

Avaliação da Ocorrência de Constrição Mecânica do Arco na Soldagem A-TIG de Aços Inoxidáveis Austeníticos

Guilherme S. Pandolfi¹, Felipe G. Pinheiro Rodrigues¹, Paulo J. Modenesi²

¹ Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Recebido: 29 Jul., 2016

Aceito: 09 Nov., 2016.

E-mails: guilhermepandolfi@hotmail.com
(GSP), modenesi@demet.ufmg.br (PJM)

Resumo: Este trabalho avalia indícios de constricção do arco pelo isolamento elétrico e térmico por fluxos de óxidos de um componente na soldagem A-TIG de aços inoxidáveis austeníticos. Foram feitas filmagens do arco, medidas de sua tensão elétrica e da morfologia de cordões de solda obtidos com SiO_2 , Cr_2O_3 e Al_2O_3 , aplicadas com duas densidades superficiais (30 e 60 g/m²) e aberturas centrais sem fluxo (1, 2 e 4 mm). Os resultados não mostraram mudança significativa na largura do arco nas condições utilizadas, não comprovando uma possível constricção mecânica no arco elétrico devido ao isolamento elétrico e térmico causado pelos fluxos. A filmagem lateral do arco indicou sua deflexão em sentido oposto ao de seu avanço para os três fluxos, sendo o efeito causado pela sílica o mais significativo. A abertura central sem fluxo reduziu a penetração, a área fundida do cordão e a largura do cordão. A ausência de indícios significativos de constricção do arco e a variação do formato do cordão de solda devido à abertura central sem fluxo favorecem o modelo da convecção de Marangoni como o mecanismo responsável pelo aumento de penetração na soldagem A-TIG de aços inoxidáveis austeníticos.

Palavras-chave: GTAW; A-TIG; FB-TIG; Formato do cordão; Arco elétrico.

Evaluation of the Arc Mechanical Constriction in A-TIG Welding of Austenitic Stainless Steels

Abstract: This paper evaluates indications of arc constriction by the thermal and electrical insulation caused by oxides of a single component in A-TIG welding of austenitic stainless steels. Changes in arc dimensions, in its electric voltage and in weld bead morphology caused by three oxide fluxes (SiO_2 , Cr_2O_3 e Al_2O_3) applied with two surface densities (30 e 60 g/m²), and with and without a flux free central strip (of 1, 2, and 4 mm) were studied. Results showed no significant change in width of the electric arc for the experimental conditions used, therefore, not supporting a possible mechanical constriction in the electric arc by oxide electrical and thermal insulation. Lateral filming indicated that the arc is delayed by the fluxes with silica causing the strongest effect. The presence of clean central strip in the flux layer decreased weld penetration and weld bead cross section, besides the reduction of the width of the bead. Therefore, the results of the present work seem to support Marangoni convection as the main mechanism responsible for increasing penetration in A-TIG welding of stainless austenitic steels.

Key-words: GTAW; A-TIG; FB-TIG; Weld bead shape; Electric arc.

1. Introdução

A soldagem TIG é utilizada quando uma elevada qualidade de soldagem é exigida, sendo um processo comumente utilizado para ligas ou metais especiais, tais como níquel e suas ligas e aço inoxidável. Fatores limitantes deste processo em sua forma convencional incluem a penetração e velocidade de soldagem relativamente baixas, sendo necessária usualmente a execução de vários passes em juntas com espessura superior a 4 ou 5 mm, fazendo com que o processo fique mais caro e complexo. Equipamentos especiais que minimizam as dimensões da mancha catódica no eletrodo permitem a soldagem com a formação de “keyhole” na poça de fusão usando correntes superiores a aproximadamente 300 A. Estes sistemas possibilitam a soldagem de juntas de maior espessura (até cerca de 10 mm) em um único passe, mas são ainda opções de alto custo e uso complexo e ainda restrito [1,2].



A soldagem A-TIG é uma variante simples do processo TIG convencional em que uma fina camada de óxidos, cloretos, fluoretos e, eventualmente, outros compostos é colocada na superfície do material a ser soldado. Durante a soldagem, a presença deste fluxo favorece a formação de um cordão mais estreito e profundo, permitindo um aumento de penetração de 150% ou mais em relação à soldagem sem fluxo nas mesmas condições e com o mesmo equipamento [1]. O processo foi desenvolvido na União Soviética, na década de 1960 [3], inicialmente para a soldagem de ligas de titânio e posteriormente de aços inoxidáveis austeníticos, sendo, atualmente, considerado também para a soldagem de ligas de alumínio, magnésio, cobre e níquel [1,4-6].

Sándor [7] e Sándor et al. [8] descrevem quatro modelos principais para explicar o efeito do fluxo na soldagem A-TIG:

1. Alterações na composição química do arco causariam a sua constrição, reduzindo o seu diâmetro e aumentando a densidade de corrente elétrica e de energia sobre a poça de fusão. Este efeito é associado, em geral, à captura de elétrons nas regiões periféricas do arco por átomos de elementos eletronegativos advindos do fluxo, particularmente o flúor e o oxigênio [3].
2. Os fluxos ativos reduziriam a tensão superficial do metal líquido na poça de fusão. Como a tensão superficial é um dos principais fatores que se opõem à ação da pressão do arco sobre a poça, a sua redução permitiria uma maior depressão da poça pela pressão do arco, aumentando a penetração. Embora uma maior depressão da poça de fusão seja realmente observada na soldagem A-TIG, Sándor et al. [8] apresentam evidências experimentais de que este mecanismo não seria importante para aumentar a penetração na soldagem A-TIG.
3. Os fluxos alterariam a variação da tensão superficial (γ) do metal líquido com a temperatura, mudando o sinal de $d\gamma/dT$ de negativo para positivo. Esta mudança alteraria o sentido do movimento de convecção do metal líquido na poça de fusão (efeito Marangoni), direcionando o metal líquido mais aquecido para a raiz da poça de fusão e aumentando a penetração [9].
4. Os fluxos, por apresentarem baixas condutividades elétrica e térmica, além de possuírem, em geral, elevada temperatura de fusão, dificultariam a passagem do arco para a poça nas regiões em que a sua temperatura fosse menor. Desta forma, as dimensões da mancha anódica seriam reduzidas e a densidade de corrente seria aumentada, isto é, o fluxo atuaria como uma barreira causando uma constrição física do arco. Li et al. [10] consideram, ainda, para um fluxo a base de SiO_2 , a tendência do arco defletir para trás, aumentando o seu comprimento e tensão e, desta forma, a quantidade de energia gerada no arco.

O efeito Marangoni é provavelmente o mecanismo mais citado atualmente para explicar o aumento de penetração observado na soldagem A-TIG com fluxos que contém óxidos em aços inoxidáveis austeníticos [11]. Contudo, diversos trabalhos consideram outros mecanismos, particularmente aqueles ligados à constrição do arco, como os maiores causadores do aumento de penetração [12,13]. Além disto, um aumento importante de penetração pode ser conseguido na soldagem A-TIG de diferentes ligas metálicas com fluxos a base de cloretos e fluoretos, sem a presença de óxidos. Nestes casos, não é, em geral, caracterizada a presença de um elemento tenso-ativo e, assim, é mais difícil considerar a possibilidade de ocorrência do efeito Marangoni, sendo necessário, portanto, considerar a ocorrência de outros mecanismos [14,15].

Uma variação do processo A-TIG, denominada FB-TIG (Flux Bounded TIG), consiste na aplicação do fluxo como duas faixas laterais paralelas à junta. A ideia é utilizar o fluxo como uma camada que isole elétrica e termicamente certas regiões da superfície da peça com o intuito de direcionar a região de incidência do arco. Neste caso, a energia do arco seria concentrada em uma região mais estreita da peça delimitada pela distância de separação entre as faixas cobertas com fluxo (isto é, pela *abertura* entre as faixas), de modo a causar um efeito de constrição física do arco, atribuída por Richetti [16] à maior resistência à passagem da corrente elétrica na região recoberta com o fluxo. Este processo permite a obtenção de soldas com bom acabamento superficial, redução da quantidade de escória formada e o aumento de penetração semelhante à observada no processo A-TIG [17].

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a ocorrência de constrição mecânica do arco na soldagem A-TIG de aços inoxidáveis austeníticos com fluxos de óxidos simples variando a largura da região sem fluxo entre faixas paralelas com fluxo. Também é avaliada a influência da composição do fluxo e de sua densidade superficial na morfologia do cordão de solda.

2. Materiais e Métodos

Foram usados como fluxos os compostos Cr_2O_3 , SiO_2 e Al_2O_3 . Os dois primeiros foram fornecidos por um fabricante de consumíveis de soldagem com as composições típicas indicadas na Tabela 1 e o último foi fornecido por um laboratório de análise química com “pureza analítica”.

Os testes de soldagem foram realizados como um planejamento fatorial completo sem réplicas com as condições indicadas na Tabela 2, sendo a ordem de execução dos testes estabelecida de forma aleatória. As demais condições de soldagem foram mantidas fixas e os principais parâmetros usados estão mostrados na Tabela 3.

Tabela 1. Composições químicas típicas (%peso) dos compostos usados como fluxos.

	Fluxo	
	Cr_2O_3	SiO_2
Cr_2O_3	99,8	--
SiO_2	--	99,2
P	0,02	0,008
S	0,02	0,01

Tabela 2. Projeto experimental fatorial ($3 \times 2 \times 4$) dos testes principais.

Fluxo	Densidade superficial (g/m^2)	Abertura (mm)
Cr_2O_3	30	0
		1
		2
	60	4
		0
		1
SiO_2	30	2
		4
		0
	60	1
		2
		4
Al_2O_3	30	0
		1
		2
	60	4
		0
		1
		2
		4

Tabela 3. Parâmetros de soldagem utilizados para os testes experimentais.

Parâmetro		Valor
Corrente (A)		190
Velocidade de soldagem (cm/min)		20
Comprimento do arco (mm)		2
Eletrodo	Tipo	AWS EWTh-2
	Diâmetro (mm)	3,2
	Ponta ($^\circ$)	60
Gás de proteção	Composição	Ar
	Vazão (L/min)	12
Posição de soldagem		Plana

Antes de cada teste, um cupom de 150 × 50 × 6 mm de aço inoxidável AISI 304 foi limpo com acetona e uma máscara de fita adesiva com área de 1000 mm² foi colada em sua superfície. Centralizada sobre esta área, foi colada uma tira de fita adesiva com a largura igual à abertura desejada para criar a região central sem fluxo. A quantidade necessária de fluxo para obter a densidade desejada na área livre da máscara foi medida com uma balança de resolução igual a 0,0001 g. Sobre a área livre restante, esta quantidade de fluxo foi aplicada com auxílio de álcool absoluto PA e dispersa homoganeamente com auxílio de hastes metálicas. Após a evaporação do álcool, retiraram-se a máscara e a tira de fita adesiva.

O cupom foi preso em um gabarito de cobre, inicialmente à temperatura ambiente, para a soldagem, que foi realizada em um dispositivo mecanizado. Este gabarito de cobre ajuda a uniformizar as condições de extração de calor e, em conjunto com a relativamente baixa condutividade térmica dos aços inoxidáveis austeníticos, facilita a obtenção de um regime quase estacionário para o escoamento de calor durante a soldagem. A obtenção destas condições foi confirmada visualmente nos cordões obtidos pela manutenção da uma largura do cordão uniforme ao longo, respectivamente, das regiões de soldagem TIG e A-TIG dos corpos de prova. As soldas foram feitas sobre chapa, se iniciando na região sem fluxo e tendo um comprimento de aproximadamente 140 mm. Destes, em torno dos 70 mm finais foram feitos sobre a camada de fluxo (soldagem A-TIG).

Para facilitar a sua identificação, os testes serão indicados pela 1ª letra de cada composto, por exemplo, S para a Sílica, seguida pela densidade superficial (em g/m²) de fluxo e pelo valor da abertura (em mm) separado por barra. Assim, por exemplo, A60/4 indica um teste com fluxo de alumina com uma densidade de 60 g/m² e com uma abertura central de 4 mm.

Durante a soldagem, os valores de corrente e tensão foram registrados com um sistema digital de aquisição de dados a uma taxa de 10 kHz, sendo tirada a média de cada bloco de 500 medidas, cujo valor foi salvo em arquivo, resultando em uma taxa final de aquisição de 20 Hz. Estes dados foram usados para o cálculo da corrente e tensão médias de soldagem e da diferença de tensão entre as condições de soldagem A-TIG e TIG ($\Delta U = U_{A-TIG} - U_{TIG}$). Para o cálculo de ΔU , as tensões médias para cada condição de soldagem (U_{TIG} e U_{A-TIG}) foram calculadas em intervalos de 3 s antes e após o arco atingir a camada de fluxo, desconsiderando-se do cálculo um período de aproximadamente 2 a 3 s, correspondente à região de transição do arco entre as regiões sem e com fluxo (Figura 1).

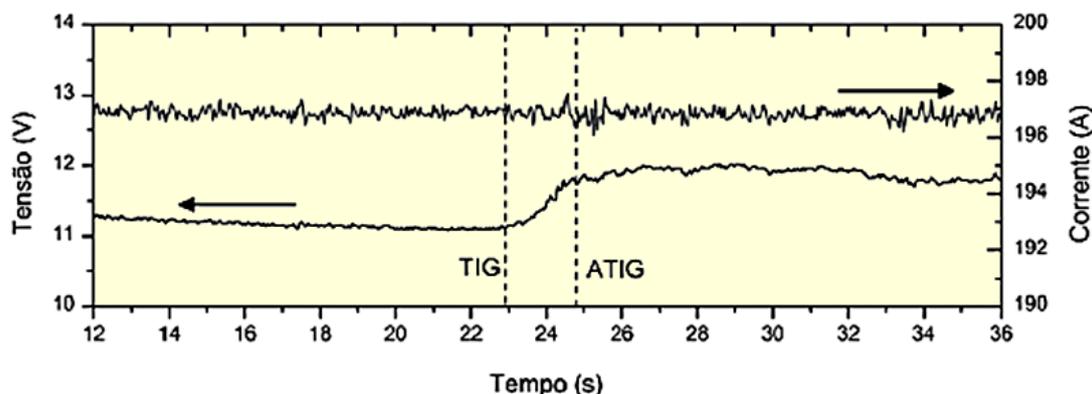


Figura 1. Exemplo de oscilogramas de tensão e corrente e indicação da transição entre a soldagem TIG e A-TIG.

Para verificar a existência da constrição mecânica do arco elétrico foi realizada a filmagem frontal do arco em 8 testes com uma câmera CCD montada com lente telefoto e filtros de densidade neutra. As filmagens foram armazenadas em computador e analisadas com o programa *ImageJ*. A largura média do arco antes e depois da transição TIG/A-TIG foi medida em três momentos distintos de cada condição e calculado o valor médio. As medidas de largura foram tomadas na região mais larga do arco, próxima do anodo (Figura 2).

Também foi realizada a filmagem lateral do arco para avaliar a ocorrência de deflexão deste pelo fluxo. Para caracterizar esta deflexão, usou-se uma ferramenta no programa *Image J* para definir as fronteiras do arco de forma padronizada. Nestas imagens, foram feitas medidas das meias larguras máximas do arco na sua direção de avanço (L_r) e na direção oposta (L_l), Figura 2b. Com base nestas foi definido um índice de simetria (IS) do arco como (Equação 1):

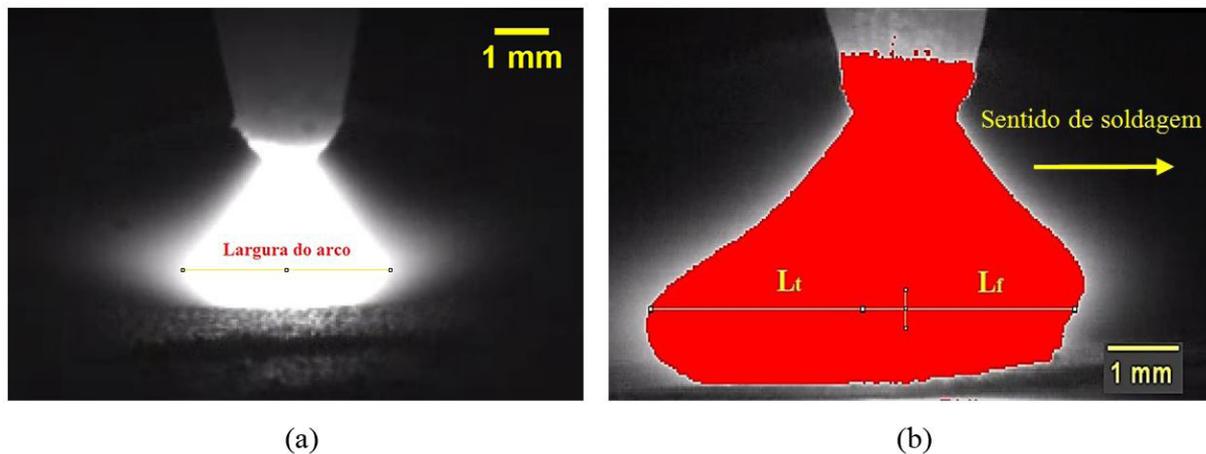


Figura 2. (a) Exemplo de medição da largura do arco na filmagem frontal utilizando o *Image J*; (b) Metodologia para análise da deflexão do arco na filmagem lateral.

$$IS = \frac{L_f}{L_t} \quad (1)$$

Para a análise macrográfica, foram retiradas, de cada corpo de prova soldado, quatro seções transversais ao cordão, duas na parte correspondente à soldagem TIG e duas na parte A-TIG. Estas seções foram feitas na região central dos corpos de prova, entre 10 e 25 mm antes e após a transição das condições de soldagem de TIG para A-TIG. As seções foram preparadas para análise macrográfica e atacadas com reativo Marble (4 g de sulfato de cobre + 20 mL de ácido clorídrico + 20 mL de água destilada), sendo o ataque realizado por aplicação direta com algodão por cerca de um minuto. As macrografias obtidas foram fotografadas em condições padronizadas e as imagens analisadas com o programa *ImageJ* para medição da largura, penetração e área da seção transversal do cordão.

Como neste trabalho foi realizado um planejamento fatorial sem réplicas, não haveria a possibilidade, considerando todas as interações possíveis, de se estimar o erro para a análise de variância. Portanto, foram levados em conta apenas os termos de interação de primeira ordem, para que houvesse graus de liberdade para estimação do erro, no caso, aqueles associados ao termo de segunda ordem. A análise de variância e os gráficos de efeitos principais e interações foram obtidos por meio do programa Minitab®. Nas tabelas de análise de variância, as linhas com os nomes de dois fatores separados por asterisco (*) indicam as interações entre estes. Adotou-se para as análises estatísticas um nível de significância de 5%.

3. Resultados e Discussão

3.1. Dados elétricos do arco

As Figuras 3 e 4 mostram os resultados da análise estatística dos fatores principais e interações de 1ª ordem para a diferença de tensão entre as condições de soldagem A-TIG e TIG (ΔU). O resultado da análise de variância destes resultados é apresentado na Tabela 4.

A análise de variância indica que o tipo de fluxo e a abertura influenciam de forma significativa, para as condições experimentais utilizadas, o valor de ΔU . Cromita e sílica levam a uma maior variação de tensão do arco, em média, 0,6 e 0,5 V, respectivamente, enquanto que a alumina parece causar menor variação, em torno de 0,25 V. Howse e Lucas [3], Middel e Den Ouden [18], Modenesi et al. [19] e outros autores também reportam um aumento na tensão de soldagem devido à presença de fluxos na soldagem TIG da ordem de 1 V ou menos.

Rückert et al. [13], utilizando a sílica como fluxo, sugerem que a presença de elementos do fluxo modifica a distribuição de portadores de carga no arco, o que aumentaria a tensão. Além disso, os autores constataram, mediante filmagem lateral do arco, que este sofre uma deflexão para trás, o que aumentaria o comprimento efetivo do arco, e, conseqüentemente, a sua tensão.

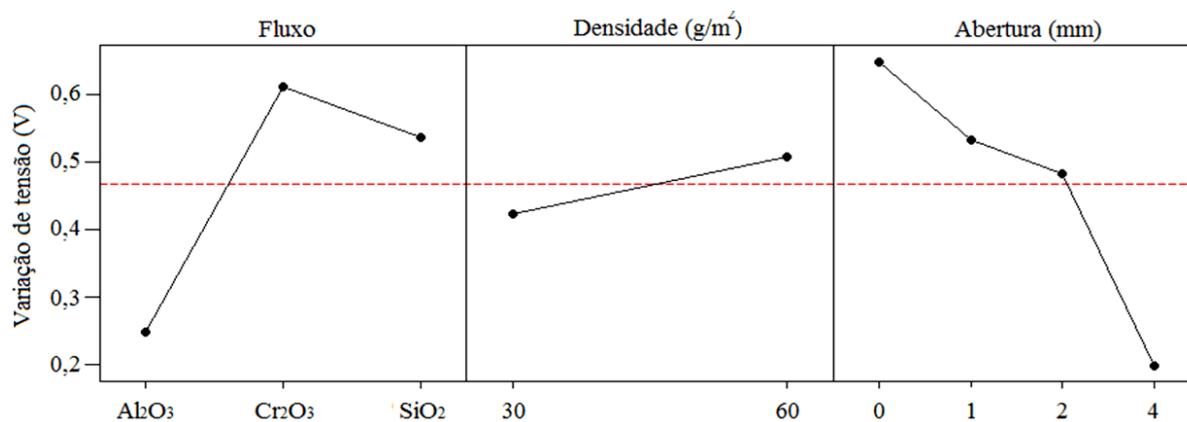


Figura 3. Efeitos principais do tipo de fluxo, densidade e abertura na variação da tensão do arco. A linha tracejada vermelha representa a média geral de variação de tensão.

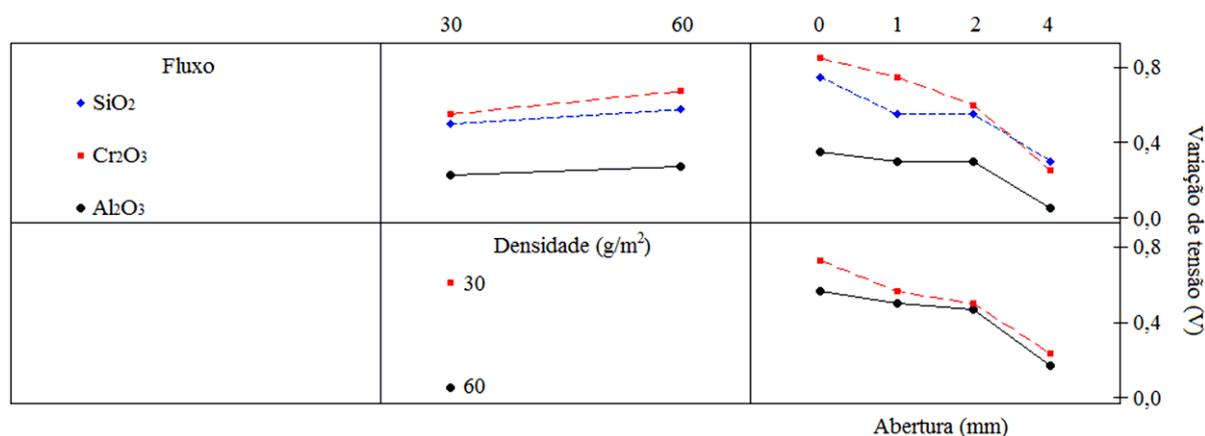


Figura 4. Análise de interação entre tipo de fluxo, densidade e abertura na variação da tensão do arco.

Tabela 4. Análise de variância para a variação de tensão do arco elétrico.

Fator	Estatística F	p-valor
Tipo de fluxo	14,96	0,005
Densidade	2,13	0,195
Abertura	11,18	0,007
Tipo de fluxo*Densidade	0,15	0,865
Tipo de fluxo*Abertura	0,60	0,723
Densidade*Abertura	0,26	0,855

Quanto ao efeito da abertura na camada de fluxo, os resultados indicam uma redução da variação na tensão do arco para maiores aberturas (Figuras 3 e 4), sendo que, usando o fluxo de alumina com uma abertura de 4 mm, a tensão de soldagem praticamente não se alterou na transição entre as soldagens TIG e A-TIG. Rückert et al. [13] encontraram uma redução similar da variação de tensão com a abertura em testes utilizando o fluxo de sílica. Segundo estes, a área sem fluxo facilita a formação da mancha anódica e estabiliza o arco em baixas correntes, reduzindo sua tensão de operação.

3.2. Filmagem frontal e lateral do arco

As Figuras 5 e 6 mostram imagens da região do arco extraídas de filmagens realizadas com fluxo de sílica. Na primeira figura, o arco é observado frontalmente, enquanto, na segunda, este é visto lateralmente.

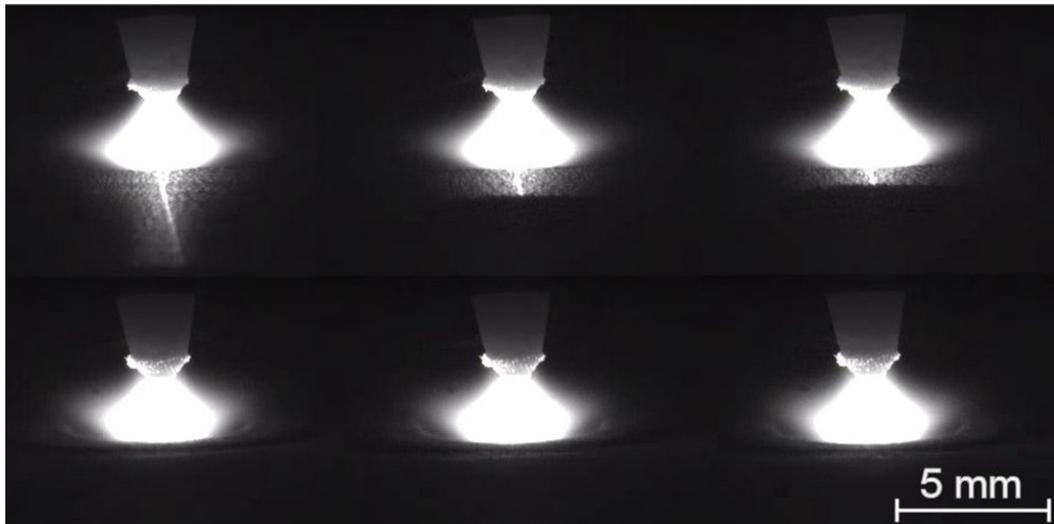


Figura 5. Imagens da região do arco filmada de frente durante um teste com fluxo de SiO_2 com densidade superficial de 60 g/m^2 (S60/0). As três imagens superiores correspondem à região do cordão sem fluxo e as três inferiores, com fluxo.

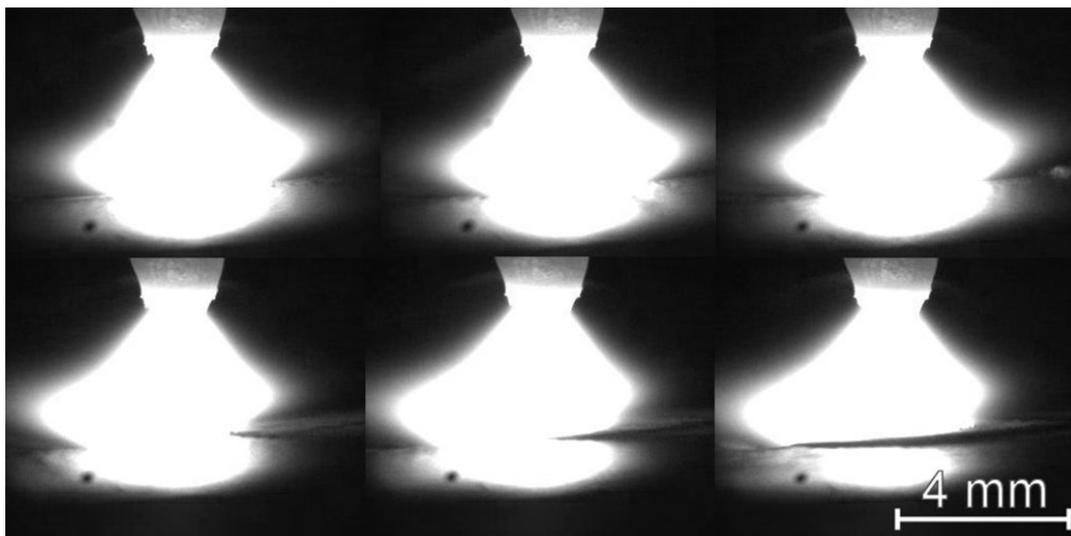


Figura 6. Imagens da região do arco filmada de lado durante um teste com fluxo de SiO_2 (S60/0). As três imagens superiores correspondem à região do cordão sem fluxo e as três inferiores, com fluxo. O sentido de soldagem é da esquerda para a direita.

As imagens frontais (Figura 5) apresentam poucas variações no formato do arco com a presença do fluxo (Tabela 5). Isto foi confirmado pela análise estatística da diferença de largura do arco nas soldagens TIG e A-TIG, que não indicou a ocorrência de uma constrição significativa do arco. A maioria dos resultados sugere até mesmo uma maior largura do arco durante a soldagem A-TIG e, nos resultados que indicam uma possível constrição do arco, a redução de sua largura foi inferior a 1%. Assim, com a metodologia e equipamentos utilizados, não foi possível comprovar a ocorrência de constrição do arco durante a soldagem TIG com fluxos simples de óxido.

Pela análise de um modelo matemático, Skvortsov [20] não encontrou evidências de que o arco sofra contração devido à captura de elétrons por átomos de elementos eletronegativos na sua atmosfera. Lowke et al. [21], também por modelagem matemática, concluíram que a captura de elétrons por átomos de oxigênio no arco teria pouca importância no aumento de penetração na soldagem TIG com fluxos. Contudo, o mesmo modelo sugere a possibilidade de redução das dimensões da mancha anódica pela constrição mecânica do arco. Por outro lado,

Tabela 5. Variação das diferenças de largura do arco entre o processo A-TIG e TIG medidas em imagens frontais do arco.

Teste	Fluxo	Densidade (g/m ²)	Abertura (mm)	Variação da largura do arco	
				(mm)	(%)
2	Cr ₂ O ₃	30	1	0,17	4,4
5	Cr ₂ O ₃	60	0	0,17	4,4
7	Cr ₂ O ₃	60	2	0,07	1,9
13	SiO ₂	60	0	-0,01	-0,3
14	SiO ₂	60	1	0,09	2,5
15	SiO ₂	60	2	-0,03	-0,7
21	Al ₂ O ₃	60	0	0,10	2,5
23	Al ₂ O ₃	60	2	0,10	2,4

Obs.: Diferenças positivas indicam uma menor largura do arco TIG.

existem na literatura vários trabalhos [3,10,17,22-25] cujos resultados indicam a ocorrência de constrição do arco considerando tanto a sua origem química como mecânica.

Li et al. [10] indicam que o aumento de penetração observado com a aplicação de SiO₂ e TiO₂ possuem razões distintas. Com SiO₂, a constrição mecânica do arco seria o mecanismo principal para aumentar a penetração da solda. Com TiO₂, o efeito Marangoni seria o mecanismo principal e a constrição mecânica teria um papel secundário. O SiO₂, por ser um óxido covalente, tem uma maior resistividade elétrica, o que favoreceria a constrição mecânica do arco.

Tseng e Lin [22] observaram constrição do arco elétrico quando micro e nanopartículas de sílica foram usadas como fluxo, enquanto que micro e nanopartículas de alumina não geraram constrição do arco. Segundo os autores a sílica, por ter menor estabilidade térmica que a alumina, conseguiu fornecer quantidade suficiente de oxigênio à poça de fusão para a ocorrência do efeito Marangoni. Além disso, uma maior quantidade de elétrons seria capturada pelos átomos de silício do que pelos átomos de alumínio, pelo fato do silício possui maior eletroafinidade, causando a constrição química do arco. Assim, os autores acreditam na atuação conjunta do efeito Marangoni e da constrição química do arco.

Segundo Ahmadi e Ebrahimi [25], o uso de sílica e cromita pode ocasionar a constrição do arco elétrico, sendo o efeito da sílica mais acentuado. Uma possível explicação seria a maior resistividade elétrica da sílica (um óxido covalente) em relação aos outros óxidos. Nesse caso, o contato elétrico entre o eletrodo e a superfície do fluxo seria mais difícil, e seria formado somente em uma pequena região do metal base onde o fluxo é decomposto pela energia do arco. Assim, a coluna do arco teria menor diâmetro, evidenciando sua constrição.

Sire e Marya [17] observaram a ocorrência da constrição do arco durante a soldagem FB-TIG de alumínio com uso de sílica. Os autores sugerem que no processo FB-TIG a constrição mecânica do arco se tornaria mais relevante que a constrição química, o que é atribuído às elevadas resistividade elétrica e temperatura de fusão da sílica.

Assim, percebe-se que, embora a constrição do arco na presença de fluxo seja bem documentada em diversos trabalhos, a sua ocorrência e, particularmente, a sua importância na formação do cordão de solda é questionada por alguns autores, em especial a constrição pela captura de elétrons por certos elementos. Neste aspecto, as observações feitas e a metodologia adotada no presente trabalho, não permitiram evidenciar indícios de constrição do arco.

A análise das filmagens laterais indicou, em alguns casos, uma deflexão do arco em sentido oposto ao de seu avanço. A maior deflexão foi encontrada com o uso da sílica, cujo índice de simetria atingiu o valor mínimo de 0,6 para o teste S60/0. Valores deste índice menores que um, mas de aproximadamente 0,9, foram observados com os fluxos de Cr₂O₃ e Al₂O₃.

Segundo Rückert et al. [13], no caso da sílica, a deflexão está relacionada com a elevada resistividade elétrica da sílica. Assim, o arco tenderia a atrasar em relação ao eletrodo devido à chegada, à frente da poça de fusão, de novas camadas de fluxo. Li et al. [10] acreditam que a deflexão, no caso da sílica, ocorre pelo fato da camada de sílica atrás do arco elétrico ser parcialmente fundida, vaporizada e expulsa pela passagem do mesmo, o que facilita

o contato elétrico entre o arco e a peça. Com os três fluxos, foram observados tanto um aumento da tensão como a deflexão do arco para trás. Contudo, não se observou uma correlação direta entre as intensidades da deflexão e da variação da tensão. Assim, os resultados obtidos não permitem relacionar o aumento da tensão de soldagem devido à presença do fluxo apenas com a deflexão do arco como indicado por Rückert et al. [13].

3.3. Aspecto e formato do cordão

Uma redução na largura do cordão e aumento de penetração durante a transição da soldagem sem fluxo para a com fluxo foram observados para todos os fluxos testados nas suas diferentes densidades superficiais (Figuras 7 e 8). Na Figura 7 percebe-se que, na soldagem A-TIG, os cordões de solda com cromita apresentaram um melhor acabamento superficial, seguidos dos feitos com sílica e alumina. De forma similar, Tseng e Hsu [26] afirmam que a sílica produz um acabamento superficial superior quando comparada com a alumina.

Nos testes feitos com alumina, alguns cordões apresentaram após a transição uma pequena extensão do cordão com irregularidades superficiais (região A-TIG irregular), ver Figuras 7e, f. Nos testes realizados com filmagem foi observado que, na entrada da região recoberta com alumina, o jato de plasma ou o próprio gás de proteção removiu parte da camada de fluxo. Este efeito cessava após certo tempo e pode ser a causa da variação do aspecto do cordão obtida na soldagem A-TIG com alumina.

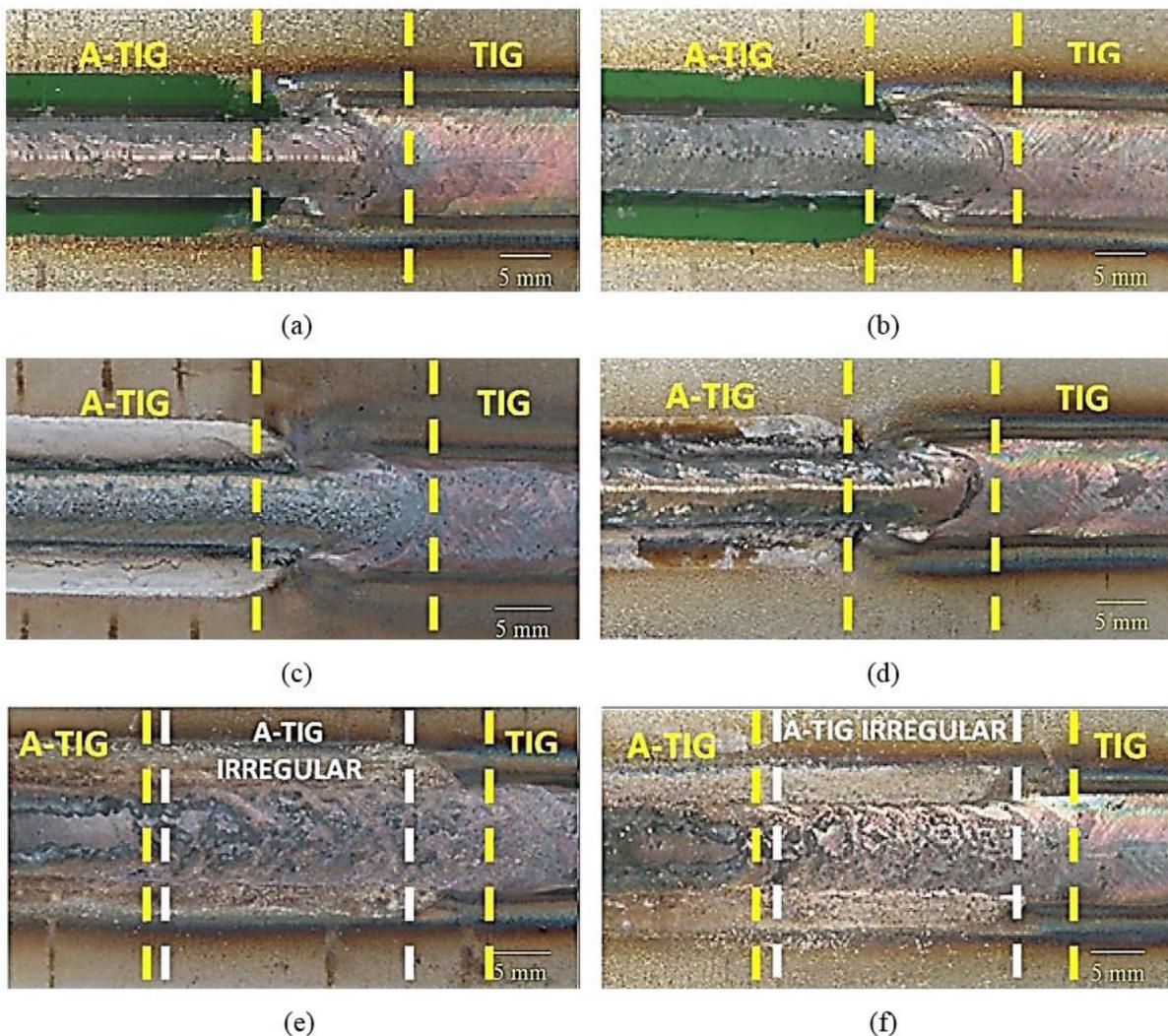


Figura 7. Aspecto dos cordões de solda dos testes: (a) C30/1; (b) C60/0; (c) S30/1; (d) S60/0; (e) A30/1; (f) A60/0.

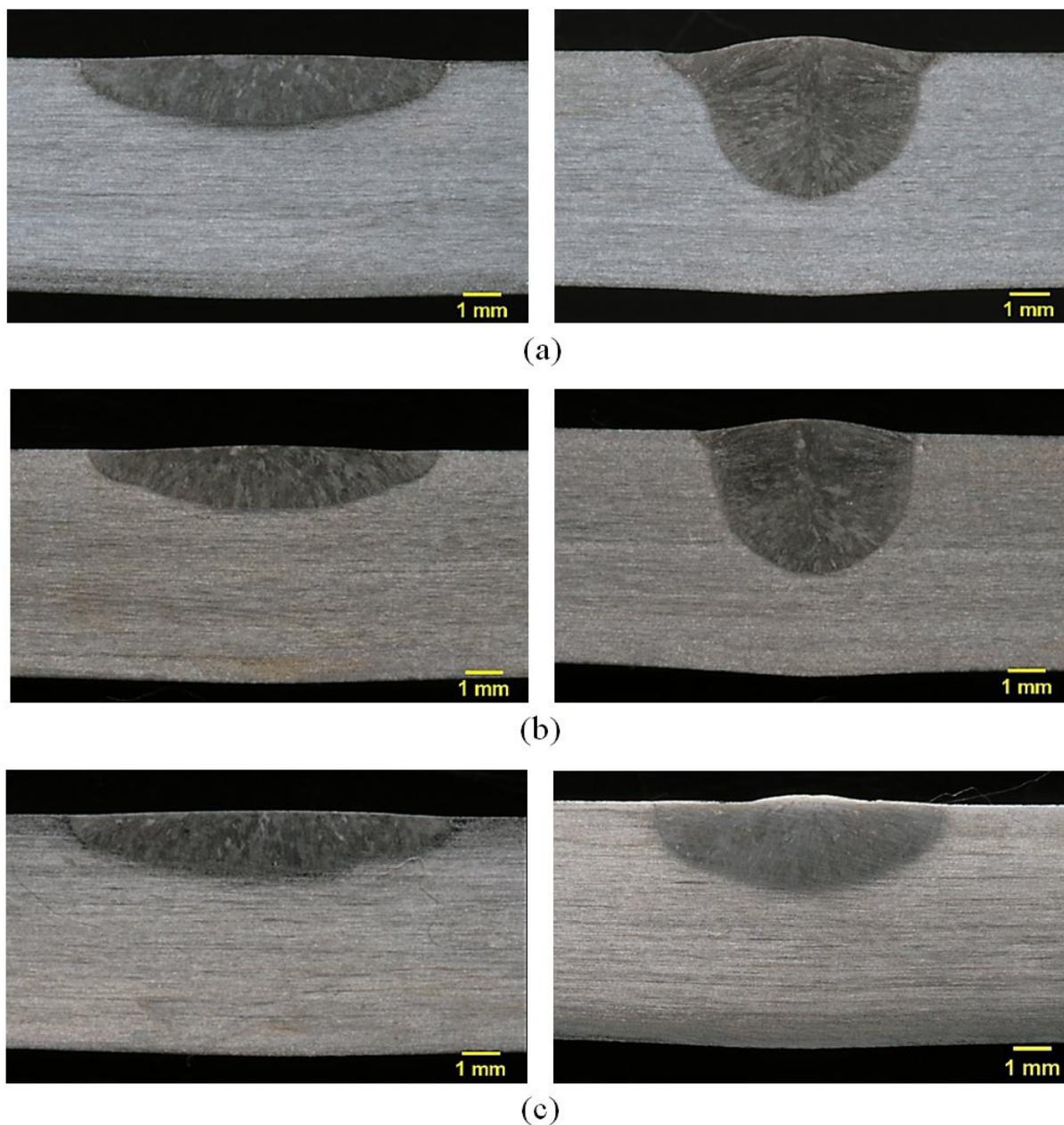


Figura 8. Macrografias TIG (à esquerda) e A-TIG (à direita): (a) C30/1; (b) S30/1 e (c) A30/1.

No geral, verificou-se, como esperado, que maiores quantidades de fluxo geraram maior quantidade de escória. Uma maior densidade foi mais negativa para o aspecto superficial no caso dos testes com sílica.

A Figura 8 mostra seções transversais de alguns cordões nas regiões sem e com fluxo. Percebe-se, além da redução de largura já indicada, o aumento de penetração na soldagem com fluxo. Observa-se, também, o efeito menos significativo do fluxo de Al_2O_3 no formato do cordão.

Gráficos mostrando o efeito dos fatores analisados e de suas interações de 1ª ordem são mostrados nas Figuras 9 e 10 para a variação da largura do cordão entre as soldagens TIG e A-TIG. A Tabela 6 resume os resultados das análises de variância feitas considerando os fatores e suas interações de 1ª ordem para as variações de largura, penetração, área da seção transversal do cordão (A_f) e razão penetração/largura (P/L).

Para um nível de 5% de significância, nas condições estudadas, a análise estatística indica que o tipo de fluxo influencia a variação de todos os parâmetros geométricos do cordão analisados. Com exceção da largura do

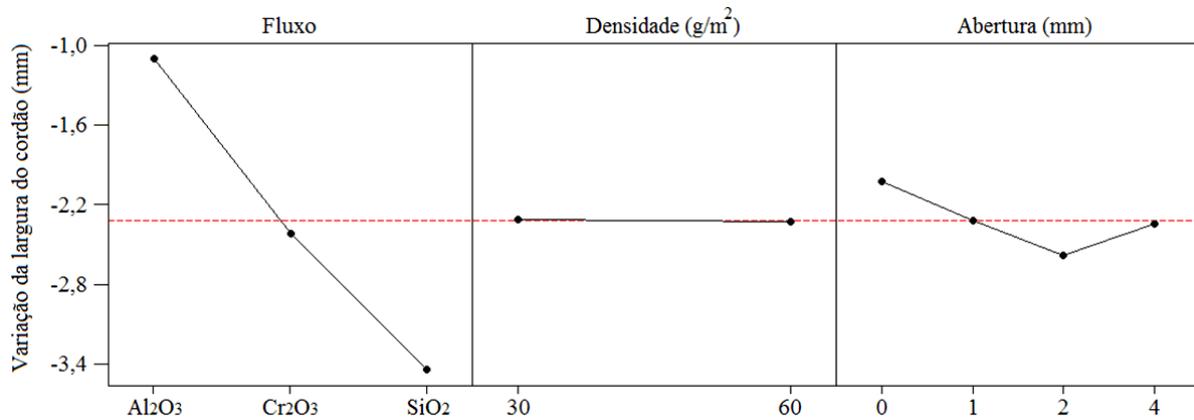


Figura 9. Efeitos principais do tipo de fluxo, densidade e abertura na variação da largura do cordão. A linha tracejada vermelha representa a média geral de variação da largura do cordão.

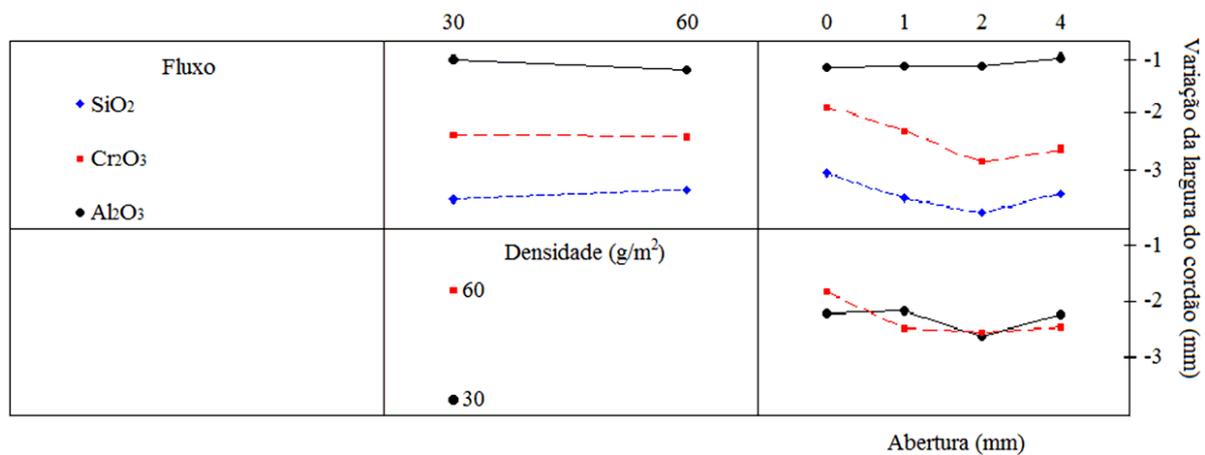


Figura 10. Análise de interação entre tipo de fluxo, densidade e abertura na variação da largura do cordão.

Tabela 6. Análise de variância para a variação dos parâmetros do cordão. Os resultados em negrito apresentam nível de significância inferior a 5%.

Fator	Largura do cordão		Penetração		Área do cordão		Razão P/L	
	F	p-valor	F	p-valor	F	p-valor	F	p-valor
Tipo de fluxo (F)	168,50	0,000	315,92	0,000	58,64	0,000	831,77	0,000
Densidade (D)	0,03	0,866	0,09	0,772	1,75	0,234	0,35	0,577
Abertura (A)	5,00	0,045	5,11	0,043	6,28	0,028	4,39	0,059
F x D	1,07	0,399	4,48	0,064	4,93	0,054	8,19	0,019
F x A	1,77	0,252	1,46	0,327	1,49	0,319	4,41	0,047
D x A	2,24	0,184	1,43	0,324	2,32	0,175	2,38	0,169

cordão (Figura 11), que variou de forma mais expressiva nos testes com SiO_2 , os valores das diferenças entre os parâmetros geométricos dos cordões de solda A-TIG e os das soldas sem fluxo foram similares nos testes feitos com os fluxos de SiO_2 e Cr_2O_3 e menores (em valor absoluto) nos testes com Al_2O_3 . Os resultados mostraram uma redução da largura do cordão e um aumento de sua penetração, da área de sua seção transversal e da razão penetração/largura (P/L) nas soldas com fluxo. Assim, em média, o uso do fluxo de sílica reduziu a largura, em relação à solda sem fluxo em 38%, e aumentou a penetração em cerca de 140%. O fluxo de alumina, por outro lado, reduziu a largura do cordão de 12% e aumentou a penetração em 30% em média.

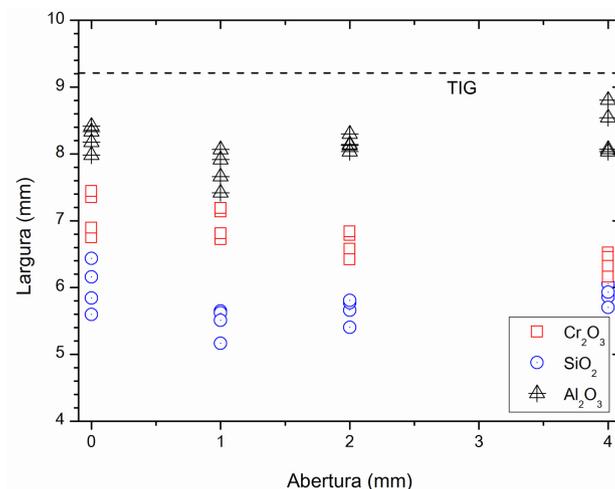


Figura 11. Largura do cordão de solda em função do tipo de fluxo e abertura na camada de fluxo. A linha tracejada representa a largura média dos cordões TIG.

A análise estatística também indica que a abertura na camada de fluxo afeta significativamente a largura, penetração e área da seção transversal do cordão, porém, neste caso, os p-valores ficaram, em geral, próximos do limite de 5%. Para a razão P/L, a análise não indicou significância suficiente, mas o parâmetro ficou apenas ligeiramente superior a 5%. Por outro lado, para este parâmetro geométrico, a análise indicou que as interações entre o tipo de fluxo e a abertura (F x A) e entre o tipo de fluxo e sua densidade superficial (F x D) seriam significativas.

As Figuras 11 a 14 mostram os resultados das medidas dos diferentes parâmetros geométricos em função do tipo de fluxo e da abertura da camada. Com relação a este último parâmetro, refletindo os valores relativamente altos de p-valor encontrados, as variações observadas não são muito claras. Notam-se, contudo, indícios do formato do cordão obtido com fluxo de Al₂O₃ se aproximar ao formato conseguido na soldagem sem fluxo quando a abertura na camada de fluxo é aumentada. Para os outros fluxos, parece haver uma tendência da largura do cordão se reduzir ligeiramente quando a abertura na camada de fluxo é aumentada.

Os resultados com fluxo de sílica para as variações da tensão do arco e da penetração do cordão em função da abertura (Figuras 4 e 11, respectivamente) estão razoavelmente de acordo com o trabalho de Rückert et al. [13]. Os resultados mostram que sílica e cromita tiveram maior influência no aumento da razão P/L, em média, de 280% e 220%, respectivamente. Modenesi et al. [27] e Lu et al. [28] constatarem resultados semelhantes, revelando a eficácia destes óxidos para afetar a relação P/L no processo A-TIG.

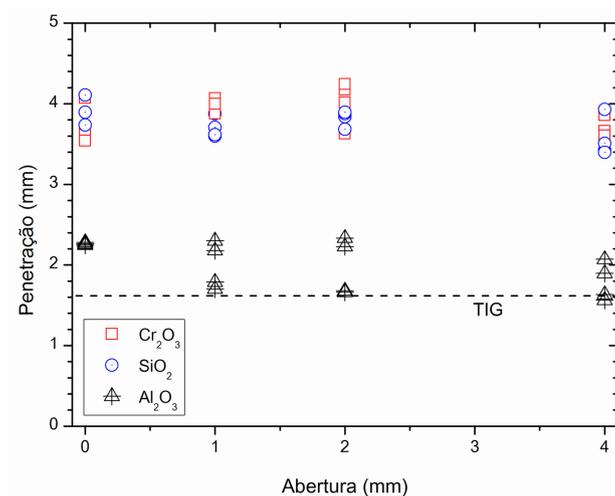


Figura 12. Penetração do cordão em função do tipo de fluxo e abertura na camada de fluxo. A linha tracejada representa a penetração média dos cordões TIG.

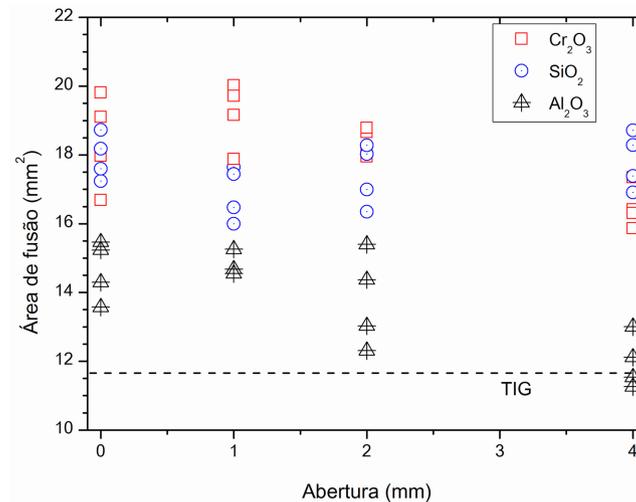


Figura 13. Área da seção transversal do cordão em função do tipo de fluxo e abertura na camada de fluxo. A linha tracejada representa a área média dos cordões TIG.

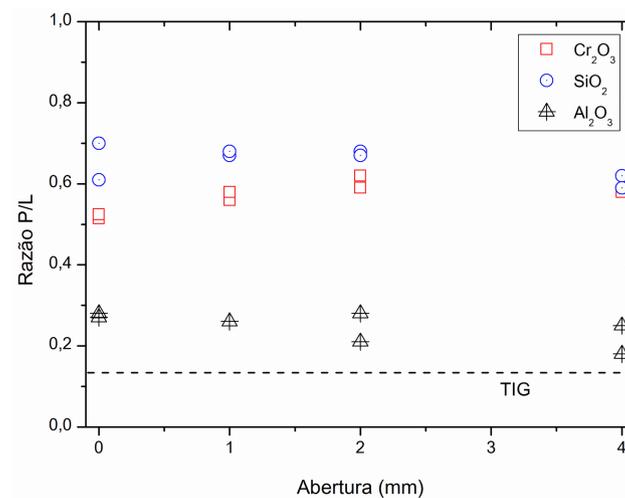


Figura 14. Razão P/L em função do tipo de fluxo e abertura na camada de fluxo. A linha tracejada representa a razão P/L média dos cordões TIG.

3.4. Considerações finais

A presença dos três fluxos reduziu a largura do cordão e aumentou a sua penetração e área fundida em relação ao cordão obtido sem fluxo. Os fluxos de sílica e de cromita alteraram de forma mais intensa a morfologia do cordão do que a alumina. Contudo, embora tenha tido um menor efeito, a alumina causou mudanças morfológicas no cordão de solda, ao contrário do que é, em geral, afirmado na literatura.

A presença de uma abertura central sem fluxo pouco alterou a largura do cordão em relação à soldagem com camada de fluxo de abertura nula. Nas soldas feitas com fluxo de alumina, a largura do cordão parece aumentar com uma maior abertura sem fluxo e tender para os valores obtidos nos testes sem fluxo. Este efeito possivelmente está ligado à reduzida capacidade da alumina de afetar o formato do cordão. Com o aumento da abertura, a quantidade de fluxo em contato com o arco é reduzida e, assim, também é reduzida a sua capacidade de afetar o formato do cordão.

Nas soldas feitas com os outros fluxos, observa-se uma possível redução na largura do cordão quando a abertura sem fluxo é aumentada. Embora a significância desta redução seja questionável do ponto de vista estatístico, ela

poderia ser associada com um efeito de constrição do arco pelas faixas laterais de fluxo. No presente trabalho, contudo, não foram encontrados indícios de uma constrição do arco por quaisquer dos fluxos estudados. Além disso, não foi observado um aumento de penetração com a existência da camada central sem fluxo, o que poderia ser esperado no caso de uma constrição mecânica do arco.

Por outro lado, considerando apenas a atuação da convecção de Marangoni na soldagem A-TIG, esperaria-se, com a presença da abertura sem fluxo, cordões de solda mais largos, com menores penetrações e menores áreas fundidas, pois esta abertura diminuiria a quantidade de fluxo incorporada à poça de fusão. De acordo com Lu et al. [29] quanto mais fluxo é incorporado à poça de fusão, dentro de certos limites, mais intenso é o mecanismo da convecção de Marangoni no processo A-TIG. Colen [30] observou, com o uso de cromita, indícios de que, para densidades superficiais de 15 e de 120 g/m², o aumento da penetração no processo A-TIG tende a ser menor do que para densidade de 30 ou 60 g/m², que foram as usadas no presente trabalho. Assim, pelo menos para os testes com menor densidade superficial de fluxo, deveria se esperar uma tendência para a redução (em módulo) das variações dos parâmetros geométricos do cordão, o que não foi observado neste trabalho.

Contudo, de forma qualitativa, é possível explicar uma redução na largura do cordão pela existência de uma abertura sem fluxo com base na convecção de Marangoni. Neste caso, pela proximidade da camada de fluxo, haveria uma maior concentração de oxigênio no metal líquido próximo das bordas da poça de fusão. Isto fortaleceria uma variação negativa da energia de superfície do metal líquido com a temperatura e favoreceria a convecção de Marangoni da borda para o centro da poça. Berthier et al. [31] mostram que ocorre a deflexão lateral do cordão quando apenas um lado da junta recebe o fluxo, sendo esta deflexão em direção ao lado da junta sem fluxo. Segundo Modenesi [11], esta deflexão é similar à observada na soldagem de uma junta com corrida de um aço inoxidável austenítico com diferentes teores de enxofre, a qual é comumente associada à convecção de Marangoni.

Assim, para as condições estudadas, o comportamento geral das variações de morfologia do cordão com a presença da abertura sem fluxo parece sugerir que a convecção de Marangoni seja o principal mecanismo responsável pelas mudanças na morfologia do cordão na soldagem A-TIG de aços inoxidáveis austeníticos.

4. Conclusões

Segundo os resultados obtidos, as principais conclusões deste trabalho foram:

- a) Com a metodologia e equipamentos utilizados, a filmagem frontal do arco na transição entre a soldagem sem e com fluxo não apresentou indícios de constrição do arco elétrico. A ausência de indícios de constrição do arco pode ser usada como uma prova da ocorrência da convecção de Marangoni e sua influência no formato do cordão na soldagem A-TIG.
- b) A filmagem lateral do arco elétrico indicou, na presença do fluxo de sílica, uma deflexão do arco em sentido oposto ao de seu avanço. Deflexões similares, porém menores, foram observadas nos testes com fluxo de cromita e alumina. Esta deflexão pode estar associada à necessidade do arco para fundir a camada de fluxo e ao isolamento elétrico devido a esta.
- c) A presença dos fluxos elevou a tensão do arco em relação à da soldagem sem fluxo. Cromita e sílica causaram maior variação de tensão, 0,6 e 0,53 V, respectivamente, em média. A alumina teve um efeito menos importante, com uma variação média em torno de 0,25 V. Maiores aberturas sem fluxos tenderam a reduzir a variação da tensão do arco.
- d) Os fluxos de sílica e de cromita afetaram de forma mais intensa a morfologia do cordão de solda em comparação à alumina, causando maiores reduções na largura do cordão e maiores aumentos de penetração. Por exemplo, com estes fluxos as penetrações foram mais do que o dobro das obtidas nas soldas feitas sem fluxo. Embora a alumina tenha causado um menor efeito, o seu uso gerou mudanças morfológicas no cordão, ao contrário do que, em geral, afirma a literatura.
- e) O acabamento superficial na região A-TIG das soldas com alumina foi inferior ao obtido com cromita e sílica.
- f) A abertura central sem fluxo causou variações pouco significativas no formato do cordão quando fluxos de SiO₂ e Cr₂O₃ foram usados. Nos testes com Al₂O₃, foram observados indícios de aumento da largura e de redução da penetração e área fundida do cordão de solda com o aumento dessa abertura. Estas variações

foram associadas com a possibilidade de que a convecção de Marangoni seja o mecanismo mais relevante para as alterações no formato do cordão que ocorrem na soldagem A-TIG.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à CAPES-PROEX pelo apoio financeiro dado à execução deste trabalho e pela concessão de bolsa a alguns dos autores.

Referências

- [1] Jarvis BL. Gas tungsten arc welding. In: Ahmed N. New developments in advanced welding. Cambridge: Woodhead Publishing; 2005. 308 p.
- [2] Lohse M, Füssel U, Schuster H, Friedel J, Schnick M. Keyhole welding with CF-TIG (cathode focussed GTA). *Weld World*. 2013;57(5):735-741. <http://dx.doi.org/10.1007/s40194-013-0074-y>.
- [3] Howse DS, Lucas W. An investigation into arc constriction by active fluxes for TIG (A-TIG) welding. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2000;5(3):189-193. <http://dx.doi.org/10.1179/136217100101538191>.
- [4] Azevedo AGL, Ferraresi VA, Farias JP. Soldagem de um aço inoxidável ferrítico com o processo A-TIG. *Soldagem Insp*. 2009;14(1):2-9.
- [5] Wang L, Shen J, Xu N. Effects of TiO₂ coating on the microstructures and mechanical properties of tungsten inert gas welded AZ31 magnesium alloy joints. *Materials Science and Engineering A*. 2011;528(24):7276-7284. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2011.06.014>.
- [6] Kovalenko DV, Pavlyak DA, Sudnik VA, Kovalenko IV. Adequacy of thermohydrodynamic model of through penetration in TIG and A-TIG welding of Nimonic-75 Nickel alloy. *The Paton Welding Journal*. 2010;10:2-6.
- [7] Sándor T. Comparison of penetration profiles of different TIG process variations. In: Proceedings of the Stainless Steel World Conference 2009; 2009 Nov 12; Maastricht, Hollandia. 16 p. Artigo P9047.
- [8] Sándor T, Mekler C, Dobránszky J, Kaptay G. 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;44(1):351-361. <http://dx.doi.org/10.1007/s11661-012-1367-2>.
- [9] Heiple CR, Roper JR. Mechanism for minor element effect on GTA fusion zone geometry. *Welding Journal*. 1982;61(4):97s-102s.
- [10] Li Q, Wang X, Zou Z, Wu J. Effect of activating flux on arc shape and arc voltage in tungsten inert gas welding. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 2007;17(3):486-490. [http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326\(07\)60120-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326(07)60120-4).
- [11] Modenesi PJ. A química da formação do cordão na soldagem TIG. *Soldagem & Inspeção*. 2013;18(3):287-300. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92242013000300011>.
- [12] Liu L, Zhang Z, Song G, Shen Y. Effect of cadmium chloride flux in active flux TIG welding of magnesium alloys. *Materials Transactions*. 2006;47(2):446-449. <http://dx.doi.org/10.2320/matertrans.47.446>.
- [13] Rückert G, Huneau B, Marya S. Optimizing the design of silica coating for productivity gains during the TIG welding of 304L stainless steel. *Materials & Design*. 2007;28(9):2387-2393. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2006.09.021>.
- [14] Leconte S, Paillard P, Chapelle P, Henrion G, Saindrenan J. Effects of flux containing fluorides on TIG welding process. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2007;12(2):120-126. <http://dx.doi.org/10.1179/174329307X159810>.
- [15] Marya M, Edwards GR. Chloride contributions in flux-assisted GTA welding of magnesium alloys. *Welding Journal*. 2002;81(12):291s-298s.
- [16] Richetti A. Análise e modelagem empírica do processo de soldagem a plasma com "keyhole" em aço inoxidável [tese de doutorado]. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia; 2003. 292 p.
- [17] Sire S, Marya S. On the selective silica application to improve welding performance of the tungsten arc process for a plain carbon steel and for aluminium. *Comptes Rendus. Mécanique*. 2002;330(2):83-89. [http://dx.doi.org/10.1016/S1631-0721\(02\)01431-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1631-0721(02)01431-6).
- [18] Middel W, Den Ouden G. The effect of additives on arc characteristics in GTA welding. In: Proceedings of the 8th International Conference in Welding Research; 1998 June 1-5; Pine Mountain, Georgia, USA. Materials Park: ASM International; 1998. p. 394-399.
- [19] Modenesi PJ, Apolinário ER, Pereira IM. TIG Welding with single-component fluxes. *Journal of Materials Processing Technology*. 2000;99(1):260-265. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00435-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00435-5).
- [20] Skvortsov EA. Role of electronegative elements in contraction of the arc discharge. *Welding International*. 1998;12(6):471-475. <http://dx.doi.org/10.1080/09507119809448517>.
- [21] Lowke JJ, Tanaka M, Ushio M. Mechanisms giving increased weld depth due to a flux. *Journal of Physics. D, Applied Physics*. 2005;38(18):3438-3445. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/38/18/018>.
- [22] Tseng KH, Lin PY. UNS S31603 stainless steel tungsten inert gas welds made with microparticle and nanoparticle oxides. *Materials*. 2014;7(6):4755-4772. <http://dx.doi.org/10.3390/ma7064755>.
- [23] Vilarinho LO, Blackburn J, Raghunathan S, Lucas B. Spectroscopic measurement during a-tig welding of austenitic stainless steel. In: Proceedings of 20th International Congress of Mechanical Engineering; 2009; Gramado, RS, Brazil. Rio de Janeiro: ABCM; 2009.
- [24] Tseng KH, Chen KL. Comparisons between TiO₂ and SiO₂ flux assisted TIG welding processes. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2012;12(8):6359-6367. PMID:22962749. <http://dx.doi.org/10.1166/jnn.2012.6419>.
- [25] Ahmadi E, Ebrahimi AR. Welding of 316L austenitic stainless steel with activated tungsten inert gas process. *Journal of Materials*

- Engineering and Performance. 2015;24(2):1065-1071. <http://dx.doi.org/10.1007/s11665-014-1336-6>.
- [26] Tseng KH, Hsu CY. Performance of activated TIG process in austenitic stainless steel welds. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010;211:503s-512s.
- [27] Modenesi PJ, Colen P, No, Apolinário ER, Dias KB. Efeito da densidade do fluxo e da presença de aditivos na soldagem ATIG de aço inoxidável austenítico. *Soldagem & Inspeção*. 2013;18(2):116-126.
- [28] Lu S, Fujii H, Sugiyama H, Tanaka M, Nogi K. Weld penetration and Marangoni convection with oxide fluxes in GTA welding. *Materials Transactions*. 2002;43(11):2926-2931. <http://dx.doi.org/10.2320/matertrans.43.2926>.
- [29] Lu S, Fujii H, Sugiyama H, Nogi K. Mechanism and optimization of oxide fluxes for deep penetration in gas tungsten arc welding. *Metallurgical and Materials Transactions. A, Physical Metallurgy and Materials Science*. 2003;34A(9):1901-1907. <http://dx.doi.org/10.1007/s11661-003-0155-4>.
- [30] Colen P, No. Efeito da concentração do fluxo na soldagem ATIG de aço inoxidável austenítico [dissertação de mestrado]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2012. 77 p.
- [31] Berthier A, Paillard P, Carin M, Valensi F, Pellerin S. TIG and A-TIG welding experimental investigations and comparison to simulation Part 1: identification of Marangoni effect. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2012;17(8):609-615. <http://dx.doi.org/10.1179/1362171812Y.0000000024>.