

ESTUDO DOS EFEITOS DA TEMPERATURA NO TRATAMENTO TÉRMICO DO AA2024-T6

Andrey Sakamoto Antoneli¹, Júlio César Dutra²

^{1,2} Departamento de Engenharia de Materiais, Centro Universitário FEI
andreysaka@outlook.com; jdutra@fei.edu.br

Resumo: O presente trabalho estudou os efeitos que as temperaturas de solubilização e envelhecimento possuem no AA2024-T6. Com os resultados derivados dos experimentos realizados, observou-se que quando o material não possui o processo de laminação, a cinética de envelhecimento é retardada. Notou-se que, apesar de um grão mais refinado, as amostras solubilizadas a 520 °C sofreram com a fragilização, com baixos alongamentos, diferente das amostras solubilizadas a 500 °C.

1. Introdução

No processo de endurecimento por precipitação o material é submetido à sequência de tratamentos térmicos: solubilização, resfriamento rápido 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 e, logo em seguida, é efetuado o resfriamento rápido, formando uma solução sólida supersaturada (SSSS) [1]. A segunda etapa consiste no aquecimento a temperaturas dentro de um campo bifásico, fornecendo energia para que ocorra a decomposição da SSSS, formando as zonas de Guinier-Preston (zonas GP). Com a exposição do material a essas temperaturas por períodos prolongados, as zonas GP começam a se transformar em precipitados θ'' , θ' e θ , com interfaces coerente, semicoerente e incoerente, respectivamente [2].

Quanto menores e mais dispersas as partículas de segunda fase θ , mais difícil será a movimentação de discordâncias [3], fazendo com que a resistência mecânica do material aumente consideravelmente; em contrapartida, sua ductilidade será reduzida.

O crescimento de grão ocorre predominantemente durante a solubilização. Esse fenômeno consiste no aumento do tamanho médio e diminuição no número total de grãos por unidade de volume. Com o crescimento de grão, a energia do sistema tende a diminuição.

Assumindo que a velocidade de crescimento de grão seja proporcional à curvatura dos grãos em um determinado instante de tempo, sendo representada por [1]:

$$\frac{dD}{dt} = K'c \quad (1)$$

onde t é o tempo, em segundos, D o diâmetro médio dos grãos, em μm , c a curvatura das paredes do grão e K a constante de proporcionalidade dependente da temperatura, dada por:

$$K = K_0 e^{-Q/RT} \quad (2)$$

onde Q é a energia de ativação, em J mol^{-1} , R , a constante geral dos gases, $8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$, T , a temperatura absoluta 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 é possível escrever e equação genérica:

$$D^n - D_0^n = Kt \quad (3)$$

2. Metodologia

Para observar os efeitos da temperatura durante o tratamento térmico, foram selecionadas as temperaturas de 500, 520 e 540 °C para a solubilização e as temperaturas de 175 e 200 °C para o envelhecimento, totalizando seis grupos distintos.

Os tratamentos foram efetuados em fornos elétricos tubulares preaquecidos nas temperaturas alvo. O tempo de solubilização utilizado foi de 1 hora. Após a solubilização, as amostras foram imediatamente resfriadas em água e levadas ao forno para o tratamento de envelhecimento. As amostras foram retiradas em uma relação de 3^o, prevista na Tabela 1, para o ensaio de dureza Vickers com carga de 5 kg.

Tabela 1- Tempo de permanência das amostras nos tratamentos de envelhecimento

Amostra	1	2	3	4	5	6	7
Tempo (min)	1	9	27	81	243	729	2187

Além da análise da dureza das amostras, foi realizada a análise microestrutural apenas das amostras após a solubilização. Para observar o fenômeno de crescimento de grão, foi realizado um corte paralelo à direção de laminação. Após a obtenção da seção desejada, as amostras foram embutidas a frio e preparadas mecanicamente por lixas, polidas com pasta de diamante e sílica coloidal.

Com o intuito de revelar os grãos, utilizou-se o reagente de Keller. Com a microestrutura revelada, as amostras foram levadas ao microscópio óptico Leica®, onde foi feita a análise de tamanho de grão.

Após as análises e levantamento das curvas de cinética de envelhecimento, observou-se grande semelhança entre os resultados obtidos entre as amostras: solubilizadas a 500 °C e envelhecidas a 175 °C por 12 horas; e solubilizada a 520 °C e envelhecidas a 175 °C por 12 horas. Com isso, ambos os tratamentos térmicos foram submetidos a um ensaio de tração para observar possíveis alterações no limite de escoamento e alongamento.

3. Resultados

O crescimento de grão observado na solubilização foi considerável, como pode ser observado na Tabela 2, de acordo com o aumento de temperatura do tratamento.

Tabela 2 - Tamanho de grão das amostras analisadas

Como recebido	$12,14 \pm 2,42 \mu\text{m}$
Solubilizado a 500 °C	$15,55 \pm 1,63 \mu\text{m}$
Solubilizado a 520 °C	$16,32 \pm 1,52 \mu\text{m}$
Solubilizado a 540 °C	$22,04 \pm 2,54 \mu\text{m}$

O resultado obtido no ensaio de dureza nas amostras solubilizadas a 500 °C mostra que o máximo de dureza obtido é alcançado em 12 horas nas amostras envelhecidas a 175 °C e em 4 horas nas amostras envelhecidas a 200 °C. Através da Figura 1, é possível observar o aumento da cinética dos mecanismos associados ao envelhecimento, resultando em um máximo de dureza mais rápidos, no caso do envelhecimento a 200°C.

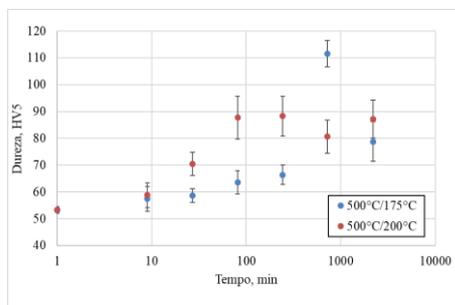


Figura 1 – Evolução da dureza da amostra solubilizada a 500 °C

Para os resultados obtidos no tratamento com solubilização a 520 °C, ambas as rotas de envelhecimento atingiram a dureza máxima com 12 horas de tratamento. Nota-se que os mecanismos associados ao endurecimento por precipitação são similares e isso pode estar ligado à geometria do grão pode estar interferindo.

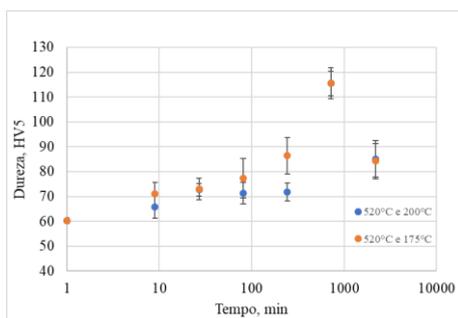


Figura 2 – Evolução da dureza da amostra solubilizada a 520 °C

No tratamento utilizando a temperatura de solubilização de 540 °C, é possível observar que o máximo de dureza continua sendo no tempo de 12 horas, como pode ser observado na Figura 3. Nota-se que até 4 horas de tratamento não houve alterações significativas nos valores de dureza, provavelmente resultado do tamanho de grão maior obtido através do aumento de temperatura de solubilização.

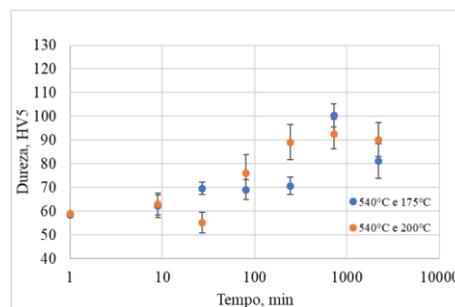


Figura 3 - Evolução da dureza da amostra solubilizada a 540 °C

Como pode ser observado na Figura 4, o material solubilizado a 520 °C e envelhecido a 175 °C foi fragilizado durante o processo de envelhecimento, além de apresentar um alongamento de 0,5%. Com as análises anteriores, não é possível concluir o motivo exato do resultado obtido.

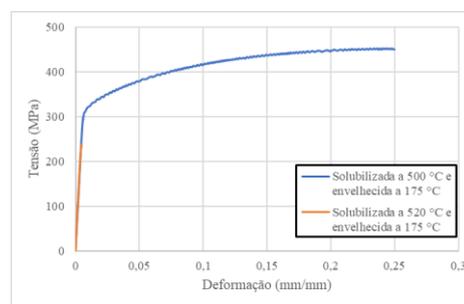


Figura 4 – Resultados do ensaio de tração

4. Conclusões

Com o aumento da temperatura de solubilização, o tamanho médio de grão aumenta consideravelmente.

A cinética de envelhecimento é atrasada com o aumento da temperatura de solubilização.

A solubilização a 520 °C e envelhecimento a 175 °C diminui o alongamento do material.

5. Referências

- [1] R.E. Reed-Hill, **Physical Metallurgy Principles**. 3 ed. (1991) Boston: PWS, 926p.
- [2] R.W. Cahn; P. Haasen; F.J. Kramer, **Materials Science and Technology: Phase Transformations in Materials**, (1991) VCH Publishers.
- [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.

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 de orientar o presente projeto.

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

² Professor Doutor do Departamento de Engenharia de Materiais do Centro Universitário FEI.