

## CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE LIGA ALUMÍNIO PARA COMPONENTES ANTIFRICÇÃO\*

Cássio Barbosa<sup>1</sup>  
Sheyla Santana de Carvalho<sup>2</sup>  
Ibrahim de Cerqueira Abud<sup>3</sup>  
Lisiane Gonçalves de Lima<sup>4</sup>  
Denise Souza de Freitas<sup>5</sup>

### Resumo

O desenvolvimento da indústria metal-mecânica nos últimos anos tem levado à demanda de materiais com propriedades mecânicas e de resistência à corrosão cada vez melhores, com o objetivo de suportar severas condições de uso e assim garantir melhor desempenho para equipamentos e estruturas que utilizam os componentes fabricados com estes materiais. Neste contexto, é de fundamental importância conhecer bem a microestrutura destes materiais, que influencia consideravelmente suas propriedades. O propósito deste trabalho é realizar uma caracterização preliminar de ligas não ferrosas (de alumínio e de cobre) utilizadas na fabricação de componentes antifricção. Com esta finalidade, técnicas como microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura (MEV), envolvendo análises de EDS e de EBSD, assim como ensaios de microdureza foram utilizadas para caracterizar a microestrutura do material (liga Al-Sn-Si-Cu). Os resultados obtidos neste estudo permitiram a identificação das fases presentes neste material.

**Palavras-chave:** Caracterização microestrutural; Alumínio; Fricção.

### MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION OF ALUMINUM ALLOY FOR ANTIFRICTION COMPONENTS

#### Abstract

In the last years the development of the mechanical and metallurgical industry has led to the search for materials with even better mechanical properties and corrosion resistance, with the purpose of withstanding severe conditions of use and thus assesses better performance for equipments and structures that use components fabricated with such materials. In this context it is very important to know in detail the microstructure of these materials that influence considerably their properties. The purpose of this work is to achieve an initial characterization of non ferrous alloys (aluminum and copper based alloys) used in the fabrication of antifriction components. With focus on this aim, techniques such as optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM), comprising EDS and EBSD analysis procedures were used to characterization the microstructure of the alloy (Al-Sn-Si-Cu). The results obtained in this study allowed the identification of the phases present in this material.

**Keywords:** Microstructural characterization; Aluminum; Friction.

- <sup>1</sup> Engenheiro Metalúrgico, D.Sc., Tecnologista, DEMP/LACPM, Instituto Nacional de Tecnologia - INT, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- <sup>2</sup> Engenheira Mecânica, M.Sc., Tecnologista, DCOR/LACOR, Instituto Nacional de Tecnologia - INT, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- <sup>3</sup> Engenheiro Metalúrgico, M.Sc., Tecnologista, DEMP/LACPM, Instituto Nacional de Tecnologia - INT, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- <sup>4</sup> Química Industrial, M.Sc., Tecnologista, DCOR/LACOR, Instituto Nacional de Tecnologia - INT, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- <sup>5</sup> Engenheira Química, Ph.D., Tecnologista, DCOR/LACOR, Instituto Nacional de Tecnologia - INT, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Componentes antifricção são utilizados em motores e outros tipos de dispositivos, nos quais atuam carregamentos dinâmicos em condições de atrito entre superfícies metálicas, como no caso de mancais que envolvem eixos rotatórios. Nessas condições, além de resistência mecânica adequada às solicitações o componente antifricção deve apresentar características de superfície deslizante que minimize o atrito com o eixo girante ou algum outro elemento que lhe transmita esforços mecânicos que exijam considerável resistência ao desgaste e fadiga na superfície, além de adequada lubricidade, que favoreça o deslizamento entre o eixo, ou peça semelhante, e o mancal, ou componente de suporte.

Ao longo de várias décadas de evolução da indústria mecânica, foram propostas e desenvolvidas ligas metálicas à base de alumínio e de cobre, às quais foram adicionados determinados elementos com o propósito de conferir lubricidade e resistência mecânica. Este é o caso das ligas Al-Sn-Si-Cu e Cu-Sn-Bi. Estas ligas apresentam uma favorável combinação de resistência mecânica adequada com lubricidade compatível com esta aplicação.

A microestrutura de uma liga Al-Sn para componentes antifricção caracteriza-se por uma matriz rica em alumínio com resistência mecânica moderada em meio á qual se dispersa uma segunda fase macia e rica em estanho praticamente puro, que melhora as, inerentemente baixas, lubricidade, conformabilidade e embutibilidade (capacidade de absorver partículas) do alumínio. Além das características antifricção, estes componentes devem ser capazes de suportar carregamento cíclico (fadiga), corrosão e temperaturas acima de 150°C nestas aplicações [1].

Ligas Al-Sn possuem limitada resistência à fadiga, necessitando da introdução de elementos adicionais, como cerca de 1 % em massa de cobre, para endurecer a matriz de alumínio (através de solução sólida e/ou formação de precipitados do tipo  $Al_2Cu$ ), e do silício, que além de promover endurecimento por solução sólida, acarreta a formação de partículas duras de silício, que aumentam a resistência ao desgaste.

As ligas Al-Sn apresentam alta lubricidade, porém baixa resistência ao desgaste, ao passo que as ligas Al-Si, com boa resistência ao desgaste, não possuem adequada lubricidade. As características tribológicas das ligas Al-Sn-Si são superiores às das ligas Al-Sn e Al-Si, devido à morfologia das partículas de silício duras cercadas por fase estanho macia e lubrificante. Nas ligas Al-Sn-Si os teores de Sn variam entre 10 e 20 %, enquanto os teores de Si variam entre 2 e 11 % (em massa) [2].

O efeito principal do estanho é como lubrificante que reduz o atrito, enquanto o silício endurece a liga, aumentando sua resistência ao desgaste. As propriedades tribológicas das ligas Al-Sn-Si são superiores às das ligas Al-Sn e Al-Si, principalmente em motores submetidos a maiores cargas e maiores velocidades. A microestrutura das novas ligas Al-Sn-Si é diferente das ligas tradicionais Al-Sn e Al-Si, por apresentar um eutético especial de Si envolvido por Sn numa matriz rica em alumínio. Devido a essa formação possui dureza relativamente alta e simultaneamente boa capacidade de lubrificação. Assim, nas ligas Al-Sn-Si a taxa de aumento do desgaste com o aumento da carga é menor do que nas ligas Al-Si e Al-Sn. Nas ligas Al-Sn-Si não se formam fases intermetálicas, e a quantidade de cobre presente é insuficiente para formar partículas de fase  $Al_2Cu$  de forma significativa [2]. Se o teor de estanho for muito alto, diminui a resistência à corrosão das ligas Al-Sn. O estanho pode ser incorporado ao reticulado de  $Al_2O_3$ , aumentando a concentração de defeitos pontuais neste reticulado, acarretando rápida corrosão na liga. Em geral

a microestrutura dendrítica mais grosseira apresenta maiores áreas com maior teor de estanho. Para ligas de alumínio usadas nessa aplicação é muito importante analisar a resistência à corrosão localizada (pites e outras) [3].

Propriedades importantes para materiais usados na fabricação de bronzinas: resistência à fadiga, resistência ao agarramento (compatibilidade), resistência ao desgaste, conformabilidade, embutibilidade (capacidade de absorver partículas), resistência à corrosão e resistência à cavitação [4].

A adição de Cu e Mg às ligas Al-Si aumentam a dureza e a resistência ao desgaste. O Si favorece o aumento da resistência mecânica e a tenacidade. As ligas com consideráveis teores de Sn e Si são as que apresentam melhores características de menor desgaste. [5].

O sistema binário Al-Sn apresenta baixa miscibilidade do Sn no Al: abaixo de 0,09 % em massa. Para teores de estanho acima de 0,09 % prevalece uma microestrutura heterogênea com partículas de Sn distribuídas em uma matriz de alumínio. Estas ligas possuem microestrutura heterogênea com grãos microscópicos de Sn distribuídos numa matriz contínua de alumínio, aliando a tenacidade desta com a boa capacidade de lubrificação do Sn. A matriz é tenaz e as partículas de Sn atuam como lubrificantes sólidos. Conferindo uma boa combinação de resistência mecânica, boa conformabilidade e boas características de superfície [6-7].

Sequência de cristalização nas ligas Al-Sn-Si: inicialmente os grãos primários de Al se separam da fase líquida, então começa a se formar o eutético binário ( $L \rightarrow Al + Si$ ), a concentração de estanho no líquido aumenta com a redução da temperatura. Finalmente, a reação do eutético ternário ocorre a cerca de 225°C:  $L \rightarrow Al + Si + Sn$ . Os teores de Sn e de Si podem influenciar a temperatura de início de formação dos grãos primários (Al) e do eutético binário (Al + Si) [8].

## 2 MATERIAL E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A Tabela 1 mostra a composição química da liga Al-Sn-Si-Cu analisada neste estudo.

**Tabela 1.** Composição química da liga Al-Sn-Si-Cu.

Elemento	Sn	Si	Cu	Mn	Al
% em massa	20,18	2,07	1,01	1,05	Balanço

Três tipos de ensaios foram realizados: microscopia ótica, incluindo análise visual em estéreo-microscópio, ensaio de microdureza, e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Amostras foram submetidas à preparação metalográfica convencional: corte, embutimento, lixamento (100 malhas a 1200 malhas) e polimento (pasta de diamante com granulometria de 6  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$  e 1  $\mu\text{m}$ ) [9-11]. A amostra de liga Al-Sn-Si-Cu foi atacada com o reagente de Keller: 1 ml de HF, 15ml de HCl, 25 ml de HNO<sub>3</sub> e 50 ml de H<sub>2</sub>O. Deste modo foram obtidas imagens em microscópio ótico Olympus, modelo BX 51M.

As mesmas amostras analisadas em microscopia ótica foram observadas com os mesmos ataques metalográficos em um microscópio eletrônico de varredura (MEV), marca FEI, modelo Quanta FEG 450 com canhão de emissão por campo elétrico ("field emission gun": FEG) operando a 20 kV, equipado com um detector de EDS

(dispositivo de espectroscopia de energia dispersiva de raios X) e outro de EBSD (“electron back scattering diffraction: difração de elétrons retroespalhados).

Foi medida a microdureza na escala Vickers com carga de 25 gf (0,245 N) no material, utilizando um microdurímetro LECO-Akashi modelo 400-M-H e de acordo com a Norma ISO 6507-1 [12].

### 3 RESULTADOS

A microestrutura da liga (Al-Sn-Si-Cu) obtida por microscopia ótica, é mostrada na figura 1.

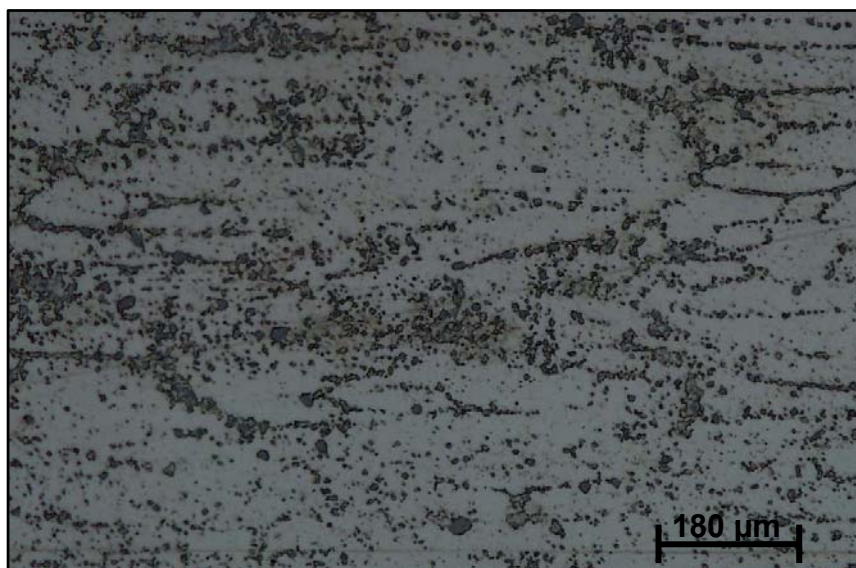
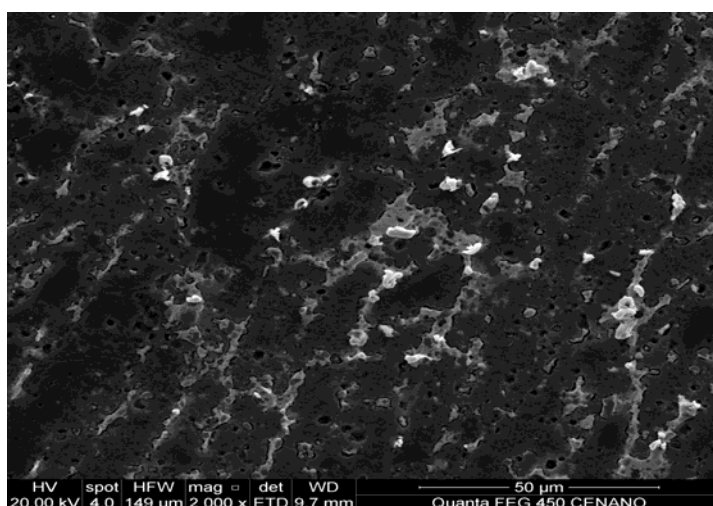


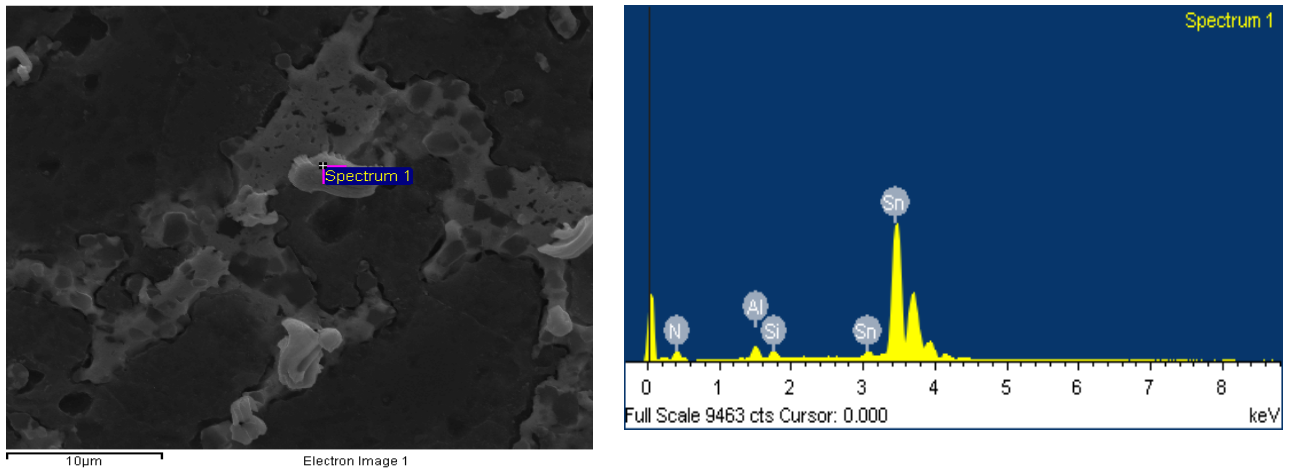
Figura 1.

As figuras 2 a 6 mostram imagens de MEV, espectros de EDS e um mapa de EBSD da amostra de liga Al-Sn-Si-Cu.

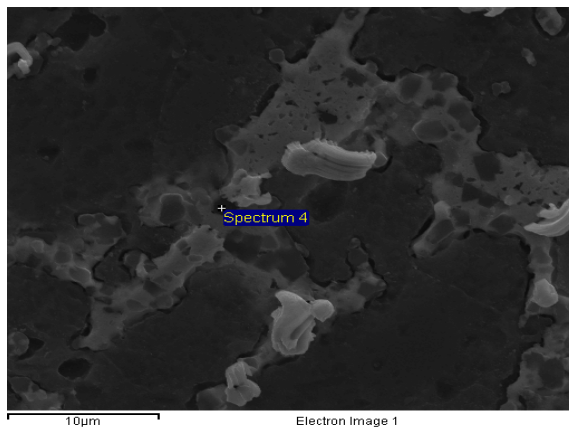


Element	Weight %	Atomic %
N K	1.56	10.35
Al K	3.25	11.18
Si K	1.62	5.36
Sn L	93.56	73.11
Totals	100.00	

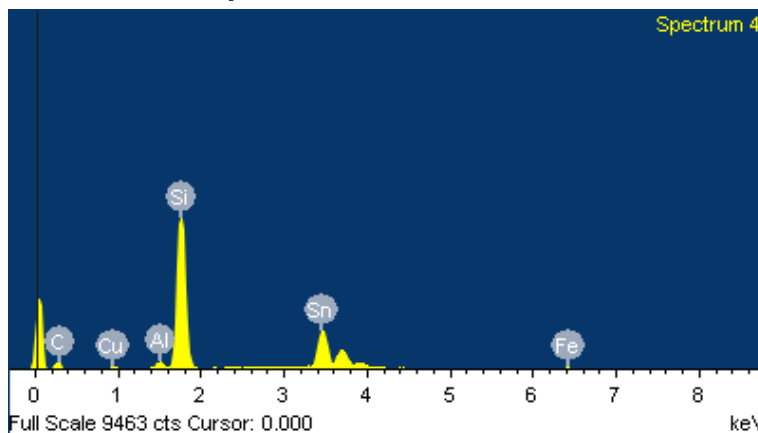
**Figura 2.** Microestrutura da liga Al-Sn-Si-Cu observada em MEV: a matriz escura é alumínio, as partículas claras e maiores são de estanho, enquanto as pequenas partículas em tom de cinza médio são de silício.



**Figura 3.** Imagem de MEV e espectro de EDS: partícula clara: estanho.

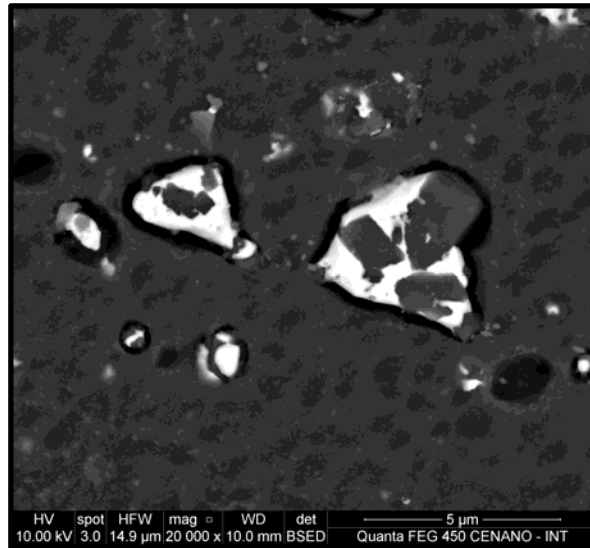


Element	Weight%	Atomic%
C K	20.64	49.67
Al K	1.28	1.37
Si K	37.63	38.73
Fe K	0.74	0.38
Cu K	0.84	0.38
Sn L	38.88	9.47
Totals	100.00	

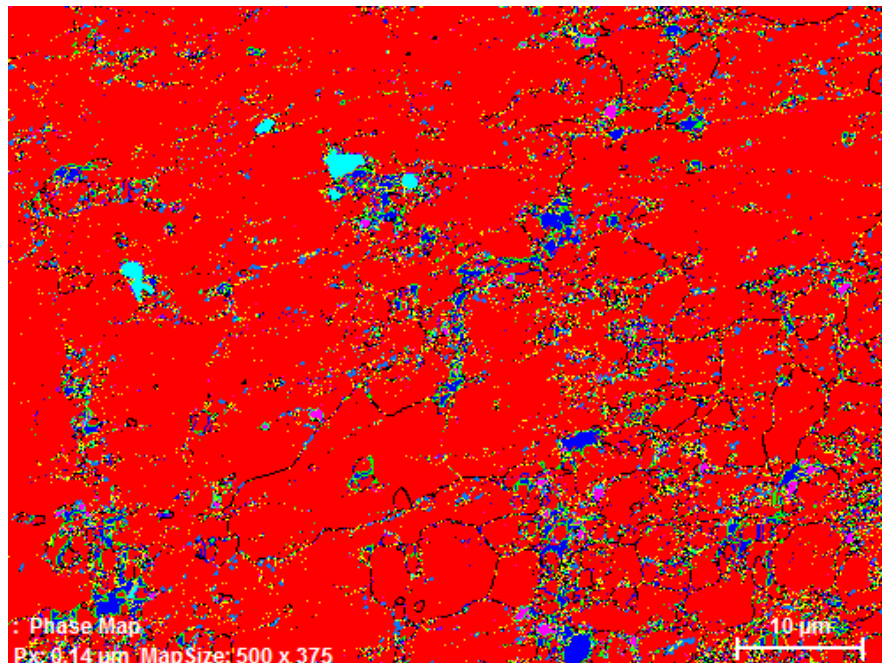


**Figura 4.** Imagem de MEV e espectro de EDS: partícula cinza médio: silício.

A Figura 5 mostra partículas, de tonalidade cinza média/escuro, ricas em Si e encapsulada por fases claras ricas em Sn. Este aspecto já foi mencionado na literatura como positivo, pois alia a dureza/resistência ao desgaste do Si com a lubrificidade/baixa fricção do Sn [2].



**Figura 5.** Partículas de silício (tonalidade cinza média/escura) encapsuladas por partículas de estanho (claras).



Aluminum  
Tin  
Aluminium Copper (2/1) - Theta  
Silicon  
Iron aluminide  
Aluminium copper magnesium (2/1/1)



**Figura 6.** Mapa de identificação de fases presentes na liga Al-Sn-Si-Cu por EBSD.

A tabela 2 apresenta os valores de microdureza na escala Vickers com carga de 25 gf (0,245 N), na matriz rica em alumínio e nas partículas mais grosseiras, ricas em estanho.

**Tabela 2.** Microdureza na matriz e nas partículas mais grosseiras da liga Al-Sn-Si-Cu.

Região	Matriz (HV0,25)	Partículas (HV0,25)
1	74,00	62,00
2	71,00	64,00
3	76,00	58,00
4	77,00	61,00
5	75,00	63,00
<b>Média</b>	<b>74,60</b>	<b>61,60</b>

#### 4 DISCUSSÃO

A liga Al-Sn-Si-Cu usada em aplicações como componente antifricção caracteriza-se pela presença de diferentes fases distribuídas ao longo da matriz rica em alumínio, já evidenciada na análise por microscopia ótica.

A análise por MEV e EDS permitiu visualizar estas fases com mais detalhe e determinar a composição química destas. Deste modo, verificou-se que as partículas mais grosseiras e mais claras (como observadas no MEV) são constituídas por estanho, enquanto as partículas menores e em tons de cinza médio ou mais escuro são de silício. O ataque metalográfico revela a fase Sn escura e a matriz de Al clara, ao contrário do que é observado em MEV [13]. Quando estes materiais são observados em MEV, a matriz de alumínio apresenta-se escura, enquanto as partículas de Sn aparecem claras [7]. No MEV com elétrons retroespalhados as fases mais claras correspondem ao estanho, e as fases cinzentas cercadas pelo estanho correspondem ao Si, que é facilmente diferenciado por contraste do Sn [8]. Muitas vezes estas partículas de silício encontram-se envoltas por partículas de estanho, conjugando o efeito de aumento de resistência mecânica/dureza conferido pelo silício com o efeito lubrificante/antifricção conferido pelo estanho. A razão Sn/Si ideal está na faixa de 3 a 4, pois proporciona fração volumétrica relativamente alta e microestrutura uniforme da estrutura de “ilhas” [8].

A análise por EBSD complementou as informações obtidas por microscopia ótica e por MEV/EDS, na medida em que revelou que além das partículas grosseiras de estanho e das partículas finas de silício, outras fases secundárias estão presentes também como partículas dispersas, como as fases  $Al_2Cu$  ( $\theta$ ),  $Al_2CuMg$  (S) e  $Al_3Fe$ . De algum modo estas fases podem contribuir até certo ponto para o aumento da resistência mecânica, assim como a fase Si [14].

Os ensaios de microdureza, consideradas as limitações intrínsecas da técnica, evidenciaram a menor dureza das partículas ricas em estanho. Embora as indentações parcialmente abranjam a matriz, uma vez que são maiores do que estas partículas, mesmo assim o menor valor médio de dureza obtido na partícula (61,60 HV), quando comparado ao obtido na matriz (74,60 HV) pode ser considerado significativo. Talvez o uso de um nanoindentador permita a obtenção de indentações ainda menores, contidas completamente dentro das partículas, eliminando a interferência da matriz, observada mesmo com baixa carga.

De um modo geral é possível dizer que a liga Al-Sn-Si-Cu reúne características microestruturais que favorecem sua utilização em componentes antifricção de aplicação industrial, conjugando boa resistência mecânica com boa lubricidade.

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos, com o uso de técnicas como microscopia ótica, MEV e microdureza, revelaram a microestrutura da liga Al-Sn-Si-Cu, constituída por uma matriz rica em alumínio e várias partículas de diferentes fases secundárias.

Entre estas fases/partículas observou-se a presença de estanho sob a forma de partículas relativamente grosseiras, localizadas principalmente nos contornos dos grãos da matriz. Estas partículas, bem mais macias que a matriz, contribuem para a boa lubrificidade do material aplicado em componentes antifricção.

Partículas bem menores de silício, que no MEV aparecem com tonalidade mais escura que as partículas de estanho, podem surgir isoladamente, ou envoltas por estas. Ao contrário, sua função básica seria contribuir para o aumento da dureza/resistência mecânica da liga de alumínio.

Outras fases identificadas foram: Al<sub>2</sub>Cu ( $\theta$ ), Al<sub>2</sub>CuMg (S) e Al<sub>3</sub>Fe. Estas fases podem contribuir até certo ponto para o aumento da resistência mecânica, do mesmo modo que as partículas de silício.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPERJ e ao CNPq pelo apoio financeiro e a Rafael de Abreu Vinhosa pela participação nas atividades experimentais do trabalho.

## REFERÊNCIAS

- 1 Marrocco, T.; Driver, L.C.; Harris, S. J.; McCartney, D.G; "Microstructure and Properties of Thermally Sprayed Al-Sn-based Alloys for Plain Bearing Applications", *Journal of Thermal Spray Technology*, 15 (4), 2006, 634-639.
- 2 Yuan, G.; Zhang, X.; Lou, Y.; Li, Z.; "Tribological characteristics of new series of Al-Sn-Si alloys", *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 13 (4), 2003, 774-780.
- 3 Osório, W.R.; Spinelli, J.E.; Cheung, N.; Garcia, A.; "Secondary dendrite arm spacing and solute redistribution effects on the corrosion resistance of Al-10wt%Sn and Al-20wt%Zn alloys", *Materials Science and Engineering A*, 420, 2006, 179-186.
- 4 Ali, M.S.; Reed, P.A.S; Syngellakis, S.; Moffat, A.; Perrin, C. ; "Microstructural factors affecting fatigue initiation in various Al based bearing alloys", *Materials Science Forum*, 519-521, 2006, 1071-1076.
- 5 Feyzullahoglu, E.; "The tribological behaviours of aluminum based materials under dry sliding"; *Industrial Lubrication and Tribology*, 63, (5), 2011, 350-358.
- 6 Cruz, K.A.S; Cheung, N.; Garcia, A.; "Parâmetros térmicos, macroestrutura e microestrutura na solidificação direcional da liga Al-20%Sn", *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, 4, (4), 21-26.
- 7 Perrone, A.; Zocco, A.; Rosa, H. Zimmermann, R.; Bersani, M.; "Al-Sn thin films deposited by pulsed laser ablation", *Materials Science and Engineering C*, 22, 2002, 465-468.
- 8 Yuan, G.C.; Li, Z.J.; Lou, Y.X.; Zhang, X.M.; "Study on crystallization and microstructure for new series of Al-Sn-Si alloys", *Materials Science and Engineering A*, 280, 2000, 108-115.
- 9 ASTM E 3-11, "Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens", American Society for Testing Materials, 2011, 13 p.
- 10 ASTM E 407-07e1, "Standard Practice for Microetching Metals and Alloys", American Society for Testing Materials, 2011, 23 p.
- 11 Andrews, S.; Rückert, M.; "Metallographic preparation of bearing materials", *Struers, Journal of Materialography*, 12;2006, 3-6.





- 12 ISO 6507-1:2005, "Metallic materials -- Vickers hardness test -- Part 1: Test method", International Organization for Standardization, 19 p.
- 13 Pathak, J.P.; Mohan, S.; "Tribological behaviour of conventional Al-Sn and equivalent Al-Pb alloys under lubrication", Bulletin of Materials Science, 26, (3), 2003, 315-320.
- 14 Hatch, J.E.: Aluminum: Properties and Physical Metallurgy, ASM, Metals Park, Ohio, 1984, 424 p.