

AVALIAÇÃO DO TEOR DE FERRO NA FORMAÇÃO DA MACROESTRUTURA E O CONSEQÜENTE EFEITO SOBRE A CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO ALUMÍNIO ELETRO-CONDUTOR

*Moreira, A.E.A.¹
Mercês, M.P.²
Machado, P.C.³
Santos, W.L.R.⁴
Quaresma, J.M.V.⁵*

Resumo: O objetivo deste estudo é avaliar o efeito de adições de ferro no alumínio eletro condutor [Al-EC], sem refinador de grão, no que diz respeito à formação da macroestrutura, bem como o tamanho dos grãos, e sua influência sobre a Condutividade Elétrica. Para este estudo, inicialmente elaborou-se a liga cuja composição representativa foi Al-0,05%Cu-0,11%Fe e que convencionou-se identificar como Al-EC. Esta liga posteriormente foi modificada com os teores: [0,40; 0,80; 1,10 e 1,60]%. As ligas foram fundidas em um cadinho de carbetto de silício, em um forno do tipo mufla e vazadas em um molde no formato U. Termopares do tipo K foram utilizados para verificar a temperatura de vazamento. Os resultados mostram que o ferro ao controlar o crescimento do grão apresenta um efeito de transição para teores no entorno de 0,8%, apresentando o maior tamanho de grão sem, no entanto, afetar a capacidade mecânica e de conduzir eletricidade.

Palavras-chave: macroestrutura, tamanho de grão, propriedades mecânicas e elétricas.

Abstract: The objective of this study is to evaluate the effect of additions of iron in electro conducting aluminum [Al-EC], without grain refiner, that respect to the formation of the macrostructure, as the grain size, and its influence on the Electric Conducting. Initially, for this study it was elaborated a alloy that represent as Al-0,05%Cu-0,11%Fe and stipulated to identify as Al-EC. Later, this alloys was modified with contents: [0,40; 0,80; 1,10 and 1,60] %. The alloy had been casting in crucible silicon's Carbon ,in an oven of the type muffle and casting in a mold in "U" format .Thermocouples of K type had been used to verify the temperature of casting. The results show that the iron when controll the growth of the grain presents a effect of transistion for contents between of 0,8%, presenting the biggest size of grain without, however, affect the mechanics capacity and electricity conducting.

Keywords: macrostructure; size of grain; mechanical and electric properties.

Universidade Federal do Pará, ¹aline@gmail.com; ²manu@hhotmail.com; ³pcmufpa@yahoo.com.br, ⁴wlrs@ufpa.br, ⁵quaresma@fem.unicamp.br

1. INTRODUÇÃO

O refinamento de grão é uma técnica importante para a melhoria dos produtos fabricados a partir do alumínio. Estruturas equiaxiais tornam as propriedades mecânicas do material uniforme, melhorando a usinabilidade e os aspectos superficiais. Os refinadores normalmente utilizados são Al-Ti ou Al-Ti-B, entretanto, estudos desenvolvidos no GPEMAT/UFPA constataram que o Si apresenta características que podem promover o refinamento do grão de ligas 6101, Al-0,06%Mg-[0,40; 0,80 e 1,20]%Si, com solidificação unidirecional horizontal [MAIA *et al*, 2005], por outro lado Backerud e Johnsson (1996) e Zhiyong *et al* (2003) desenvolveram estudo com teores variados de Si e constataram sua capacidade de refinar grão. Estudos de Zhang *et al* (2005) mostram o efeito do teor de ferro, em alumínio eletrocondutor como refinador de grão, como visto nas macro estruturas da Figura 1.

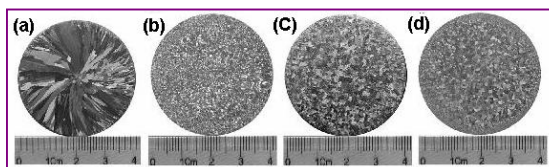


Figura 1 – Evolução da macroestrutura do Al-EC com variação do teor de Fe: (a) Al-EC; (b) 0,5 %Fe; (c) 0,8%Fe; (f) 1,2 %Fe. [ZHANG *et al*, 2005].

Estes benefícios são cruciais na indústria de condutores elétricos, visto que se almeja ligas capazes de serem deformadas sem apresentar defeitos estruturais e sem comprometer as características mecânicas e elétricas do perfil deformado.

Baseado em estudos realizados sobre a influencia de teores de Fe na formação da macroestrutura de alumínio, este artigo pretende contribuir com estas considerações ao apresentar um estudo em que a liga Al-0,05%Cu-0,10%Fe, modificada com os teores de Fe (0,40; 0,80; 1,10 e 1,60)% apresenta

modificação na formação da macroestrutura e, além disso, avalia as consequências nas características mecânicas e elétricas do produto final.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização do estudo, foram confeccionadas amostras com as ligas Al-0,05%Cu-0,10%Fe, e com as ligas Al-0,05%Cu-[0,40; 0,80; 1,10 e 1,60]%Fe. As ligas foram elaboradas em um forno tipo mufla, marca BRASIMET, utilizando-se um cadinho de grafite, revestido interiormente por uma pintura protetora de caulim e vazadas em coquilha de aço-carbono na forma de “U”, como pode ser vista na Figura 2.



Figura 2 – O molde em forma de “U” e os perfis obtidos.

Este molde permitiu a obtenção de dois corpos-de-prova, por liga, no formato cilíndrico de 20 mm de diâmetro e 230 mm de comprimento, aproximadamente. A análise metalográfica foi desenvolvida em um microscópio LEICA acoplado a um micro computador de última geração equipado com software para análise das imagens. As amostras, para esta finalidade, foram retiradas da parte inferior do perfil “U” obtido, e os braços laterais do perfil foram usinados para o diâmetro de 10 mm. Após a usinagem, as amostras foram laminadas até o diâmetro de 3,98mm, em um laminador com canais circulares e posteriormente trefiladas até o diâmetro de 2,90 mm em um trefilador industrial marca TECALSA modelo 450EE. Desta forma foi possível realizar ensaios de resistividade, em um micro ohmímetro marca MEGABRAS modelo MPK 2000e, para a obtenção da condutividade elétrica. Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina KRATOS,

modelo IKCL1-USB com velocidade de 10mm/min, temperatura de 25°C, uma pré-carga 220N e umidade relativa 70%. O ensaio foi realizado segundo a norma NBR-6810-1991 (corpo-de-prova laminado), para a análise de limite de resistência à tração (LRT) e alongamento em corpo-de-prova de 150 mm.

Cada liga recebeu injeção de argônio durante 40 segundos, antes do vazamento e ao atingir a temperatura de 750°C, como forma de se minimizar a ocorrência de poros pela presença de hidrogênio, foi vazada. A análise química foi realizada em um Espectrômetro Óptico, os resultados encontram-se relacionados na Tabela 1, abaixo.

Tabela 1 – Composição química das ligas estudadas

| Liga | | Si (%) | Mg (%) | Fe (%) |
|--------------------|--------|--------|--------|------------|
| Al-0,05%Cu-0,10%Fe | | 0,0530 | 0,0089 | 0,1122 |
| Al-0,05%Cu-0,4%Fe | | 0,0534 | 0,0020 | 0,3577 |
| Al-0,05%Cu-0,8%Fe | | 0,0531 | 0,0000 | 0,7950 |
| Al-0,05%Cu-1,10%Fe | | 0,0502 | 0,0000 | 1,1392 |
| Al-0,05%Cu-1,6%Fe | | 0,0571 | 0,0000 | 1,5677 |
| Cu (%) | Ti (%) | B (%) | Al (%) | Outros (%) |
| 0,0463 | 0,0011 | 0,0015 | 99,76 | 0,0172 |
| 0,0502 | 0,0009 | 0,0011 | 99,49 | 0,0428 |
| 0,0508 | 0,0006 | 0,0015 | 99,00 | 0,0936 |
| 0,0497 | 0,0007 | 0,0015 | 98,65 | 0,1054 |
| 0,0481 | 0,0007 | 0,0015 | 98,21 | 0,1150 |

2.2. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise metalográfica permitiu avaliar o efeito do ferro na liga Al-0,05%Cu-0,10%Fe. A Figura 3 mostra a macrografia das ligas.

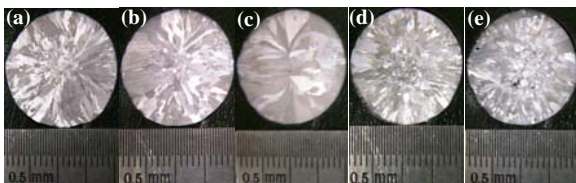


Figura 3 - Macrografias das ligas estudadas, na seqüência: (a) 0,10%, (b) 0,4%, (c) 0,8%, (d) 1,1%, (e) 1,6% de Fe.

A Figura 3(a) mostra a macrografia da liga Al-0,05%Cu-0,10%Fe, e é possível notar grãos colunares na periferia e, no centro, grãos equiaxiais. À medida que se adiciona ferro, em (b), os grãos colunares diminuem de tamanho e a estrutura equiaxial se faz menos presente, em (c)

os grãos estão completamente colunares, em (d) a adição de ferro diminuiu o tamanho dos grãos, da periferia, que nos teores anteriores tendiam a manter os grãos colunares, agora com 1.6% de ferro mostra grãos mais finos, ou seja, onde se localizavam grãos mais alongados e espessos agora dão forma a grãos de tamanho menor, embora ainda colunares, mas de largura menor, a mesma característica é observada em (e) onde o centro dá lugar a grãos mais refinados e em maior quantidade. Estudos de Zhang *et al* (2005) mostraram a tendência do ferro em refinar os grãos em matriz de alumínio, porém o teor de cobre era inexistente. Este fato permite inferir que a combinação Cu/Fe tende a interferir na estrutura bruta de fusão destas ligas.

O gráfico da Figura 4 mostra o comportamento do tamanho de grão em relação o teor de ferro e, no qual o valor maior representa a medida do TG para a liga com 0,8% de ferro e cuja macro estrutura apresenta-se completamente colunar. Para a medida do TG foi adotada a técnica dos interceptos NBR 1323/1990.

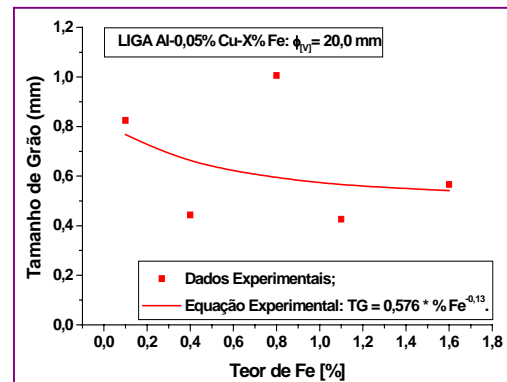


Figura 4- Variação do tamanho de grão em função do teor de ferro.

Uma outra maneira de medir o TG pode ser feita pela diferença das áreas colunar e coquilhada produzidas em função do teor de ferro nas estruturas das ligas. Neste caso a metodologia adotada no processo de medição das áreas foi o existente no *Software Motic Images Plus 2.0*. Os resultados encontram-se listados na Tabela 2 e plotados na Figura 5.

Tabela 2 – Relação de áreas das macro estruturas

| %Fe | Área (mm ²) | | | Porcentagem (%) | | |
|-----|-------------------------|--------|-------|-----------------|--------|-------|
| | Coq. | Colun. | Total | Coq. | Colun. | Total |
| 0,1 | 31.2 | 273.4 | 304.6 | 10.3 | 89.7 | 100 |
| 0,4 | 32.9 | 271.7 | 304.6 | 10.8 | 89.2 | 100 |
| 0,8 | 0 | 304.6 | 304.6 | 0 | 100 | 100 |
| 1,1 | 71.3 | 233.3 | 304.6 | 23.4 | 76.6 | 100 |
| 1,6 | 109.2 | 195.4 | 304.6 | 35.9 | 64.1 | 100 |

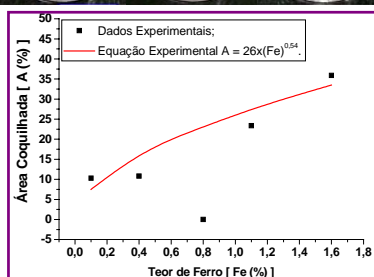


Figura 5 – Arranjo demonstrativo da evolução da estrutura coquilhada em função do teor de Ferro para as ligas em estudo.

Os gráficos da Figura 6 mostram os resultados de ensaio de tração para cada teor estudado em função da quantidade relativa dos grãos coquilhados. A partir dos ensaios mecânicos foi possível obter o limite de resistência à tração e alongamento.

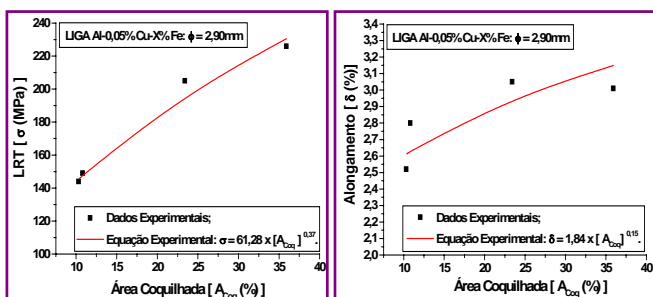


Figura 6 - Resultados dos Ensaio de Tração: [A] LRT e em [B] Alongamento para o fio 2,90 mm em função da quantidade relativa dos grãos coquilhados.

A partir das curvas da Figura 6 é possível verificar que o limite de

resistência à tração aumenta sem perder a capacidade de deformar à medida que se adiciona ferro. Isto pode estar ocorrendo por dois motivos: i) O binário Cu/Fe aparentemente contribui para produzir zonas centrais coquilhadas que realmente estarão sujeitas a todas às deformações a partir do diâmetro de 10mm; ii) Maiores regiões coquilhadas contribuem para melhorar a “trabalhabilidade” da liga, elevando seu LRT por maior capacidade de encruar sem, no entanto fragilizar-se.

Os dados elétricos medidos foram resistências elétricas para cada teor de liga. Após a obtenção desses dados, foi necessária a correção da temperatura do ensaio, uma vez que influencia na resposta elétrica do material, a norma NBR 6814/1985 traz cálculos de correção para uma temperatura ambiente a 20 °C.

$$R_{t_0} = \frac{R_t}{1 + \alpha_{t_0} (t - t_0)} \quad (1)$$

Em seguida, o cálculo de resistividade elétrica é realizado, segundo a norma NBR 6815/1981.

$$R_m = R_c * mc \quad (2)$$

Através dos resultados da condutividade elétrica da Figura 7, relativos às ligas Al-0,05%Cu-(0,10; 0,4; 0,8; 1,1 e 1,6)%Fe, observa-se que à medida que o binário Cu/Fe é mais presente na liga, pelo crescente teor de ferro, a capacidade de conduzir eletricidade diminui. Particularmente para os teores maiores que 0,8%, caindo a baixo de 57 IACS. Estes resultados permitem inferir que teores de ferro maiores que 0,8%, que contribuem na formação da zona central coquilhada interferem no LRT e na “trabalhabilidade” positivamente, não agem da mesma forma quando se trata da condutividade elétrica. Neste caso melhor será adotar-se teores menores que 0,8% de ferro com os quais podem ser obtidos valores para a condutividade elétrica, compatíveis aos das ligas da série 6000 quando submetidas à têmpera, da ordem de 58 IACS (*Hand Book*, vol. 2).

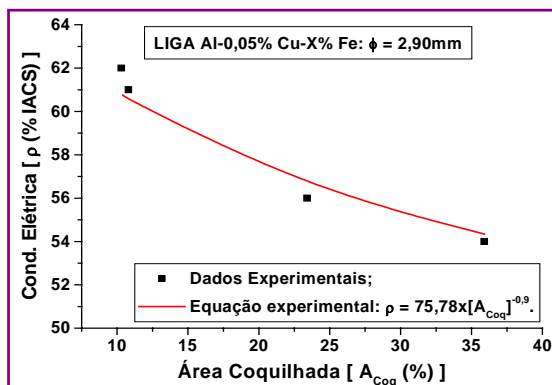


Figura 7 - Condutividade elétrica da liga Al-0,05%Cu-(0,4; 0,6; 0,8; 1,2 e 1,6) %Fe para o fio de diâmetro 2,90mm em função da quantidade relativa dos grãos coquilhados.

3. CONCLUSÃO

O teor de 0,8% de ferro parece atuar como uma referência. Teores a cima ou a baixo associados com 0,05% de Cobre tendem a proporcionar, nas condições experimentais impostas, o surgimento de uma zona central coquilhada.

A partir da análise da macroestrutura das ligas estudadas, nota-se que a presença do binário Cu/Fe cada vez mais marcante pelo maior teor de ferro, atua de forma positiva quanto ao LRT e à “trabalhabilidade”, por contribuir com a formação da zona central coquilhada. Entretanto, este desempenho não se traduz quando se trata da Condutividade Elétrica.

A avaliação do ponto de vista da propriedade elétrica melhor será adotar-se teores de ferro menores que 0,8%, quando se tem boa performance mecânica associada à excelente performance elétrica, podendo mesmo a ser compatíveis às ligas de alumínio da série 6000, tratadas termicamente.

4. AGRADECIMENTOS

O grupo GPEMAT entende ser importante demonstrar o sincero agradecimento à Universidade Federal do Pará pela disponibilidade de espaço físico, ao GRUPO ALUBAR e a ELETRONORTE pelo apoio financeiro,

parceria e incentivo ao desenvolvimento de estudos científicos e a FADESP e a FUNPEA que gerenciam essas parcerias entre os grupos.

5. BIBLIOGRAFIA

ABNT, NBR 6810 - Fios e cabos elétricos tração à ruptura em componentes metálicos. – Especificação. São Paulo, 1981.

_____. NBR 5118 - Fios de alumínio nus de seção circular para fins elétricos. – Especificação. São Paulo, 1985.

_____. NBR 6814/1985 – Ensaio de resistência elétrica. Especificação. São Paulo, 1985.

_____. NBR 6815/1981 – Fios e Cabos elétricos – Ensaio de determinação da resistividade em componentes metálicos – método do ensaio.

ASM SPECIALITY HANDBOOK. Aluminum and Aluminum Alloys. Ed. United States of America: ASM International, 1998.p.68-69,688-689.

ASM HANDBOOK. Volume 2 - Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special - Purpose Materials. 1998. p. 421- 42.

Backerud, L., Johnsson, M. The relative importance of nucleation and growth mechanisms to control grain size in various aluminum alloys. Light Met 1996;27(4):679–85.

Maia, R. F. da S., Moreira, A. E. A., de Sá, F. A., da Silva, M. B., Quaresma, J. M. do V. - Relação entre a Deformação e

as Estruturas de Ligas Al-Mg-Si Solidificadas Unidirecionalmente, 2005.

Zhiyong, L., Mingxing, W., Yonggang, W. et al.. Effect of silicon on grain refinement of aluminum produced by electrolysis. Mater Trans 2003; 44(10): 2157–62.

Nomenclaturas

R_{t0} Resistência do condutor corrigida à temperatura de 20°C, em Ω ;

R_t Resistência do condutor medida a uma determinada temperatura, em Ω ;

α_{t0} Coeficiente de temperatura da resistência do condutor à temperatura de 20°C, em $^{\circ}\text{C}^{-1}$;

t Temperatura qual foi efetuada a medição, em $^{\circ}\text{C}$;

t_0 Temperatura especificada – 20°C.

R_c Resistência elétrica do corpo de prova por unidade de comprimento a 20°C, em Ω/m ;

m_c Massa do corpo de prova por unidade de comprimento, em g/m.