

Influência da adição de 2% e 6% Mg nas propriedades macroestruturais, limite de resistência a tração e condutividade na liga Al-0,18%Zr.

Rodrigo Ribeiro Lima, rrlmecanica@hotmail.com¹

Clóvis Iarlande Oliveira Santana, clovis.mecanica@hotmail.com¹

Mauro Quaresma Lobato, mauroqlobato@gmail.com¹

Jhonata Maico Paes Bezerra, jpaesbezerra@gmail.com¹

José Maria do Vale Quaresma, quaresma@fem.unicamp.br¹

¹ Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Rua Augusto Corrêa, 01 - Guamá – 66075-110- Belém, Brasil.

Resumo: Aumentar a resistência mecânica das ligas de alumínio em temperaturas elevadas tem sido o objeto de muitos estudos nos últimos anos. O alumínio tem elementos de liga que têm despertado o interesse especial em pesquisas, como Zr e Mg, principalmente devido à capacidade do primeiro para formar compostos intermetálicos endurecíveis por precipitação, e à capacidade do segundo, quando em solução sólida, de reduzir o grau de desorientação do parâmetro de rede entre a matriz e os precipitados. Assim, o presente trabalho tem o objetivo de analisar os efeitos da adição de 2 e 6.% de Mg na liga Al-0.18% Zr. As ligas estudadas foram convencionalmente moldadas e solidificadas com uma alta taxa de resfriamento e as amostras foram retiradas dos seus lingotes e usinadas até a obtenção de cilindros de 9,5 mm de diâmetro, e estes foram laminados a frio e transformados em fios de 3,0 mm de diâmetro. Esses fios foram submetidos aos testes de condutividade elétrica e de tração que permitiram observar que as adições de Mg modificaram as propriedades da liga.

Palavras-chave: Liga Al-Zr-Mg, Condutividade Elétrica, Limite de resistência a Tração

1. INTRODUÇÃO

A resistividade do alumínio praticamente puro está em torno de $0,00000263 \text{ ohm/cm}^3$, cujo a condutividade é de aproximadamente 62% da IACS (International Annealed Copper Standard), sendo usados para a fabricação de fios condutores (ABAL, 2007). A boa condutividade elétrica do alumínio, aliado à sua elevada resistência mecânica, torna esse metal bastante utilizado nos fios condutores de eletricidade, nesse sentido, a adição de Zr e Mg ao alumínio, podem formar ligas termorresistentes, sendo assim ideais para a fabricação de cabos para transmissão de energia elétrica sujeitos a temperaturas elevadas (KAUFMAN; ROOY, 2004).

A solubilidade do zircônio no alumínio ocorre em teores de no máximo 0,28%. O zircônio é utilizado em diversas ligas de alumínio, sobretudo na família Al-Zn-Mg, para aumentar a temperatura de recristalização e controlar a estrutura dos grãos em produtos trabalhados (ASM INTERNATIONAL, 1998).

O alumínio praticamente puro possui ponto de fusão de 660°C e sua resistência à tração é de aproximadamente 90 Mpa. Geralmente teores crescentes de Mg tendem a aumentar a resistência mecânica das ligas de alumínio aumentando também sua resistência a corrosão (ABAL, 2007).

O encruamento proveniente da conformação por trabalho mecânico a frio, é capaz de aumentar a resistência mecânica de metais não-ferrosos que não são endurecíveis por tratamentos térmicos. O encruamento diminui os níveis de densidade e condutibilidade elétrica (BRESCIANI, 2011).

Nos lingotes comerciais é bastante comum encontrar três tipos de zonas nas macroestruturas, no lingotamento contínuo comercial por exemplo é possível encontrar: Zona equiaxial fina, Zona colunar e Zona equiaxial central (COLPAERT, 2008).

Correntes de metal fluido ocasionadas naturalmente ou artificialmente, tendem a diminuir a região colunar (GARCIA, 2001). As correntes convectivas contribuem significativamente para a formação de cristais equiaxiais, isso ocorre porque durante os estágios iniciais de solidificação, a convecção possibilita a separação de cristais da parede do molde. Do mesmo modo, a diminuição da convecção do metal líquido, tende a formar estruturas colunares (OHNO, 1998).

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Primeiramente faz-se o vazamento das três composições de liga (Al-0,18%Zr; Al-0,18%Zr-2,0%Mg; Al-0,18%Zr-6,0%Mg), utilizando-se de um forno na temperatura de 900° C durante 4 horas. Após ser fundida, a liga é depositada no molde de cobre e em seguida, o molde contendo o material fundido é depositado em um recipiente contendo água, garantindo assim um resfriamento brusco em decorrência das altas taxas de transferência de calor promovidas pelo molde de cobre e a água.

Em seguida foram obtidas amostras transversais dos lingotes de cada liga para encontrar as suas macroestruturas. Para isso utilizou-se uma máquina politriz para realização das etapas de lixamento e polimento. Após serem polidas, as amostras foram atacadas quimicamente em um recipiente contendo reagente keller por 10 segundos para visualização das macroscopias.

Nas etapas seguintes, os lingotes foram cortados longitudinalmente e usinados em um torno até se tornarem cilindros de diâmetro de 9,5 mm, os cilindros foram laminados em um laminador até o diâmetro de 3,0 mm.

Os fios de 3,0 mm foram submetidos a testes de condutividade elétrica através de um multi-ohmímetro. Seguindo as recomendações da ASTM B193.

Após os ensaios de condutividade, as amostras foram submetidas ao ensaio de tração realizados na máquina Kratos, seguindo os padrões da NBR 6892.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente trabalho, o Mg nos teores de 2% e 6%, encontra-se como solução sólida supersaturada devido ao resfriamento brusco durante o vazamento dos lingote, nesse sentido, não houve tempo suficiente para precipitação do Mg na matriz de alumínio, tal fenômeno é ilustrado na figura 1-a. Em relação ao zircônio, o resfriamento brusco no vazamento, provavelmente fez com que esse elemento também se apresente como solução sólida na liga, conforme ilustra a figura 1-b. Vale ressaltar que a liga com 6% de Mg encontra-se mais supersaturada do que a liga com 2% de Mg, pois a temperatura de precipitação do Mg no alumínio é de aproximadamente 150° C em teores de 2% de Mg, enquanto que a temperatura de precipitação em 6% de Mg é de aproximadamente 290° C.

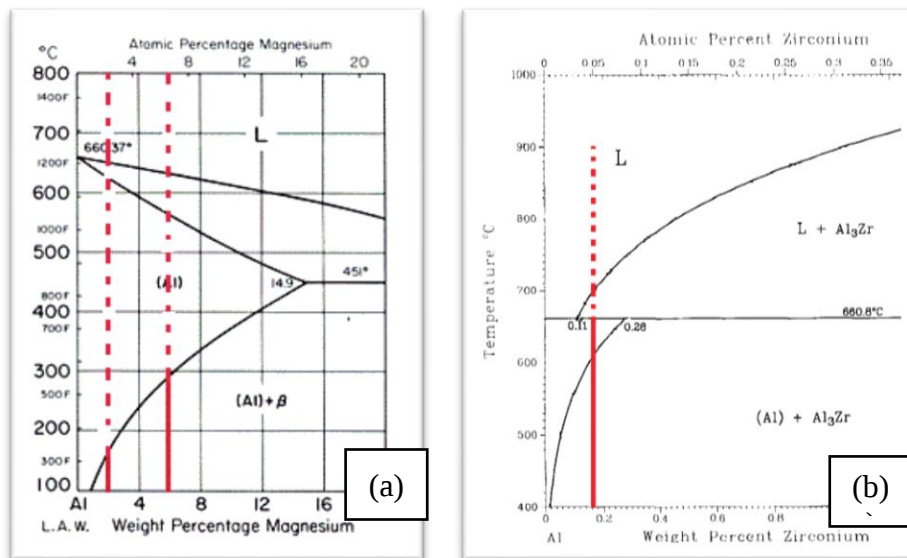


Figura 1. Representação do resfriamento brusco para o elemento (a) Mg (b) Zr

3.1. Macroestruturas dos lingotes

Pelas macroestruturas encontradas, consta-se que na liga Al-0,18%Zr (figura 2-a) predominam grãos colunares e um grande grão central. Na liga Al-0,18%Zr-2,0%Mg (figura 2-b) existem grãos colunares e equiaxiais, na liga Al-0,18%Zr-6,0%Mg (figura 2-c) predominam grãos equiaxiais refinados. A adição de Mg ocasionou refinamento nos grãos, que pode ser explicado pela hipótese de que esse elemento tenha tornado o metal líquido mais fluido, facilitando as correntes convectivas durante o vazamento do mesmo e dificultando portanto o aparecimento de grandes grãos, onde tal consequência é explicada por Ohno.

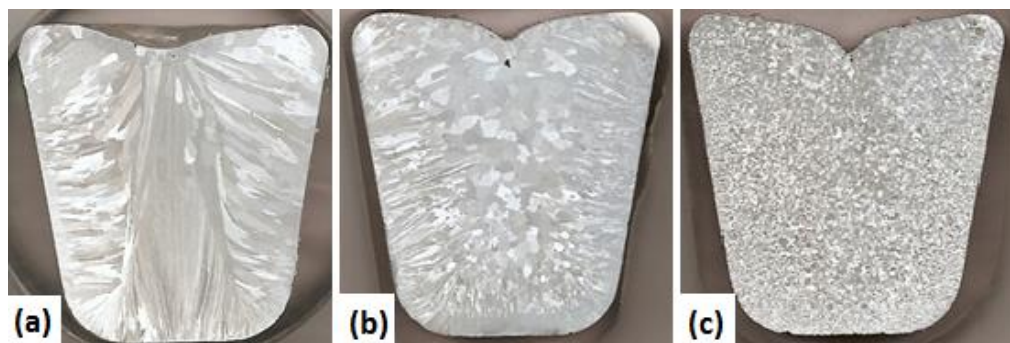


Figura 2: (a) Macroestrutura da liga Al-0,18%Zr, (b) Macroestrutura da liga Al-0,18%Zr-2,0%Mg e (c) Macroestrutura da liga Al-0,18%Zr-6,0%Mg.

3.2 Limite de resistência a tração

A adição de Mg na liga Al-0,18%Zr aumentou significativamente os valores de LRT, conforme mostram a Tabela 1 e Figura 3. Tal comportamento pode ser explicada pelo encruamento proveniente da deformação por laminação (conforme estudos de Bresciani) podendo ainda ter sido potencializado pela supersaturação nas ligas “Al-0,18%Zr-2%Mg”, e “Al-0,18%Zr-6%Mg”, dificultando assim a movimentação de discordâncias, que por consequência torna tais ligas mais resistentes. Por fim, o aumento do LRT também pode estar relacionado ao refino dos grãos.

Tabela 1- Resultados de LRT para as ligas modificadas com magnésio

Ligas (%Massa)	Limite de resistência a tração [LRT] (MPa)
Al-0,18%Zr	147,24 ± 2,99
Al-0,18%Zr-2,0%Mg	335,57 ± 3,83
Al-0,18%Zr-6,0%Mg	468,10 ± 1,96

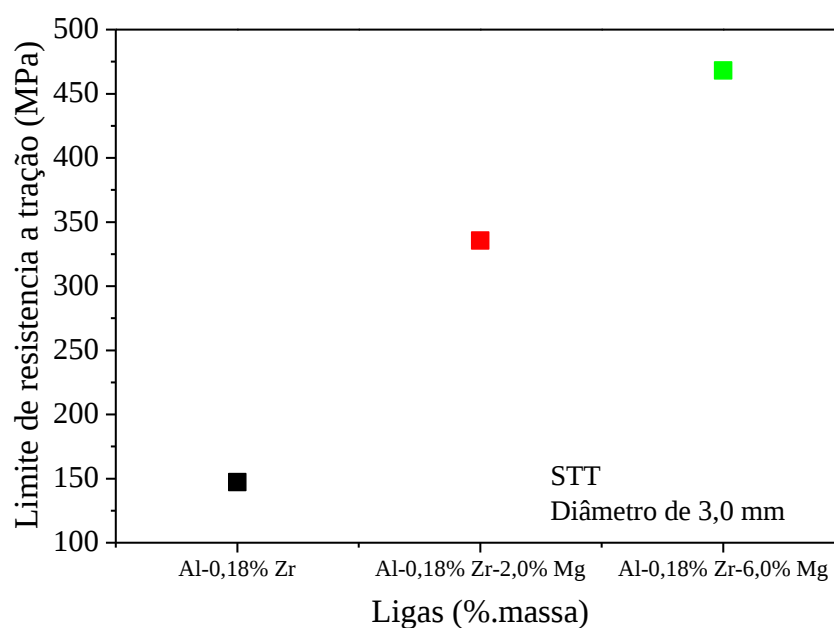


Figura 3: Gráfico do limite do LRT para as ligas modificadas com Mg

3.3 Condutividade elétrica

Os resultados mostrados na Tabela 2 e na Figura 4 mostram que a adição de Mg diminuiu a condutividade elétrica. Tal comportamento pode ser relacionado com o aumento da supersaturação e refinamento dos grãos provocadas pela adição de Mg, ocasionando assim uma crescente dificuldade na passagem dos elétrons pelo material.

Tabela 2- Resultados de Condutividade elétrica

Ligas (%Massa)	Condutividade Elétrica (%IACS)
Al-0,18%Zr	59,86 $\pm$ 0,65
Al-0,18%Zr-2,0%Mg	43,52 $\pm$ 0,55
Al-0,18%Zr-6,0%Mg	33,86 $\pm$ 0,37

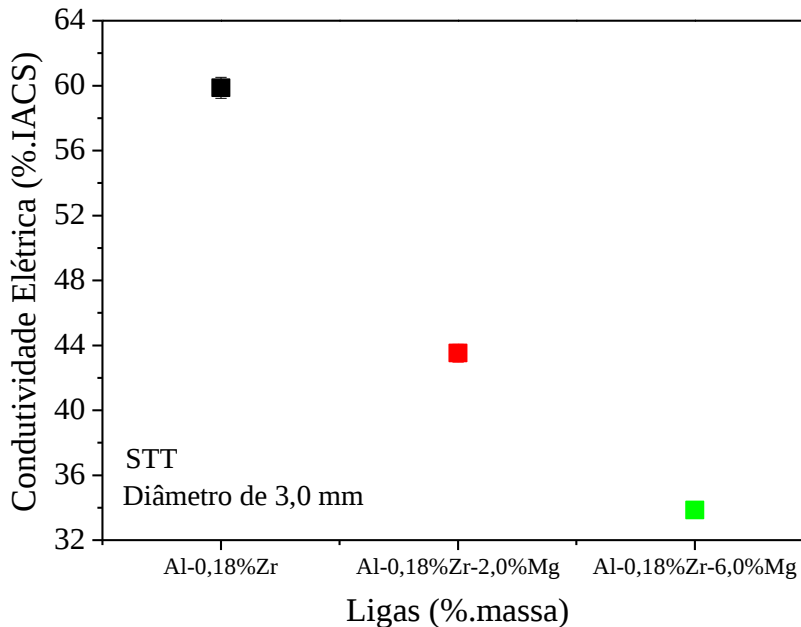


Figura 4: Gráfico de condutividade elétrica para as ligas modificadas com Mg

4 CONCLUSÕES

Para a liga Al-0.18%Zr foi observado uma estrutura de grão completamente colunar. Constatou-se que a adição de Mg, gerou redução da quantidade e do tamanho dos grãos colunares e a presença de grãos equiaxiais no centro do lingote para a liga com 2,0%Mg. Já para a liga com 6,0%Mg houve refinamento de grãos.

A adição de Mg gerou perda de quase 45% de condutividade para a liga com 6,0%Mg.

A adição de Mg aumentou significativamente o limite de resistência a tração [LRT] das ligas, apresentando ganhos de 200 MPa para a liga com 2,0%Mg e 320 MPa para a liga com 6,0%Mg.

5 REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM INTERNATIONAL), Aluminum and Aluminum alloys. v. 4. American Society for Metals - ASM Handbook, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM INTERNATIONAL), B 193/16. Standard Test Method for Resistivity of Electrical Conductor Materials – ASTM, 2016.

Associação Brasileira de Alumínio–ABAL. Fundamentos e aplicações do alumínio. 2a edição, Maio de 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT NBR 6892). Materiais metálicos - Ensaio de tração à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, nov. 2002.

BRESCIANI Filho, Ettore (coord.); ZAVAGLIA, Cecília Amélia Carvalho; BUTTON, Sérgio Tonini; GOMES, Edson; NERY Fernando Antonio da Costa. Conformação Plástica

COLPAERT, Hubertus. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. Revisão técnica André Luiz V. da Costa e Silva. 4ª edição. São Paulo: Blucher, 2008.

Garcia, A. Solidificação: Fundamentos e Aplicações. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2001, p. 399.

KAUFMAN, J. G.; ROOY, E. L. The Influence and Control of Porosity and Inclusions in Aluminum Castings. In: KAUFFMAN, J. G.; ROOY, E. L. **Aluminum alloy castings: properties, processes and applications**, Materials Park, ASM International, 2004. pp.: 47- 54.

Solidificação dos metais / Atsumi Ohno; tradutores Paulo da Silva Pontes, Nivaldo Lemos Cupini. São Paulo: Livr. Ciências e Tecnologia, 1998

6 RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

INFLUENCE OF THE ADDITION OF 2WT% AND 6WT% MG ON THE MACROSTRUCTURE, ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND ULTIMATE TENSILE STRENGTH OF AL-0.18WT% ZR ALLOY

Rodrigo Ribeiro Lima, rrlmecnica@hotmail.com¹

Clóvis Iarlande Oliveira Santana, clovis.mecnica@hotmail.com¹

Mauro Quaresma Lobato, mauroqlobato@gmail.com¹

Jhonata Maico Paes Bezerra, jpaesbezerra@gmail.com¹

José Maria do Vale Quaresma, quaresma@fem.unicamp.br¹

¹Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Augusto Corrêa Street, 01 - Guamá – 66075-110- Belém, Brazil.

Abstract. Increasing the mechanical strength of aluminum alloys at elevated temperatures has been the subject of many studies in recent years. Aluminum has alloying elements that have aroused particular interest in researches, such as Zr and Mg, due to the ability of the former to form hardenable intermetallic compounds and to the ability of the latter, when in solid solution, to reduce the precipitate/matrix lattice parameter mismatch. Hence, the present work has the objective of analyzing the effects of the addition of 2 and 6wt.% Mg in the Al-0.18wt.%Zr alloy. The studied alloys were conventionally cast and solidified with a high cooling rate and samples were taken from their ingots which were machined to 9.5mm diameter cylinders which were cold-rolled and processed into wires of 3.0 mm in diameter. These wires were submitted to tensile and electrical conductivity tests that allowed to observe that Mg additions modified the alloy properties.

Keywords: Al-Zr-Mg alloy, Electrical Conductivity, Ultimate Tensile Strength.