

## INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE ALB<sub>2</sub>, TITÂNIO E ESTRÔNCIO NA MACRO E NA MICROESTRUTURA DE UMA LIGA DE ALUMÍNIO-SILÍCIO

Alexandre Leão Quadro<sup>1</sup>, Antônio Luís Ribeiro Sabariz<sup>2</sup>, Marco Túlio Raposo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Física e Química de Materiais, Universidade Federal de São João Del Rei, 36.301-160, São João Del Rei, Brasil.

<sup>2</sup> Depto. de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del Rei, 36.307-352, São João Del Rei, Brasil.

\*E-mail: [aleao@amg-al.com](mailto:aleao@amg-al.com)

Recebido em: 20/08/2015

Aceito em: 13/11/2015

### RESUMO

O presente artigo tem como objetivo apresentar o efeito das possíveis interações entre boro, titânio e estrôncio sobre a macro e a microestrutura de uma liga Al-Si quase-eutética. No estudo realizou-se testes de refino de grão da *Aluminum Association*, variando-se a concentração de diboreto de alumínio (de 40 a 280 ppm de boro), titânio (de 100 a 700 ppm) e estrôncio (de 50 a 200 ppm). As análises químicas foram feitas com um espectrômetro de emissão óptica. Para a avaliação da macroestrutura, empregou-se uma lupa estereoscópica, e o tamanho médio de grão das amostras foi medido através do método do intercepto. A microestrutura foi avaliada por meio de um microscópio óptico, e a modificação da estrutura eutética foi mensurada a partir de padrões internacionais. Observa-se que um aumento no teor de titânio favorece o refino da fase primária Al-alfa pelo diboreto de alumínio. Para níveis de 300 ppm de titânio e de 120 ppm de boro, a modificação da estrutura eutética pelo estrôncio não foi deteriorada após a adição do diboreto de alumínio, o que ocorre para taxas mais altas de adição. Portanto, a adição de titânio é recomendada quando propriedades elétricas e térmicas não são requisitos, o que permitir trabalhar com taxas mais baixas de adição de diboreto de alumínio (120 ppm de B), obtendo-se excelente refino de grão (~ 200 microns), sem que ocorra o envenenamento do estrôncio.

**Palavras-chave:** Ligas alumínio-silício. Boro. Titânio. Estrôncio.

### 1 Introdução

As ligas Al-Si compõem a base da mais popular família de ligas de fundição na indústria do alumínio, por possuírem boas propriedades mecânicas e de fundição, boa soldabilidade e resistência à corrosão [1-7]. Existem dois importantes tipos de tratamento nestas ligas Al-Si: a modificação da estrutura eutética e o refino de grão [2,3,8]. No tratamento da modificação do eutético, as agulhas e placas grosseiras de silício são transformadas em uma estrutura fina e fibrosa [3]. A Figura 1a mostra uma microestrutura sem a modificação do eutético, e a Figura 1b revela uma microestrutura modificada [3]. Essa alteração na morfologia melhora as propriedades mecânicas da peça, como resistência à tração e a ductilidade [2,8]. O principal agente modificador utilizado mundialmente é o estrôncio e, normalmente, ele é adicionado através de uma anteliga de Al-10Sr [2,8]. Já no tratamento de refino de grão, finos grãos equiaxiais são obtidos através da adição controlada de vários tipos de inoculantes [4,7,9-16]. O refino de grão melhora a homogeneidade da peça e as propriedades mecânicas, reduzindo as porosidades, as quebras a quente e a usinabilidade [2,4,7,9-17]. A Figura 2a mostra a seção de uma

peça sem o tratamento de refino de grão, e a Figura 2b revela uma seção com o tratamento de refino de grão. Quando esses dois tratamentos são realizados simultaneamente, há a potencialização de propriedades mecânicas e de fundição [2].

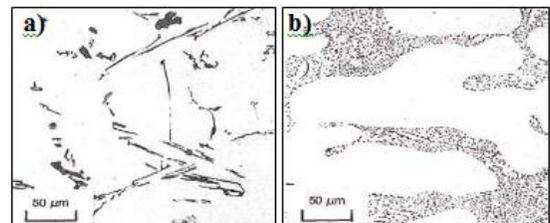


Figura 1 – Modificação da estrutura eutética – a) Sem modificação b) Com modificação [3].

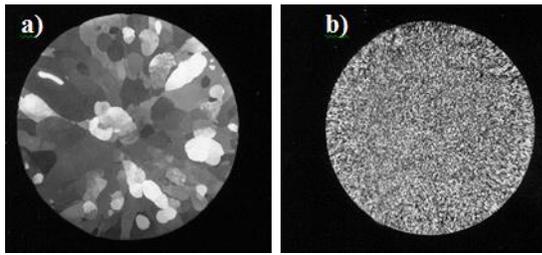


Figura 2 – Tratamento de refino de grão – a) Sem tratamento b) Com tratamento.

O método mais utilizado de refino de grão em ligas de alumínio é a inoculação do banho com partículas de diboreto de titânio ( $TiB_2$ ) e aluminetos de titânio ( $TiAl_3$ ) pela adição de anteligas do sistema Al-Ti-B [1,4,7,9-17]. É possível que certos elementos de liga possam afetar negativamente a eficiência dos refinadores de grão do sistema Al-Ti-B, inibindo sua capacidade de refino [1,2]. Esse efeito é geralmente denominado de envenenamento da liga refinadora pelo elemento prejudicial [1]. O silício é um elemento típico que, a partir de 2%, envenena o refino de grão das ligas do sistema Al-Ti-B [1-7]. Uma forma de amenizar o efeito do envenenamento é aumentar a quantidade da adição de ligas Al-Ti-B, porém esta não é uma boa solução sob o ponto de vista econômico [1]. No entanto, demonstrou-se nas últimas décadas que anteligas do sistema Al-B são refinadores mais efetivos para as ligas de fundição baseadas em Al-Si [1-7]. Entretanto, o B reage com o Sr, formando o hexaboreto de estrôncio ( $SrB_6$ ), prejudicando o efeito da modificação da estrutura do eutético pelo Sr. Além desse fato, com o uso prolongado das ligas Al-B, pode ocorrer a formação de lodo no fundo dos fornos devido à decantação de boretos [2,5]. Estas são razões pelas quais a utilização de anteligas de Al-B ainda é pouco difundida para o refino de grão de ligas Al-Si [2,5].

Neste trabalho estudou-se o efeito das possíveis interações entre o  $AlB_2$ , Ti e Sr sobre a macro e a microestrutura de uma liga de Al-Si. A liga de Al-Si utilizada para o estudo foi a Al-11Si-0,1Mg, muito comum na produção de rodas e outros componentes automotivos. Esta é uma liga de difícil refino pelos refinadores convencionais do sistema Al-Ti-B devido ao seu elevado teor de Si.

Para a análise macrográfica utilizou-se uma lupa estereoscópica de marca Olympus e, para a análise micrográfica, usou-se um microscópio óptico de marca Nikon. Para as análises químicas, empregou-se um espectrômetro de emissão óptica da marca Spectrolab.

## 2 Metodologia

### 2.1 Teste Padrão de Refino de Grão TPI – A.A.

Para a realização dos testes, utilizou-se o Procedimento de Teste Padrão para Refinadores de Grão de Ligas de

Alumínio TP1 da *Aluminum Association* – (*Standard Test Procedure for Aluminum Alloys Grain Refiners TPI*) [18].

O teste consiste na adição de uma quantidade pré-estabelecida do refinador que está em avaliação em 10 kg da liga líquida (Al-11Si-0,1Mg), em uma temperatura de  $680 \pm 10^\circ C$ . A Figura 3 mostra o forno elétrico de laboratório utilizado para a realização dos testes. As amostras são retiradas com um molde de aço (Figura 4) nos tempos pré-estabelecidos de: 0 (sem adição), 5, 15, 30, 45 e 60 minutos após a adição do refinador. O molde é resfriado em um tanque com uma vazão de água de 3,8 litros/min (Figura 5). Antes da coleta das amostras o banho é agitado por 30 segundos. As amostras resultantes são cortadas a 38 mm da base menor do cone, e atacadas por 20 segundos com solução ácida de Poulton (60% HCl a 37%; 30%  $HNO_3$  a 65%; 5% HF a 50% e 5% de água) e clareadas com a solução clareadora (67% de  $HNO_3$  a 65%; 20% de HF a 50% e 13% de água), para revelar os grãos, que são medidos no plano de corte pelo método do intercepto da ABNT [19]. Para as análises metalográficas, foram retiradas e embutidas amostras do plano de corte.



Figura 3 – Forno elétrico à resistência utilizado para a realização dos testes.

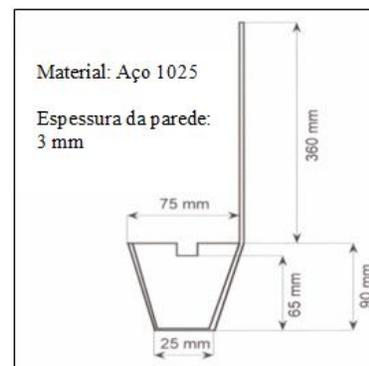


Figura 4 – Esquema do molde utilizado para retirar as amostras [18 - Adaptado].

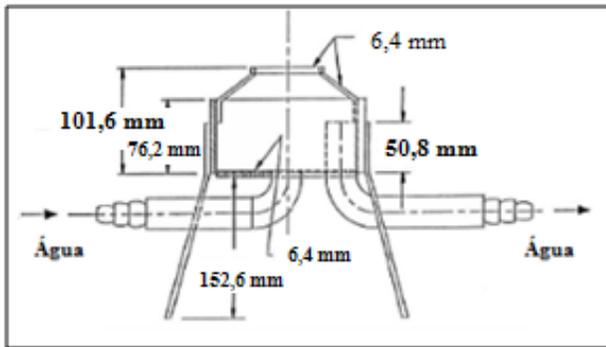


Figura 5 – Esquema do tanque de resfriamento utilizado para resfriar o molde [18 - Adaptado].

### 2.2 Efeito da taxa de adição de partículas de AlB<sub>2</sub>

Para a realização dos testes, utilizou-se uma liga Al-4B contendo predominantemente partículas de AlB<sub>2</sub>. Realizou-se testes de refino TP1 da *Aluminum Association*, em triplicata, variando a taxa de adição de 1 kg/t até 7 kg/t do refinador Al-4B (ou de 40 a 280 ppm de adição de B). As taxas encontram-se descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Taxas de adição de Al-4B utilizadas nos testes TP1.

	Teste A1	Teste A2	Teste A3	Teste A4
Taxa (kg/t) Al-4B	1 kg/t	3 kg/t	5 kg/t	7 kg/t
Concentração Final de B	40 ppm	120 ppm	200 ppm	280 ppm

A Tabela 2 mostra a composição química objetivada da liga Al-11Si-0,1Mg.

Tabela 2. Composição química da liga Al-11Si-0,1Mg.

%Si	%Mg	%Fe	%Sr	%Ti	%Al	Outros
11,0	0,10	0,13	0,000	0,0100	Balanço	0,03%
± 0,2	± 0,02	± 0,02	± 0,002	± 0,002		máx

Para a produção dessa liga, utilizou-se as seguintes matérias primas: alumínio primário P1020, silício metálico grau metalúrgico, magnésio metálico grau metalúrgico e Al-10Ti.

### 2.3 Efeito da concentração de titânio na liga Al-11Si-0,1Mg

Para os testes de efeito da concentração, a taxa de adição da liga Al-4B foi mantida constante em 3 kg/t (ou 120 ppm de B) e variou-se o teor de Ti na liga Al-11Si-0,1Mg entre 0,0100% a 0,0700%, conforme a Tabela 3.

Tabela 3. Concentrações de Ti utilizadas na liga Al-11Si-0,1Mg para uma taxa constante de adição de 3 kg/t de Al-4B.

	Teste B1	Teste B2	Teste B3	Teste B4
%Ti	0,0100	0,0300	0,0500	0,0700
	± 0,002	± 0,002	± 0,002	± 0,002

### 2.4 Efeito da concentração do estrôncio na liga Al-11Si-0,1Mg

Para avaliar o efeito da concentração de Sr, a taxa de adição de 3 kg/t de Al-4B e o teor de Ti em 0,0300% foram mantidos constantes. O teor de Sr foi variado de 0,000 a 0,0200% na liga Al-11Si-0,1Mg, conforme Tabela 4.

Para todos os testes dos itens 2.2, 2.3 e 2.4, o tamanho de grão das amostras foi medido pelo método do intercepto [19] através de uma lupa estereoscópica. Avaliou-se a microestrutura através de um microscópio óptico.

Tabela 4. Concentrações de Sr utilizadas na liga Al-11Si-0,1Mg para uma taxa constante de adição de 3 kg/t de Al-4B e 0,0300% de Ti.

	Teste C1	Teste C2	Teste C3	Teste C4
%Sr	0,000	0,010	0,015	0,020
	± 0,002	± 0,002	± 0,002	± 0,002

## 3 Resultados e discussão

O refino de grão através da adição do Al-4B melhorou significativamente com um aumento no teor de titânio na liga Al-11Si-0,1Mg, obtendo-se grãos finos e equiaxiais a partir de taxas de 3 kg/t. A taxa de adição de Al-4B não prejudicou a modificação da estrutura eutética pelo Sr, obtendo-se uma estrutura completamente modificada com 0,0200% de Sr. Os resultados revelam que é possível utilizar a liga Al-4B, obtendo-se excelente nível de refino e evitando a deterioração da modificação do eutético pelo Sr.

### 3.1 Efeito da taxa de adição de partículas de AlB<sub>2</sub>

A Tabela 5 e a Figura 6 revelam um aumento na taxa de adição do Al-4B, de 1kg/t até 7 kg/t, o que resultou tamanhos de grão cada vez menores.

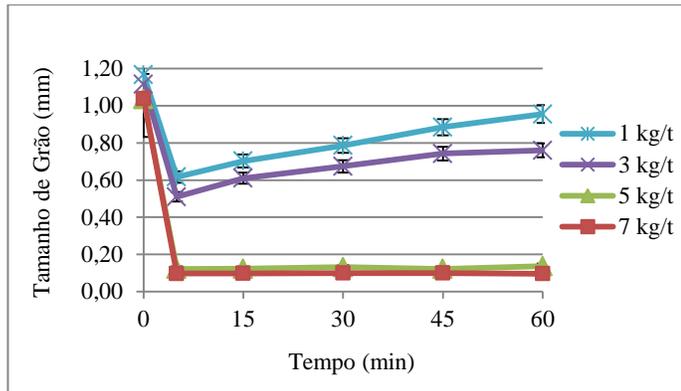


Figura 6 – Efeito da taxa de adição de Al-4B sobre o tamanho de grão da liga Al-11Si-0,1Mg.

Tabela 5. Tamanhos de grão para várias taxas de adição de Al-4B (mm)

Tempo (min)	A1 (1 kg/t)	A2 (3 kg/t)	A3 (5 kg/t)	A4 (7 kg/t)
0	1,17 ± 0,08	1,12 ± 0,09	1,04 ± 0,05	1,04 ± 0,15
5	0,62 ± 0,12	0,51 ± 0,12	0,12 ± 0,01	0,10 ± 0,01
15	0,70 ± 0,02	0,61 ± 0,07	0,12 ± 0,01	0,10 ± 0,01
30	0,79 ± 0,03	0,67 ± 0,09	0,13 ± 0,01	0,10 ± 0,01
45	0,88 ± 0,02	0,74 ± 0,06	0,12 ± 0,01	0,10 ± 0,01
60	0,95 ± 0,06	0,76 ± 0,05	0,14 ± 0,01	0,10 ± 0,01

As taxas de adição de 1 kg/t e 3 kg/t foram insuficientes para a obtenção de grãos finos e equiaxiais, o que ocorre completamente para as taxas de adição de 5 e 7 kg/t. Porém, taxas de 5 ou 7 kg/t trazem o inconveniente da adição de muitas partículas de  $AlB_2$ , fato que pode favorecer para uma rápida formação de lodo no fundo dos fornos, devido à decantação dos boretos, o que leva a paradas para limpeza [3].

As Figuras de 7 a 10 mostram os grãos da liga Al-11Si-0,1Mg sob luz polarizada, no tempo zero (sem a adição do Al-4B) e no tempo de 5 min após a adição do Al-4B, para as várias taxas de adição acima.

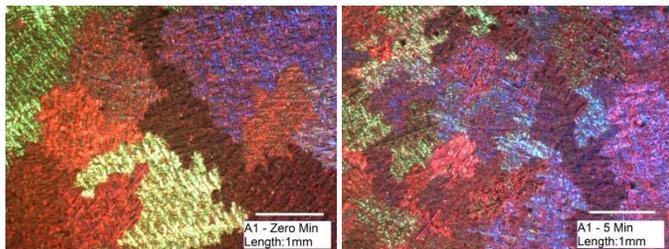


Figura 7 – Grãos Teste A1 (1 kg/t Al-4B) – Tempo zero e 5 min.

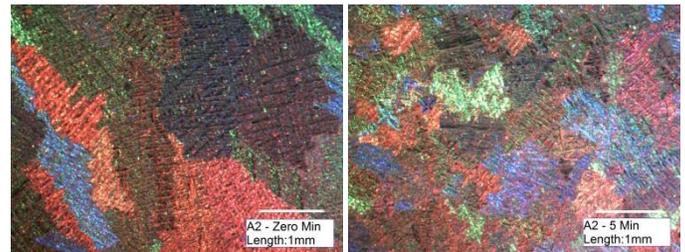


Figura 8 – Grãos Teste A2 (3 kg/t Al-4B) – Tempo zero e 5 minutos.

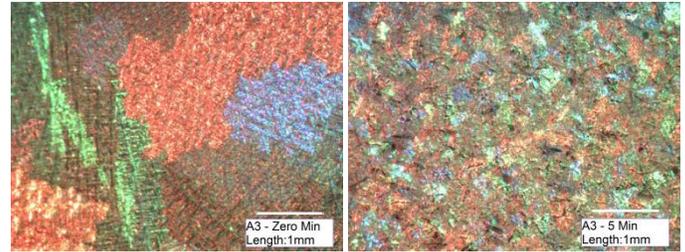


Figura 9 – Grãos Teste A3 (5 kg/t Al-4B) – Tempo zero e 5 minutos

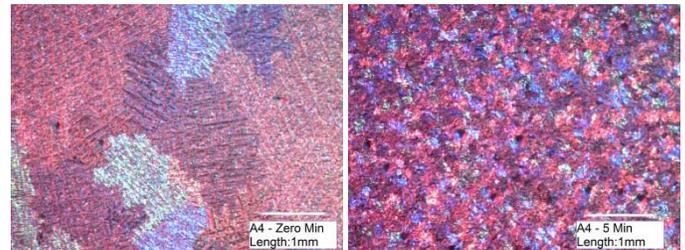


Figura 10 – Grãos Teste A4 (7 kg/t Al-4B) – Tempo zero e 5 minutos.

As Figuras 11 a 14 mostram o efeito do aumento da taxa de adição de Al-4B na microestrutura da liga Al-11Si-0,1Mg. A Figura 11 apresenta a microestrutura sem a adição do refinador de grão, as dendritas da fase Al-alfa são grosseiras. Aumentando-se a taxa de adição, observa-se que as dendritas diminuem de tamanho, conforme pode ser visto nas Figuras de 12 a 14. A Figura 14 apresenta dendritas completamente refinadas para uma taxa de adição de 7 kg/t de Al-4B.

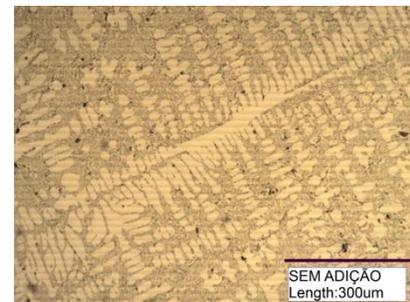


Figura 11 – Microestrutura da liga Al-11Si-0,1Mg sem adição de Al-4B (50x)

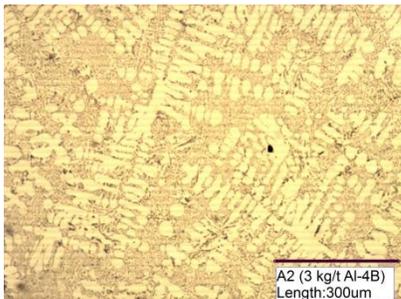


Figura 12 – Microestrutura Teste A2 – 3 kg/t Al-4B (50x)



Figura 13 – Microestrutura Teste A3 – 5 kg/t Al-4B (50x)

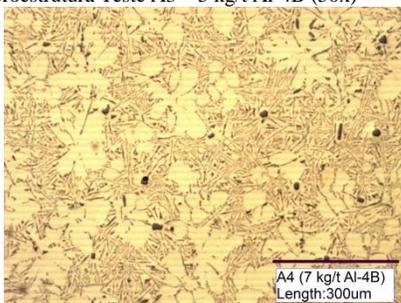


Figura 14 – Microestrutura Teste A4 – 7 kg/t Al-4B (50x)

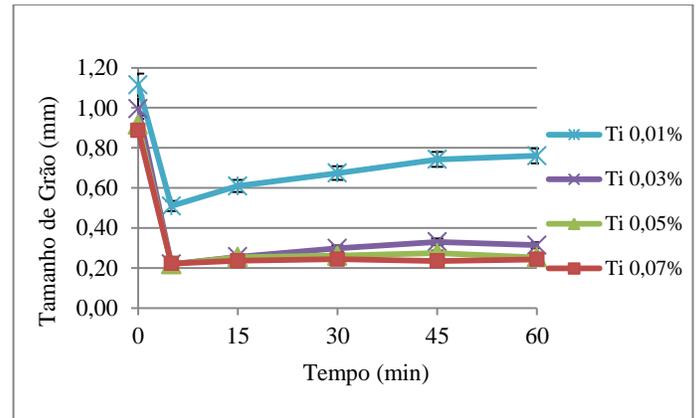


Figura 15 – Efeito da concentração de Ti sobre o tamanho de grão da liga Al-11Si-0,1Mg

Tabela 6. Tamanho de grão para 3 kg/t de Al-4B, variando-se o Ti (mm)

Tempo (min)	B1 (Ti 0,01%)	B2 (Ti 0,03%)	B3 (Ti 0,05%)	B4 (Ti 0,07%)
0	1,12 ± 0,09	0,99 ± 0,17	0,92 ± 0,05	0,89 ± 0,05
5	0,51 ± 0,12	0,22 ± 0,03	0,22 ± 0,01	0,22 ± 0,03
15	0,61 ± 0,07	0,26 ± 0,06	0,25 ± 0,05	0,24 ± 0,01
30	0,67 ± 0,09	0,30 ± 0,08	0,26 ± 0,05	0,24 ± 0,02
45	0,74 ± 0,06	0,33 ± 0,05	0,27 ± 0,05	0,24 ± 0,01
60	0,76 ± 0,05	0,31 ± 0,04	0,25 ± 0,05	0,24 ± 0,02

Uma consequência negativa na adição do Ti nas ligas Al-Si é a redução da condutividade térmica e elétrica [20]. Portanto, para peças que necessitam de boa condutividade elétrica ou térmica, não é recomendada a adição de Ti.

### 3.2 Efeito da concentração do estrôncio

A taxa de adição de Al-4B foi mantida em 3 kg/t, e o teor de Ti em 0,0300% na liga Al-11Si-0,1Mg. O teor de Sr foi variado de 0,00% até 0,020%. A Figura 16 e a Tabela 7 mostram o tamanho do grão com o aumento no teor de Sr. Segundo Birol, 2014, o Sr reduz o tamanho de grão devido à formação do SrB<sub>6</sub>, que também é refinador de grão.

As Figuras de 17 até 19 mostram os grãos da liga Al-11Si-0,1Mg no tempo zero (antes da adição do Al-4B) e de 5 minutos após a adição do Al-4B. Pode-se notar que o Sr reduz o tamanho de grão da liga Al-Si no tempo zero e sem a adição do refinador de grão, conforme já relatado por Birol em 2014 [2].

### 3.2 Efeito da concentração de titânio na liga Al-11Si-0,1Mg

O efeito do Ti sobre o tamanho de grão da liga Al-11Si-0,1Mg para uma taxa de adição de 3 kg/t de Al-4B pode ser observado na Figura 15 e na Tabela 6. Um aumento no teor de Ti melhora a eficiência do refino da anteliga Al-4B. Este não era um resultado esperado pois segundo Birol 2012, o AlB<sub>2</sub> reage com o Ti, formando o TiB<sub>2</sub>, que não é um bom refinador de grãos para as ligas Al-Si. Entretanto, a taxa de 3 kg/t de Al-4B, que gerava grãos grosseiros com 0,0100% de Ti, passou a gerar grãos finos (0,22 a 0,31 mm) para concentrações de 0,0300% de Ti, conforme pode ser observado na Tabela 6.

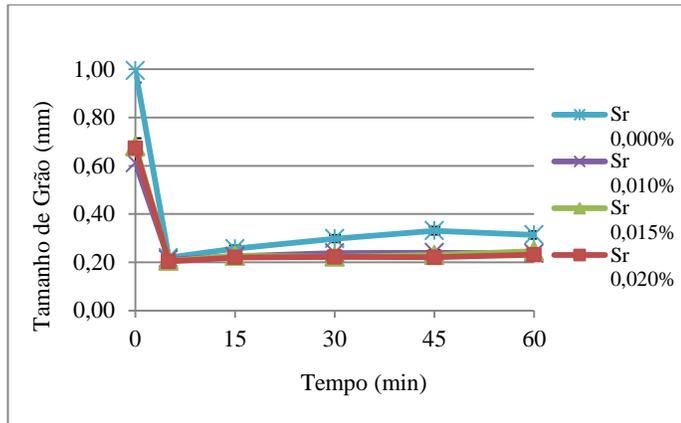


Figura 16 – Efeito da concentração de Sr sobre o tamanho de grão da liga Al-11Si-0,1Mg

Tabela 7. Tamanho de grão, variando-se a concentração de Sr (mm)

Tempo (min)	C1 Sr 0,000%	C2 Sr 0,010%	C3 Sr 0,015%	C4 Sr 0,020%
0	0,99 ± 0,17	0,61 ± 0,07	0,68 ± 0,14	0,67 ± 0,07
5	0,22 ± 0,03	0,21 ± 0,03	0,21 ± 0,02	0,20 ± 0,01
15	0,26 ± 0,06	0,22 ± 0,01	0,23 ± 0,01	0,22 ± 0,01
30	0,30 ± 0,08	0,24 ± 0,02	0,22 ± 0,01	0,22 ± 0,01
45	0,33 ± 0,05	0,24 ± 0,01	0,23 ± 0,01	0,22 ± 0,01
60	0,31 ± 0,04	0,24 ± 0,01	0,25 ± 0,01	0,23 ± 0,01

A Figura 20 apresenta uma microestrutura sem a adição de Sr e sem a modificação da estrutura eutética. A Figura 21 mostra a microestrutura com a adição de 0,010% de Sr, em que é possível observar uma estrutura parcialmente modificada [3]. A Figura 22 mostra a microestrutura com a adição de 0,015% de Sr, a qual apresenta uma estrutura não lamelar [3]. E a Figura 23 apresenta uma estrutura com a adição de 0,02% de estrôncio, a qual é uma estrutura completamente modificada [3]. A adição de 3 kg/t de Al-4B (ou 120 ppm de B) não prejudicou a modificação da estrutura do eutético pelo Sr, conforme ocorre para taxas mais elevadas de adição de Al-4B e como já evidenciado por Birol em 2014 [2].

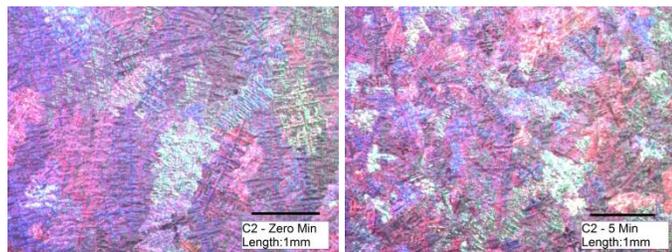


Figura 17 – Grãos Teste C2 (Sr 0,010%) – Tempo zero (esq) e 5 minutos (dir).

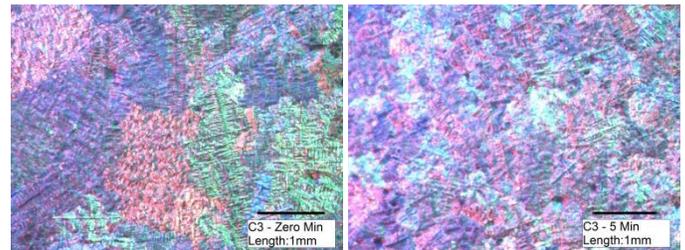


Figura 18 – Grãos Teste C3 (Sr 0,015%) – Tempo zero (esq) e 5 minutos (dir).

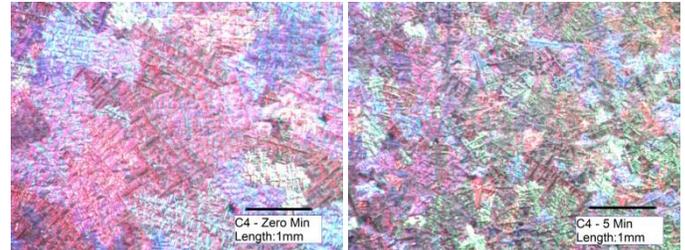


Figura 19 – Grãos Teste C4 (Sr 0,020%) – Tempo zero (esq) e 5 minutos (dir).

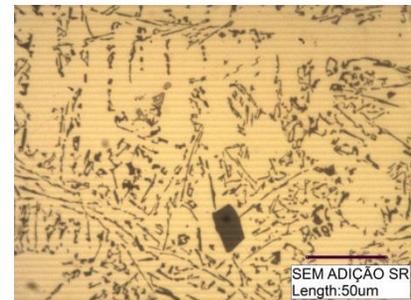


Figura 20 – Microestrutura da liga Al-11Si-0,1Mg sem adição de Sr (200x).

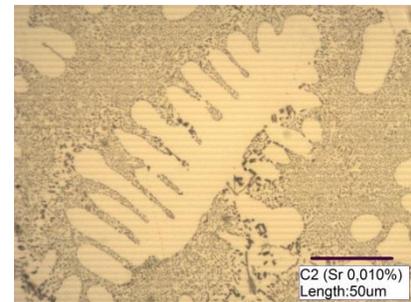


Figura 21 – Teste C2 – 60 min – Microestrutura parcialmente modificada da liga Al-11Si-0,1Mg (200x)

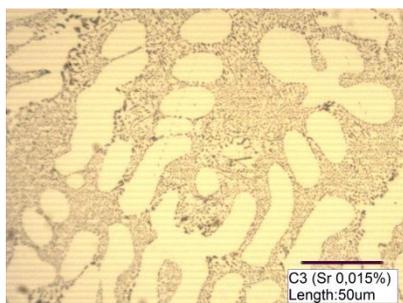


Figura 22 – Teste C3 – 60 min – Microestrutura não lamelar da liga Al-11Si-0,1Mg (200x)



Figura 23 – Teste C4 – 60 min – Microestrutura modificada da liga Al-11Si-0,1Mg (200x)

#### 4 Conclusões

A concentração de titânio na liga na liga Al-11Si-0,1Mg melhora o desempenho do refinador de grão Al-4B à base de  $AlB_2$ . Para 0,0300% de Ti, a adição de 3 kg/t de Al-4B foi suficiente para gerar grãos finos e equiaxiais, enquanto que para 0,0100% de Ti são necessários pelo menos 5 kg/t, como mostraram os testes de refino da *Aluminum Association*.

O aumento da concentração de estrôncio proporcionou uma ligeira melhora no refino de grão do Al-4B sobre a liga Al-11Si-0,1Mg. O tamanho de grão médio foi reduzido de 0,26 mm para 0,22 mm, com a adição de 0,020% de Sr, no tempo de amostragem de 15 minutos.

Trabalhando-se com uma taxa de adição de 3 kg/t de Al-4B (120 ppm de B), 0,0300% de Ti e 0,020% de Sr, obteve-se excelente refino de grão (200 microns) e uma estrutura eutética completamente modificada.

A baixa taxa de adição do refinador Al-4B de 3 kg/t pode prevenir ou retardar a formação de lodo no fundo dos fornos, possibilitando o uso industrial do Al-4B.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à AMG Group / LSM Brasil, por disponibilizar os equipamentos e as matérias-primas e à

Universidade Federal de São João Del Rei, por disponibilizar os laboratórios e equipamentos.

### THE INFLUENCE OF THE CONCENTRATION OF $AlB_2$ , TITANIUM AND STRONTIUM IN THE MACRO AND MICROSTRUCTURE OF AN ALUMINUM-SILICON ALLOY

#### ABSTRACT:

This study aims at showing the effects of possible interactions among boron, titanium and strontium on the macro and micro structure of a near-eutectic Al-Si alloy. During this study, grain refinement tests were made from Aluminum Association, varying the concentration of aluminum diboride (from 40 to 280 ppm of boron), titanium (from 100 to 700 ppm) and strontium (from 50 to 200 ppm). Chemical analyzes were performed with an optical emission spectrometer. For the evaluation of the macro-structure, a stereoscopic microscope was used and the average grain size of the samples was measured by the intercept method. The micro structure was evaluated using an optical microscope and the modifications the eutectic structure were measured through international standards. It is observed that an increase in the titanium content promotes the refining of the primary phase Al-alpha because of the aluminum diboride. For levels of 300 ppm of titanium and 120 ppm boron, the modification of the strontium eutectic structure was not damaged after the addition of the aluminum diboride, which occurs in higher rates of addition. Therefore, the addition of titanium is recommended when electrical and thermal properties are not required, what allows working with lower rates of addition of aluminum diboride (120 ppm of B), obtaining excellent grain refining (~ 200 microns) and without the occurrence of poisoning of strontium.

**Keywords:** Aluminum-silicon alloys. Boron. Titanium. Strontium.

#### Referências

- [1] QIU, D.; TAYLOR, J. A.; ZHANG, M. X.; KELLY, P. M.; A mechanism for the poisoning effect of silicon on the grain refinement of Al-Si alloys, *Acta Materialia*, Vol. 55, p 1447-1456, 2007.
- [2] BIROL, Y.; Grain refinement and modification of Al-Si foundry alloys with B and Sr additions, *Materials Science and Technology*, Vol. 30, p. 1154-1161, 2014.

- [3] APELIAN, D.; SIGWORTH, G. K.; WHALER, K.R.; Assessment of grain refining and modification of AlSi foundry alloys by thermal analysis, AFS Transactions 161, p 297-307, 1984.
- [4] ARANGO, J. M. R.; MARTORANO, M. A.; Efeitos da adição do inoculante Al-3%Ti-1%B às ligas do sistema Al-Si, Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 9, p.71-79, 2012.
- [5] SIGWORTH, G. K.; KUHN, T. A.; Grain refinement of aluminum casting alloys, AFS Transactions, paper 07-067 (02), p. 1-12, 2007.
- [6] BIROL, Y.; Impact of grain size on mechanical properties of AlSi7Mg0.3 alloy, Materials Science & Engineering, v. 559, p. 394-400, 2012.
- [7] CHEN, Z.; WANG, T.; GAO, L.; FU, H.; LI, T.; Grain refinement and tensile properties improvements of aluminum foundry alloys by inoculation with Al-B master alloys, Material Science and Engineering A, Vol. 553, p. 32-36, 2012.
- [8] COOK, R.; COPPER P. S.; KEAMS M. A.; Benefits of master alloy melt treatments in the aluminum foundry industry, Lightmetals, (ed. S. J. Lindsay), p. 647-654; 1996.
- [9] SCHUMACHER, P.; GREER A. L.; Studies of the action of grain-refining particles in aluminium alloys, Light Metals, The Minerals, Metals & Materials Society, Vol.869-877, 1995.
- [10] QUESTED, T. E.; Understanding mechanisms of grain refinement of aluminium alloys by inoculation, Materials Science and Technology, Vol. 20, p. 1357-1369, 2004.
- [11] GREER, A. L.; BUNN, A. M.; TRONCHE, A.; EVANS, P. V.; BRISTOW D. J.; Modelling of inoculation of metallic melts: application to grain refinement of aluminium by Al-Ti-B, Acta Materialia, Vol. 48, p. 2823-2835, 2000.
- [12] ZHANG, M. X.; KELLY, P. M.; EASTON, M. A.; TAYLOR, J. A.; Crystallographic study of grain refinement in aluminum alloys using the edge-to-edge matching model, Acta Materialia, Vol. 53, p. 1427-1438, 2005.
- [13] EASTON, M.; StJOHN, D.; Grain refinement of aluminum alloys: Part I. The nucleant and solute paradigms – A review of the literature, Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 30, p. 1613-1623, 1999.
- [14] EASTON, M.; StJOHN, D.; Grain refinement of aluminum alloys: Part II. Confirmation of, and a mechanism for, the solute paradigm, Metallurgical and materials transactions A, Vol 30A, p. 1625-1633, 1999.
- [15] MOHANTY, P. S.; GRUZLESKI, J. E.; Mechanism of grain refinement in aluminium, Acta Materialia, Vol 43, p. 2001-2012 1994.
- [16] GUZOWSKI, M.M.; SIGWORTH, G.K.; SENTNER, D.A.; The Role of Boron in the grain refinement of aluminum with titanium, Metallurgical Transactions A, Vol 18A, p. 603-619, 1987.
- [17] GUTIERREZ, V.; GONZALEZ, G.; GARCIA, A.; Thermal analysis of grain refinement and modification of an 356 cast alloy, Chemistry and Materials Research, Vol. 6, p. 52-62, 2014.
- [18] ALUMINUM ASSOCIATION, Standard Test Procedure for Aluminum Alloy Grain Refiners – TP1, 1990.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11568: Determinação do tamanho de grão em materiais metálicos. Rio de Janeiro, 1990.
- [20] PITHAN, A; KOCH, H.; Modifications of aluminum alloys for high thermal stresses, Giesserei, Vol. 10, p. 38-43, 2012.