



FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas - FEM/UNICAMP

Rua Mendeleev, 200 - CEP 13083-860

Cidade Universitária "Zeferino Vaz" Barão Geraldo

Campinas - SP www.fem.unicamp.br

EXPERIMENTO 1: ENDURECIMENTO DE LIGAS METÁLICAS POR SOLUBILIZAÇÃO E PRECIPITAÇÃO CONTROLADA

Objetivos:

Estudar a variação de dureza em duas ligas de alumínio submetidas ao tratamento térmico de endurecimento por solubilização e precipitação.

Fundamentação Teórica

A resistência mecânica e a dureza de algumas ligas metálicas podem ser elevadas pela nucleação de partículas de uma segunda fase extremamente pequenas e finamente dispersas na matriz da fase original. Tal fenômeno é obtido por meio da aplicação de tratamentos térmicos apropriados.

Esse procedimento de aumento da resistência mecânica é denominado de endurecimento por solubilização e precipitação, pois as tais pequenas partículas são conhecidas por precipitados da segunda fase. O termo “endurecimento por envelhecimento” também pode ser utilizado para descrever esse processo de tratamento térmico, pois a resistência mecânica se desenvolve ao longo do tempo ou à medida que a liga envelhece.

Em materiais metálicos, a deformação plástica ocorre quando tensões de cisalhamento, auxiliadas pelo movimento de discordância, provocam o deslizamento de planos atômicos. O aumento da resistência mecânica ou endurecimento ocorre à medida que os precipitados da segunda fase atuam como obstáculos ao movimento das discordâncias e consequentemente, dificultam o deslizamento de planos. Exemplos de ligas que são endurecidas por tratamentos de precipitação incluem as ligas Al-Cu, Al-Mg, Cu-Be e Cu-Sn. Algumas ligas ferrosas também podem ser endurecidas pela técnica de solubilização e precipitação.

Para que a aplicação do procedimento de solubilização e precipitação acarrete em endurecimento de uma liga metálica, duas características obrigatórias devem ser exibidas pelos diagramas de fases de tal liga:

a) A solubilidade do soluto no solvente deve estar limitada a um valor apreciável, da ordem de vários pontos percentuais;

b) Tal limite de solubilidade deve aumentar de forma significativa com o aumento da temperatura.

Essas duas condições são encontradas no diagrama de fases hipotético apresentado na figura 1. Nesse caso, a solubilidade máxima corresponde à composição no ponto M, enquanto a solubilidade mínima é dada pelo ponto N. Nesse intervalo de solubilidades, a solubilidade do elemento B em A aumenta com o aumento da temperatura.

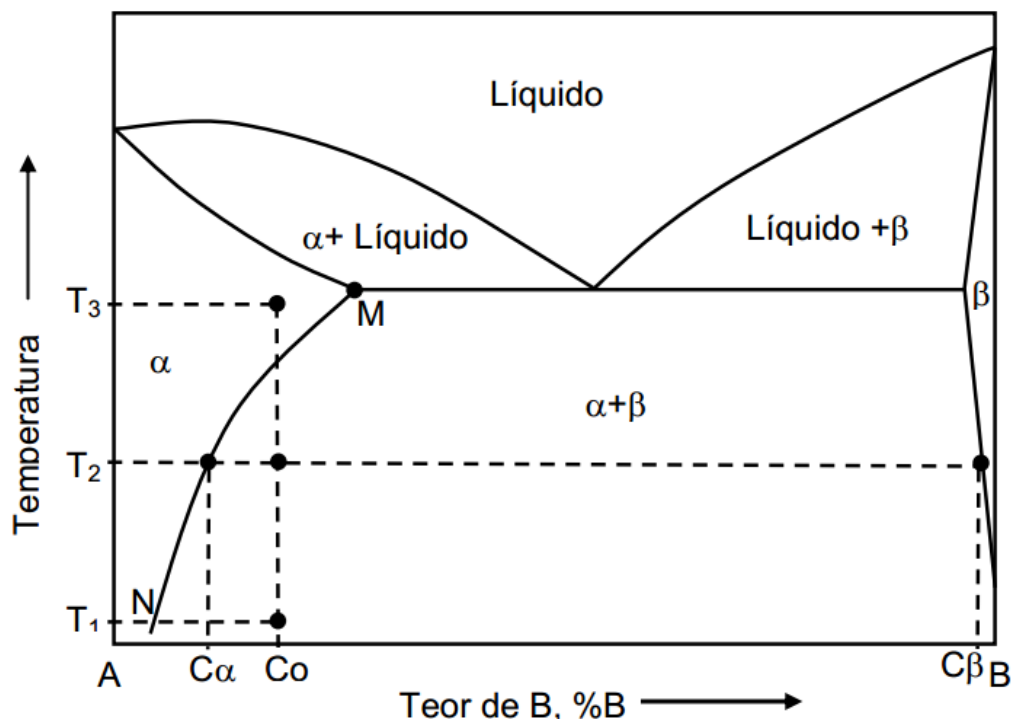


Figura 1. Diagrama de fases hipotético dos elementos A e B.

Em ligas A-B, o fenômeno de endurecimento por solubilização e precipitação é obtido mediante dois procedimentos distintos: tratamento térmico de solubilização da fase β e tratamento térmico de precipitação da fase β .

a) No tratamento térmico de solubilização, os átomos de soluto (B) são dissolvidos na estrutura cristalina do elemento A, formando assim, uma única solução sólida, o que dá origem a um campo monofásico no diagrama de fases. Na Figura 1, considere a liga de composição C_0 . O procedimento de tratamento térmico consiste em aquecer a liga até uma temperatura (T_3) dentro do campo \square e aguardar até que toda a fase β seja completamente dissolvida. Em ligas de Al, essa temperatura é próxima a 530°C e o tempo de solubilização pode passar de 15 h. Após tal procedimento, a microestrutura dessa liga será formada apenas pela fase α , cuja composição é C_0 . Na sequência, a liga de composição C_0 é submetida a resfriamento rápido, denominado de tratamento de têmpera, até a temperatura T_1 , a qual para muitas ligas é a temperatura ambiente. Esse resfriamento rápido limita muito a difusão atômica e a consequente formação da fase β . Desta forma, existe uma situação de ausência de equilíbrio, onde somente a solução sólida da fase α , supersaturada com átomos de B, está presente à temperatura T_1 .

b) No tratamento térmico de precipitação da fase β , a solução sólida \square supersaturada é aquecida até uma temperatura intermediária T_2 , localizada dentro da região bifásica $\alpha + \beta$. Nessa temperatura, a difusão atômica é consideravelmente superior à difusão à temperatura ambiente, o que resulta na formação da fase β na forma de partículas muito pequenas e finamente dispersas, com composição C_\square . Esse processo é comumente conhecido por “envelhecimento”. Após o período de tempo de envelhecimento apropriado à temperatura T_2 , a liga é resfriada até a temperatura ambiente.

No sistema Al-Cu, as microestruturas resultantes desse procedimento são apresentadas na figura 2.

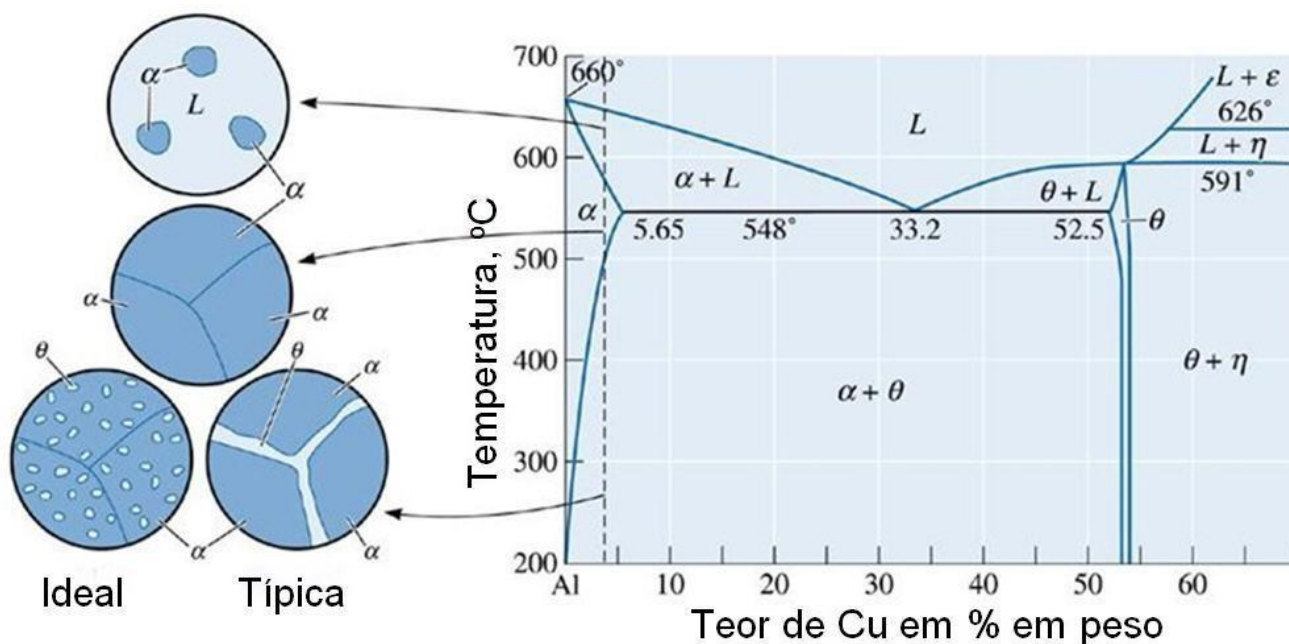


Figura 2. Parte do diagrama de fases Al-Cu e possíveis microestruturas obtidas durante tratamento térmico de endurecimento por solubilização e precipitação da fase β

Em ligas Al-Cu, a precipitação da fase β na matriz da fase α supersaturada não é imediata e ocorre em etapas, produzindo diferentes fases. Inicialmente, ao ser aquecida à temperatura T_2 , são formadas regiões dentro da matriz definidas como zonas GP1 (Zonas Guinier-Preston). A continuidade do processo de envelhecimento resulta na transformação das zonas GP1 em zonas GP2, também definidas como fase θ'' . Em uma terceira etapa, é formada a fase θ' . Finalmente, a fase de equilíbrio, definida como fase θ forma-se na etapa final e sua composição corresponde ao composto Al_2Cu . As principais características dessas fases em suas várias etapas são:

a) Zonas GP1 – Formam-se em temperaturas de envelhecimento baixas e originam-se da segregação de átomos de Cu da solução sólida supersaturada α . Consistem de grupos de átomos na forma de discos com espessura variando entre 0,4 e 0,6 nm e diâmetro entre 8 e 10 nm. Tais discos são formados nos planos $\{100\}$ da estrutura CFC da fase α . As zonas GP1 são coerentes com a matriz.

b) Zonas GP2 (fase θ'') - São coerentes com a matriz e sua espessura varia entre 1 e 4 nm e seu diâmetro entre 10 e 100 nm.

c) Fase θ' - Essa fase forma-se por nucleação heterogênea, especialmente em discordâncias e é cristalinamente incoerente com a matriz. Sua estrutura cristalina é tetragonal.

d) Fase θ - Fase de equilíbrio, é incoerente com a matriz e tem composição Al_2Cu . Sua estrutura cristalina é tetragonal de corpo centrado e forma-se a partir da fase θ' .

O conceito de coerência ou incoerência de uma segunda fase (precipitados) com a estrutura cristalina da matriz pode ser definido a partir das representações esquemáticas mostradas na figura 3. Em ligas de Al-Cu, a resistência mecânica da amostra em função das diversas fases formadas é apresentada na figura 4.

O endurecimento de ligas metálicas por tratamentos térmicos de solubilização e precipitação decorrem de reações de estado sólido, onde os átomos que compõem os precipitados da segunda fase são, dependendo da temperatura, solúveis ou não na estrutura cristalina da matriz. Mesmo em temperaturas em que esses precipitados são estáveis, os mesmos exibem tendência em reduzir sua área superficial por meio do processo de crescimento de grão. Nesse caso, as partículas menores tendem a ser incorporadas por partículas maiores, que crescem.

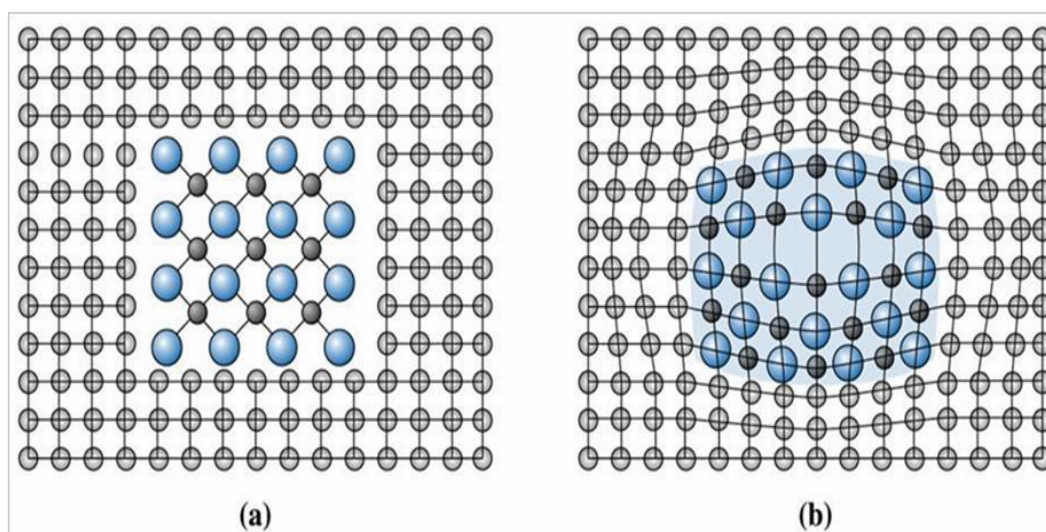


Figura 3. Representação esquemática de precipitados (a) incoerentes e (b) coerentes na estrutura cristalina da matriz.

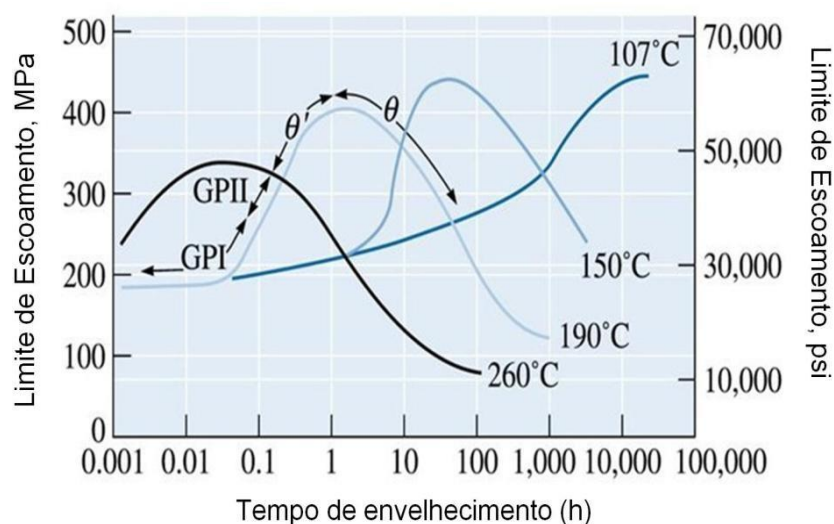


Figura 4. Evolução do limite de escoamento com o tempo e temperatura de envelhecimento para uma liga Al-4,5%Cu.

Dessa forma, se o período de tempo de tratamento térmico a que a amostra é submetida na etapa de precipitação for muito elevado, as partículas da fase β (fase θ em ligas Al-Cu) crescerão demasiadamente e provocarão a queda da resistência mecânica. Tal situação é definida por superenvelhecimento da liga.



FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas - FEM/UNICAMP

Rua Mendeleev, 200 - CEP 13083-860

Cidade Universitária "Zeferino Vaz" Barão Geraldo

Campinas - SP www.fem.unicamp.br

Os tratamentos térmicos aplicados a ligas de alumínio são bastante diversos e uma nomenclatura específica se faz necessária.

T1 - Envelhecimento natural

T3 - Solubilização, deformação a frio e envelhecimento natural

T4 - Solubilização e envelhecimento natural

T5 - Envelhecimento artificial

T6 - Solubilização e envelhecimento artificial

T7 - Solubilização e estabilização

T8 - Solubilização, deformação a frio e envelhecimento artificial

Pré-teste:

Tópicos a serem abordados no pré-teste:

- Quais características uma liga metálica deve apresentar para que possa ser endurecida por solubilização e precipitação?
- Qual é o conceito de endurecimento por envelhecimento ou por precipitação? Quais são suas etapas? De que maneira a dureza máxima varia com a temperatura de envelhecimento?
- O que é superenvelhecimento?
- Qual a diferença entre envelhecimento natural e envelhecimento artificial?
- Qual a nomenclatura utilizada para o envelhecimento artificial das ligas de Al?

Material:

Ligas de alumínio 6351 e 2024 (Cu 4,4; Mg 1,4; Mn 0,5; Zn 0,2; Si 0,2)

Procedimento Experimental

Cada grupo receberá dez corpos de prova (5 CPs da liga 6351 e 5 CPs da liga 2024), os quais serão solubilizados à temperatura de 550 °C, resfriados em água e, em seguida, tratados termicamente à temperatura de 200 °C durante diferentes intervalos de tempo. Serão utilizados dois fornos elétricos para a realização do tratamento térmico dos CPs, um balde com água para realização do resfriamento rápido e durômetro para medida de dureza Rockwell B (HRB).

As seguintes etapas serão realizadas:

- Realizar o tratamento de solubilização à temperatura de 550 °C por 30 minutos dos CPs;
- Retirar os CPs do forno e mergulhar em água (temperatura ambiente);
- Envelhecimento natural:** Dois CPs (um de cada liga) serão utilizados para realizar medidas de dureza HRB após os seguintes intervalos de tempo: logo após a solubilização, após 30 min, 90 min, um dia e uma semana;
- Envelhecimento artificial:** Os oito CPs remanescentes (quatro de cada liga) serão aquecidos no forno a 200°C. Um CP será retirado do forno após 5, 20, 60 e 90 minutos, resfriando-os em água e medindo sua dureza HRB correspondente.

* **Análise dos resultados:** Elaborar gráfico da dureza em função do tempo de medida e das condições de envelhecimento (natural ou artificial).



FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas - FEM/UNICAMP

Rua Mendeleev, 200 - CEP 13083-860

Cidade Universitária "Zeferino Vaz" Barão Geraldo

Campinas - SP www.fem.unicamp.br

Relatório:

1. Introdução – revisão bibliográfica breve (máx. 1 página) sobre o endurecimento de ligas metálicas por solubilização e precipitação;
2. Objetivos do experimento;
3. Metodologia experimental;
4. Resultados e discussão;
5. Conclusões;
6. Referências bibliográficas.

Obrigatória a discussão dos seguintes tópicos:

- * Discuta a variação da dureza como função do tempo de envelhecimento.
- * Como a curva dureza versus tempo de envelhecimento se altera para uma das ligas de alumínio estudadas? Como explicar essa diferença em função da composição química de cada liga.
- * A que classes de tratamentos térmicos T (Ex: T8 - Solubilização, deformação a frio e envelhecimento artificial) correspondem os resultados obtidos?
- * Comparação entre os tratamentos/ligas e o tratamento mais adequado para cada liga.
- * Correlação entre os resultados e possíveis aplicações na indústria
- * Discuta os erros experimentais observados nos resultados e suas possíveis causas.
- * Compare os resultados com a literatura e faça uma análise crítica.

OBS: Analisar criticamente os resultados obtidos.

Referências bibliográficas:

CALLISTER, W.D. Materials science and engineering – An introduction. 7 ed, John Wiley & Sons, 975p, 2007.
ASKELAND, D.R. The science and engineering of materials. 6 ed, Cengage Learning, 652p, 2008 (**capítulo 12**).

Observações:

- 1) Para execução do procedimento experimental, deve-se utilizar Equipamento de Proteção Individual - EPI ou Equipamento de Proteção Coletivo - (EPC) indicado, nos laboratórios, para cada operação;
- 2) Cuidado com a manipulação de objetos quentes;
- 3) Segurança máxima para evitar o contato de metal aquecido.