

# ESTUDO DO EFEITO DE FLUXOS NA SOLDAGEM ATIG DE ALUMÍNIO<sup>1</sup>

Wagner Custódio de Oliveira<sup>2</sup>  
Paulo José Modenesi<sup>3</sup>  
Cícero Murta Diniz Starling<sup>4</sup>  
Carlos Henrique Lopes<sup>5</sup>

## Resumo

Estudou-se a viabilidade de aplicação do processo ATIG (“Activated Tungsten Inert Gas”) na soldagem de alumínio, visando identificar formulações de fluxos mais efetivas na remoção da alumina, camada superficial de óxido que dificulta a passagem da corrente elétrica e a soldagem deste material. Corpos de prova de alumínio foram soldados pelo processo ATIG com corrente contínua e eletrodo negativo. Utilizou-se soldagem mecanizada e uma fonte do tipo corrente constante com sistemas de deslocamento de tocha e aquisição de dados. Foram utilizados fluxos simples, de apenas um componente, compostos por fluoretos, cloretos ou óxidos, misturados em acetona e aplicados imediatamente antes da soldagem. Na análise dos resultados utilizou-se uma lupa estereoscópica, um programa de análise de imagens e um microscópio eletrônico de varredura. Os resultados foram comparados com os obtidos na soldagem TIG com corrente alternada sem a utilização de fluxo. Os fluxos compostos por cloretos de zinco, potássio e sódio e os fluoretos de alumínio e cálcio, apresentaram uma maior efetividade na remoção da camada de alumina. Na soldagem ATIG com cloretos e óxidos, parte do fluxo permaneceu aderida na região central do cordão de solda, enquanto que, na soldagem ATIG com fluoretos, parte do fluxo ficou aderida na periferia do cordão de solda. A observação da superfície das soldas por microscopia eletrônica de varredura mostrou que o mecanismo de limpeza atuante no processo ATIG difere do observado na soldagem TIG com corrente alternada sem a utilização de fluxo.

**Palavras-chave:** Alumínio; Soldagem ATIG; Fluxos.

## STUDY OF THE EFFECT OF THE FLUX ON ALUMINUM ATIG WELDING

### Abstract

The feasibility of using ATIG (active flux TIG) welding for surface oxide removal in aluminum welding with direct polarity was evaluated. Welding trials were performed in a mechanized jig using a constant current power supply. Welding parameters were recorded using a digital data acquisition system. Single component fluxes of fluoride, chloride or oxides, mixed with acetone were applied to aluminum specimen immediately before welding. Welding surface was observed using low power optical and scanning electronic microscopes, analyzed by image processing software, and compared with welds performed with alternate current and no flux. Zinc, potassium and sodium chloride, and aluminum and calcium fluoride fluxes were the most effective to remove the alumina layer. However, part of the flux always remained adhered to the weld surface and its location on the weld surface depends on the flux composition. Scanning electron microscopy observation of the weld surface reveals the mechanism of oxide removal from the aluminum surface by flux differs from that of the arc cleaning.

**Key words:** Aluminium; ATIG Welding; Flux.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ*

<sup>2</sup> *Engenheiro Mecânico, Msc, Doutorando do CPGEM- UFMG.*

<sup>3</sup> *Prof. Adjunto, PhD, Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais, UFMG.*

<sup>4</sup> *Prof. Adjunto, Dr., Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, UFMG.*

<sup>5</sup> *Graduando em Engenharia Metalúrgica, UFMG.*

## 1 INTRODUÇÃO

O alumínio, por suas excelentes propriedades físico-químicas, entre as quais se destacam o baixo peso específico, a resistência à corrosão e uma elevada condutividade térmica e elétrica e, ainda, por ser altamente reciclável, apresenta ampla utilização, tornando este, o metal não-ferroso, mais consumido no mundo.<sup>(1)</sup> Algumas de suas ligas apresentam elevados níveis de resistência mecânica que são obtidos através de tratamentos térmicos ou mecânicos, fazendo com que seja extremamente competitivo em relação aos seus concorrentes em diversas aplicações estruturais. Assim, estudos para o desenvolvimento ou a otimização de processos de união por soldagem de alumínio e suas ligas, com qualidade e baixo custo, são de fundamental importância.

Um dos processos mais utilizados na soldagem de alumínio é o GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) ou TIG (Tungsten Inert Gas), como é mais conhecido no Brasil. Neste processo, um arco elétrico é formado entre um eletrodo de tungstênio e a peça. A proteção é realizada por um gás ou por uma mistura de gases inertes. Uma das principais limitações deste processo é a baixa capacidade de fusão do metal base, o que limita a sua aplicação na soldagem de componentes de maior espessura.

Desenvolvida na União Soviética na década de 60, a soldagem TIG com fluxo (Processo TIG ativado – ATIG, Activated Tungsten Inert Gas) representa um método alternativo para aumentar fortemente a penetração do cordão de solda, sendo possível a soldagem em um único passe e sem metal de adição de componentes de até 6mm de espessura. Este processo foi estudado em ligas de titânio e nos aços, principalmente por pesquisadores de países ligados à antiga União Soviética, os quais associaram o aumento na penetração a um efeito de constrição do arco devido à redução da condutividade elétrica nas suas camadas mais externas, em função da captura de elétrons livres para a formação de íons negativos, principalmente de elementos halogênicos e, eventualmente, de oxigênio.<sup>(2-7)</sup> Atualmente, acredita-se que este não seja o principal mecanismo responsável pelo aumento da penetração no processo ATIG. Mudanças no sentido de circulação do metal líquido por ação de variações na tensão superficial (Efeito Marangoni) seriam o fator fundamental.<sup>(8-12)</sup>

Na soldagem de alumínio, além da baixa penetração que é um problema ainda mais crítico devido à sua elevada condutividade térmica, este material apresenta uma camada superficial de óxido refratário, a alumina ( $Al_2O_3$ ). Esta camada forma-se quase que instantaneamente e, portanto, deve ser removida imediatamente antes da soldagem, pois pode levar a um mau acabamento do cordão de solda e à formação de inclusões e porosidades. Trabalhos desenvolvidos sobre a soldagem ATIG de alumínio com fluxos compostos por cloretos ou fluoretos indicaram, além de um aumento na penetração do cordão de solda, que através da seleção adequada de um fluxo, pode-se obter uma razoável remoção da camada de alumina com corrente contínua e eletrodo negativo.<sup>(13,14)</sup> Esta configuração que não é usualmente utilizada na soldagem de alumínio e suas ligas possui muitas vantagens em termos de estabilidade e capacidade de fusão do metal base, aumentando ainda a vida útil do eletrodo. Além disto, dispensa o uso de um ignitor de alta frequência, o qual é prejudicial para equipamentos eletrônicos localizados próximos à área de soldagem. Este trabalho apresenta um estudo do efeito de fluxos simples, de apenas um componente, compostos por fluoretos, cloretos ou óxidos na soldagem ATIG de alumínio operando o processo com o eletrodo negativo. Os resultados são

comparados com os obtidos na soldagem TIG com corrente alternada sem a utilização de fluxo.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O metal base para a confecção dos corpos de prova, alumínio comercialmente puro, foi recebido na forma de chapas laminadas com uma espessura igual a 6,35mm (1/4"). A composição química deste material é apresentada na Tabela 1:

**Tabela 1.** Composição química (% em peso)

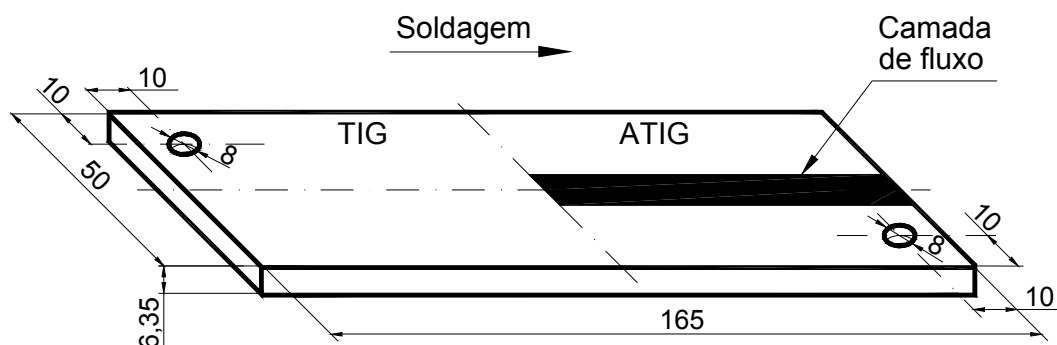
Al	Mn	Cu	Mg	Si	Fe	Zn
99,09	0,126	0,026	0,005	0,032	0,680	0,046

Fonte: Laboratório de Análises Químicas da UFMG.

Foram selecionados treze componentes para a elaboração de fluxos simples, de apenas um componente, sendo quatro fluoretos (KF, NaF,  $\text{AlF}_3$  e  $\text{CaF}_2$ ), seis cloretos (KCl, NaCl,  $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{BaCl}_2$  e  $\text{ZnCl}_2$ ) e três óxidos ( $\text{V}_2\text{O}_5$ , CaO e  $\text{SiO}_2$ ). Estes componentes foram mantidos em um forno tipo mufla a uma temperatura de 250°C por um tempo de 2 horas para secagem. Após este tempo, os mesmos foram transferidos para uma estufa onde permaneceram a uma temperatura de 100°C até o momento de sua preparação e aplicação na soldagem.

A preparação dos fluxos consistiu na mistura de 50mg de cada componente com acetona em um béquer, após a moagem do mesmo, em um gral de ágata. Uma balança analítica digital com precisão de 0,0001g foi usada na pesagem dos componentes.

A Figura 1 mostra as dimensões com que foram confeccionados os corpos de prova e a camada de fluxo, aplicada manualmente com um pincel sobre a metade da superfície do corpo de prova, imediatamente antes da soldagem. A acetona evaporava-se em segundos e a camada de fluxo ficava aderida ao corpo de prova.



**Figura 1.** Corpo de prova (Dimensões em mm).

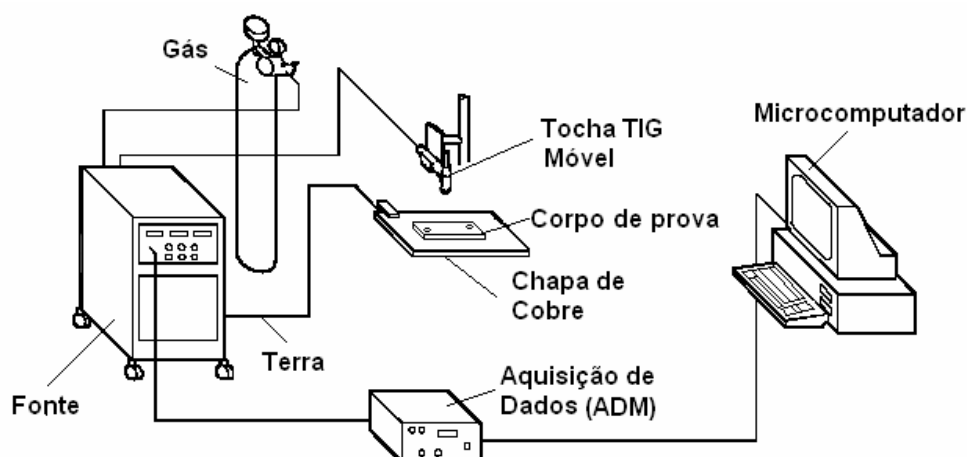
Utilizou-se soldagem mecanizada e uma fonte do tipo corrente constante com sistemas de deslocamento de tocha e aquisição de dados (Figura 2). Foi utilizada uma fonte transistorizada chaveada no secundário, INVERSAL 300. Na aquisição e registro de tensão e corrente de soldagem utilizou-se um sistema específico para soldagem (ADM – Arc Data Monitor da CRC, USA) conectado a um microcomputador. Um programa, SINAL, desenvolvido no LABSEND (Laboratório de Soldagem e Ensaio Não Destrutivos) foi usado no processamento dos dados. Os corpos de prova foram aparafusados sobre uma chapa de cobre posicionada sob a

tocha TIG e, antes do início da soldagem, fez-se a configuração do sistema de aquisição de dados para a leitura de tensão e corrente a uma taxa de aquisição de 10Hz e em um tempo de aproximadamente 30 segundos. Apenas um cordão de solda foi depositado em um único passe de soldagem para cada corpo de prova. Após o resfriamento, os corpos de prova foram lavados em água corrente. Foi soldado um corpo de prova nas mesmas dimensões, porém com a metade direita do cordão de solda com corrente alternada sem a aplicação de fluxo, para ser adotado como padrão de limpeza. A Tabela 2 apresenta os parâmetros de soldagem adotados.

**Tabela 2.** Parâmetros de soldagem

Corrente Alternada ( $I_{eficaz}$ )	180A
Corrente Contínua	150A
Comprimento de Arco	3mm
Velocidade de Soldagem	20cm/min
Tipo do Eletrodo	W 2%ThO <sub>2</sub>
Diâmetro do Eletrodo	3,2mm
Ângulo da Ponta do Eletrodo	60°
Gás	Argônio Puro
Vazão	12L/min

Os cordões de solda ATIG foram observados com uma lupa estereoscópica e comparados com o cordão de solda TIG com corrente alternada. As superfícies dos cordões de solda foram registradas com uma câmera fotográfica digital e uma resolução de três megapixels, mantendo constante e igual a 95mm a distância da lente da câmera ao corpo de prova. Utilizou-se uma mesa fotográfica, a qual permitiu a fixação da câmera e a padronização da iluminação. Foram usadas duas lâmpadas fluorescentes de 18W, sob o corpo de prova, e duas lâmpadas halógenas de 300W nos holofotes. Para minimizar a incidência direta da luz sobre a superfície do corpo de prova e obter uma iluminação uniforme, foi usada uma folha de papel A4 como anteparo em cada um dos holofotes.



**Figura 2.** Disposição dos equipamentos de soldagem e aquisição de dados.

Desenvolveu-se uma metodologia para quantificar a efetividade dos fluxos na remoção da camada de alumina. Com o auxílio de um programa de análise de imagens, uma área fixa de 500x120pixels nas imagens dos cordões de solda foi

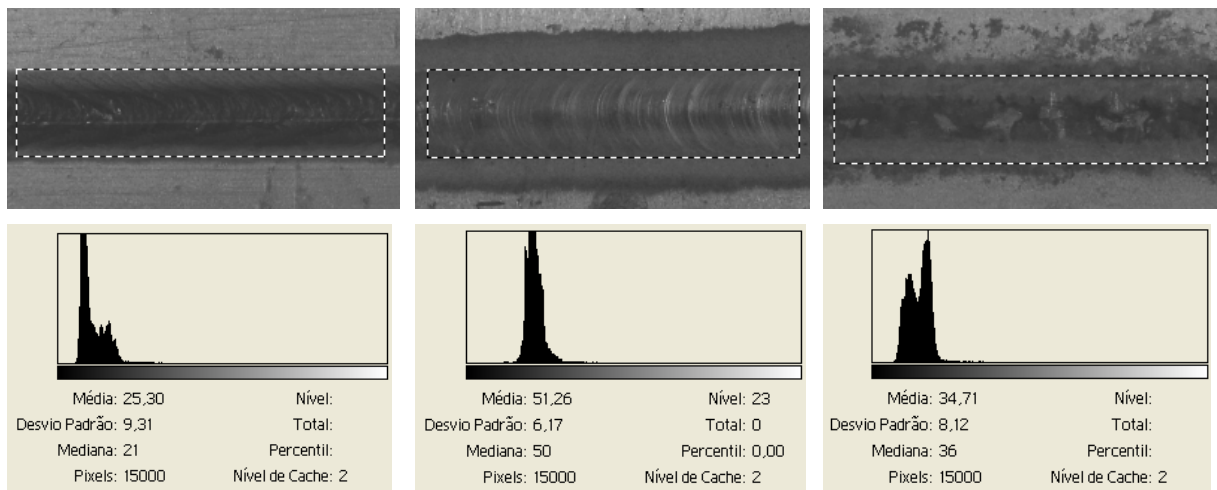
analisada. O programa forneceu a média e o desvio padrão dos valores de pixels nesta área mostrando-os em um histograma (Figura 3).

Para caracterizar as superfícies dos cordões de solda ATIG em relação à soldagem TIG com corrente alternada foram realizadas imagens das superfícies dos cordões de solda em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

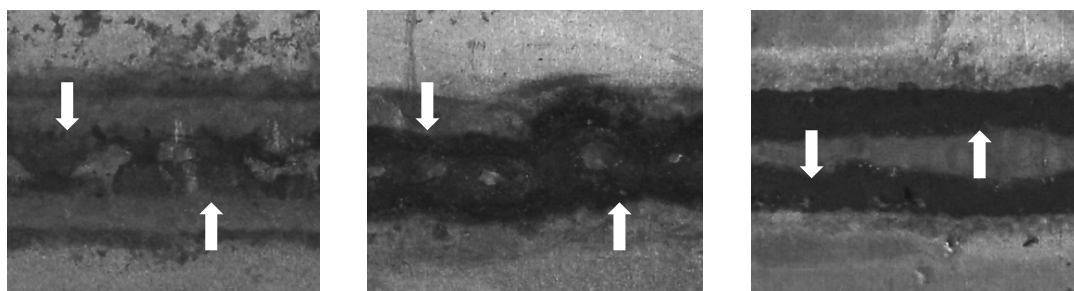
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A corrente média de soldagem em toda a extensão dos cordões de solda foi de  $137,3 \pm 1,3A$ . Os valores de tensão medidos na soldagem ATIG não apresentaram variação significativa em relação à soldagem TIG. A tensão média na soldagem TIG foi de  $11,9 \pm 0,2$  e na soldagem ATIG de  $12,0 \pm 0,3$ . Estes resultados mostram que este parâmetro não pode ser usado para caracterizar os efeitos dos fluxos na soldagem ATIG de alumínio.

Na observação da superfície dos cordões de solda com uma lupa estereoscópica verificou-se que, na soldagem ATIG com cloretos e óxidos, parte do fluxo permaneceu aderida na região central do cordão de solda, enquanto que, na soldagem ATIG com fluoretos, parte do fluxo ficou aderida na periferia do cordão de solda. (Figura 4). Este resultado pode ser associado com mudanças na intensidade e no sentido do movimento das correntes de metal líquido na poça de fusão devido à presença de elementos tensoativos (Efeito de Marangoni).



**Figura 3.** Imagens mostrando a área fixa de 500x120pixels (linha tracejada) nos cordões de solda TIG (esquerda), TIG com corrente alternada (centro) e ATIG-NaCl (direita) com seus respectivos histogramas.




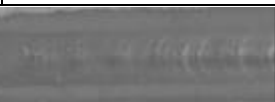
**Figura 4.** Imagens dos cordões de solda ATIG-NaCl (esquerda), ATIG-SiO<sub>2</sub> (centro) e ATIG-NaF (direita). As setas indicam a região de contaminação pelo fluxo.

A Figura 5 mostra as imagens e os valores de pixels do cordão de solda do corpo de prova padrão e dos cordões de solda TIG/ATIG, os quais apresentaram valores maiores e negativos do “índice de limpeza” (IL). Este índice foi criado como um critério para caracterizar a ação de limpeza dos fluxos, sendo arbitrariamente definido como:

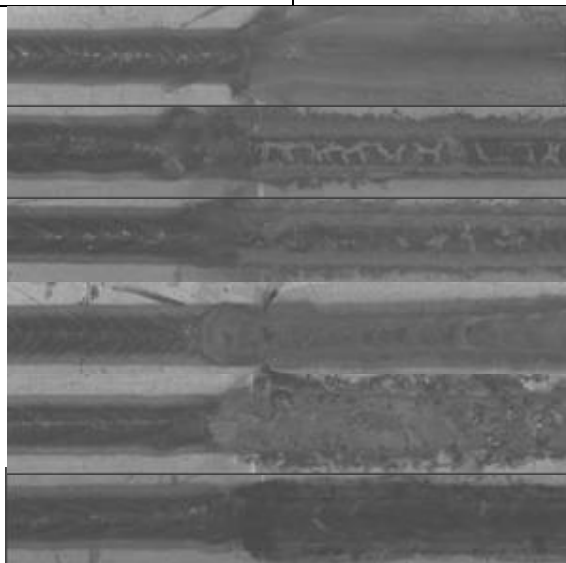
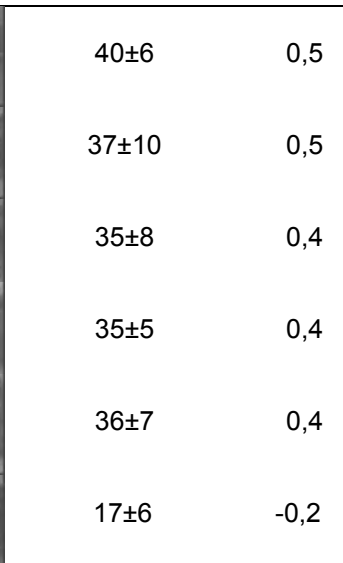
$$IL = \frac{\Delta P_{ATIG} - \Delta P_{TIG}}{\Delta P_{CA} - \Delta P_{TIG}} \quad (1)$$

em que  $\Delta P_{ATIG}$  é a média dos valores de pixels do cordão de solda ATIG,  $\Delta P_{TIG}$  a média dos valores de pixels do cordão de solda TIG,  $\Delta P_{CA}$ , a média do valor de pixels do cordão de solda TIG com corrente alternada e  $\Delta P_{TIG}$  a média do valor de pixels do cordão de solda TIG do corpo de prova padrão. Um valor de IL igual a um corresponde à limpeza obtida com corrente alternada. Valores menores de IL indicam uma tonalidade mais escura do cordão de solda e foram considerados, neste trabalho, como uma indicação de uma menor ação de limpeza.

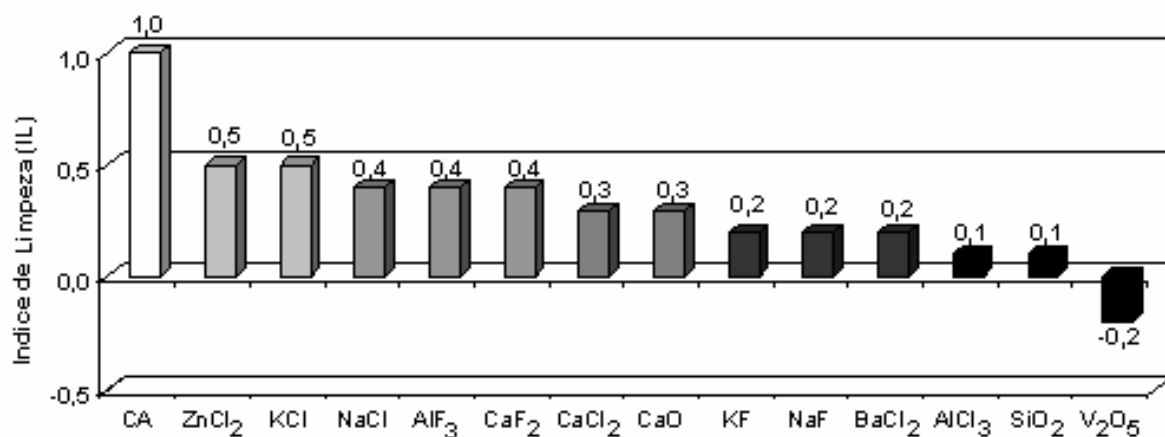
A Figura 6 apresenta a classificação dos fluxos a partir dos valores de IL. Observa-se que os fluxos que apresentaram maior efetividade na remoção da camada de alumina foram os cloretos de zinco, potássio e sódio e os fluoretos de alumínio e cálcio, respectivamente. Entretanto, mesmo para estes fluxos mais efetivos, o maior valor de IL foi igual a 0,5, ou seja, atingindo apenas a metade da eficiência obtida na soldagem TIG com corrente alternada. Este resultado, de certa forma, era esperado, pois o mecanismo de limpeza atuante no processo de soldagem ATIG difere do mecanismo obtido na soldagem TIG com corrente alternada sem a utilização de fluxo, como mostra as imagens da região central e da zona termicamente afetada (ZTA), observadas por microscopia eletrônica de varredura, dos cordões de solda apresentados nas Figuras 7 e 8. No primeiro caso, um fluxo pode interagir com a camada de óxido e de outras contaminações na superfície de uma peça metálica, durante a operação de soldagem, de três maneiras básicas: (i) por reação química, formando uma escória de menor ponto de fusão que o metal de solda, (ii) pela redução do óxido e (iii) pela dissolução do óxido ou contaminação pelo fluxo, o qual não teria os seus pontos de fusão e viscosidade significativamente alterados.<sup>(15)</sup> No segundo caso, ocorre a limpeza catódica, que consiste na remoção da camada de óxidos superficiais pela ação do arco elétrico quando o eletrodo é positivo. Este efeito é bem conhecido em soldagem e de importância tecnológica na soldagem com proteção gasosa do alumínio.<sup>(16,17)</sup>

	Pixels	TIG	Corrente Alternada	Pixels	IL
Padrão	25±9			51±6	1,0

	Pixels	TIG	ATIG	Pixels	IL
ZnCl <sub>2</sub>	27±8			40±6	0,5
KCl	24±11			37±10	0,5
NaCl	24±11			35±8	0,4
AlF <sub>3</sub>	26±12			35±5	0,4
CaF <sub>2</sub>	25±13			36±7	0,4
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	22±11			17±6	-0,2

**Figura 5.** Imagens do cordão de solda do corpo de prova padrão e dos cordões de solda TIG/ATIG, os quais apresentaram valores maiores e negativos de IL.

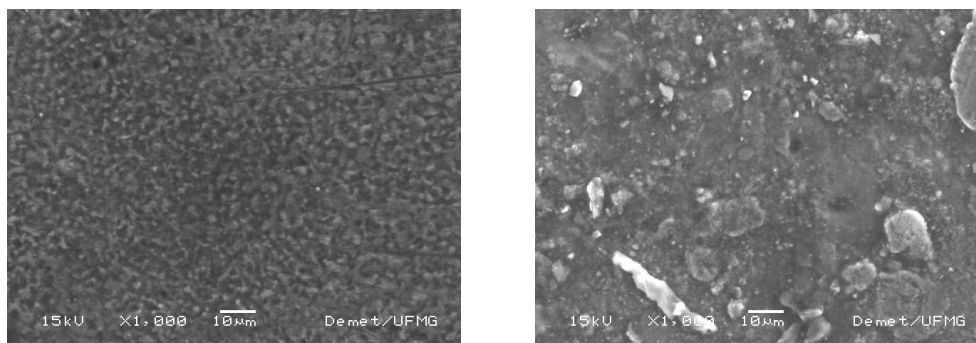


**Figura 6.** Classificação dos fluxos.

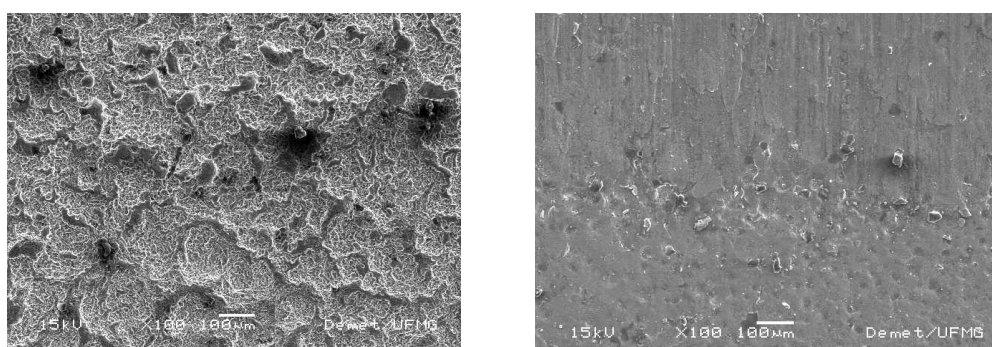
Apesar dos resultados obtidos neste trabalho, acredita-se que efeitos mais significativos na remoção da camada de alumina podem ser obtidos com o uso de fluxos compostos, a partir da mistura de dois ou mais componentes dos fluxos simples mais efetivos na soldagem ATIG de alumínio.

#### 4 CONCLUSÕES

- Nenhum dos fluxos testados apresentou uma variação significativa nos valores medidos da tensão em relação à soldagem TIG. Assim, este parâmetro não pode ser usado para caracterizar os efeitos dos fluxos na soldagem ATIG de alumínio.



**Figura 7.** Imagens da região central dos cordões de solda. TIG com corrente alternada (esquerda). Cordão de solda ATIG-NaCl (direita). Ampliação: 1000x.



**Figura 8.** Imagens da ZTA dos cordões de solda. TIG com corrente alternada (esquerda). Cordão de solda ATIG-NaCl (direita). Ampliação: 100x.

- Na soldagem ATIG com cloretos e óxidos, parte do fluxo ficou aderida na região central do cordão de solda, enquanto que, na soldagem ATIG com fluoretos parte do fluxo ficou aderida na periferia do cordão de solda.
- Os fluxos que apresentaram uma maior efetividade na remoção da camada de alumina foram os cloretos de zinco, potássio e sódio e os fluoretos de alumínio e cálcio, respectivamente. Entretanto, mesmo para estes fluxos mais efetivos, o valor de IL foi inferior a 0,5, sugerindo uma eficiência de limpeza muito menor que a obtida na soldagem TIG com corrente alternada.
- Como esperado, o mecanismo de limpeza obtido com o uso de fluxos na soldagem TIG com corrente contínua difere do mecanismo de limpeza atuante na soldagem TIG com corrente alternada sem a utilização de fluxo.

### **Agradecimentos**

Ao CNPQ pelo suporte financeiro.



## REFERÊNCIAS

- 1 ABAL, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. Fundamentos do alumínio e suas aplicações. São Paulo-SP, 2004.
- 2 ZAMKOV, V. N., PRILUTSKII, V. P., GUREVICH, S. M. The effects of the composition of the flux on the process of welding titanium with a non consumable electrode. *Avtomaticheskaya Svarka*, n. 4, p. 22-26, 1977.
- 3 KAZAKOV, Y. V., KORYAGIN, V. P., POTEKHIN, V. P. Effect of activating fluxes on penetration in welding steels thicker than 8mm. *Welding Int.*, n. 5, p. 202-205, 1991.
- 4 KAZAKOV, Y. V., et al. Effect of activating fluxes on penetration on the structure of the welding arc in argon. *Svarochnoe Proizvodstvo*, n. 4, p. 30-32, 1991.
- 5 MECHEV, V. S. Mechanism of contraction of the welding arc in the presence of electronegative particles. *Welding Int.*, n. 7, p. 154-156, 1993.
- 6 LUCAS, W., HOWSE, D. Activating flux-increasing the performance and productivity of the TIG and plasma processes. *Welding & Metal Fabrication*, London, p. 11-17, 1996.
- 7 ANDERSON, P. C. J., WIKTOROWICZ, R. Improving productivity with ATIG welding. *Welding & Metal Fabrication*, n. 3, v. 64, p. 108-109, 1996.
- 8 LEINONEN, J. L., KARJALAINEN, L. P. Unexpected weld pool profiles in GTA welding with oxidizing shielding gas. In: *Recent Trends in Welding Science and Technology Proceedings, 2<sup>nd</sup> International Conference*, Gatlinburg, University of Oulu, Finland, p. 387-390, 1989.
- 9 HEIPLE, C. R., ROPER J. R. The geometry of arc, gas metal arc, and submerged arc weld beads, welding theory and practice. *Materials Processing*, Elsevier, Amsterdam, n. 1 v. 8, p. 1-34, 1990.
- 10 PASKELL, T., LUNDIN, C., CASTENER, H. GTAW flux increases weld joint penetration. *Welding Journal*, n. 4, v. 76, p. 57-62, 1997.
- 11 APOLINÁRIO, E. R. Estudo da influência de fluxos no processo de soldagem TIG em aço inoxidável austenítico. Dissertação de Mestrado, CPGEM-UFMG, Belo Horizonte, MG, 1998.
- 12 PERRY, N. Etude et développement des flux solides en vue d'application en soudage atig appliqué au titane et ses alliages ainsi qu'aux aciers inoxydables, Tese de Doutorado, Universidade de Nantes, 2000.
- 13 CASTRO, R. P. Desenvolvimento e avaliação da soldagem ATIG em alumínio, Parte 2, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 10p, 2000.
- 14 PEREIRA, I. M. Soldagem TIG com fluxos de aços inoxidáveis e de alumínio, Iniciação Científica, UFMG, Belo Horizonte, MG., 2000.
- 15 LINNERT, GEORGE E. *Welding metallurgy - Carbon and alloy steels*. American Welding Society, Miami, Flórida, 1994.
- 16 GUILLE, A. E. Arc-electrode phenomena, *Proceedings IEE*, n. 9R, v. 118, p. 1131-1154, 1971.
- 17 MODENESI, P. J. Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais. CPGEM-UFMG, Belo Horizonte, MG., 2002.