

ESTUDO DE LIGAS Al-Si FUNDIDAS EM MOLDE DE AREIA VERDE: EFEITO DA ADIÇÃO DE REFINADOR E DE MODIFICADORES DE GRÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

G. F. C. Almeida (1); A. A. Couto (1,2); B. P. Severino (1); A. Cabral Neto (1); J. Vatauvuk (1); K. B. S. C. Machado (3,4)
Av. Prof. Lineu Prestes, 2.242, Cidade Universitária, São Paulo, SP, CEP: 05508-900; e-mail: acouto@ipen.br
(1) U.P.Mackenzie; (2) IPEN; (3) ABAL; (4) IPT

RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi caracterizar a microestrutura e as propriedades mecânicas da liga Al-Si hipoeutética (7%Si) fundida em molde de areia verde e identificar os efeitos do refino de grão do alumínio (Al- α) e da modificação do silício eutético. Foram feitas adições diversa do refinador TiBAI (5/1) e de modificadores à base de sais de sódio e a liga SrAl 10%. A liga sem adições de modificadores do silício eutético apresentou os valores mais baixos de limite de escoamento e de resistência devido ao silício apresentar-se na forma de plaquetas. A adição dos modificadores de grão, tanto à base de sódio como estrôncio, acarretou uma mudança na morfologia do silício eutético, tornando-o com uma aparência menos angular e mais arredondada, acompanhada por uma melhoria nas propriedades mecânicas da liga. Nenhuma constatação significativa com relação à microestrutura e às propriedades mecânicas pode ser observada devido à adição do TiBAI.

Palavras-chave: Al-Si, fundição em areia, refino de grão, modificação.

INTRODUÇÃO

A produção de ligas fundidas de alumínio tem aumentado consideravelmente nas últimas décadas. Ligas de alumínio fundidas devem conter, além de elementos endurecedores (Mg, Cu), quantidades suficientes de elementos formadores de eutético (usualmente o silício), visando obter uma maior fluidez. Ligas do sistema Al-Si são as mais importantes entre as ligas fundidas de alumínio, principalmente por

sua alta fluidez, baixa contração nos fundidos, elevada resistência à corrosão, boa soldabilidade, fácil brasagem e seu baixo coeficiente de expansão térmica (1). As ligas de alumínio com 5-20% de Si (em porcentagem em peso) são as mais comuns e as mais usadas na indústria. A característica marcante destas ligas é que elas consistem de uma fase primária, de alumínio ou de silício, e de uma estrutura eutética composta por esses 2 elementos.

A fundição em areia verde é um processo mais simples, mais versátil e de menor custo do que outros processos de fundição. A microestrutura final de uma liga fundida é muito importante, pois influencia suas propriedades mecânicas. Grandes grãos colunares são indesejáveis e o refino e a modificação de grão têm por objetivo suprimir a formação destes grãos. Os refinadores de grão introduzem muitas partículas, que agem como substratos para nucleação do alumínio primário (Al- α). Quando o refinamento de grão é bem sucedido, finos grãos de Al- α são formados e conduzem a uma melhoria da fundabilidade e das propriedades mecânicas (2). A adição destes refinadores provoca a formação de partículas sólidas dispersas de Al₃Ti que atuam como núcleos para os primeiros grãos decorrentes da solidificação. O refino de grão tem como objetivo principal reduzir os tamanhos das dendritas (grão da fase α pró-eutética), melhorando as condições de alimentação (e assim, a sanidade e estanqueidade das peças fundidas), as propriedades mecânicas (limites de escoamento e de resistência), bem como a tendência a formação de trincas a quente (3-7).

A microestrutura bruta de fundição das ligas Al-Si apresenta, em geral, partículas de Si com morfologia acicular, que diminui a ductilidade do material. A modificação consiste em um tratamento do banho da liga Al-Si pela adição de agentes modificadores da morfologia das partículas de Si (8,9). Os agentes modificadores mais empregados são: o Na (Sódio), o Sr (estrôncio) e o Sb (antimônio). Adições destes elementos (entre 0,005 e 0,02% em peso) promovem fortes alterações no crescimento da fase β (silício) do eutético: a fase β passa a exibir uma morfologia mais refinada, aumentando a ductilidade das ligas Al-Si fundidas. A modificação com estrôncio é realizada por meio da adição de estrôncio (Sr) metálico ou na forma de ante-liga Al-Sr. Normalmente, as adições são da ordem de 0,01% de Sr e exige-se um tempo de incubação para banhos com pouca agitação.

Diante do citado anteriormente, este estudo pretende investigar os efeitos da adição de titânio, boro, estrôncio e sódio no refinamento de grão de alumínio e na modificação das partículas do silício e, conseqüentemente, nas propriedades mecânicas de ligas Al-Si fundidas em molde de areia verde. O material investigado neste trabalho foi a liga Al-Si com composição hipoeutética (7 % em peso de Si).

MATERIAIS E MÉTODOS

A liga Al-Si utilizada neste estudo foi a A356.0, fornecida na forma de lingotes pela Metalur Ltda., cuja composição é mostrada na tabela 1. O refinador de grão utilizado foi uma liga de alumínio, titânio e boro com uma relação de titânio/boro de 5/1, conforme mostrado na tabela 2. Os modificadores do silício eutético utilizados foram à base de sais de sódio e a liga SrAl. A composição química da liga SrAl utilizada como modificador é mostrada na tabela 3. Em todas as fusões foram utilizados desgaseificantes e escorificantes.

Tabela1: Composição química da liga de Al-Si A356.0.

Elemento	Mg [%]	Si [%]	Mn [%]	Cu [%]	Zn [%]	Fe [%]	Ti [%]	Al [%]
A356.0	0,2 a 0,45	6,5 a 7,5	0,35 máx.	0,25 máx.	0,35 máx.	0,6 máx.	0,25 máx.	Balanço

Tabela 2: Composição química da liga TiBAI utilizada como refinador de grão.

Elemento	% Ti	% B	% V	% Fe	% Si	% outros	% Al
TiBAI	4,60	0,92	0,08	0,18	0,14	0,10 máx	Balanço

Tabela 3: Composição química da liga SrAl utilizada como modificador do silício.

Elemento	% Sr	% Fe	% Si	% Ba	% Ca	% P	% outros	% Al
SrAl	10,05	0,19	0,10	0,10 máx	0,03 máx	0,01 máx	0,10 máx	Balanço

As fusões foram realizadas em forno de indução ao ar, com temperatura de vazamento de 750°C, controlada por pirômetro de imersão. Todas as ligas foram vazadas em molde de areia verde, utilizando como modelo uma placa com cinco corpos-de-prova para ensaio de tração, conforme mostrado na figura 1. Nas ligas Al-Si foram feitas adições dos diferentes refinadores e modificadores conforme

procedimentos e especificações dos fabricantes. As denominações das ligas com as diferentes adições de refinadores e modificadores são apresentadas na tabela 4.



Figura 1: Modelo de madeira e molde de areia verde dos corpos-de-prova para ensaios de tração das ligas fundidas.

Tabela 4: Ligas Al-7%Si com adições de refinadores e modificadores.

LIGA	MODIFICADOR	REFINADOR
B	-	-
D	Sais de Sódio	TiBAI 5/1
E	SrAl 10%	-
F	SrAl 10%	TiBAI 5/1
G	-	TiBAI 5/1

Após a fusão e o vazamento, os corpos-de-prova para ensaios de tração foram cortados e esmerilhados. Os ensaios de tração foram executados em máquina universal de ensaios mecânicos Q-Test e foram determinados o limite de escoamento, o limite de resistência e o alongamento total. Uma amostra do canal de alimentação, junto aos corpos-de-prova de tração, foi retirada para análise metalográfica e medidas de dureza Vickers. As amostras para observações microestruturais foram preparadas por meio de técnicas metalográficas convencionais de lixamento e polimento. No polimento final das amostras metalográficas foram utilizadas pasta de diamante e sílica coloidal. As observações microestruturais foram feitas num microscópio óptico da Olympus acoplado a um sistema de análise de imagens. As medidas de dureza Vickers foram executadas num equipamento Buehler com aplicação de carga de 5 kg.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As propriedades mecânicas obtidas em ensaios de tração e as medidas de dureza Vickers da liga Al-7%Si com adições de refinadores e modificadores diversos são apresentadas na tabela 5. A liga B, sem adições de refinador e modificador, apresentou os valores mais baixos de limite de escoamento e de resistência. Contudo, a ductilidade da liga Al-7%Si sem adições apresentou valores similares aos das ligas com adições. A adição de modificador, tanto à base de estrôncio como à base de sódio, e do refinador parece induzir a um aumento na resistência mecânica da liga Al-7%Si fundida em molde de areia verde. Este aumento na resistência mecânica devido às adições de modificadores e de refinador não acarreta mudanças significativas da ductilidade da liga. A adição dos modificadores parece ter um efeito mais pronunciado do que a adição do refinador no aumento da resistência mecânica da liga. As medidas de dureza acompanham razoavelmente os valores de limite de resistência. Entretanto, os valores de dureza são dependentes da posição em que são feitas as indentações, prejudicando a análise.

Tabela 5: Propriedades mecânicas obtidas em ensaios de tração e medidas de dureza Vickers das ligas Al-7%Si com adições de refinador e modificadores.

LIGA	LIMITE DE ESCOAMENTO (MPa)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	ALONGAMENTO (%)	DUREZA VICKERS (HV)
B	86,6±4,3	119,6±5,8	10,8±1,1	58,3±3,2
D	111,6±1,7	152,9±5,0	10,1±1,4	60,1±3,3
E	107,9±4,4	154,5±4,1	12,1±1,7	70,7±2,6
F	102,3±1,4	153,4±8,9	11,9±2,7	61,4±0,5
G	103,4±3,3	136,5±1,7	9,4±0,8	58,2±0,3

A evolução da microestrutura durante a solidificação de ligas Al-Si hipoeutética pode ser considerada como consistindo de dois estágios principais. O primeiro estágio envolve a nucleação e crescimento de dendritas de alumínio e o segundo a nucleação e o crescimento do eutético Al-Si. Nas figuras 2 a 6 são apresentadas as micrografias observadas por microscopia óptica da liga Al-Si com adições de

refinadores de grão do Al- α e modificadores do silício eutético. Na figura 2 é apresentada uma micrografia típica da liga Al-7%Si somente com adição de refinador de grão, sem adição de modificadores. Na figura 3 é mostrado em detalhe a região eutética da microestrutura da figura 2. Notam-se nesta figura que o silício no eutético tem uma morfologia tipo plaquetas típicas das ligas não-modificadas. Os resultados de limite de resistência mais baixos verificados nas ligas sem modificador (B e G) podem ser explicados pela morfologia do silício no eutético.

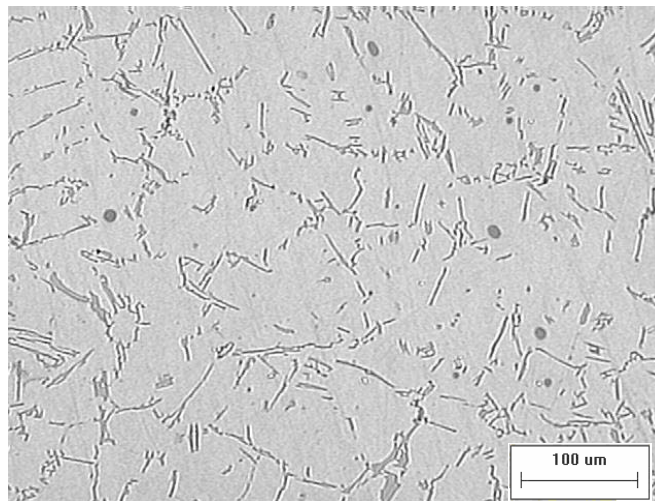


Figura 2: Micrografia típica da liga G, com adição apenas do refinador de grão TiBAI 5/1.

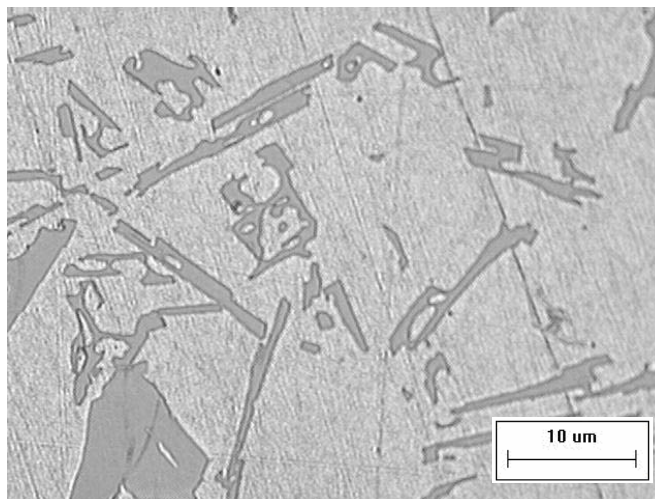


Figura 3: Detalhe da região do eutético da liga G, com adição apenas do refinador de grão TiBAI 5/1.

Na figura 4 é mostrada a micrografia típica da liga Al-7%Si com adição do refinador TiBAI 5/1 e do modificador à base de sais de sódio. Nota-se nesta figura a presença de dendritas de Al- α e um eutético contínuo. Um detalhe da região do eutético é mostrado na figura 5, onde se observa uma estrutura eutética com o silício com uma aparência menos angular e mais arredondada devido ao modificador. Na figura 6 é mostrada a micrografia típica da liga Al-7%Si com adição apenas do modificador SrAl 10%. A adição do refinador TiBAI 5/1 em conjunto com o modificador SrAl 10% não alterou a microestrutura mostrada na figura 6. De uma maneira geral, a adição dos modificadores utilizados parece ter o mesmo efeito na microestrutura da liga Al-7%Si, independentemente se o modificador for à base de sódio ou estrôncio. Esta modificação da morfologia do silício eutético parece ser a responsável pelos valores mais elevados de resistência mecânica em tração da liga Al-7%Si. Nenhuma constatação significativa pode ser observada em função da adição do refinador de grão.

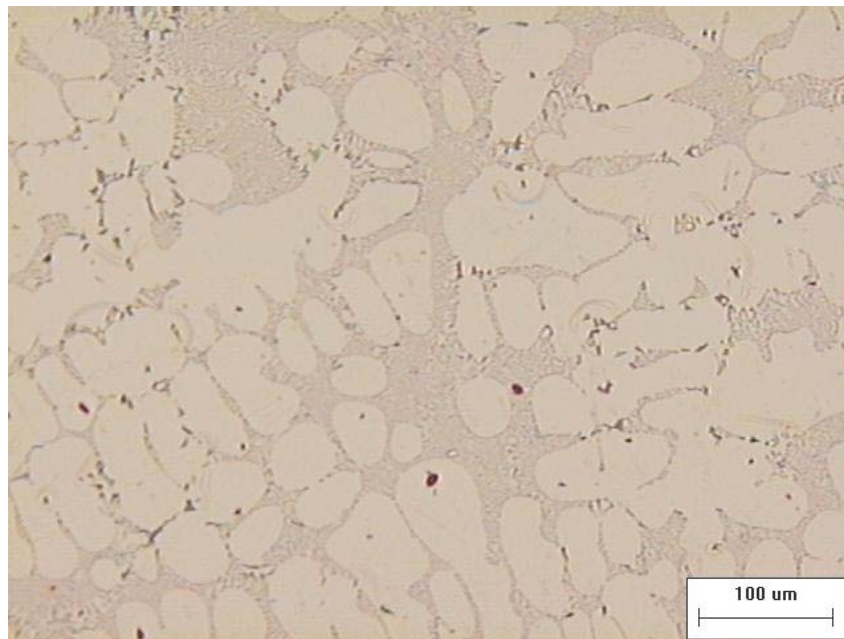


Figura 4: Micrografia típica da liga D, com adição de sais de sódio e TiBAI 5/1.

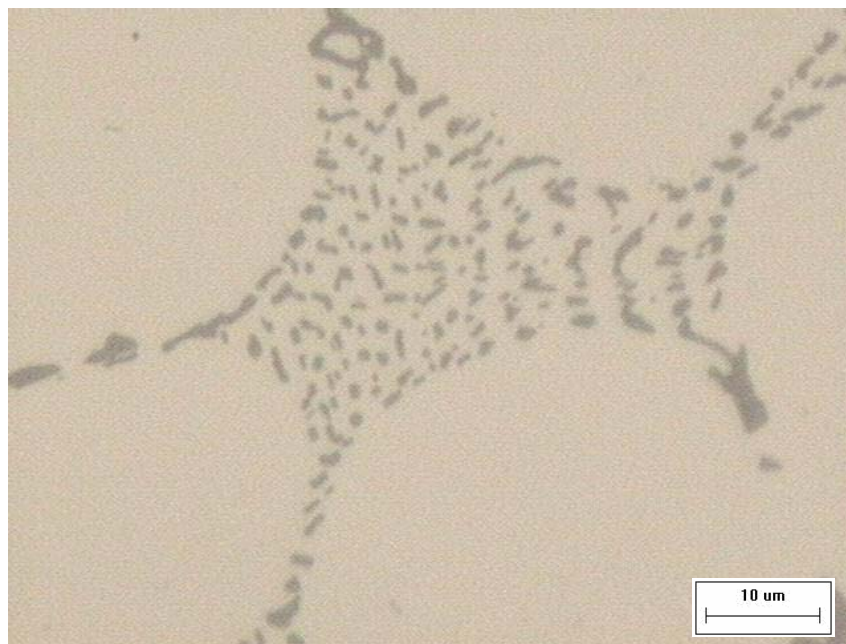


Figura 5: Detalhe da região do eutético da liga D, com adição de sais de sódio e TiBAI 5/1.

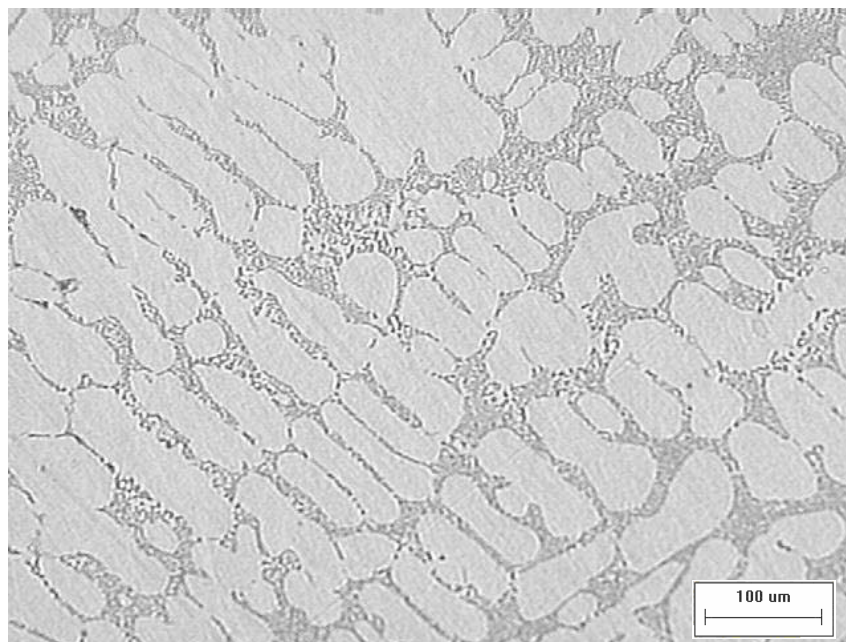


Figura 6: Micrografia típica da liga F, com adição apenas do modificador SrAl 10%.

CONCLUSÕES

O estudo do efeito da adição de refinador de grão e de modificadores do eutético na microestrutura e no comportamento mecânico da liga Al-7%Si permitiu concluir que:

- A liga sem adições de modificadores do silício eutético apresentou os valores mais baixos de limite de escoamento e de resistência devido ao silício apresentar-se na forma de plaquetas.
- A adição dos modificadores de grão, tanto à base de sódio como estrôncio, acarretou uma mudança na morfologia do silício eutético, tornando-o com uma aparência menos angular e mais arredondada. Esta mudança no silício do eutético foi acompanhada por uma melhoria nas propriedades mecânicas da liga.
- Com relação à adição do refinador TiBAL, nenhuma constatação significativa com relação à microestrutura e às propriedades mecânicas pode ser observada.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado em parte pelo Instituto Presbiteriano Mackenzie através do Fundo Mackenzie de Pesquisa – MackPesquisa. Os autores agradecem ao MackPesquisa pelas bolsas concedidas às alunas Gisele Fabiane Costa Almeida e Beatriz de Pádua Severino. Os autores também agradecem à Associação Brasileira do Alumínio - ABAL e à Metalur Ltda. pelo apoio e pelo material utilizado neste trabalho.

REFERÊNCIAS

1. ASM HANDBOOK; Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals. The Ninth Edition of Metals Handbook, v. 2, 1991.
2. PIO, L. Y.; SULAIMAN, S.; HAMOUDA, A. M.; AHMAD, M. M. H. M.; Grain refinement of LM6 Al-Si alloy sand casting to enhance mechanical properties. Journal of Materials Processing and Technology, 162 (2005), 435-441.

3. NAKAI, M.; ETO, T.; New aspects of development of high strength aluminum alloys for aerospace applications. *Materials Science and Engineering*, v. A285, p.62-68, 2000.
4. HEIBERG, G.; NOGITA, K.; DAHLE, A. K.; ARNBERG, L.; Columnar to equiaxed transition of eutectic in hypoeutectic aluminum-silicon alloys. *Acta Materialia*, 50 (2002), 2537-2546.
5. SCHAFFER, P. L.; ARNBERG, L.; DAHLE, A. K.; Segregation of particles and his influence on the morphology of eutectic silicon phases in Al-7wt.% Si alloys. *Scripta Materialia*, 54 (2006), 677-682.
6. SRITHARAN, T.; LI, H.; Influence of titanium to boron ratio on the ability to grain refine aluminum-silicon alloys. *Journal of materials Processing Technology*, 63 (1997), 385-389.
7. McDONALD, S. T.; NOGITA, K.; DAHLE, A. K.; Eutectic nucleation in Al-Si alloys. *Acta Materialia*, 52 (2004), 4273-4280.
8. NOGITA, K.; DAHLE, A. K.; Effects of boron on eutectic modification of hypoeutectic Al-Si alloys. *Scripta Materialia*, 48 (2003), 307-313.
9. McDONALD, S. T.; NOGITA, K.; DAHLE, A. K.; Eutectic grain size and strontium concentration in hypoeutectic aluminum-silicon alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 422 (2006), 184-191.

STUDY OF THE Al-Si ALLOYS CASTED IN A GREEN SAND MOLD: THE EFFECT OF THE ADDITION OF GRAIN REFINERS AND MODIFIERS IN THE MECHANICAL PROPERTIES

ABSTRACT

The objective of this paper is to characterize the microstructure and the mechanical properties of the hypoeutectic Al-Si alloy (7%Si) casted in a green sand mold and to identify the effects of the aluminum grain refinement and the eutectic silicon modification. There were made diverse additions of the TiBAl refiner (5/1) and

sodium salt-based modifiers and the SrAl 10% alloy. The alloy with no eutectic silicon modifiers addition presented the lower values of strength due to the silicon presenting in the form of plaquettes. The grain modifiers addition, both sodium-based and strontium based, resulted in a change in the eutectic silicon morphology, making it have a less pointed and more rounded appearance, with an improvement in the alloy's mechanical properties. No significant evidences related to the microstructure and to the mechanical properties could be observed due to the addition of TiBAI.

Key-words: Al-Si, sand casting, grain refinement, modification.