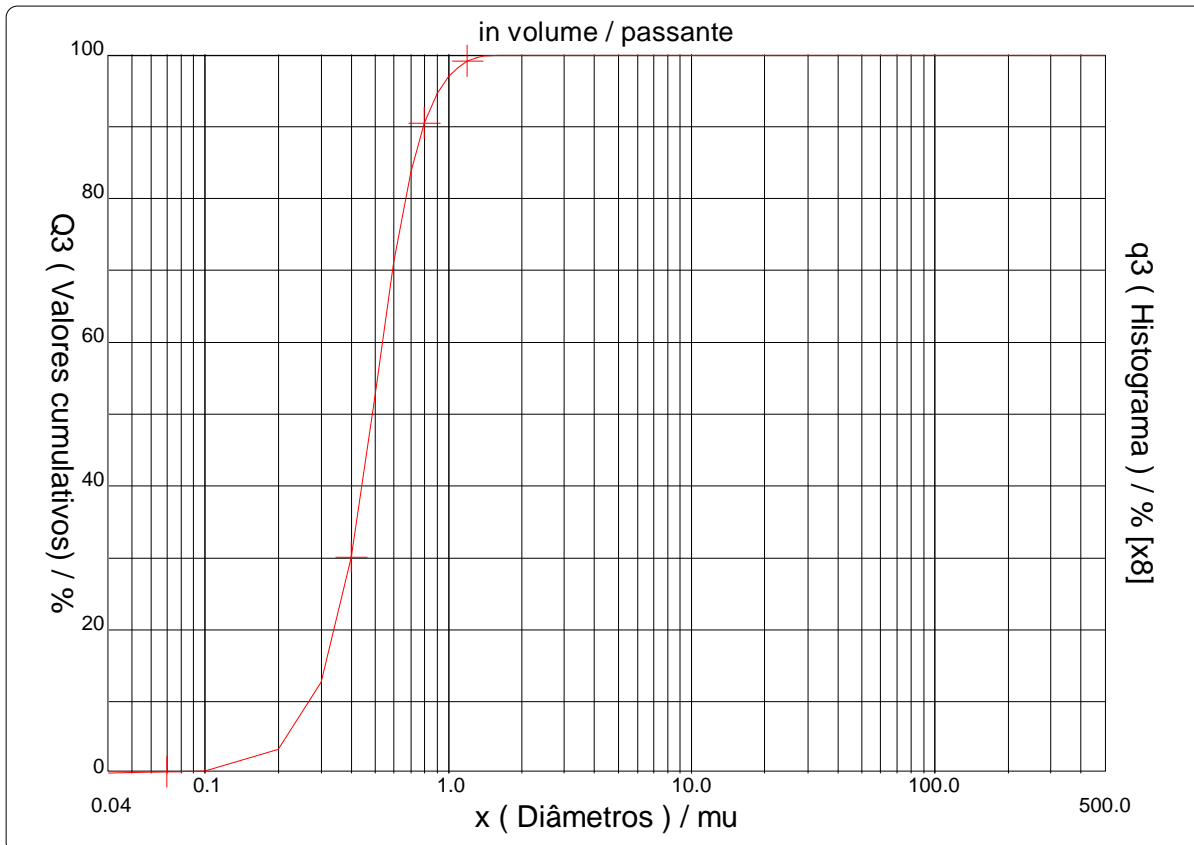
in volume / passante

x	1.00	5.00	10.00	15.00	20.00	30.00	38.00	45.00	56.00	75.00
Q3	96.95	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

x : diâmetro / mu    Q3 : valor cumulativo / %    q3 : Histograma / %

Porcentagem do usuário

%	100.0
Q3	1.60





Ref da amostra : HM13120172  
 Type of product : Fe2O3  
 Client : Golder  
 Comentários : Amostra Sólida  
 Líquido : TRITONX100  
 Agente dispersante : Nenhum  
 Operador : Ilda  
 Empresa :  
 Localização :  
 Data : 23/05/2017 Hora : 17:02:32  
 Índice med. : 1968

Ultrassom : 80 s (+durante)  
 Concentração : 144  
 Diâmetro a 10% : 0.27 mu  
 Diâmetro a 50% : 0.49 mu  
 Diâmetro a 90% : 0.79 mu  
 Diâmetro médio : 0.52 mu  
 Fraunhofer  
 Densidade/Fator : -----  
 Superfície específica : -----  
 Diluição automática : Não / Não  
 Medida./Limp. : 60/60/2  
 SOP : Incremento

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.12	0.31	3.31	12.69	30.09	52.46	70.96	83.57	90.50
q3	0.00	0.04	0.10	0.84	4.49	11.73	19.45	19.69	15.87	10.07
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	94.55	96.95	98.28	99.09	99.57	99.85	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	6.67	4.42	2.71	1.81	1.16	0.73	0.22	0.00	0.00	0.00
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu    Q3 : valor cumulativo / %    q3 : Histograma / %

## APÊNDICE B

O cálculo do balanço de CO<sub>2</sub> oriundo da decomposição do fluxo CaCO<sub>3</sub> seguiu as seguintes etapas:

1. Cálculo do CO<sub>2</sub> oriundo da decomposição da massa de CaCO<sub>3</sub> utilizada

- a. Número de moles de CaCO<sub>3</sub> que é igual ao de CO<sub>2</sub> pela relação estequiométrica 1:1:

$$n_{CaCO_3} = \frac{m_{CaCO_3}}{MM_{CaCO_3}} \quad n_{CaCO_3} = n_{CO_2}$$

- b. Volume de CO<sub>2</sub> gerado pelo fluxo:

$$V_{CO_2 \text{ no } CaCO_3} = n_{CO_2} * 22,4$$

2. Cálculo do CO<sub>2</sub> presente no gás de proteção

- a. Tempo de soldagem:

$$t_s = d / vel$$

- b. Volume do gás Ar-2,5% CO<sub>2</sub> dispensado sobre a chapa no intervalo A-MIG de acordo com a vazão utilizada:

$$V_{gás} = v \cdot t_s$$

- c. Determinação do volume de CO<sub>2</sub> no gás de proteção dispensado

$$V_{CO_2 \text{ no gás}} = V_{gás} * 2,5\%$$

3. Cálculo da porcentagem teórica de CO<sub>2</sub> presente no arco durante a soldagem

$$\%_{CO_2 \text{ total}} = \frac{V_{CO_2 \text{ no } CaCO_3} + V_{CO_2 \text{ no gás}}}{V_{gás}}$$

Onde:

<p>d – Comprimento da área com fluxo [cm]</p> <p>m<sub>CaCO<sub>3</sub></sub> – Massa de CaCO<sub>3</sub> [g]</p>	<p>MM<sub>CaCO<sub>3</sub></sub> – Massa molar de CaCO<sub>3</sub> [g/mol]</p> <p>n<sub>CaCO<sub>3</sub></sub> – Número de moles de CaCO<sub>3</sub></p> <p>v – Vazão do gás de proteção [L/min]</p>
---	--

$V_{\text{CO}_2 \text{ no CaCO}_3}$  – Volume de  $\text{CO}_2$  oriundo da decomposição de  $\text{CaCO}_3$  [L]

$V_{\text{CO}_2 \text{ no gás}}$  – Volume de  $\text{CO}_2$  presente no gás de proteção [L]

Vel – Velocidade de soldagem [cm/min]

$V_{\text{gás}}$  – Volume do gás de proteção [L]

$n_{\text{CO}_2}$  – Número de moles de  $\text{CO}_2$

$t_s$  – Tempo de soldagem [min]