

## CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE LIGAS DE ALUMÍNIO A PARTIR DA ADIÇÃO DE BORO

A. G. P. Nunes<sup>1</sup>, T. F. Pipano<sup>1</sup>, M. A. Mota<sup>1</sup>, N. A. Mariano<sup>1</sup>, E. C. T. Ramos<sup>1</sup>  
Rua Assis Figueiredo, 1625, apto 301, Centro, CEP: 37701-000  
- Poços de Caldas-MG.

<sup>1</sup>Universidade Federal de Alfenas, Instituto de Ciências e Tecnologia, Rodovia: José Aurélio Vilela, nº 11.999, Cidade Universitária, 37715-400, Poços de Caldas-MG, Brasil

### RESUMO

*Na indústria elétrica, o alumínio se torna atraente por possuir características excelentes para transmitir energia elétrica. O alumínio líquido apresenta em sua composição elementos de transição (zircônio, titânio, vanádio e cromo) que interferem negativamente na qualidade do produto. A adição de ligas de alumínio-boro tem sido utilizada para remover os metais de transição por meio da formação de boretos, possibilitando um aumento na condutividade elétrica. Porém, não há mecanismos detalhados das reações entre o boro, metais de transição e alumínio primário. Contudo, o objetivo do trabalho é determinar a composição estequiométrica que possibilite um aumento da condutividade elétrica de uma liga de alumínio. As amostras com diferentes concentrações de boro foram caracterizadas por meio de espectrofotometria de emissão óptica, condutividade elétrica e difração de raios-X. A adição de boro em excesso reduz o tempo na formação dos boretos, além de possibilitar um aumento na condutividade elétrica.*

*Palavras-chave: ligas de alumínio, adição de boro, condutividade elétrica.*

### INTRODUÇÃO

O alumínio é um metal amplamente utilizado nos mais diversos setores industriais, suas propriedades são ótimas em uma série de aplicações. Para a indústria elétrica se torna atraente por possuir boa condutividade elétrica, resistência mecânica e leveza como características excelentes na transmissão de energia elétrica <sup>(1)</sup>. No entanto, este metal pode ser utilizado como um condutor elétrico se o nível de impurezas estiver controlado, em particular, a concentração de metais de

transição, como, o titânio, zircônio, vanádio e cromo, com efeito minimizado quando estão em forma combinada. <sup>(2)</sup>

Comercialmente, o tratamento com boro tem sido usado para remover os elementos de metais de transição da massa líquida por meio da formação/precipitação de boretos. Este processo é realizado com a adição de ligas padrão de alumínio-boro <sup>(3)</sup>.

A quantidade a ser adicionada depende da quantidade de metais de transição presentes na carga de alumínio. Segundo Cooper <sup>(3)</sup>, é possível executar o cálculo estequiométrico para determinar a quantidade teórica para precipitação dos elementos em função de seus teores iniciais, conforme a equação (A):

$$\%B = \frac{\%Ti + \%V + \%Cr + \%Zr}{2} \times 1,5 \quad (A)$$

A condutividade melhora cerca de 60% já nos estágios iniciais. No entanto, recomenda-se um excesso de 50 - 75% acima da exigência teórica, o que produz um excesso de boro a fim de garantir que todos os metais de transição sejam removidos. Os níveis de adição de boro típicos estão no intervalo de 0,01-0,015% <sup>(3)</sup>.

Apesar do tratamento com boro ser amplamente utilizado na indústria, não há mecanismos detalhados das reações entre o boro e os metais de transição no estado líquido do alumínio. Além disso, a natureza exata dos boretos, sua morfologia e composição devem ser analisadas para obter uma completa compreensão do mecanismo de formação de boretos, além de estudo termodinâmico e cinético <sup>(4)</sup>.

Considerando as condições reais em que ocorre a formação de boretos dos metais de transição, o objetivo principal do presente trabalho é estudar os aspectos ligados ao processo e a caracterização do alumínio líquido, avaliando a melhor composição estequiométrica para a liga padrão adicionada que corresponda a uma condutividade elétrica superior.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Dez amostras foram analisadas para três quantidades diferentes da liga alumínio-boro [Al-4B (%-peso)] adicionadas em forma de barras. As amostras foram nomeadas de Al por se tratar de alumínio, seguida de um número, de 1 a 3, que

representa a quantidade de barras, de uma letra para identificar o material antes e após a adição de boro. A letra A foi utilizada para classificar amostras antes da adição, a letra D para amostras logo após a adição, e a letra P para o caso das amostras quando decorrido certo tempo da adição, especificamente, na chegada ao cliente. Ainda faz parte da nomenclatura adotada o número referente à amostra.

As pesagens das barras foram realizadas em balança analítica de marca Urano UDC 6000/1-S e para o metal em balança industrial de piso marca Mettler Toledo. Os horários do preenchimento do metal no cadinho e no momento da entrega do produto ao cliente foram anotados e as temperaturas foram realizadas em contato direto com o material e medidas em graus Celsius com termopar manual, tipo K.

As análises da composição química dos elementos contidos na liga foram realizadas em amostras desbastadas em torno mecânico, a análise se deu em mais de uma região da superfície da amostra, em um espectrofotômetro de emissão ótica (Thermo Scientific Arc/Spark).

As análises de condutividade elétrica foram realizadas em temperatura ambiente, com uso do aparelho condutímetro digital modelo DC-9 que expressa a condutividade elétrica em porcentagem de IACS (International Annealed Copper Standard %).

As análises de difração de Raios X foram realizadas em amostras na forma de bulk, no difratômetro de Raios X, marca RIGAKU, modelo ULTIMA IV, instalado na UNIFAL, campus Alfenas. As condições adotadas foram tensão de 40 kV; corrente de 30 mA; ângulo ( $2\theta$ ) variando de  $10^\circ$  a  $120^\circ$ ; passo angular de  $0,05^\circ$  e tempo de contagem por passo de 2s, à temperatura ambiente, sob radiação Cu-K $\alpha$  e com filtro de Ni. As fases presentes foram identificadas com o uso dos dados contidos nos registros JCPDS36 e o auxílio do programa de computador Powdercell.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A porcentagem teórica de boro a ser adicionado foi calculada por meio da Equação A, com um excesso de 50%, e apresentam um teor médio de boro de  $0,0114 \pm 0,0008$ . A porcentagem teórica calculada está de acordo com o valor obtido por Cooper <sup>(3)</sup>, onde as porcentagens de adição de boro típicas estão no intervalo de 0,01-0,015% <sup>(3)</sup>.

Os teores médios dos elementos (% em peso) contidos na liga, antes e logo após a adição da liga Al-B e no momento que chega ao cliente, estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Teores médios dos elementos (% em peso) da liga, antes, após a adição da liga Al-B e no momento de entrega ao cliente.

Amostras	Cr%	Ti%	V%	Zr%	B%
AI1A	0,0030±0,0001	0,0021±0,0007	0,0036±0,0001	0,0040±0,0001	0,0035±0,0004
AI1D	0,0002±0,0001	0,0015±0,0008	0,0044±0,0009	0,0006±0,0003	0,0045±0,0002
AI1P	0,0002±0,0001	0,0008±0,0004	0,0021±0,0004	0,0003±0,0002	0,0018±0,0002
AI2A	0,0090±0,0008	0,0024±0,0003	0,0045±0,0007	0,0039±0,0006	0,0038±0,0007
AI2D	0,0003±0,0001	0,0022±0,0001	0,0040±0,0006	0,0027±0,0003	0,0046±0,0003
AI2P	0,0002±0,0001	0,0003±0,0001	0,0019±0,0006	0,0003±0,0001	0,0022±0,0005
AI3A	0,0014±0,0005	0,0021±0,0003	0,0035±0,0008	0,0030±0,0004	0,0013±0,0001
AI3D	0,0006±0,0001	0,0046±0,0009	0,0095±0,0005	0,0019±0,0002	0,0058±0,0002
AI3P	0,0003±0,0001	0,0021±0,0001	0,0052±0,0003	0,0012±0,0007	0,0046±0,0004

Os valores em quilogramas das barras da liga Al-4B (%-peso) adicionadas (média de 3,5 kg/barra) e do metal encaminhado ao cliente (média de 5500 kg/cadinho) foram fundamentais para o cálculo da % em peso do boro real adicionados ao metal. Efetuou-se o cálculo da quantidade de boro em quilogramas presente na liga Al- 4B (%-peso) somado com a quantidade de boro presente no metal antes da adição, em quilogramas. O valor total de boro foi convertido em porcentagem em peso a partir da quantidade de metal para cada amostragem. Os valores médios da porcentagem de boro obtidos e da medida de condutividade elétrica em porcentagem estão expressos na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores médios da porcentagem real do boro adicionado e condutividade elétrica.

Amostras	% - peso Boro real	% Condutividade Elétrica
AI1P	0,0056±0,0004	61,060
AI2P	0,0079±0,0007	61,915
AI3P	0,0093±0,0007	61,905

A quantidade de boro adicionada para as três amostras apresentou abaixo da quantidade teórica estequiométrica requerida. Porém, deve-se levar em conta que a

quantidade calculada levaria à precipitação de todo o elemento de transição, sendo que existe um limite aceitável do teor do mesmo.

Estudos mostram que o excesso de boro em 50% é mais eficiente para a formação de boretos e conseqüente purificação do alumínio, comprovando a necessidade do uso dessa quantidade do reagente, principalmente, devido a fatores cinéticos. O experimento com três barras se aproximou do intervalo, com uma média de  $0,0093\% \pm 0,0007$ . Entretanto, para testes de condutividade realizados para as amostras com adição de três barras de liga alumínio-boro, o resultado, na maioria das vezes, não foi satisfatório, sendo que alguns elementos como o vanádio, tiveram suas concentrações aumentadas (Tabela 1). Com relação à condutividade, foi notado expressivo, porém discreto aumento de uma para duas barras, enquanto que para maiores concentrações de boro (adição de três barras) não observou-se significativa alteração.

Os difratogramas de raios X das amostras Al1D8 e Al1P8, indicam a presença dos picos de Al, Ti e B, conforme mostrado nas figuras 1(a) e 1(b). A ausência de boretos sugere que o boro está dissolvido na estrutura no alumínio. Observa-se que os picos de Al foram deslocados no sentido de menores ângulos de difração para as amostras Al1D8 e Al1P8, conforme mostrado na Figura 1c. Os valores dos parâmetros de rede e do volume da célula do Al<sub>ss</sub> (ss-solução sólida) foram reduzidos, o que sugere a dissolução do boro e a formação da solução sólida, devido ao menor raio atômico do elemento B. Observa-se um aumento na intensidade relativa dos picos de B, com o decorrer do tempo, conforme mostrado para amostra Al1P8, na Figura 1(b).

As amostras Al2D8 e Al2P8 indicam somente a presença dos picos de Al, conforme mostrado nas figuras 2(a) e 2(b). Novamente a ausência de boretos sugere que o boro está dissolvido no alumínio. Para a amostra Al2D8, o pico principal do alumínio apresentou um alargamento e diminuição de intensidade quando comparado com a amostra Al2P8, conforme Figura 2(c).

As amostras Al3D8 e Al3P8 indicam também a presença dos picos de Al, conforme mostrado nas figuras 3(a) e 3(b). Nessas amostras os picos de Al não foram deslocados no sentido de menores ângulos de difração em nenhuma das

amostras. Observa-se um aumento na intensidade relativa dos picos de Al, com o decorrer do tempo, conforme mostrado para amostra Al3P8, na Figura 3(c).

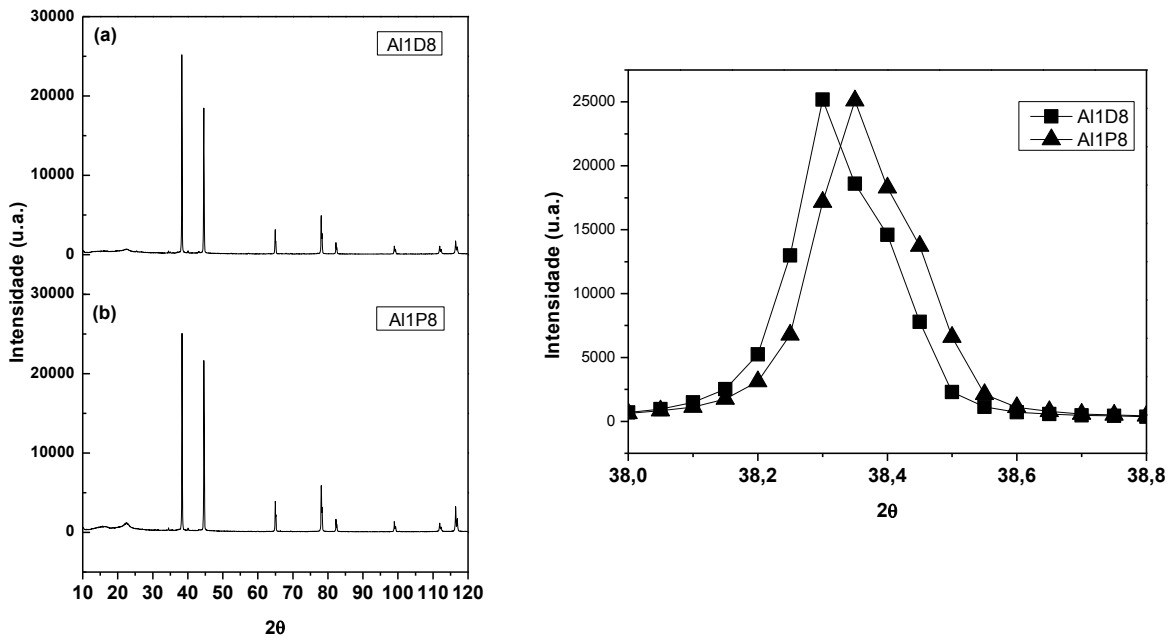


Figura 1 – Difratogramas de raios X das amostras: (a) Al1B8; (b) Al1P8 e (c) ângulo de difração  $2\theta$ .

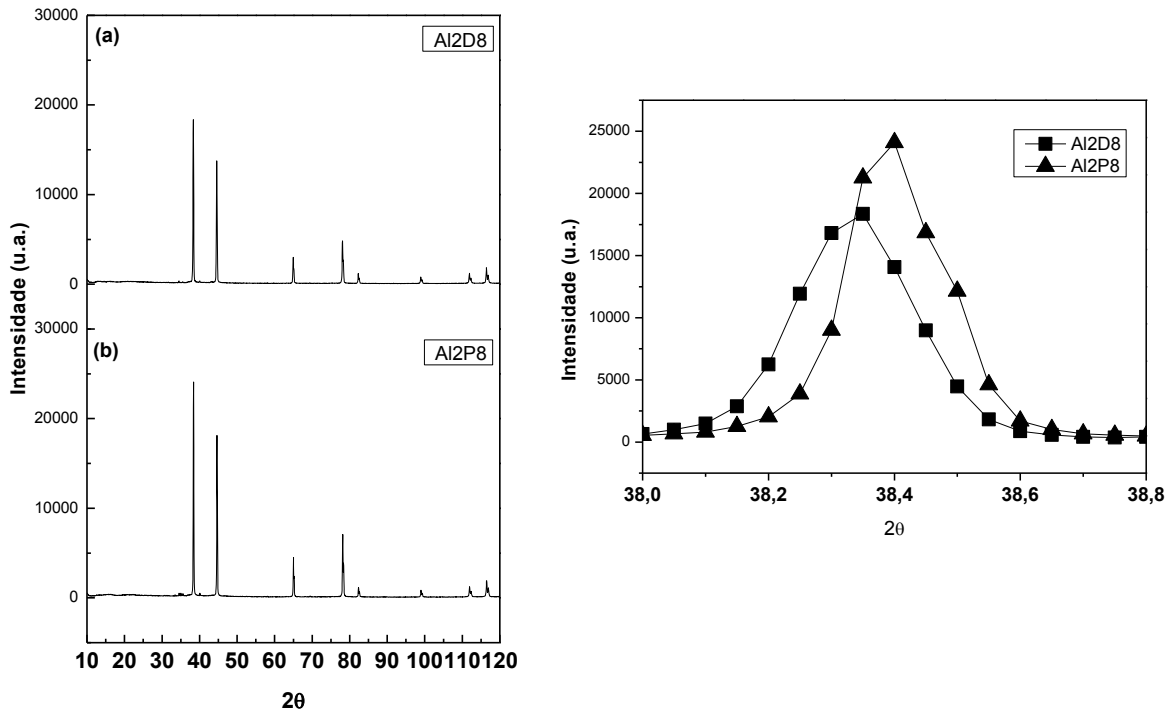


Figura 2 – Difratogramas de raios X das amostras: (a) Al2D8; (b) Al2P8 e (c) ângulo de difração.

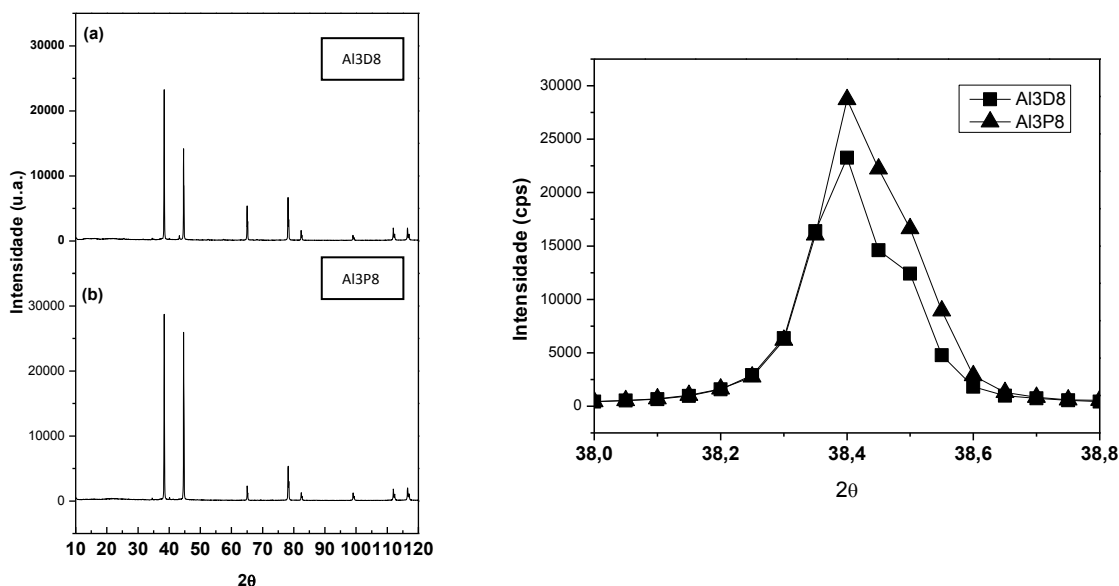


Figura 3 – Difratogramas de raios X das amostras: (a) Al3D8; (b) Al3P8 e (c) ângulo de difração.

## CONCLUSÃO

O estudo mostrou que somente a maior concentração de boro utilizada (três barras) aproximou do excesso recomendado pela literatura. Porém, a quantidade adicionada de boro não proporcionou à precipitação dos elementos, devido à variação de temperatura no decorrer do processo, mesmo que o tempo limite entre a adição, o transporte e a entrada no processo de fabricação fosse suficiente para completa reação e precipitação dos boretos.

Concluiu-se que a melhor composição estequiométrica para a liga, a partir das condições trabalhadas, foi a do segundo teste, com adição de duas barras de alumínio-boro, pois permitiu concentrações aceitáveis dos elementos de transição e bons resultados de condutividade elétrica. Mas em termos econômicos pode-se fazer adição de apenas uma barra, pois a condutividade neste caso teve valor ligeiramente menor.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ANDRADE, M. L. A.; CUNHA L. M.; GANDRA, G. T.; **A indústria do alumínio: desempenho e impactos da crise energética**. BNDS setorial, Rio de Janeiro. 2001.

(2) COOPER, P.; COOK R.; KEAMS M.A. **Effects of Residual Transition Metal Impurities on Electrical Conductivity and Grain Refinement of EC Grade Aluminium.** The 126th TMS Annual Meeting & Exhibition, Orlando, Florida, – February 1997.

(3) COOPER, P., JACOB, A., DETOMI, A. **Additive Developments in the Aluminium Industry.** 1st International Congress of the Aluminum Industry, São Paulo, Brazil - November 2000.

(4) STROUP, P.T., " **Purification of Aluminum**", in U. S. Patent: 3,198,625. Aluminum Company of America, Pittsburgh, PA 1965.

## **MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION ALUMINIUM ALLOYS FROM THE ADDITION OF BORON**

### **ABSTRACT**

*In the electrical industry, the aluminum becomes attractive because it has excellent characteristics for transmitting electricity. The liquid aluminum has in its composition transition elements (zirconium, titanium, vanadium and chromium) that interfere negatively on the quality of the product. The addition of aluminum-boron alloys have been used to remove transition metals through the formation of borides, enabling an increase in electrical conductivity. However, no detailed reports of reactions between boron, transition metals and primary aluminum engines. However, the objective is to determine the stoichiometric composition that enables an increase in electrical conductivity of an aluminum alloy. Samples with different concentrations of boron were characterized by optical emission spectrometry, electrical conductivity and X-ray diffraction. The addition of boron in excess reduces the time in the formation of borides, and enable an increase in electrical conductivity.*

*Keywords: aluminum alloys, boron addition, electrical conductivity.*