

# PESQUISA BIBLIOGRÁFICA: EFEITO DA TEMPERATURA DE ENVELHECIMENTO EM LIGAS DE ALUMÍNIO DA FAMÍLIA 2000

Andrey Sakamoto Antoneli<sup>1</sup>, Júlio César Dutra<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Departamento de Engenharia de Materiais, Centro Universitário FEI

andreysaka@outlook.com<sup>1</sup>, jdutra@fei.edu.br<sup>2</sup>

**Resumo:** O seguinte projeto tem como objetivo estudar o efeito da temperatura de solubilização e envelhecimento artificial na microestrutura e nas propriedades mecânicas da liga de alumínio ABNT 2024. Por meio desta pesquisa bibliográfica, foi possível propor as temperaturas de tratamentos térmicos de solubilização e de envelhecimento com vistas à maior dureza no material estudado.

## 1. Introdução

Muitas propriedades mecânicas do alumínio, que fazem com que ele seja um material muito cobiçado na indústria aeroespacial, vem de sua baixa densidade e da capacidade de formação de partículas de segunda fase por meio do processo de endurecimento por precipitação [1]. Neste processo, o material é submetido à sequência de tratamentos térmicos de solubilização, têmpera e envelhecimento.

A primeira etapa consiste no aquecimento da liga para uma região monofásica sólida para solubilização de todos os elementos de liga na matriz de alumínio. Em seguida, efetua-se um resfriamento rápido que resulta em uma solução sólida supersaturada (SSSS) [2]. Tal situação fornecerá a energia necessária para a formação das zonas de Guinier-Preston (zonas GP) além do número em excesso de lacunas.

Com a exposição dessa liga a uma dada temperatura por períodos prolongados, as zonas GP crescem e transforma-se em precipitados coerentes  $\theta''$ , semicoerentes  $\theta'$  e finalmente  $\theta$ , de composição química  $Al_2Cu$ . Essa evolução pode ser esquematizada pela Equação 1 [1].

$$SSSS \rightarrow \theta'' \rightarrow \theta' \rightarrow \theta \quad (1)$$

Quanto menor for essa partícula de segunda fase  $\theta$  e maior sua fração volumétrica, mais difícil será a movimentação de discordâncias [3], fazendo com que a resistência mecânica do material aumente consideravelmente, processo esse conhecido como endurecimento por dispersão.

A solução sólida formada no processo de solubilização só é termodinamicamente estável acima da temperatura *solvus*. Quando ocorre a diminuição dessa temperatura, é possível ocorrer a decomposição dos solutos presentes na matriz e consequente precipitação das fases intermediárias [1].

O crescimento de grão ocorre durante a solubilização, predominantemente. Esse fenômeno consiste no aumento do tamanho médio e diminuição no número total de grãos por unidade de volume e tem como

potencial termodinâmico a diminuição na energia livre de superfície associada aos contornos de grão.

Assumindo que a taxa de crescimento seja proporcional à curvatura da parede das células dos grãos em um determinado instante de tempo, ela pode ser representada por [2]:

$$\frac{dD}{dt} = k'c \quad (2)$$

onde  $t$  é o tempo, em segundos,  $D$  o diâmetro médio dos grãos, em  $\mu m$ ,  $c$  a curvatura das paredes da célula e  $k$  é constante de proporcionalidade dependente da temperatura, dada por:

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (3)$$

onde  $Q$  é a energia de ativação, em  $J mol^{-1}$ ,  $R$ , a constante geral dos gases,  $8,314 J mol^{-1} K^{-1}$ ,  $T$ , a temperatura absoluta, em  $K$ , e  $k_0$  uma constante pré-exponencial.

Assumindo que  $D_0$  é o tamanho médio dos grãos no início do processo e que  $c$  é equivalente ao diâmetro médio na Equação 2, nota-se que:

$$D^2 - D_0^2 = Kt \quad (4)$$

A forma mais geral da taxa de crescimento de grão, no entanto, é dada por:

$$D^n - D_0^n = Kt \quad (5)$$

## 2. Método investigativo da literatura

Para a análise do efeito da temperatura de envelhecimento, Dhal e Shunmugam [3] utilizaram placas de alumínio e as submeteram à laminação criogênica até uma deformação verdadeira de 3,6%. Após dessa deformação, foi realizado um processo de solubilização a  $602^\circ C$  por duas horas e resfriada rapidamente em água fria.

As amostras solubilizadas foram recozidas em temperaturas variadas na faixa de  $50$  a  $400^\circ C$  por 30 minutos seguidas de resfriamento rápido em água. As características microestruturais do material foram analisadas no microscópio eletrônico de transmissão [3].

Já para a cinética de crescimento de grão, Huda e Zaharinie [4] realizaram tratamentos de recozimento com temperaturas na faixa de  $250$  a  $350^\circ C$  por 20 minutos. Após o envelhecimento artificial, foi realizada a preparação dos corpos de prova para a metalografia, com lixamento, polimento com pó de alumina e utilizando o reagente de Kroll para evidenciar os precipitados e os contornos de grão [4].

## 3. Análise do fenômeno na literatura

Com as imagens obtidas através da técnica de microscopia eletrônica de transmissão, foi possível

observar a existência de subgrãos, fazendo com que a densidade de discordâncias do material cresça consideravelmente, observados nos retângulos na Figura 1.a e 1.b.

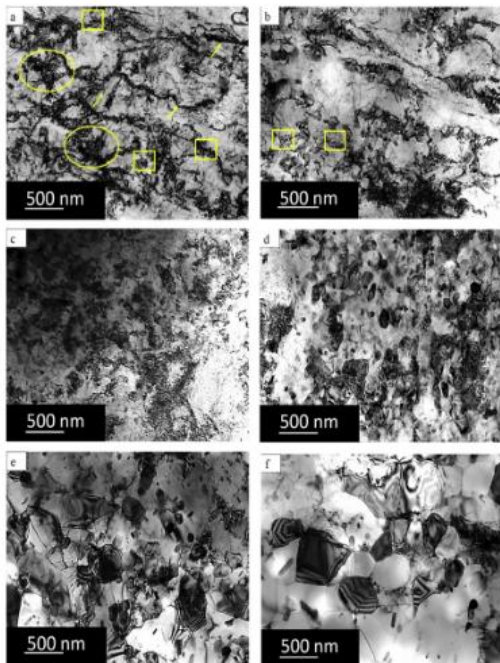


Figura 1- Microestrutura obtida pelo Dhal e Shunmugan por MET [3].

Também foi possível observar que com o aumento da temperatura, iniciou-se o crescimento desses subgrãos na microestrutura, analisado na sequência das Figuras 1.d, 1.e e 1.f. Além dessas mudanças, considerando os subgrãos, também pode ser analisado o aumento do tamanho das partículas de precipitados [3].

A evolução do tamanho de grão observado pelo Huda e Zaharinie [4] é possível observar que a variação do diâmetro médio dos grãos sofreu leve aumento com baixas variações de temperatura no envelhecimento artificial, representado na Figura 2.

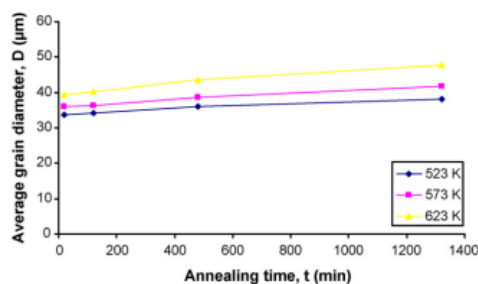


Figura 2 – Evolução do diâmetro médio de grão

Com essa diferença relevante entre os processamentos estudados, foi plotado o gráfico da Figura 3 para a retirada de valores da constante K e n, por meio da linearização da Equação 5.

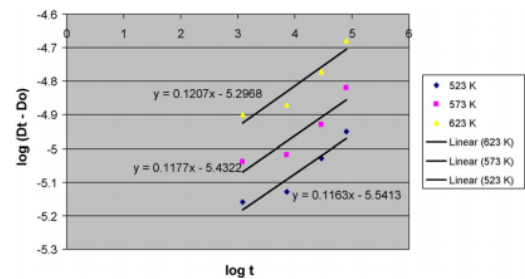


Figura 3– Gráfico do  $\log(D_t - D_0)$  em função do  $\log t$  [4].

#### 4. Considerações Finais

O trabalho encontra-se na fase preliminar, ou seja, na aprovação do formulário FEI INFO40 para aquisição do material necessário para a realização do projeto. A revisão bibliográfica mostra, de todo modo, que nas temperaturas mais elevadas de tratamento térmico, há ativação de mecanismos que diminuem a densidade de discordâncias e favorecem o crescimento de grão.

#### 5. Referências

- [1] R.W. Cahn; P. Haasen; F.J. Kramer, **Materials Science and Technology: Phase Transformations in Materials**, (1991) VCH Publishers.
- [2] R.E. Reed-Hill, **Physical Metallurgy Principles**. 3 ed. (1991) Boston: PWS, 926p.
- [3] A. Dhal; M.S. Shunmugam, Precipitation phenomena, thermal stability and grain growth kinetics in an ultra-fine grained Al 2014 alloy. (2015) **Journal of Alloys and Compounds**. p. 229-238.
- [4] Z. Huda; T. Zaharinie, Kinetics of grain growth in 2024-T3: An aerospace aluminum alloy. (2009) **Journal of Alloys and Compounds**. p 128-132.

#### Agradecimentos

Ao Centro Universitário FEI pelo financiamento do projeto de iniciação científica PBIC 050/18 e os recursos necessários para o projeto. Ao Professor Doutor Júlio César Dutra pela disposição, conselhos e paciência para orientar o presente projeto.

<sup>1</sup> Aluno de IC do Centro Universitário FEI, PBIC 050/18. Projeto com vigência de 08/18 a 07/19.

<sup>2</sup> Professor Doutor do Departamento de Engenharia de Materiais do Centro Universitário FEI.