

## **EFEITO DA MODIFICAÇÃO COM ESTRÔNCIO NA MICROESTRUTURA E NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA 356<sup>1</sup>**

*Sacha Karine de Araujo<sup>2</sup>  
Guilherme Ourique Verran<sup>3</sup>  
Vinícius Maurício Cardeliquio Villela<sup>4</sup>*

### **Resumo**

A resistência mecânica e a qualidade de ligas fundidas alumínio-silício são determinadas pela microestrutura e pela sanidade interna das peças fundidas. Tratamentos de refino de grão e de modificação do silício causam alterações microestruturais que resultam em melhorias nas propriedades mecânicas das ligas Al-Si de fundição. O tratamento de modificação altera a forma do silício do eutético da forma acicular para forma fibrosa interferindo no efeito destas partículas sobre o comportamento mecânico da liga. Diversos tipos de modificadores são descritos na literatura, entretanto somente o estrôncio e o sódio apresentam efeitos de modificação adequados para as baixas concentrações requeridas, sendo o estrôncio o mais empregado em fundições, em função da maior facilidade no manuseio e uma maior resistência ao desvanecimento. Entretanto, adições de Sr estão associadas com a formação da porosidade em ligas modificadas. O principal objetivo deste estudo foi avaliar a influência de diferentes percentuais de estrôncio sobre a morfologia e a distribuição das partículas de Si na matriz, bem como os efeitos destas alterações sobre as propriedades mecânicas. Os resultados obtidos indicam que teores de Sr a partir de 0,012% em peso resultaram na modificação total do Si e incrementos consideráveis na ductilidade da liga 356.

**Palavras-chave:** Liga de alumínio-silício; Modificação; Eutético de silício; Propriedades mecânicas; Microestrutura; Estrôncio.

### **EFFECT OF STRONTIUM MODIFICATION IN MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES IN 356 ALLOY**

#### **Abstract**

The strength and quality of cast aluminum-silicon alloys are determined by the microstructure and the homogeneity of the castings. Grain refining treatments and modification of the silicon are used to cause microstructural changes that result in improvements in mechanical properties to Al-Si alloy casting. Treatment to modify alters the shape of eutectic silicon from acicular to fibrous form as interfering with the effect of these particles on the mechanical behavior of the alloy. Several types of modifiers are described in the literature, however, only strontium and sodium are acceptable for the purpose of modification required to these low concentrations, and strontium has a large use in foundries, due to ease handling and greater resistance to fading. However, additions of Sr are associated with the formation of porosity in modified alloys. The aim of this study was to evaluate the influence of different percentages of strontium on the morphology and distribution of Si particles in the matrix and the effects of these changes on the mechanical properties. The results indicate that levels of Sr from 0,012 wt% led full modification of Si particules and considerable increases in the ductility of the alloy 356.

**Key words:** Aluminum-silicon alloys; Modification; Eutectic silicon; Mechanical properties; Microstructure; strontium.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 12º Seminário de Metais Não-ferrosos, 31 de outubro a 1 de novembro de 2011, São Paulo, SP.*

<sup>2</sup> *Eng. Mecânica – Mestranda do PGCEM-CCT-UDESC.*

<sup>3</sup> *Dr. Eng. Metalúrgica – Professor do DEM/PGCEM/UDESC.*

<sup>4</sup> *Acadêmico de Eng. Mecânica – Bolsista PIBIC\_CNPQ\_UDESC.*

## 1 INTRODUÇÃO

As ligas Al-Si constituem 80% das ligas de fundição em alumínio, devido as suas características como: excelente fluidez, alta resistência à corrosão, boa soldabilidade, baixa contração na solidificação e baixo coeficiente de dilatação térmica.<sup>(1,2)</sup>

Nestas ligas o silício forma um sistema eutético com o alumínio, sendo responsável por aumentar a fluidez na alimentação dos rechupes que ocorrem nas ligas fundidas, reduz o ponto de fusão da liga, assim como também diminui a contração da liga durante a solidificação. Outra vantagem é sua baixa densidade  $2,75 \text{ g/cm}^3$ , que mantém a liga fundida com uma baixa densidade em relação ao peso da peças, tornando seu custo de produção interessante para o mercado.<sup>(3)</sup>

Quando as ligas Al-Si são fundidas em areia ou em molde permanente uma forma de melhorar suas propriedades de resistência mecânica, ductilidade, estanquidade e usinabilidade é através da modificação do eutético. Em solidificações lentas de ligas Al-Si, forma-se uma microestrutura com uma morfologia grosseira, onde o eutético aparece na forma de placas ou agulhas de silício dentro de uma matriz de alumínio. Nesta morfologia, o silício é denominado acicular. Estas grosseiras agulhas de silício são quebradiças, ocasionando estruturas eutéticas com baixa ductilidade e baixa resistência mecânica.<sup>(4,5)</sup>

A utilização de modificadores químicos, como o estrôncio, resultam na modificação do silício do eutético, mudando sua morfologia de grosseira e na forma de agulha para uma morfologia mais fina e na forma fibrosa. Os modificadores influenciam no processo de nucleação e crescimento dos cristais de silício eutético, conforme diferentes abordagens teóricas e experimentais descritas na literatura, como Sathyapal revisou em seu artigo sobre as principais teorias para os mecanismos de modificação de ligas Al-Si.<sup>(5)</sup> A teoria da restrição a nucleação, defendida por Dahle, onde há relação entre o grau de modificação e frequência de nucleação de grãos eutéticos e a teoria da restrição ao crescimento defendida por Makhoulouf, na qual a adsorção do modificador causa a ocorrência de maclas reentrantes que se encaixam ou crescem na superfícies da fase de Si, inibindo o crescimento de Si e produzindo assim uma estrutura modificada.<sup>(6)</sup> O estrôncio é o modificador mais utilizado na indústria, por ser de fácil manuseio, não ser tóxico, ter uma boa taxa de modificação com adição de uma pequena quantidade de material em peso em relação à liga e por ter bom tempo de atuação no banho.<sup>(7-9)</sup>

Alguns estudos Closset defendem que a quantidade ideal de estrôncio a ser adicionada na liga está em torno de 0,005% a 0,012% em peso, para atingir propriedades mecânicas ideais, outros estudos DasGupta defendem o uso de estrôncio entre 0,005% e 0,01% em peso. Ligas com teores de estrôncio menores que os necessários para atingirem uma modificação ideal tendem a apresentar uma microestrutura parcialmente modificada. Teores de estrôncio superiores ao necessário para uma modificação ideal resultam no fenômeno denominado supermodificação.<sup>(10)</sup>

Nesta pesquisa, diferentes níveis de estrôncio foram adicionados na liga alumínio-silício denominada de 356, com o objetivo de investigar a influência da quantidade de estrôncio sobre a microestrutura, em especial sobre a morfologia do silício eutético, e as consequências destas alterações sobre o comportamento mecânico da liga.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Como agente modificador foi utilizado estrôncio na forma de ante-liga de alumínio com 10% em peso de Sr, na forma de vareta, o que facilita o seu manuseio, como liga base foi escolhida a 356 com composição química conforme apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1.** Composição química da liga alumínio – silício 356 não modificada

Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Sr	Al
P%	6,54	0,08	0,04	0,03	0,11	0,009	0,07	0	Remanescente

Os corpos de prova fundidos foram obtidos pelo método de fusão por indução em um forno da marca Inductotherm modelo VIPPT 10, 30 KW no Labfund/DEM/UEDESC. Sendo 1 kg aproximadamente de liga de alumínio-silício 356 fundida num cadinho de carbetto de silício. A temperatura de fusão utilizada foi de aproximada de  $720 \pm 10^\circ\text{C}$ . Na liga líquida foi adicionado 6 g de desgaseificante em forma de pastilha com principio ativo de hexacloretano, com um sino de imersão. Após ocorrer a ação do desgaseificante na liga está foi deixada por aproximadamente 10 min em repouso na temperatura de  $720 \pm 10^\circ\text{C}$ . Depois do repouso foi adicionado a ante-liga Al-10%Sr por 15 minutos até conseguir a homogeneização do banho. A Tabela 2 apresenta as concentrações de estrôncio nas amostras fundidas da liga 356.

**Tabela 2.** Percentuais de estrôncio utilizados\*

Liga	T1	T2	T3	T4	T5
Sr (peso) %	0	0,008	0,012	0,022	0,031

\* percentuais em peso medidos por espectroscopia de emissão ótica

Na caracterização foi utilizado microscópio metalográfico óptico. As amostras foram retiradas dos corpos de prova de fundição designados para este fim, sem terem sido feito nestes corpos ensaio de tração. Estas amostras foram lixadas mecanicamente e depois polidas. Após o polimento foi realizado ataque químico com ácido fluorídrico 0,5%.<sup>(11)</sup> Foram estudados os microconstituintes da liga e as formas do eutético de Silício.

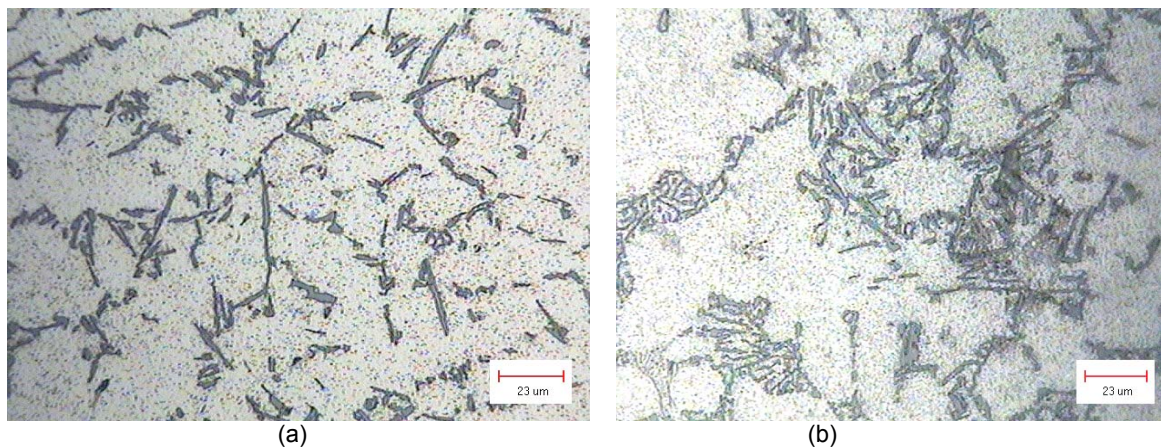
Os ensaios de resistência á tração foram realizados conforme a norma ASTM E 8M-01, em uma máquina de ensaios mecânicos universais EMIC 300 KN, com uma velocidade de aplicação de carga de 5 mm/min. Dados como limite de resistência, tensão limite de escoamento e alongamento foram obtidos com a realização do ensaio.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

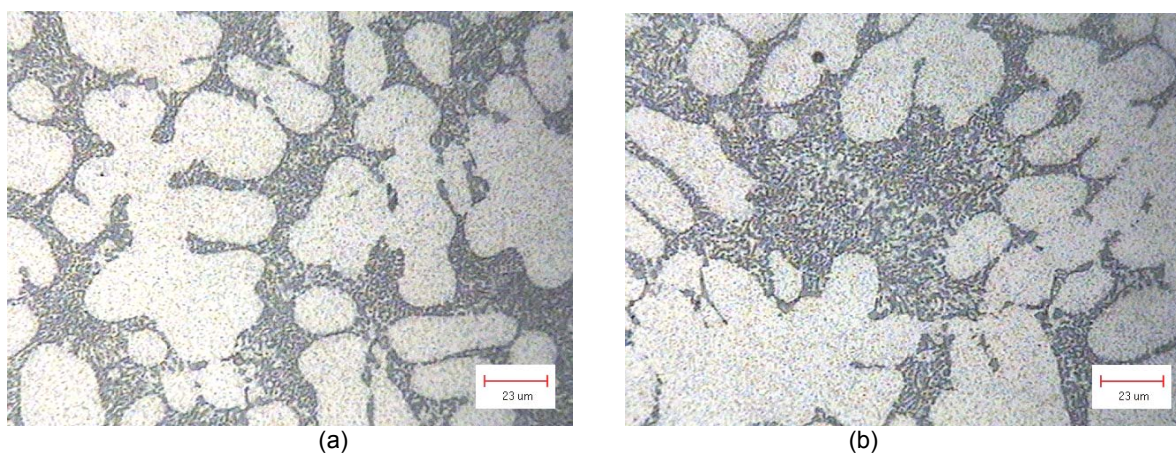
### 3.1 Caracterização Microestrutural

As Figuras 1 e 2 mostram a evolução na alteração na microestrutura da liga com o acréscimo no percentual de estrôncio utilizado.





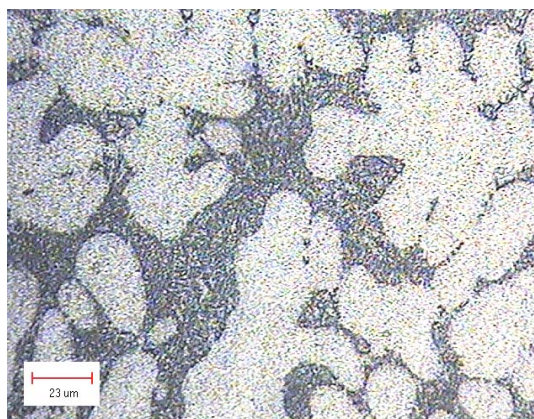
**Figura 1.** Imagens de microscopia óptica representativas das microestruturas da liga 356. (a) não modificada; e (b) modificada com 0,008% Sr peso.



**Figura 2.** Imagens de microscopia óptica representativas das microestruturas da liga 356. (a) modificada 0,012% S em peso; e (b) modificada com 0,022% Sr em peso.

Na Figura 1 observa-se presença do Si na forma de plaquetas para a amostra fundida sem adição de estrôncio (Figura 1a) e ocorrência de modificação parcial do Si para a liga com 0,008% em peso de Sr (Figura 1b), sugerindo que esta quantidade de Sr não é suficiente para a modificação desta liga.

A Figura 2 mostra a ocorrência de modificação total do Si para os dois percentuais investigados, não se observou alteração significativa na microestrutura com o acréscimo no Sr de 0,012% (Figura 2a) para 0,022% em peso (Figura 2b).

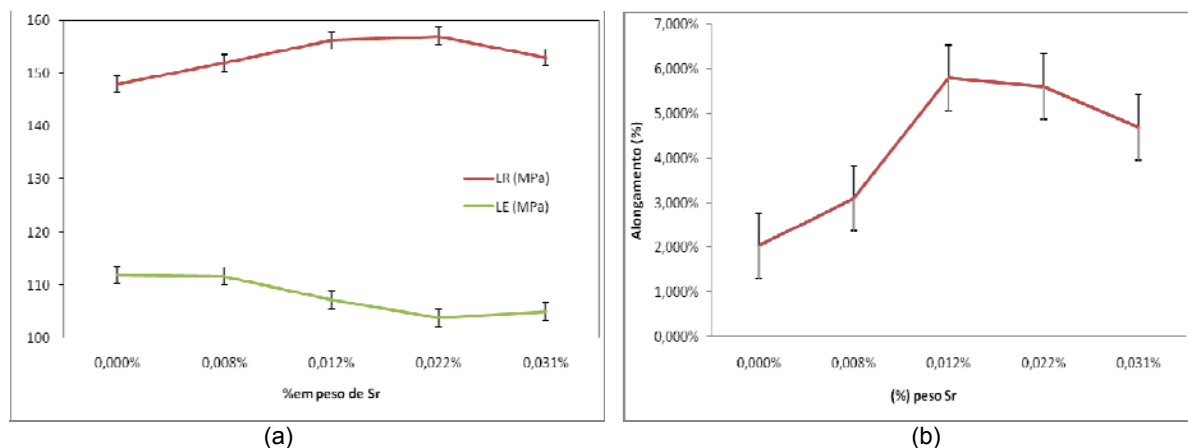


**Figura 3.** Imagem de microscopia óptica representativa da microestrutura da liga 356 modificada com 0,031% Sr em peso.

Na microestrutura da liga com adição de 0,031% de Sr (Figura 3) observa-se uma maior aglomeração das partículas de Si e um aparente engrossamento de algumas partículas, sugerindo que esta concentração pode causar supermodificação das partículas de Si.

### 3.2 Propriedades Mecânicas

O efeito do tratamento de modificação nas propriedades de tração como Limite de Resistência, Limite de escoamento e Alongamento, para os lotes fundidos com a liga 356, estão representados graficamente na Figura 4.



**Figura 4.** Valores das propriedades mecânicas para diferentes percentuais de Sr na liga 356.

Como pode ser observado pela Figura 4a, ocorreram incrementos no limite de resistência com o acréscimo no percentual de Sr utilizado no tratamento de modificação, e uma pequena queda com a concentração de 0,031%Sr, mas mantendo valores acima da condição bruta de fundição. Com relação ao limite de escoamento os incrementos nos percentuais de Sr no tratamento de modificação resultaram de menores valores nesta propriedade, o que pode ser atribuído ao aumento da ductilidade (Figura 4b) em função da modificação do Si. A liga modificada com 0,012% em peso de Sr apresentou os maiores incrementos nos valores de alongamento, atingido um alongamento médio de 5,8% que em comparação com a liga não modificada (alongamento de 2,03%) indica um incremento de 3,8% no alongamento.

Comparando-se as microestruturas com os valores das propriedades mecânicas observa-se a influência da modificação da morfologia das partículas de Si no comportamento mecânico desta liga, e a evidente influência desta modificação sobre a alteração na ductilidade, pois embora se tenha obtido menores limites de escoamento, maiores deformações plásticas são necessárias para atingir os máximos limites de resistência.

Observou-se que para esta liga, nas condições de fundição utilizadas nesta pesquisa, as melhores propriedades mecânicas foram atingidas para as concentrações entre 0,012% e 0,022% em peso de Sr, acima deste limite observou-se uma tendência a redução nestas propriedades.

Acredita-se que a modificação na morfologia do silício promove uma maior continuidade na matriz de  $\alpha$ -alumínio e uma melhor distribuição das partículas de silício, o que contribui para o aumento da resistência e da ductilidade da liga.

Na continuidade deste trabalho pretende-se estudar os efeitos do percentual de Sr sobre a superesfriamento na solidificação e suas correlações com a microestrutura e



o comportamento mecânico da liga, também se pretende utilizar MEV para a caracterização da fratura e investigação da possível ocorrência de supermodificação para maiores concentrações de Sr.

#### **4 CONCLUSÕES**

O estudo foi baseado na elaboração de um do procedimento de fundição de corpos de prova da liga 356 em coquilha e na avaliação dos efeitos da modificação com estrôncio sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas dos fundidos.

As propriedades mecânicas apresentaram alterações em função dos percentuais de estrôncio na liga, verificou-se um aumento no limite de resistência com o tratamento de modificação para o uso de até 0,022%Sr e uma pequena queda para a concentração de 0,031%Sr, no entanto, os valores máximos mantiveram-se acima da condição bruta de fundição. Com relação ao limite de escoamento ocorreram perdas com o tratamento de modificação. Porém, esta perda no limite de escoamento, foi compensada por um aumento da ductilidade resultante do tratamento.

As análises das microestruturas permitiram observar um início de modificação para o percentual de 0,008%Sr, mostrando uma estrutura parcialmente modificada com silício na forma de agulhas e na forma de fibras, o que esta em concordância com propriedades mecânicas obtidas. Para os percentuais entre 0,012% e 0,022% de Sr observou-se uma modificação total do eutético de silício, com a morfologia em forma de fibras finas. Os decréscimos observados nas propriedades mecânicas das amostras com 0,031%Sr podem estar relacionados com a ocorrência de supermodificação, no entanto a técnica metalográfica utilizada não permitiu detectar com clareza este fenômeno, apesar da observação de um engrossamento das partículas de Si, uma investigação mais detalhada usando MEV será utilizada para um melhor entendimento deste fato.

#### **Agradecimentos**

Os autores agradecem à Capes e ao programa PIBIC-CNPq-UDESC pelas bolsas concedidas e às empresas Wetzell Divisão Alumínio S.A, Alumínio Rio Cedrense e VR Metais pelas doações das matérias primas utilizadas neste estudo.

#### **REFERÊNCIAS**

- 1 ABAL: Associação Brasileira do Alumínio. Manuais Fundamentos e Aplicações do Alumínio, 2008.
- 2 LIANG, Z.; ZHAO, D.; FUXIAO Y.; KEZHUN H.; Effect of phosphorus modification on the microstructure and mechanical properties of DC cast Al17.5Si-4.5Cu-1Zn-0,7Mg-0,5Ni alloys, Transactions of Indian Institute of Metals, v. 62, p. 367-371,2009.
- 3 DJURDJEVIC, M.; JIANG, H.; SOKOLOWSKI, J.; On -line prediction of aluminum-silicon eutectic modification level using thermal analysis, Materials Characterization, v. 46, p. 31-38, 2001.
- 4 JUNG, H.K; SEO, P.K; KANG, C.G. Microstructural characteristics and mechanical properties of hypo-eutectic and hyper-eutectic Al-Si alloys in the semi-solid forming process, Journal of Materials Processing Technology, v. 113, p. 568-573, 2001.
- 5 SATHYAPAL, H.; PRABHU, N.K.; Modification of eutectic silicon in Al-Si alloys, Journal of Materials Science, p. 3009 – 3026, 2008.



- 6 SHABESTARI, S.G.; GHODRAT, S.; Assessment of modification and formation of intermetallic compounds in aluminum alloy using thermal analysis, *Materials Science & Engineering*, A 467, p. 150 – 158, 2007.
- 7 ZHANG, B.; POIRIER, D.R; CHEN, W., Efeito da pressão isostática a quente e da modificação sobre a liga A356.2, *Revista Fundição e Serviços*, v.146, p. 18 – 32, 2004.
- 8 LIU, L.; SAMUEL, A.M.; SAMUEL, F.H, Role of Strontium Oxide on porosity formation in Al-Si casting alloys, *AFS Transactions*, v. 02-138, p. 1-14,2002.
- 9 MA, Z.; SAMUEL, A.M.; SAMUEL, F.H. Effect of Iron and Cooling Rate on Tensile Properties of B319.2 Alloys in Non-Modified and Sr-Modified Conditions. *AFS Transactions*, v. 01-45, p. 1-12 ,2004.
- 10 FURLAN, TARITA S. Influência do Teor de Estrôncio na Modificação da Liga A356. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- 11 COUTINHO, T. A.; *Metalografia de Não Ferrosos: Análise e Prática*. Editora Edgar Blucher, São Paulo, 1980.
- 12 ASTM. E 8M-01 - Test methods for tension testing of metallic materials [Metric]. West Conshohocken, s.d.