

## **INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE BORO NAS TEXTURAS METALOGRAFICAS E PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA A7004S-T5 EXTRUDADA**

RICARDO CRUZ DA SILVA<sup>1\*</sup>; MARCOS DANTAS DOS SANTOS<sup>2</sup>;  
JOSÉ COSTA DE MACEDO NETO<sup>3</sup>;

<sup>1\*</sup>Tecnólogo em Tecnologia Mecânica, UEA-EST, Manaus-AM. Fone: (92) 99904-2900  
ricardo\_cruz11@yahoo.com.br

<sup>2</sup>MSc. Professor em Engenharia Mecânica, UEA-EST, Manaus-AM. Fone: (92) 98147-8343,  
marcosdantas73@hotmail.com

<sup>3</sup>Dr. Professor em Engenharia de Materiais, UEA-EST, Manaus-AM. Fone: (92) 98265-3945,  
jotacostaneto@gmail.com

Apresentado no

Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2018  
21 a 24 de agosto de 2018 – Maceió-AL, Brasil

**RESUMO:** Este trabalho teve como objetivo demonstrar algumas alterações nas características Macrográfica, Micrográficas e Propriedades Mecânicas na liga extrudada de Alumínio (Al) e Zinco (Zn) A7004S-T5 quando inserido elemento de liga Boro em sua composição química. A liga A7004S-T5, possui boa resistência mecânica após tratamento térmico e extrusão, porém sua condutividade elétrica é baixa, o uso do elemento Boro tem como finalidade aumentar a condutibilidade elétrica tornando possível o aumento da gama de utilização destes materiais também na indústria de fabricação de condutores elétricos. No entanto, os fenômenos que ocorrem com a utilização Al-4B da liga de boro inserida no banho de alumínio ainda são muito pouco compreendidas, e este trabalho visa demonstrar quais as características metal-mecânicas são afetadas por estes fenômenos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Geotecnologias, capacidade de uso dos solos, restrição de uso do solo, aptidão pedológica.

### **INFLUENCE OF BORON ADDITION ON METALLOGRAPHIC TEXTURES AND MECHANICAL PROPERTIES OF A7004S-T5 EXTRUDED ALLOY**

**ABSTRACT:** This study had the objective to demonstrate some changes in the Macrographs, Micrographs and Mechanical Properties characteristics in the extruded Aluminum (Al) and Zinc (Zn) alloy A7004S-T5 when Boron alloy element was inserted in its chemical composition. The alloy A7004S-T5 has good mechanical strength after heat treatment and extrusion, but its electrical conductivity is low, the use of Boron element has the purpose of increasing the electrical conductivity making it possible to increase the range of use of these materials also in the industry. Manufacture of electric conductors. However, the phenomena that occur with the use of Al-4B of the boron alloy inserted in the aluminum bath are still very little understood, and this work aims to demonstrate the metal-mechanical characteristics.

**KEY WORDS:** electrical conductivity, boron addition, standard alloy, aluminum.

### **INTRODUÇÃO**

O alumínio e suas ligas são caracterizados por uma densidade relativamente baixa (2,7 g/cm<sup>3</sup>, em comparação com uma densidade de 7,9 g/cm<sup>3</sup> para o aço), condutividades elétrica e térmica elevadas, e uma resistência à corrosão em alguns ambientes comuns, incluindo a atmosfera ambiente. Devido a estas características o alumínio é empregado na indústria civil, automotiva, naval, aeroespacial (Lopes, 2008).

Segundo (Nunes et. all, 2014), 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.

De acordo com (Arango et. all, 2012) é bem conhecido que certos elementos químicos podem afetar negativamente a eficiência destas ligas refinadoras à base de Al-Ti-B, o que é chamado de envenenamento do refino de grão.

Neste trabalho, utilizou-se a liga de alumínio **A7004S-T5** que foi projetada para aplicações que requerem alta resistência e boa soldabilidade. Esta liga, assim como as ligas 7005 e 7039, tem uma quantidade limitada de cobre que reduz a sensibilidade de fratura na solda. Uma característica importante da liga 7004 é a capacidade de a zona termicamente afetada recuperar suas propriedades mecânicas, a temperatura ambiente, após a soldagem. Devido a isto, as propriedades da solda continuam a melhorar por até 30 dias após a soldagem. A liga **A7004S-T5**, ainda oferece boa resistência à corrosão, moderada a alta resistência mecânica, boa ductilidade a fratura e conformabilidade, também tem sido usada em formas extrudadas e, em menor escala, em formas de folhas para aplicações estruturais (ALCOA, 2010).

O objetivo deste trabalho é a caracterização mecânica, microestrutural por microscopia óptica e eletrônica, bem como testes de tração, dureza e impacto, após surgimento de descontinuidades em peças produzida por fundição e conformação em liga de A7004S-T5 sob o efeito de boro.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Análise Química

Para a análise química da liga **A7004S-T5**, utilizou-se um espectrômetro de Plasma Acoplado Indutivo (ICP) da marca Varian, modelo Vista – MPX CCD Simultaneous ICO – OE. A Tabela 1 mostra as análises químicas das ligas que serão utilizadas neste estudo.

Tabela 1. Utilizada liga A7004-T5 com ou sem aditivo de Al-4B

A7004 - T5	Si 0,25 máx	Fe 0,35 máx	Cu 0,05 máx	Mn 0,2 ~ 0,7	Mg 1,0 ~ 2,0	Cr 0,05 máx	Zn 3,8 ~ 4,6	Zr 0,1 ~ 0,2	Ti 0,05 máx	B (ppm)
Amostra Sem Boro	0,09	0,14	0,01	0,30	1,10	> 0,005	4,45	0,13	0,01	23,3
Amostra com Boro	0,08	0,14	> 0,005	0,25	1,71	> 0,005	4,50	0,10	0,01	88,3
	0,08	0,14	> 0,005	0,24	1,73	> 0,005	4,54	0,11	0,01	124,5

Amostras sem Boro: 0,000%    Amostra com Boro: 0,002%

### Processo de Fundição

Processo de fundição utilizado foi por gravidade utilizando um molde permanente basculante para a obtenção do tarugo para posterior extrusão para a fabricação dos tubos. Este estudo foi realizado em um ambiente industrial. A Tabela 2 mostra os parâmetros utilizados no processador de fundição.

Tabela 2. Parâmetros de Fundição por Gravidade

Temperatura de Vazamento	660 ~ 680°C
Temperatura do Molde	320 ~ 350°C
Tempo de Solidificação	1200s seguido de resfriamento em água

### Processo de Extrusão

No processo de extrusão a matéria prima fundida (tarugo) é submetida a uma temperatura de equalização para estabilização do material antes do processo de extrusão, que foi realizado conforme os seguintes parâmetros definidos na tabela 3. Após o processo de extrusão o tubo foi resfriado ao ar e em seguida realizado os processos de corte e dobra.

Tabela 3. Parâmetros de Extrusão.

Parâmetros de Equalização	450 ~ 460°C / 30 minutos
Parâmetros de Extrusão	430 ~ 450°C, velocidade de 11 ~13 m/min
Temperatura da Ferramenta	510°C

Após a produção do tubo foram realizados os seguintes ensaios:

**Ensaio de Tração:** As amostras dos tubos foram submetidas a processo de corte, lixamento, usinagem para atender o perfil de corpos de prova conforme estabelecido em norma JIS Z 2241, onde foi utilizado o dinamômetro: Modelo DL 10000kN – Emic, Célula: 500 kgf e Velocidade: 5mm/min.

**Ensaio de Impacto:** Retirado Corpos de Prova dos Materiais com e sem adição de Boro, o perfil dos Cp's e o método utilizado atende a norma JIS Z 2242 – Método para Teste de Impacto. Equipamento de Impacto EMIC.

**Ensaio de Dureza:** Retirado Corpos de Prova dos Materiais com e sem adição de Boro para medição de dureza Rockwell, escala HRB conforme norma JIS Z 2245. Equipamento utilizado: Durômetro Instron B 2000.

**Metalografia:** Para esta avaliação as amostras foram embutidas em resina termo fixo e submetidas a preparação metalográfica realizada conforme ASTM E3. A análise será realizada com e sem ataque de um reagente ácido Keller's (2mlHF, 3mlHCl, 5mlHNO<sub>3</sub>, 190mlH<sub>2</sub>O). Em seguida as amostras foram analisadas utilizando um banco metalográfico óptico da marca Leica, modelo 550 com aumentos de 10X a 1000X, acoplado com câmara para captura de imagens da marca Leica, modelo DFC295 de 3MP, software LAS. E também submetidas a análises por microscopia eletrônica utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV), fabricante Jeol, modelo JSM5600, com ampliação 25X (vezes) a 100000X(vezes).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

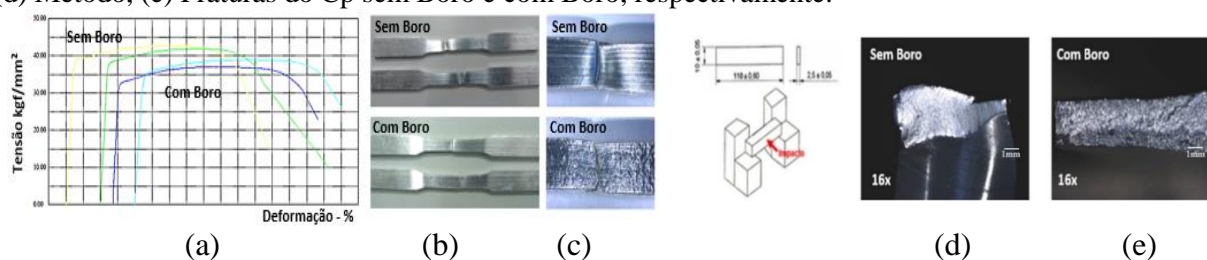
A tabela 4 demonstra que os ensaios de tração revelaram diferenças significativas de propriedades como Redução de 10,2% do limite de resistência, 13,7% do Limite de Escoamento e aumento em 34% de Alongamento no material com inserção de Boro.

Tabela 4. Resultado de Teste de Tração em Cp's com e sem adição do elemento Boro

Especificado		Sem Boro		Com Boro	
		Cp1	Cp2	Cp3	Cp4
Limite de Resistência	290 MPa min	419	426	389	370
Limite de Escoamento	255 MPa min	379	386	343	316
Alongamento	10% min	23	21	14	15

A figura 1c demonstra considerável diferença visual na região de ruptura, onde o material com Boro apresenta menor nível de estrição e elevado nível de enrugamento caracterizado como casca de laranja. As figuras 1d e 1e demonstram que a amostra com Boro apresenta menor nível de deformação na fratura após ensaio de impacto.

Figura 1. (a) Gráfico de tensão e deformação e (b) Corpos de Prova após teste de tração e (c) Fraturas. (d) Método, (e) Fraturas do Cp sem Boro e com Boro, respectivamente.



A tabela 5 demonstra que o ensaio de impacto a temperatura ambiente apresentou uma redução de 29,2% no material com inserção de Boro.

Tabela 5. Resultado de Teste de Impacto em Cp's com e sem adição do elemento Boro

Resistência ao Impacto J/cm <sup>2</sup>	Sem Boro		Com Boro	
	Cp1	Cp2	Cp3	Cp4
	73,60	75,52	60,16	55,04
	74,88	78,08	50,56	48,00
	75,52		53,44	

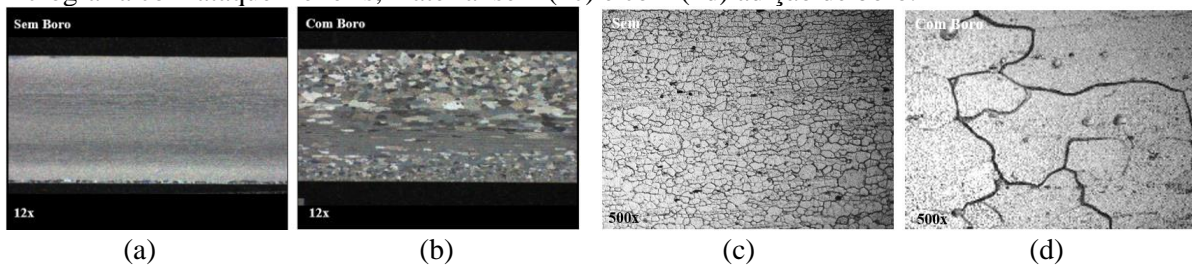
A tabela 6 demonstra que o ensaio de dureza Rockwell apresentou aumento de 18,8% no material com inserção de Boro.

Tabela 6. Resultado de Teste de Dureza em Cp's com e sem adição do elemento Boro

Durômetro Rockwell HRB	Sem Boro		Com Boro	
	Cp1	Cp2	Cp3	Cp4
	58	57	72	70
	59	59	72	73
	58,25		71,75	

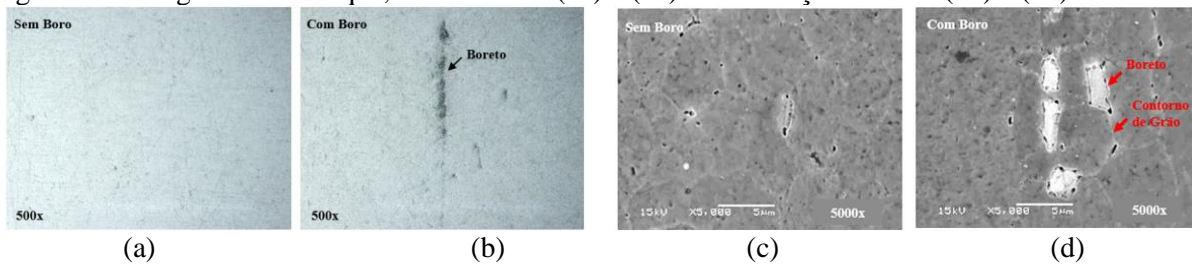
As figuras 2b e 2d mostram um elevado nível de crescimento de grãos no material com adição de boro, justificando o efeito de casca de laranja na região de ruptura no teste de tração (figura 1c).

Figura 2. Macrografia da secção longitudinal de material sem (2a) e com (2b) adição de boro. Micrografia com ataque Keller's, material sem (2c) e com (2d) adição de boro.



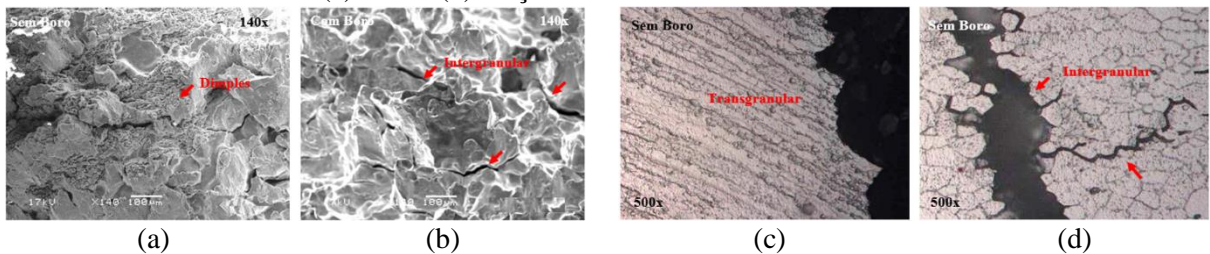
As figuras 3b e 3c, mostram que o alinhamento no sentido longitudinal de extrusão é formado por precipitados alongados com tonalidade cinza claro alojados também nos contornos dos grãos, os quais não estão presentes no material sem adição de boro observado na Figuras 3a e 3c.

Figura 3. Micrografia sem ataque, material sem (2a) e (2c) e com adição de boro (2b) e (2d).



A figura 4(a), fratura com 80% de Dimples. Figura 4(b), fratura frágil, propagação Transgranular. A figura 4(c) mostra fratura com propagação Transgranular. A Figura 4(d) verifica-se a fratura com propagação e trincas secundárias intergranulares, característica de fragilidade.

Figura 4. Fraturas do teste de impacto de material sem (a) e com (b) adição de boro. Secções transversais das fraturas. Material sem (c) e com (d) adição de boro.





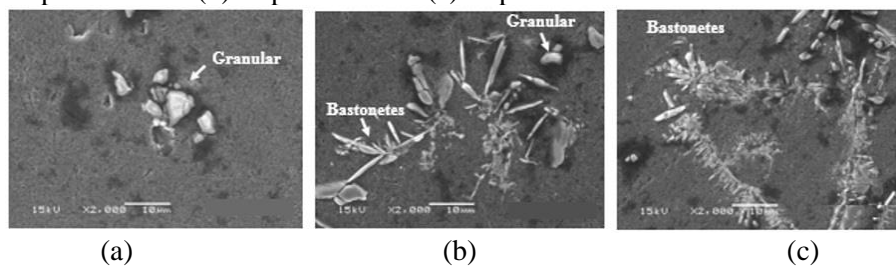
A tabela 7 mostra três experimentos realizados na base da na liga de Al-Zn, onde foi adicionado boro em dissolução no molde de 500g/1 para reprodução da precipitação.

Tabela 7. Proporções de Zr e B utilizadas para simulação do fenômeno de precipitação de boretos.

Experimento	Zr%	B%
1	0,0921	0,0000
2	0,0271	0,0544
3	0,0911	0,0571

A Figura 5(a) mostra precipitados com morfologia granular com 0% de boro. A adição média de 0,0557% de Boro alterou a morfologia dos precipitados de granular para bastonetes, aumentando a quantidade de precipitados com morfologia alongada, quando adicionado mais zircônio, Figuras 5(b) e 5(c), caracterizando o precipitado como  $ZrB_2$ .

Figura 5. (a) Experimento 1. (b) Experimento 2. (c) Experimento 3.



## CONCLUSÃO

Conclui-se com os resultados obtidos neste trabalho que a utilização do elemento Boro na liga de alumínio A7004-T5, liga de alta resistência com a finalidade de aumentar a condutividade elétrica proporciona drásticas consequências no que se refere a redução de propriedades mecânicas da liga e alterações na recristalização de grãos, ambos fatores contribuem para a fragilidade do material, reduzindo sua resistência e durabilidade quando submetido a esforços dinâmicos.

## REFERÊNCIAS

- ALCOA. Ligas e têmperas de Extrusão. Disponível em: <[https://www.alcoa.com/brasil/pt/resources/pdf/indústria/catalogo\\_ligas\\_temperas\\_2010.pdf](https://www.alcoa.com/brasil/pt/resources/pdf/indústria/catalogo_ligas_temperas_2010.pdf)>. Publicado em 2010, acesso em: 19 de maio de 2018.
- ASTM E3\_ Método para Preparação e Ensaio Metalográfico.
- Arango, J. M. R., Martorano, M. A., Efeitos da adição do inoculante Al-3%Ti-1%B às ligas do sistema Al-Si, Tecnologia Metalurgia Materiais e Mineração, v.9, pp. 71-79, 2012.
- JIS Z 2241 \_ Método para Teste de Tração.
- JIS Z 2242 \_Método para Teste de Impacto.
- JIS Z 2245 \_ Método para Ensaio de Dureza
- Lopes, C. F. T. Estudo do tratamento de solubilização da liga de Al 354.0. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto 2008. 70f. Tese (Doutorado em engenharia metalúrgica e materiais).
- Loong, C; Heathcock, C., Grain refining foundry alloys. Thomastown: Comalco Research Center, 2001.
- Khaliq, A.; Rhamdhani, M.A.; Brooks, G. A.; Grandfield, J. Thermodynamic Analysis of Transition Metals Impurities in automotive applications process technology extreme applications industry sustainability Aluminium Melt. Light Metals, pp.751-756, 2011.
- Nunes, A. G. P.; Pipano, T. F.; Mota, M. A.; Mariano, N. A.; Ramos, E. C. T. Caracterização microestrutural de ligas de alumínio a partir da adição de boro. 21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais 09 a 13 de Novembro de 2014, Cuiabá, MT, Brasil.
- Qiu, D., Taylor, J. A., Zhang, M. X., et al., "A mechanism for the poisoning effect of silicon on the grain refinement of Al-Si alloys", Acta Materialia, v. 55, p.p. 1447-1456, 2007.