

Materiais Metálicos

Ligas de Alumínio

Profa. Dra LAURALICE CANALE

Prof. Dr. FERNANDO CRUZ BARBIERI

Eng. Marcelo Gonçalves, M.E., Ph.D.

Alpina Consultoria | ESEG - Escola Superior de
Engenharia e Gestão

LIGAS DE ALUMÍNIO

GENERALIDADES

- O alumínio é o metal mais abundante na crosta terrestre
- O seu processamento é caro, tendo restringido a sua aplicação até meados do século, mas é um dos materiais mais usados atualmente
- Forma ligas com Mn, Cu, Mg, Si, Fe, Ni, Li, etc
- Algumas ligas possuem resistência mecânica superior aos aços estruturais

LIGAS DE ALUMÍNIO

PROPRIEDADES

- Baixa densidade (1/3 do aço)
- Boa condut. térmica e elétrica
- Elevada resistência específica
- Grande ductilidade
- Fácil usinabilidade, fundição, soldagem e processamento em geral
- Boa resist. à corrosão
- Custo moderado

LIGAS DE ALUMÍNIO

APLICAÇÕES

- Construção civil e arquitetura
- Embalagens
- Aeronáutica e aeroespacial
- Indústrias automóvel, ferroviária e naval
- Condutores elétricos alta voltagem
- Utensílios de cozinha

LIGAS DE ALUMÍNIO

TRATAMENTOS

- Recozimentos
- Endurecimento por precipitação e envelhecimento, apenas em algumas ligas
- Endurecimento por deformação plástica a frio (encruamento)

TABLE 13-2 ■ *The effect of strengthening mechanisms in aluminum and aluminum alloys*

Material	Tensile Strength (psi)	Yield Strength (psi)	% Elongation	Ratio of Alloy-to-Metal Yield Strengths
Pure Al	6,500	2,500	60	1
Solid-solution-strengthened Al alloy	16,000	6,000	35	2.4
Cold-worked Al	24,000	22,000	15	8.8
Age-hardened Al alloy	83,000	73,000	11	29.2

MINERAÇÃO:

Fonte mais praticável: bauxita



(Al + O + H₂O + Sílica + Óxido de Ferro + Titânia + Misturas de Sílica, Impurezas)

Este minério pode ser encontrado próximo à superfície com uma espessura média de 4,5 metros.

A bauxita é dissolvida em soda cáustica e, posteriormente, filtrada para separar todo o material sólido, concentrando-se o filtrado para a cristalização da alumina.

FABRICAÇÃO DO ALUMÍNIO:

Composta de 2 Fases Distintas:

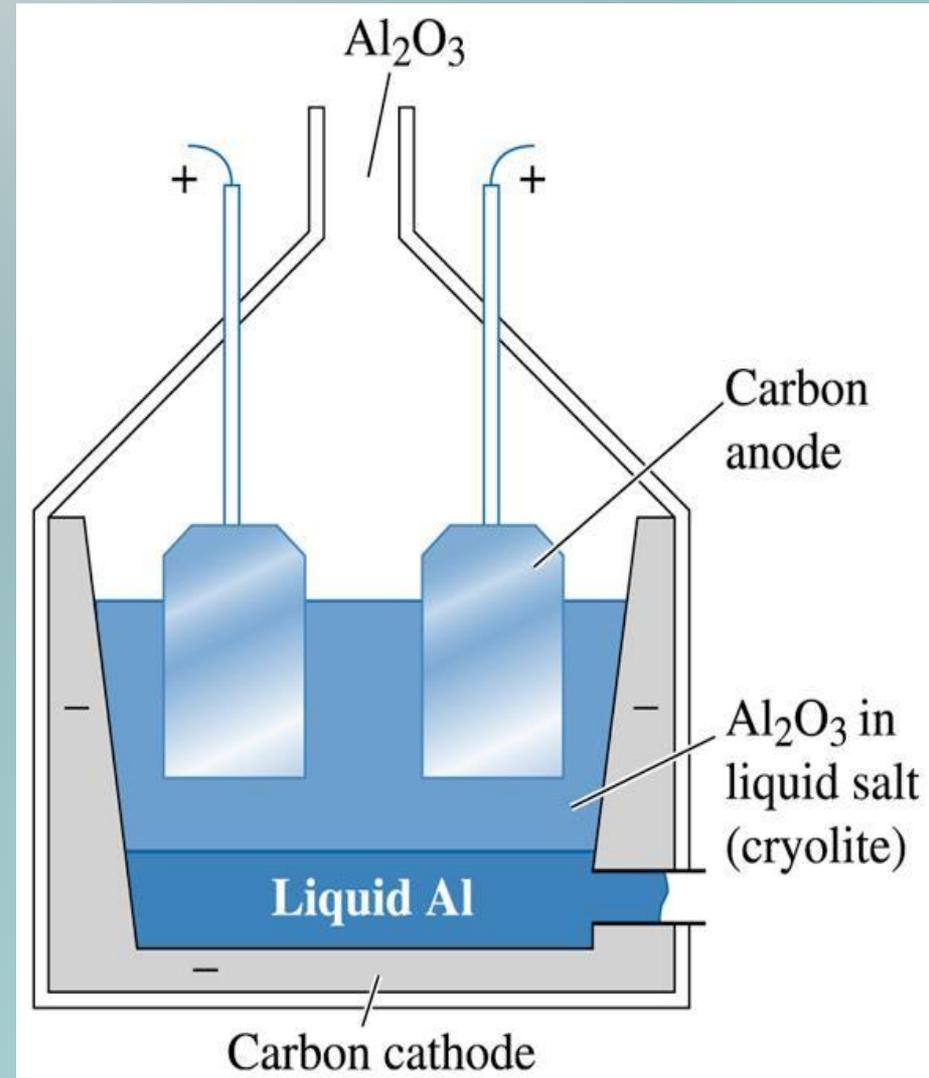
➤ Tratamento químico do minério para extrair a alumina

BAUXITA \Rightarrow ALUMINA (Al_2O_3)

➤ Redução eletrolítica da alumina (eletrólise: 1000 °C)

ALUMINA \Rightarrow ALUMÍNIO

Redução Eletrolítica



Na produção do alumínio, a redução é o processo que separa o metal do oxigênio, que formam a alumina (Al_2O_3).

A operação ocorre a uma temperatura próxima a 960°C , nas cubas eletrolíticas – fornos especiais revestidos com carbono pelos quais circulam uma corrente elétrica.

Dentro da cuba, a alumina dissolve-se em uma solução química chamada eletrólito, formada por sais de fluoreto de sódio e fluoreto de alumínio.

A passagem da corrente elétrica proveniente do anodo (polo positivo) pelo eletrólito promove a separação do metal do oxigênio

Como resultado da eletrolise , o oxigênio liberado da alumina reage com o carbono do anodo formando dióxido de carbono e o alumínio deposita-se no fundo da cuba em estado líquido, de onde é retirado e encaminhado para a produção de lingotes, placas e tarugos (alumínio primário).

Principal Limitação:

Baixo ponto de fusão.

Incêndios onde temperatura pode chegar a 1000 °C: completa fusão das esquadrias e componentes estruturais.

World Trade center

Utilização da Alumina (Al_2O_3)

- Pasta de dente
- Borracha
- Refratários
- Abrasivos
- Antitranspirantes
- Catalizadores na refinação do petróleo
- Detergentes

USOS DO ALUMÍNIO

- Sinais e faixas divisórias de rodovias (não se deterioram)
- Pisos leves de pontes
- Transporte terrestre: Carrocerias de caminhão e ônibus, carros ferroviários e metroviários
- Construção de edifícios: leve/resistt
corrosão/não necessita pintura

USOS DO ALUMÍNIO

Transporte aeroespacial: corresponde a 80% do peso de um avião descarregado. Estrutura, capa e componentes de foguetes e até como combustível sólido. Refletores solares.

- Os satélites na forma de balão dependem de folhas ultrafinas de alumínio para a sua superfície altamente refletora.
- Tintas, pigmentos, combustíveis para mísseis, produtos químicos, explosivos, fogos de sinalização e de artifício.

Classificação: Tratada Termicamente:

4 dígitos : X X X X

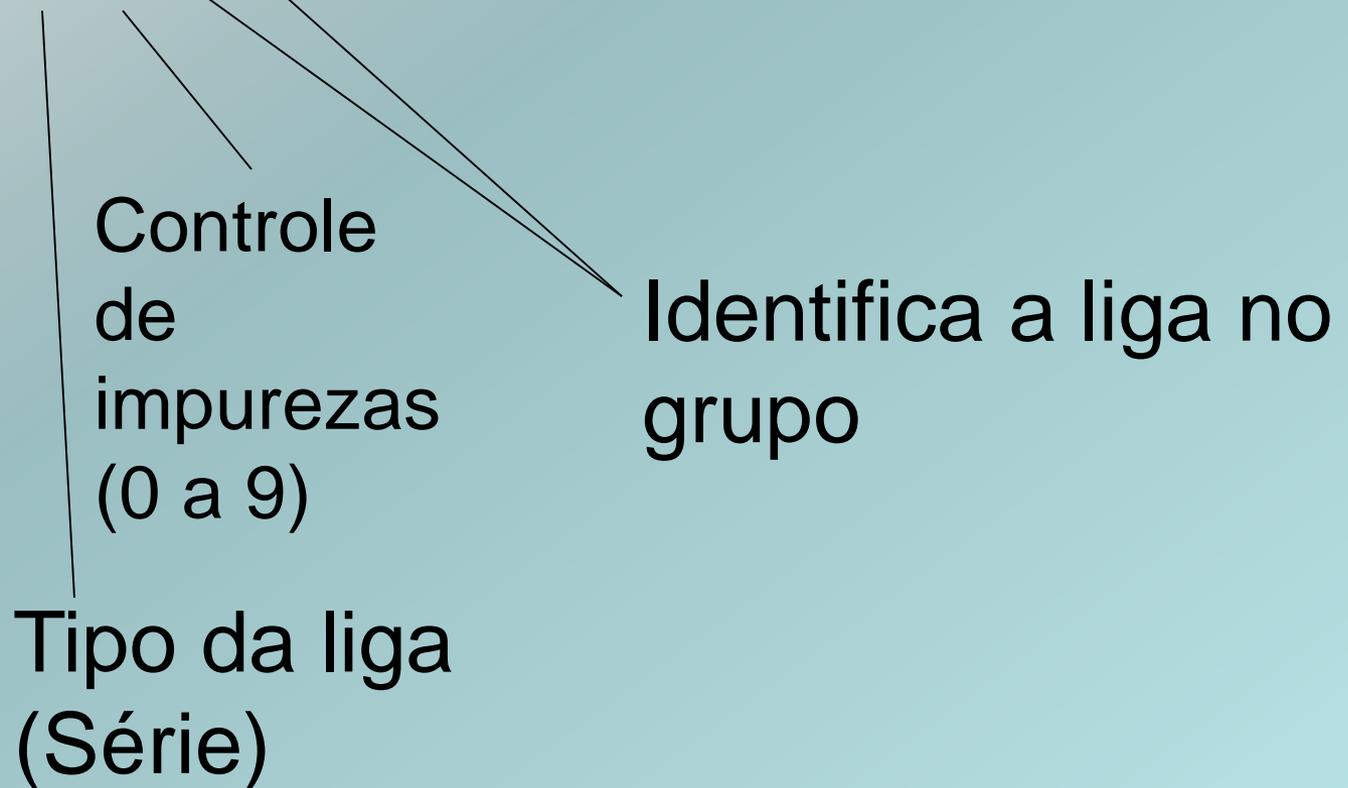


Tabela 1 – Classificação das ligas forjadas e fundidas.

Designação de Ligas Forjadas		Designação de Ligas Fundidas	
Série da Liga	Elementos Majoritários na Liga	Série da Liga	Elementos Majoritários na Liga
1xxx	Mais de 99% de Alumínio	1xx.x	Mais de 99% de Alumínio
2xxx	Cobre	2xx.x	Cobre
3xxx	Manganês	3xx.x	Silício mais Cobre e/ou Magnésio
4xxx	Silício	4xx.x	Silício
5xxx	Magnésio	5xx.x	Magnésio
6xxx	Magnésio e Silício	6xx.x	Série não Utilizada
7xxx	Zinco	7xx.x	Zinco
8xxx	Outros Elementos	8xx.x	Estanho
9xxx	Série não Utilizada	9xx.x	Outros Elementos

CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO

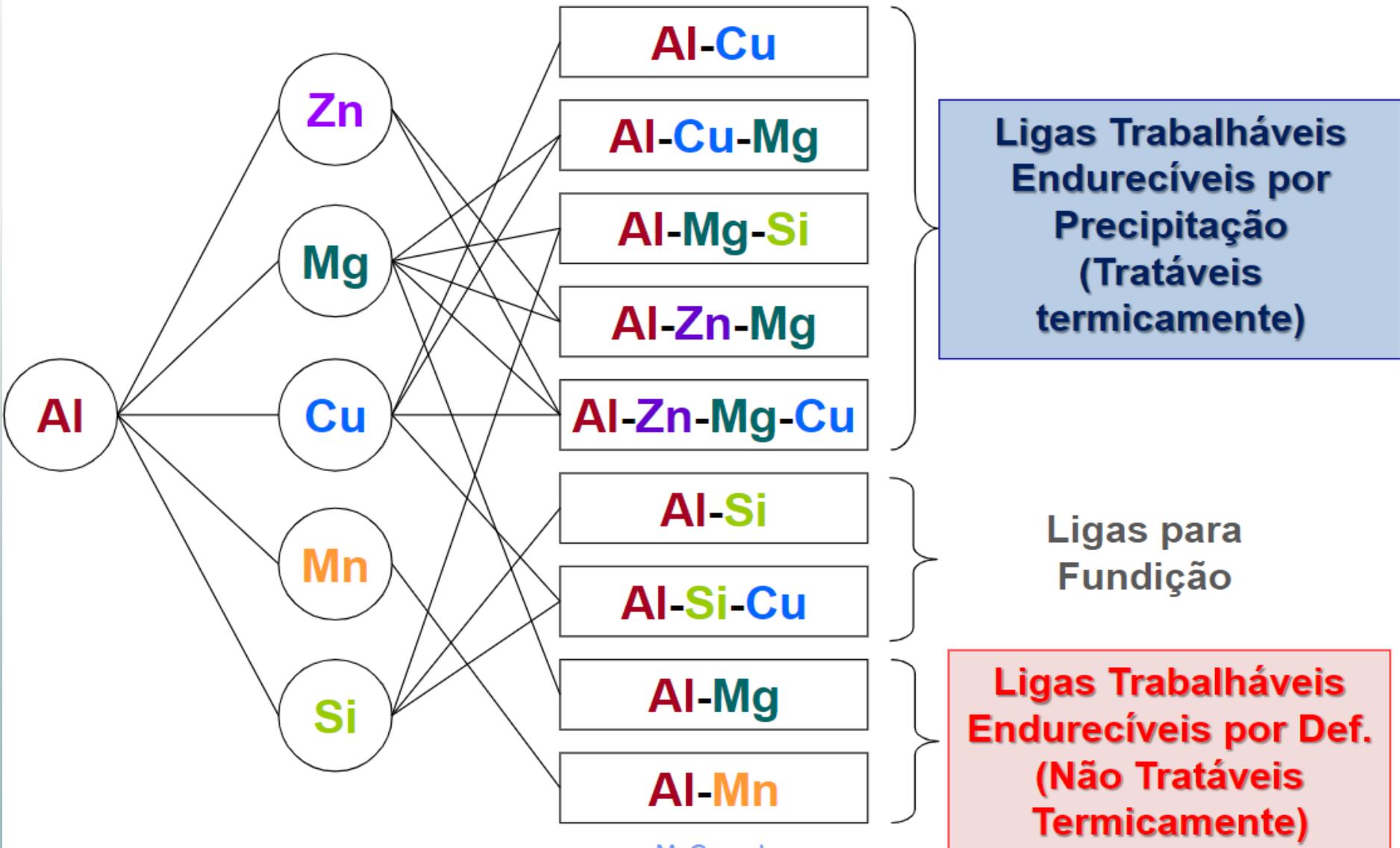


Tabela 2 – Classe das ligas que são tratáveis termicamente e suas principais aplicações.

Número da Associação do Alumínio	Número UNS (unified numbering system)	Composição (%p)*	Condição	Aplicações / Características Típicas
Ligas Forjadas, Tratáveis Termicamente				
2024 (Série 2000)	A92024	4,4 Cu; 1,5 Mg; 0,6 Mn	Tratada Termicamente (T4)	Estruturas de aeronaves, rebites, rodas de caminhão, produtos de máquinas de fazer parafuso.
6061 (Série 6000)	A96061	1,0 Mg; 0,6 Si; 0,3 Cu; 0,2 Cr	Tratada Termicamente (T4)	Caminhões, canoas, vagões de trem, mobílias, tubulações.
7075 (Série 7000)	A97075	5,6 Zn; 2,5 Mg; 1,6 Cu; 0,23 Cr	Tratada Termicamente (T6)	Peças estruturais de aeronaves e outras aplicações submetidas a tensões elevadas.

Designação básica das ligas de alumínio.

F” COMO FABRICADO, NÃO SOFREU
TRATAMENTO NENHUM

“O” SOFREU RECOZIMENTO PARA
RECRISTALIZAÇÃO PARA ELIMINAR O
ENCRUAMENTO

“H” LIGAS QUE SOFRERAM TRATAMENTO
MECÂNICO PARA ENCRUAMENTO

“T” LIGAS QUE SOFRERAM TRATAMENTO
TÉRMICO

“W” SOLUBILIZADA E ESTOCADA

Sufixo de letra	1º Sufixo Numérico	2º Sufixo Numérico
H	1 - somente deformado a frio 2 - deformado a frio e parcialmente recozido 3 - deformado a frio e estabilizado 4 - deformado a frio e pintado ou envernizado	2 - ¼ duro 4 - ½ duro 6 - ¾ duro 8 - duro 9 - extra duro
T	1 - solubilização parcial + envelhecimento natural 2 - solubilização parcial + trabalho a frio + envelheci/o natural 3 - solubilização + trabalho a frio + envelhecimento natural 4 - solubilização + envelhecimento natural 5 - envelhecimento artificial somente 6 - solubilização + envelhecimento artificial 7 - solubilização + estabilização (sobre envelhecimento) 8 - solubilização + trabalho a frio + envelhecimento artificial 9 - solubilização + envelhecimento artificial + trabalho a frio 10 - solubilização parcial + trabalho a frio + envelheci/o art.	

SIMBOLOGIA PARA LIGAS TRATÁVEIS TERMICAMENTE

- **T6**→ Tratado por solubilização e então envelhecido artificialmente
- **T7**→ Tratado por solubilização e então estabilizado.
- **T8**→ Tratado por solubilização, trabalhado a frio e envelhecido artificialmente
- **T9**→ Tratado por solubilização envelhecido artificialmente e encruado por trabalhado a frio.
- **T10**→ Envelhecido artificialmente (sem tratamento prévio) e trabalhado a frio.

Ligas de Alumínio

Wilm (alemão)

começo século XX

Ligas leves para estruturas de Zepelins

Liga Al 4% Cu

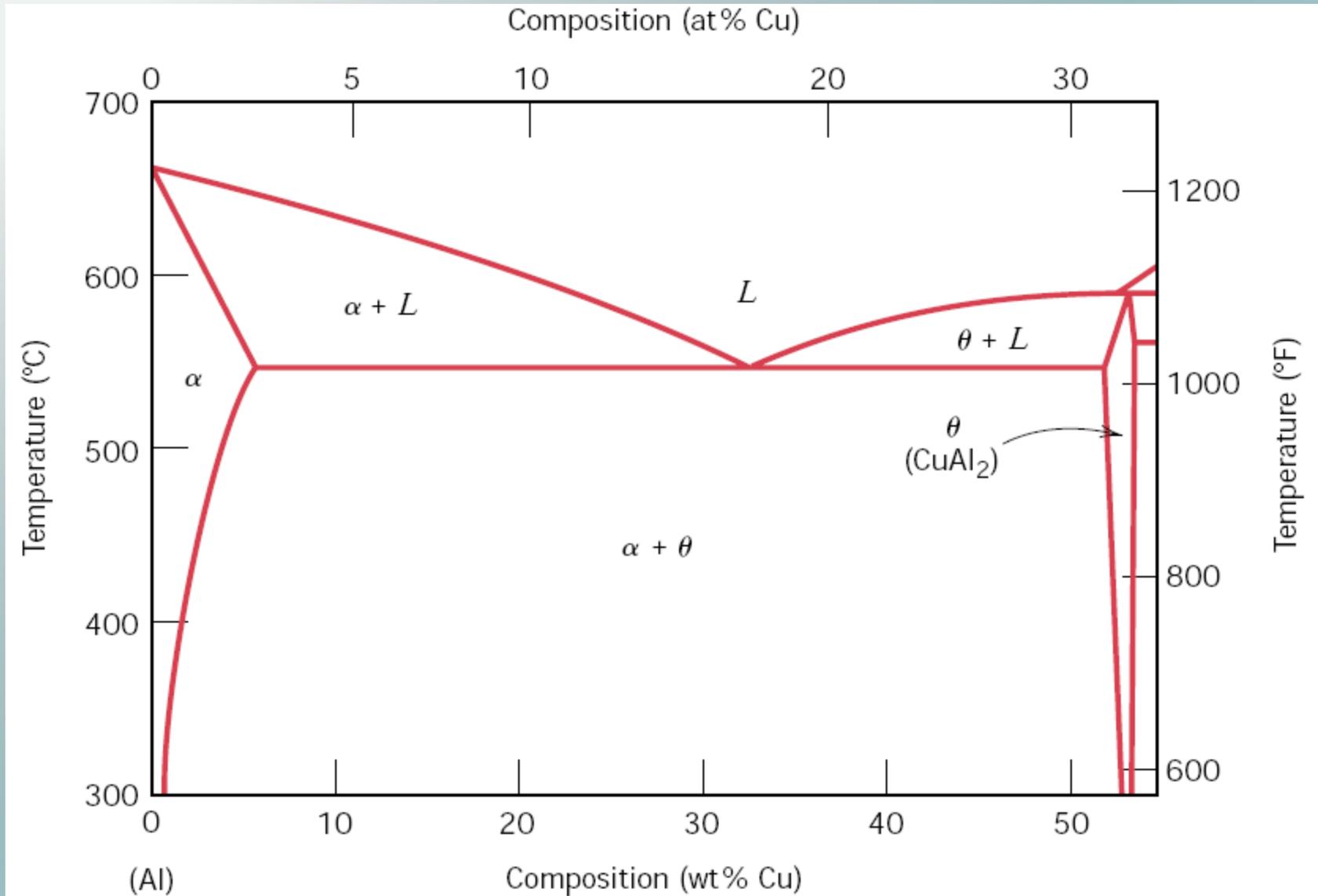
60 HB

280MPa

110HB

380Mpa

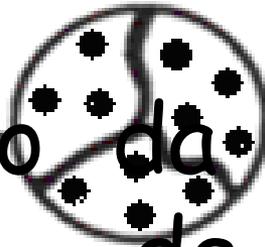
Diagrama de Fase do Alumínio-Cobre



Recozido (formação de grandes precipitados)

O endurecimento da liga se dá pela precipitação de partículas microscópicas da ordem de $5 \cdot 10^{-5}$ mm que se formam na última fase do tratamento de envelhecimento e aparecem incrustadas na matriz, atuando como cunhas que fixam os cristais, e são necessárias cargas muito altas para produzir o escorregamento dos planos atômicos principais.

Resfriamento lento até a temperatura ambiente



Resfriamento até a temperatura ambiente

(formação de partículas submicroscópicas)

Envelhecimento



Solubilizado

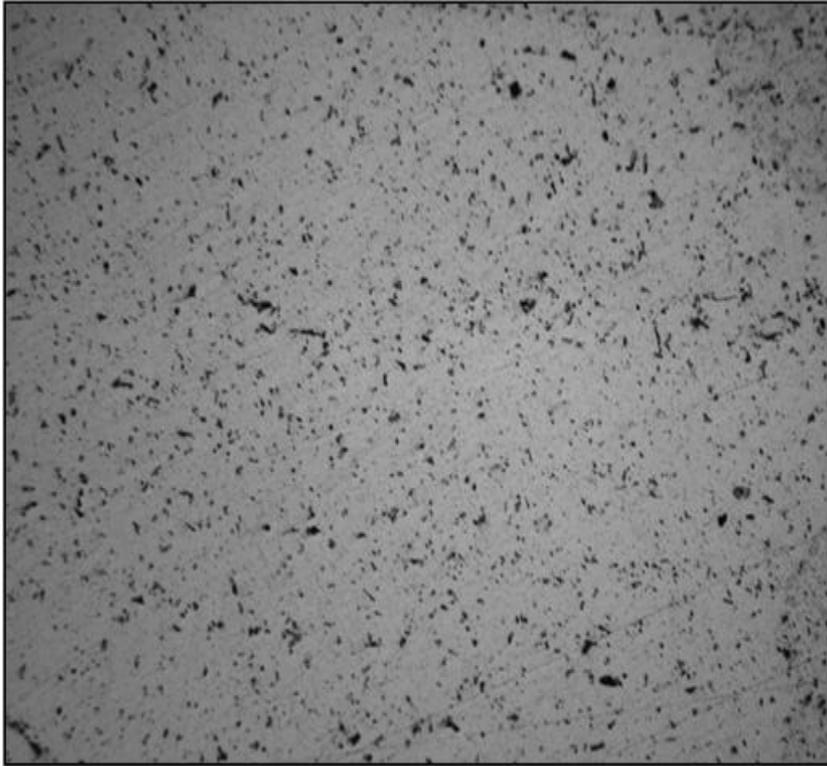
Após o envelhecimento

Solubilização:

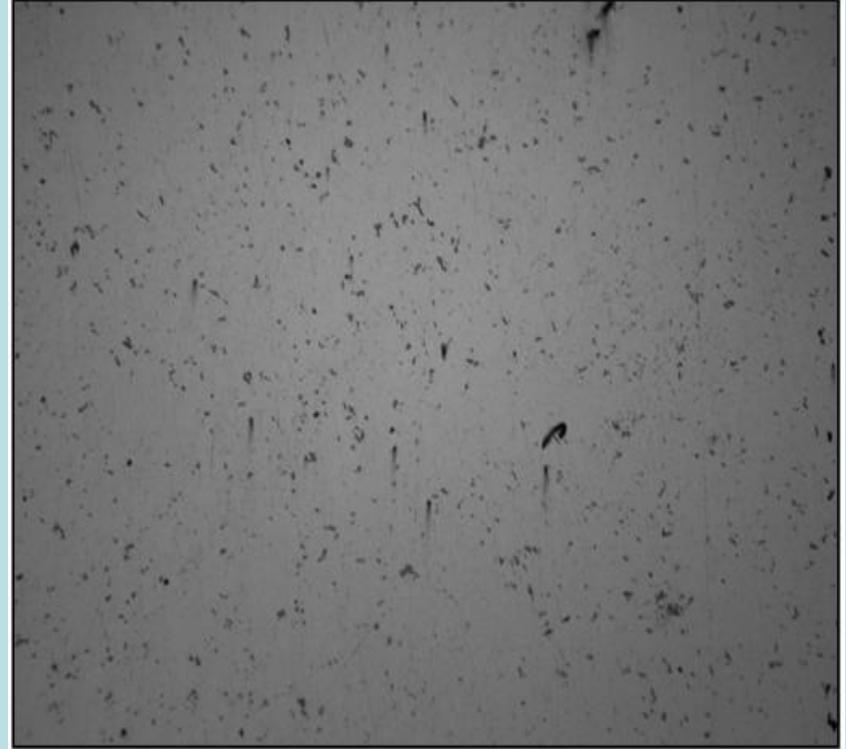
➤ O objetivo da solubilização é por em solução sólida a maior quantidade possível de átomos de soluto, deseja-se dissolver ao máximo possível, todos os elementos presentes na liga de alumínio no próprio alumínio, sendo que este deve permanecer no estado sólido, onde a fusão ou o super aquecimento, mesmo que sejam parciais ou localizados, devem ser evitados.

- Essa dissolução dos elementos presentes na liga, leva um determinado tempo, em temperatura, para ser concluída e esse tempo deve ser o suficiente para que também haja a total dissolução de todas as fases do metal (estrutura uniforme e monofásica da solução sólida;
- O processo de solubilização é vital para um perfeito envelhecimento posterior e é um fator preponderante para o atingimento das características mecânicas desejadas.

Solubilização:



500°C



e

590°C

Têmpera:

- Logo após a solubilização, em correta temperatura e tempo, o material deve ser temperado, ou seja, **resfriado rapidamente**;
- Esta etapa do processo térmico de solubilização é de suma importância e requer máxima atenção, pois deseja-se que com esse resfriamento rápido, a solução sólida super-saturada, que anteriormente estava em alta temperatura, permaneça idêntica em temperatura ambiente (solução sólida supersaturada de elementos de liga) ;

O meio usualmente utilizado para temperar (resfriar) o material é a água (ou mesmo soluções de polímeros).

O resfriamento ao ar permite a formação de precipitados descontroladamente, não proporcionando a melhor resposta possível, quando realizar o envelhecimento.

Envelhecimento:

➤ Logo após a têmpera, inicia-se o **processo de envelhecimento**, seja ele **natural** (a temperatura ambiente) ou **artificial** (a uma temperatura mais elevada e controlada);

➤ No processo de **envelhecimento natural**, além de **não se controlar completamente a formação dos precipitados** que endurecem o material, os **tempos para a geração destes precipitados são mais longos**, ou seja, a **formação dos precipitados é lenta e demorada**, se comparado ao **envelhecimento artificial**;

➤ Este processo de envelhecimento é realizado em temperaturas bem inferiores e em tempos superiores, se comparado ao processo de solubilização;



ANDRÉ GUINIER
1911-2000

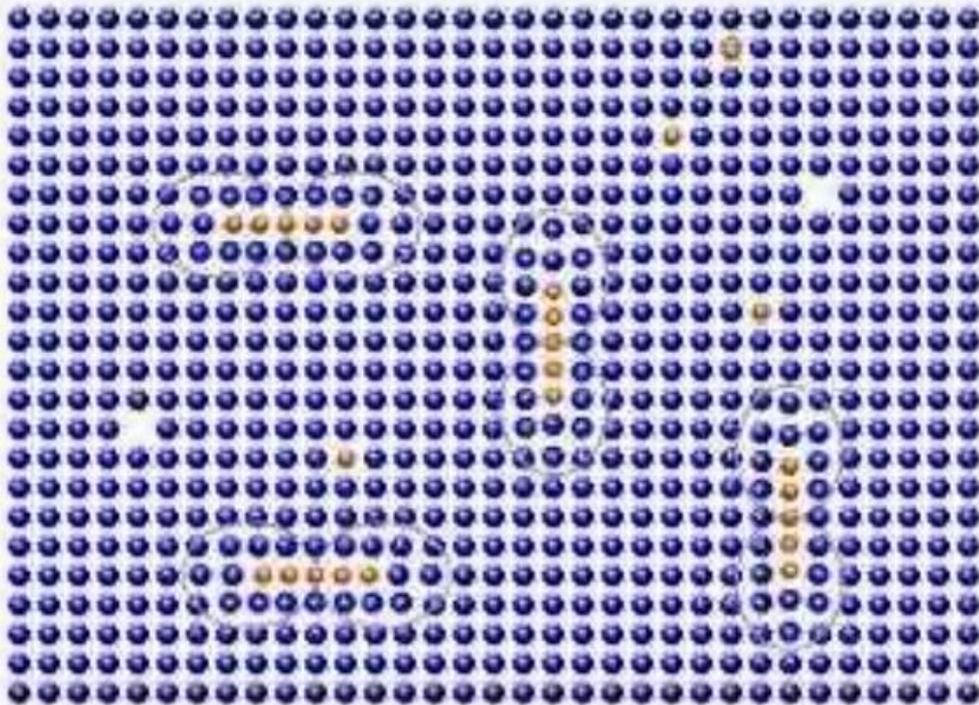


GEORGE D. PRESTON
1896-1972

**No envelhecimento,
uma solução sólida
supersaturada se
transformará em uma
estrutura de equilíbrio.
Porém, antes do
equilíbrio ser atingido,
estágios intermediários
ocorrem.**

**Zonas de Guinier-Preston
(Zonas GP)**

Precipitação



A  B 



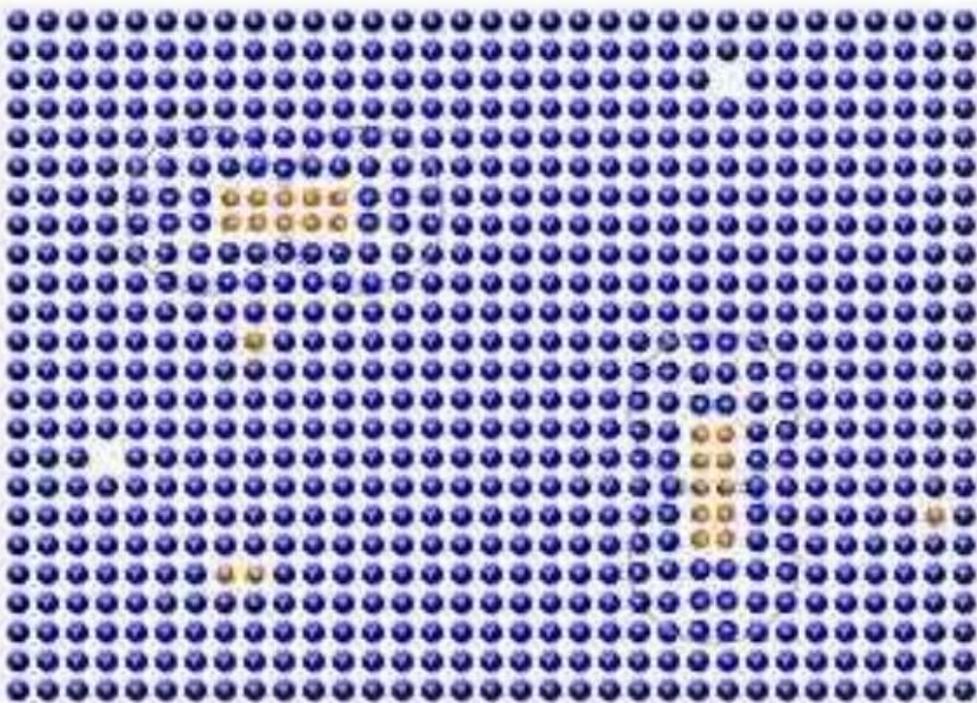
No envelhecimento, uma solução sólida supersaturada se transformará em uma estrutura de equilíbrio. Porém, antes do equilíbrio ser atingido, estágios intermediários ocorrem.

**Zonas de Guinier-Preston
(Zonas GP)**

ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO

TRATAMENTO DE ENVELHECIMENTO

Precipitação



A • B •



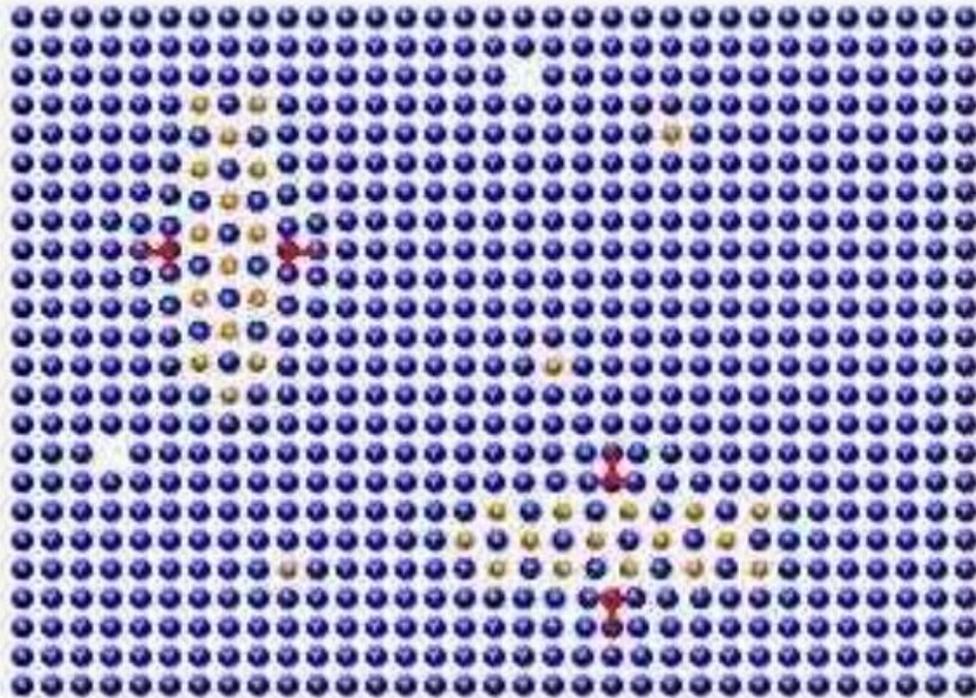
No envelhecimento, uma solução sólida supersaturada se transformará em uma estrutura de equilíbrio. Porém, antes do equilíbrio ser atingido, estágios intermediários ocorrem.

Estágio Intermediário 2
Precipitados Coerentes

ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO

TRATAMENTO DE ENVELHECIMENTO

Precipitação



A ● B ●



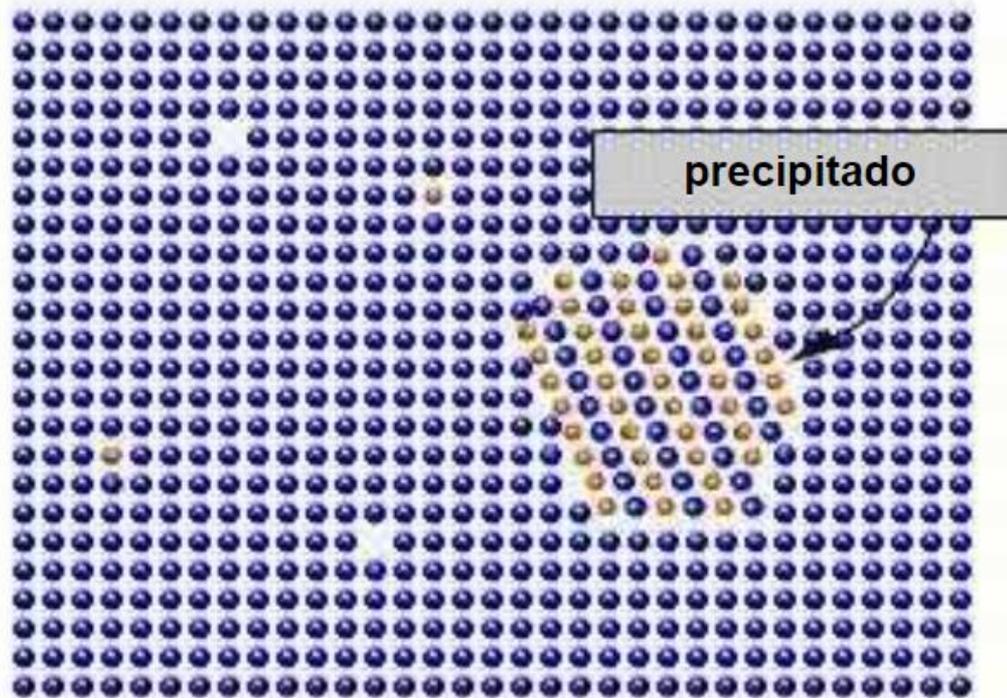
No envelhecimento, uma solução sólida supersaturada se transformará em uma estrutura de equilíbrio. Porém, antes do equilíbrio ser atingido, estágios intermediários ocorrem.

Estágio Intermediário 3
Precipitados Semi-Coerentes

ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO

TRATAMENTO DE ENVELHECIMENTO

Precipitação



A • B •



No envelhecimento, uma solução sólida supersaturada se transformará em uma estrutura de equilíbrio. Porém, antes do equilíbrio ser atingido, estágios intermediários ocorrem.

Fase de Equilíbrio
Precipitados Incoerentes

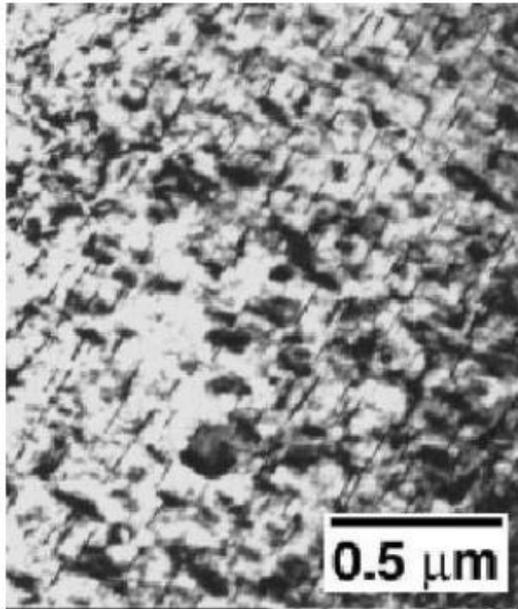
ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO

Principais precipitados formados nas ligas de alumínio responsáveis pelo endurecimento

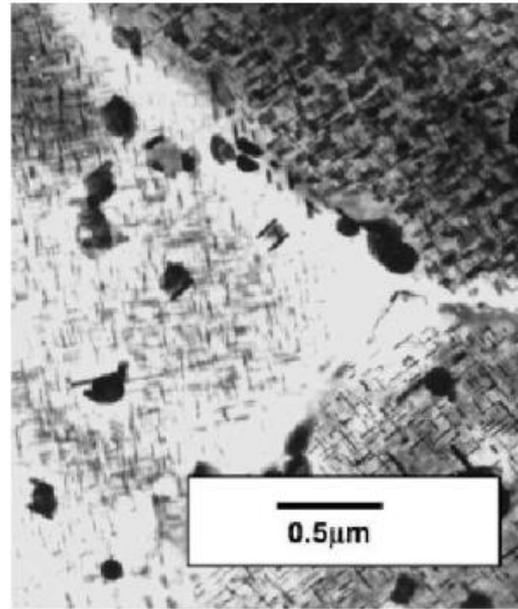
- série 2XXX (Al-Cu) \Rightarrow Al_2Cu
- série 2XXX (Al-Cu-Mg) \Rightarrow Al_2CuMg / (Al-Cu)
- série 6XXX (Al-Mg-Si) \Rightarrow Mg_2Si
- série 7XXX (Al-Zn-Mg) \Rightarrow $\text{Mg}_x(\text{Al},\text{Zn})_y$

ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO

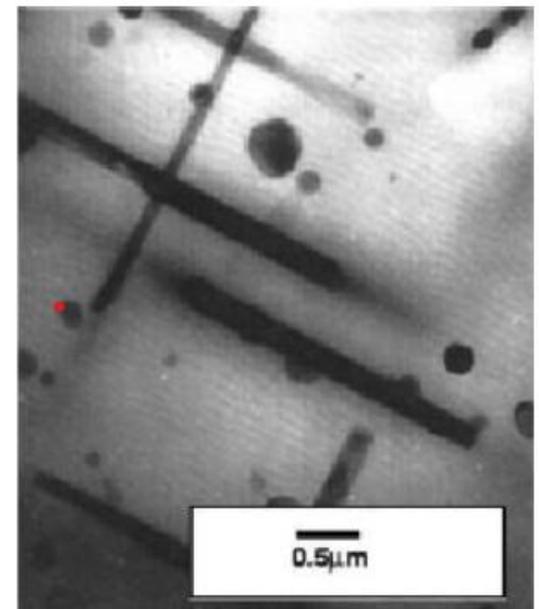
Precipitação no Al-Cu



zonas GP rica em Cu
Al-4%Cu
envelhecimento
6 h / 180°C



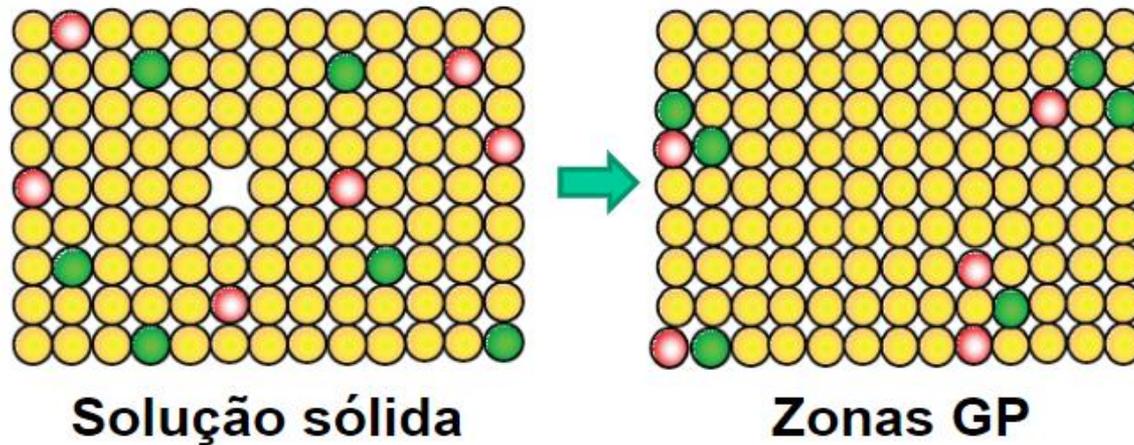
precipitados θ' (CuAl_2)
Al-4%Cu
envelhecimento
2 h / 200°C



precipitados θ (CuAl_2)
Al-4%Cu
envelhecimento
45 min / 450°C

ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO

Evolução da morfologia dos precipitados

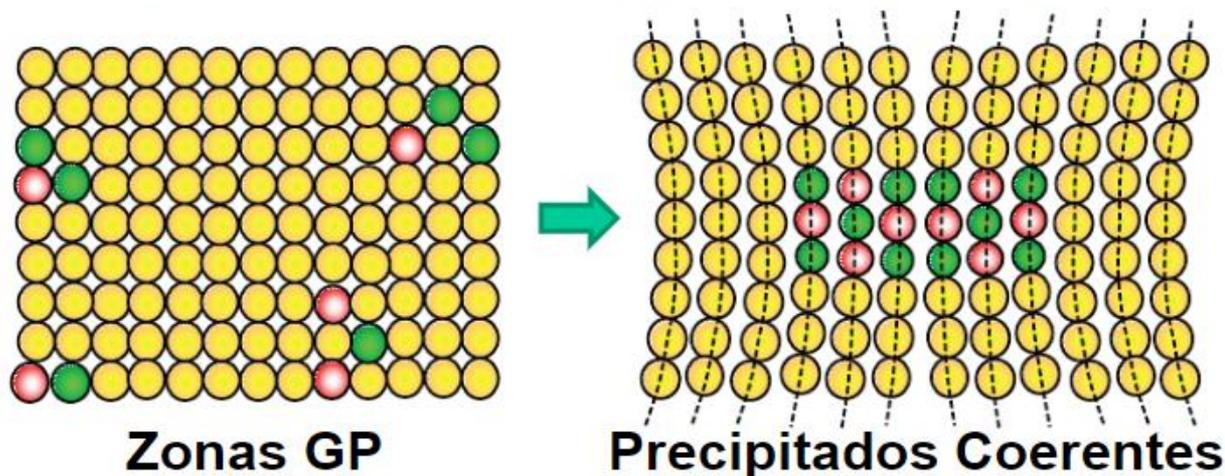


As **zonas de Guinier-Preston (GP)** são regiões do reticulado do alumínio em que a concentração de elementos de liga é maior do que na média do material, mas não há ainda uma proporção definida entre os elementos.

São extremamente finas, com dimensões da ordem de 100 Å.

ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO

Evolução da morfologia dos precipitados

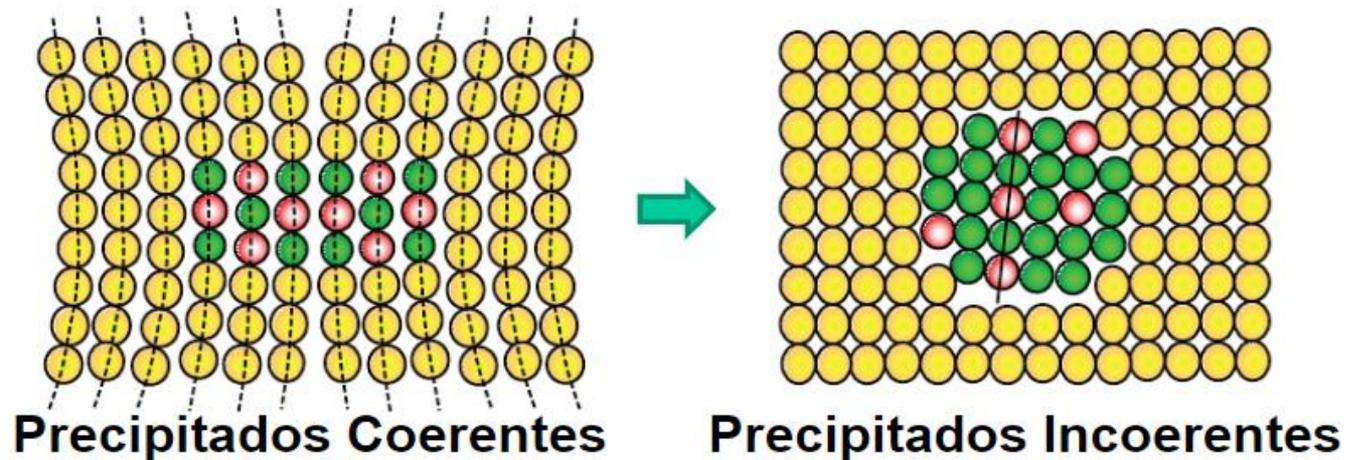


Agrupamento com maior número de átomos e composição química definida, mas ainda diferente da composição de equilíbrio. Esse precipitado ainda mantém continuidade cristalográfica com os cristais do alumínio e, por isso, é denominado **coerente** com a matriz.

Em algumas ligas, a coerência se mantém apenas em algumas direções e planos atômicos e, nesse caso, o precipitado denomina-se **semicoerente**.

ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO

Evolução da morfologia dos precipitados

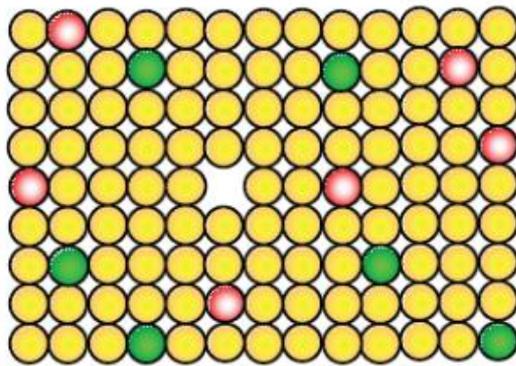


Continuando o tratamento (e principalmente em temperaturas acima de 220°C), os precipitados coerentes se transformam dando lugar aos **precipitados incoerentes**, bem maiores, mais esparsos que os primeiros e com composição química definida pelo diagrama de equilíbrio.

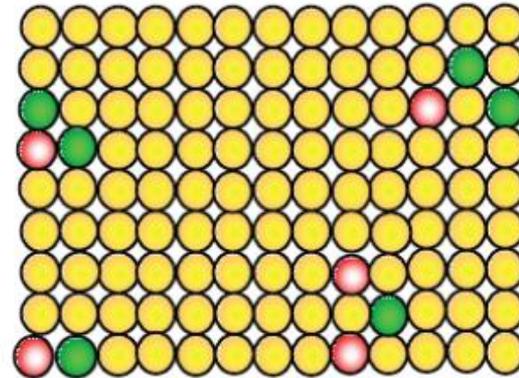
A estrutura cristalina desse precipitado é muito diferente da dos cristais de alumínio, produzindo uma interface bem definida. O **endurecimento**, nesse caso, **não é tão intenso quanto o obtido na precipitação coerente ou semicoerente**.

ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO

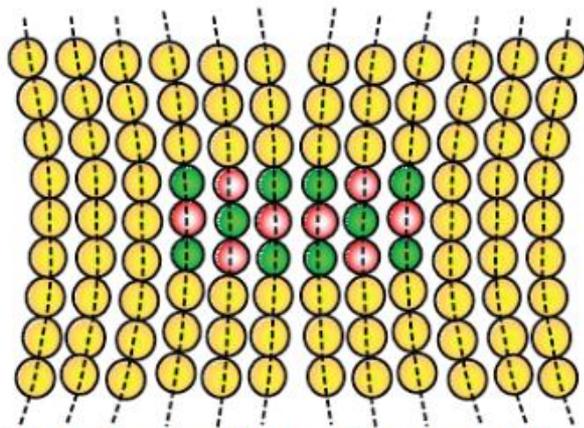
Evolução da morfologia dos precipitados



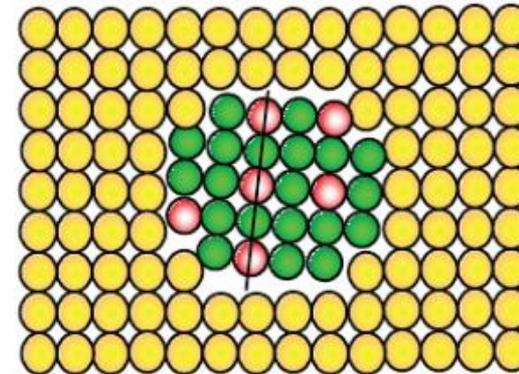
Solução sólida



Zonas GP

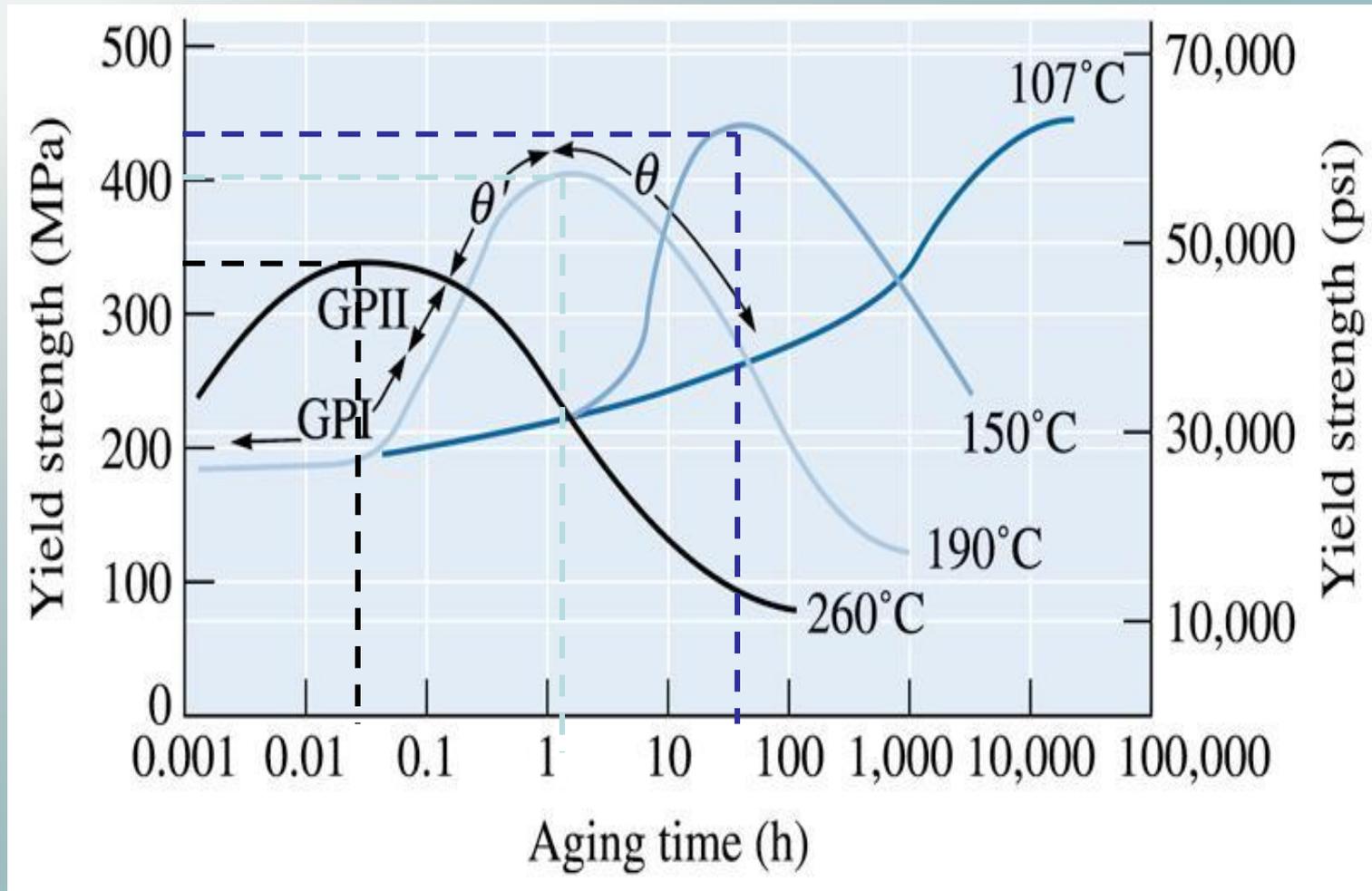


Precipitados Coerentes



Precipitados Incoerentes

Efeito da temperatura e tempo de envelhecimento no limite de elasticidade da liga Al-4%Cu.



Quanto maior a Temperatura de envelhecimento menor a resistência mecânica (dureza) e menor o tempo para atingir tal dureza.

Tabela 9.2 – Temperaturas de solubilização e envelhecimento (série 2XXX).

Liga	T solubilização (°C)	T envelhecimento (°C)
2011	525	160
2025	515	170
2219	535	175
2018	485	170
2024	485	190
2036	500	190
2038	540	205
2218	510	170
2008	510	205
2014	500	160
2017, 2117	500	170
2618	530	200
2090	540	165
2091	530	120

Tab

Tabela 9.3 – Temperaturas de solubilização e envelhecimento (série 6XXX).

Zonas Guinier-Preston (GP):

homenagem aos cientistas que revelaram a estrutura dessas zonas através de estudos de difração de raios-x

Guinier A: *Nature*, **142**, 569 (1938)

Preston G P: *Nature*, **142**, 570 (1938).

GP1: São pré-precipitados e se formam em temperaturas de envelhecimento baixas. Podem ser consideradas como um agrupamento de átomos de Cu que se separaram da solução sólida reunindo-se em um único plano, formando placas ou discos. **Interface coerente.** CFC. Se formam em incontáveis posições da fase α .

2 camadas de át com espessura $< 10 \text{ \AA}$

Diâmetro $< 100 \text{ \AA}$

Transcorrer do tempo e subsequente difusão dos átomos de Cu

GP2: São formadas por 5 camadas de átomos. Caracterizada por notável aumento da dureza. ***Interface coerente.*** Máxima dureza. CFC

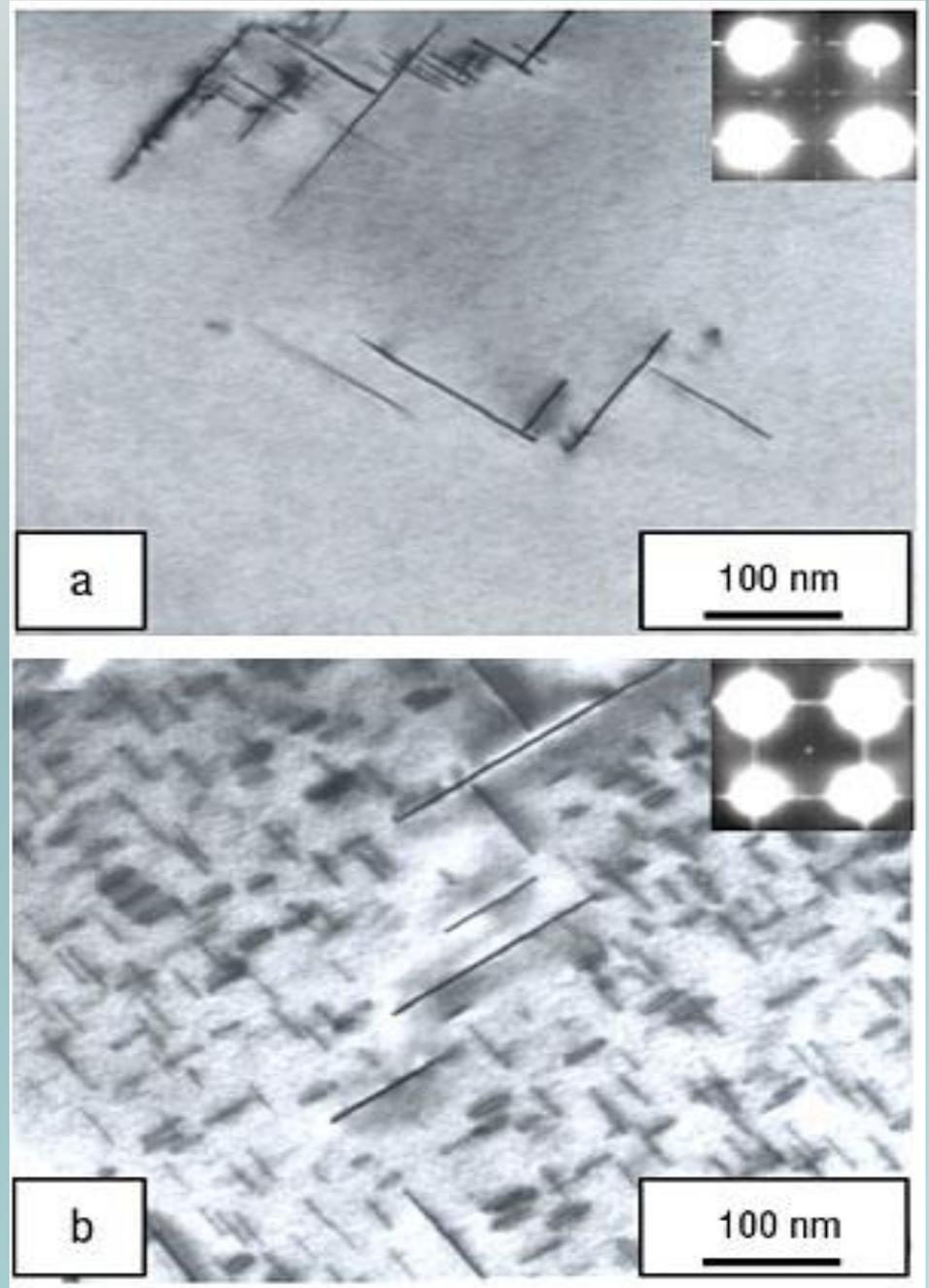
Espessura: $< 50 \text{ \AA}$

Diâmetro $< 500 \text{ \AA}$.

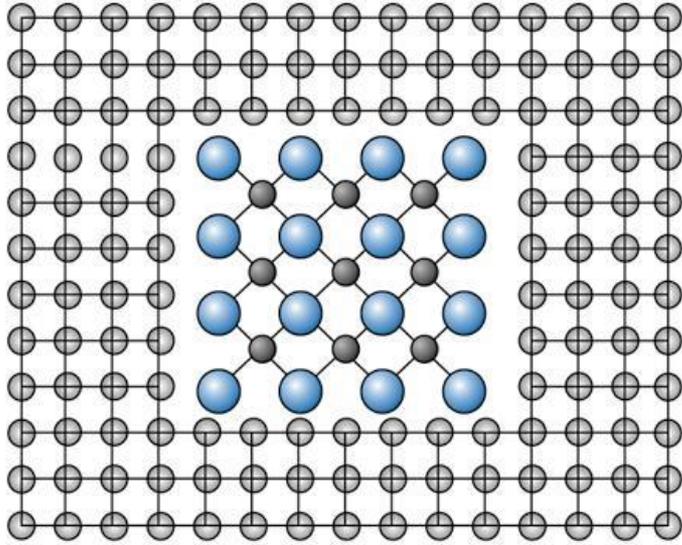
Aumento de tamanho das partículas

- Os átomos supersaturados tendem a se acumular ao longo de planos cristalinos específicos. A concentração de átomos de cobre (soluto) nessas posições abaixa a concentração em outras áreas, produzindo menos supersaturação, e assim sendo, uma estrutura cristalina mais estável;
- Neste estágio, os átomos de cobre não terão formado uma fase totalmente distinta,
- Movimentos de discordâncias ocorrem com maior dificuldade nessas regiões, conseqüentemente o metal, sob altas pressões, se torna mais duro e mais resistente às deformações.

As zonas Gp I
Imagem obtida
por
microscopia
eletrônica
de transmissão

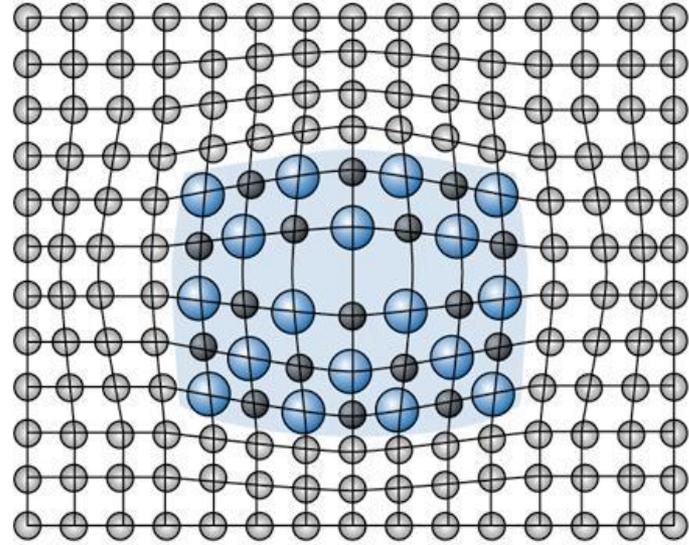


Incoerente (θ)

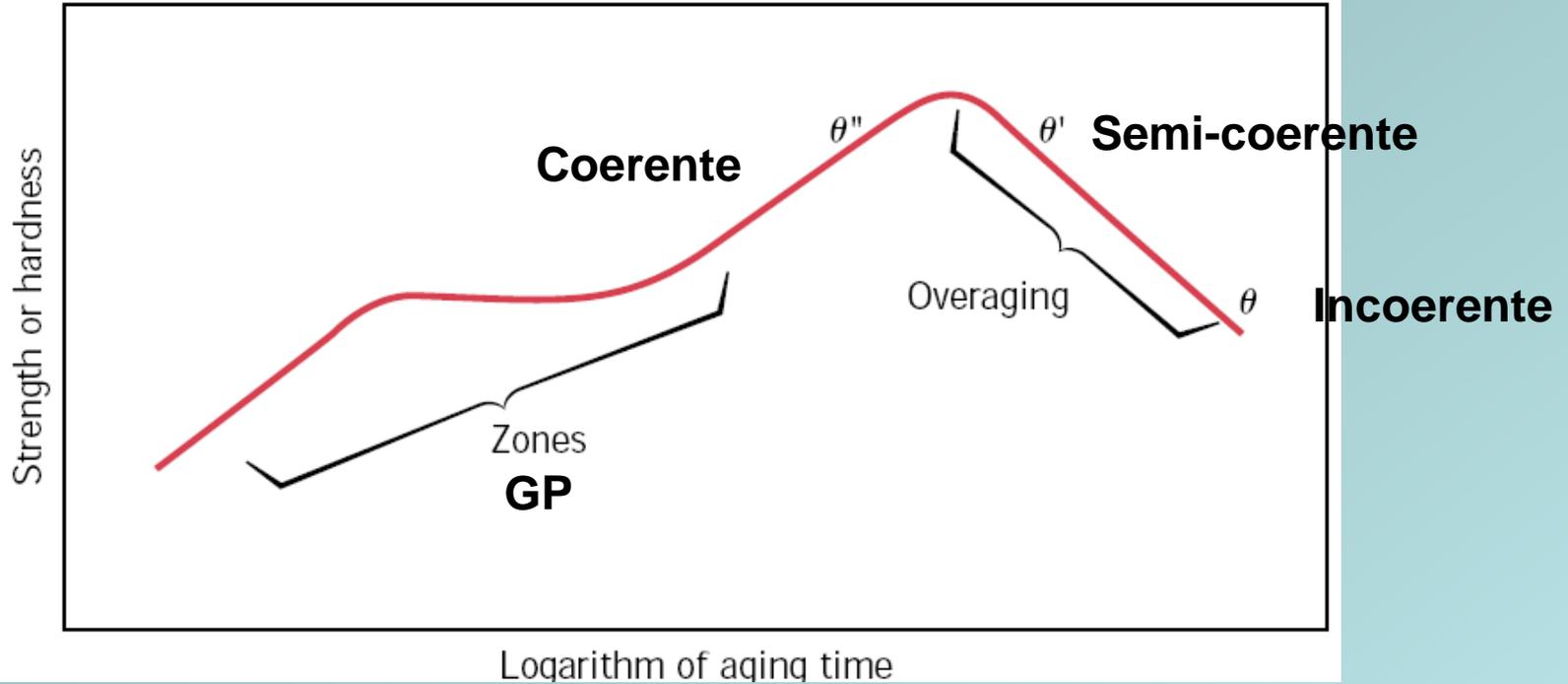


(a)

Coerente



(b)



Superenvelhecimento (continuação do crescimento das partículas)

θ' : Tem esse nome em função da estrutura ser bastante semelhante à θ (CuAl_2). São ***semi-coerentes*** e podem ser considerados verdadeiros compostos. Rede menos deformada provocando queda da dureza.

Superenvelhecimento (continuação do crescimento das partículas)

θ : Podem formar-se pela decomposição da fase alfa ao ser aquecido a temperatura elevada ou pela decomposição da fase θ' pela ação do tempo ou da temperatura. A disposição dos átomos é independente do sistema cristalino. ***Interface incoerente***. Não provoca deformação da matriz. Dureza baixa.

Dimensões: de 0.01 a 1 mm

➤ O **superenvelhecimento** é caracterizado pela

redu
enve
enve
máxi
aume
dimin

mpo de
de
stênci
fase θ
rentes,



Fig. 3.44 Electron micrograph showing incoherent particles of θ in an Al-Cu alloy. (After G.A. Chadwick, *Metallography of Phase Transformations*, Butterworths, London, 1972, from C. Laird.)

Condições necessárias para realizar o endurecimento por envelhecimento

- O sistema da liga deve apresentar solubilidade sólida decrescente com a diminuição da temperatura.
- O sistema deverá formar uma única fase em uma ampla faixa de temperatura.

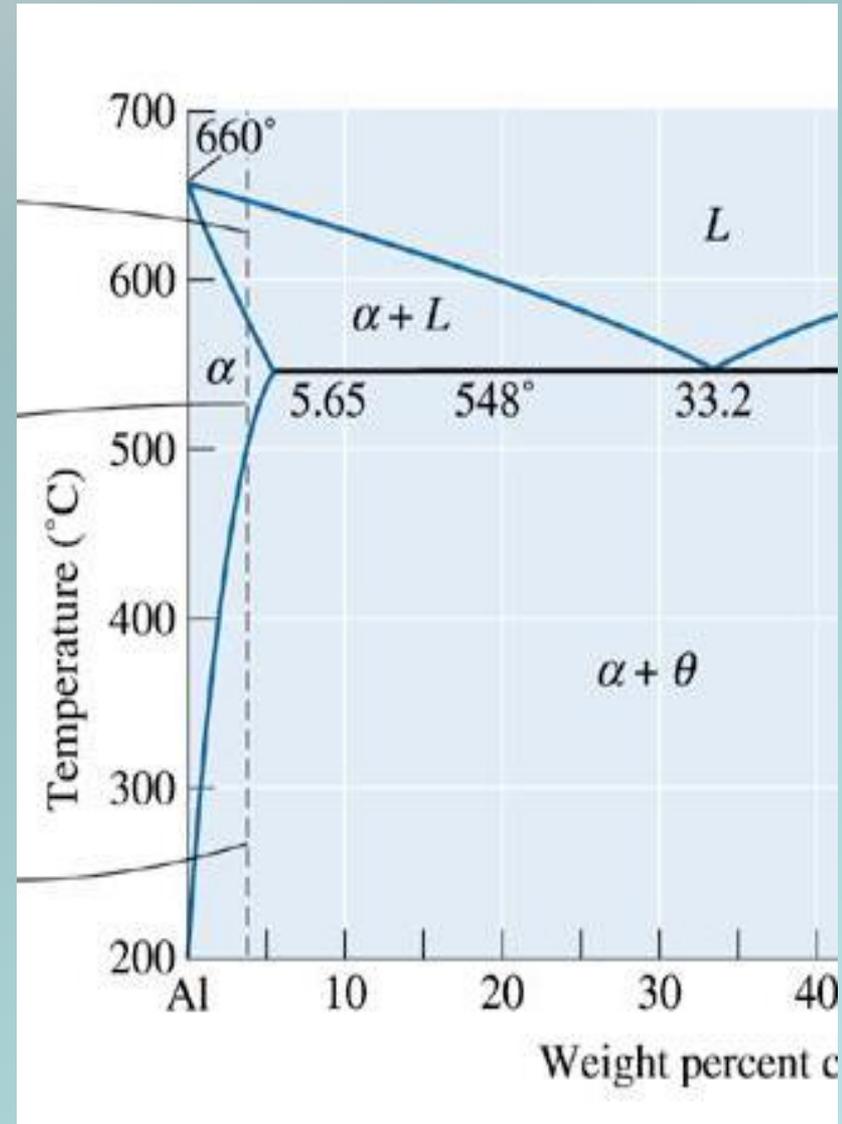
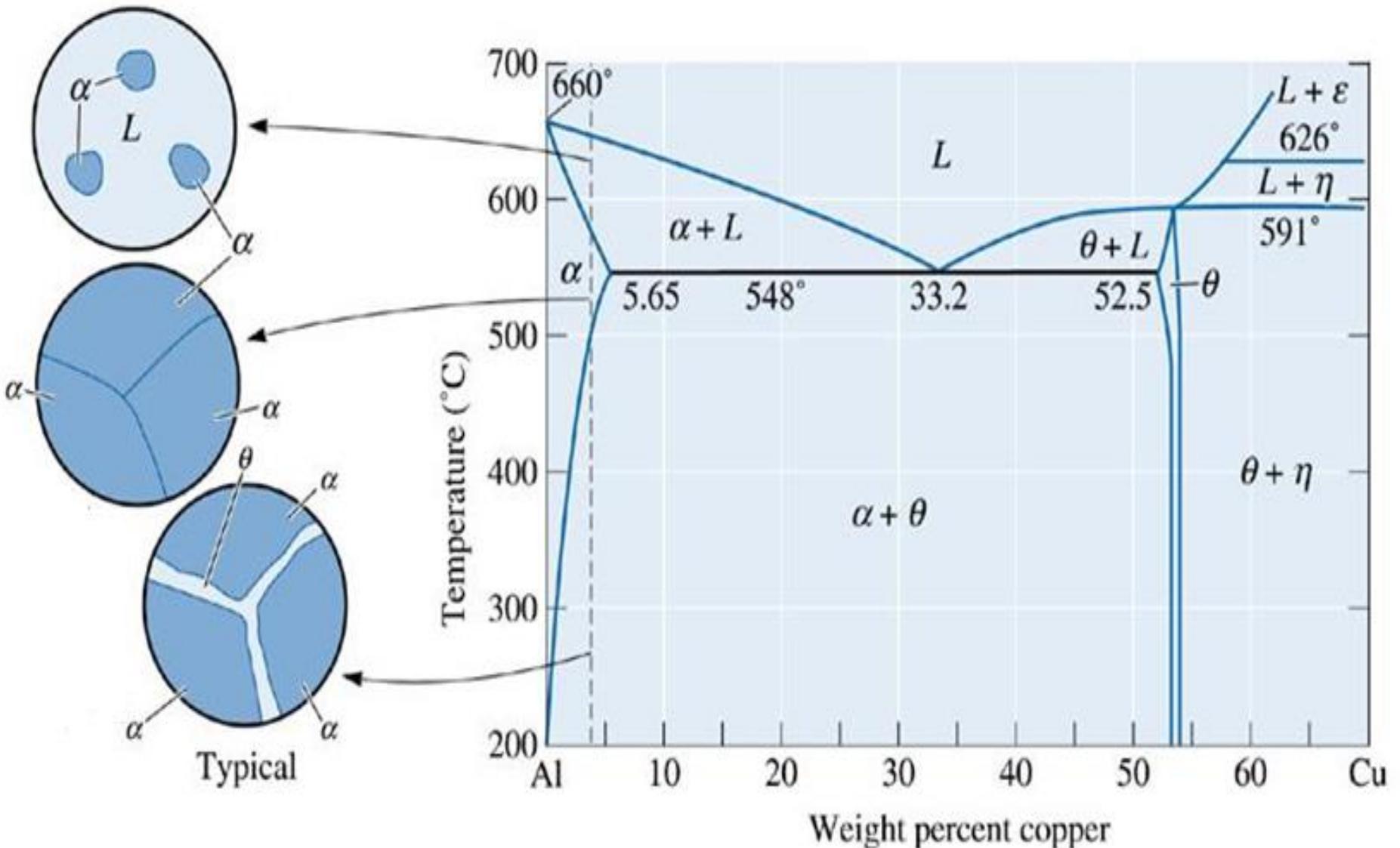
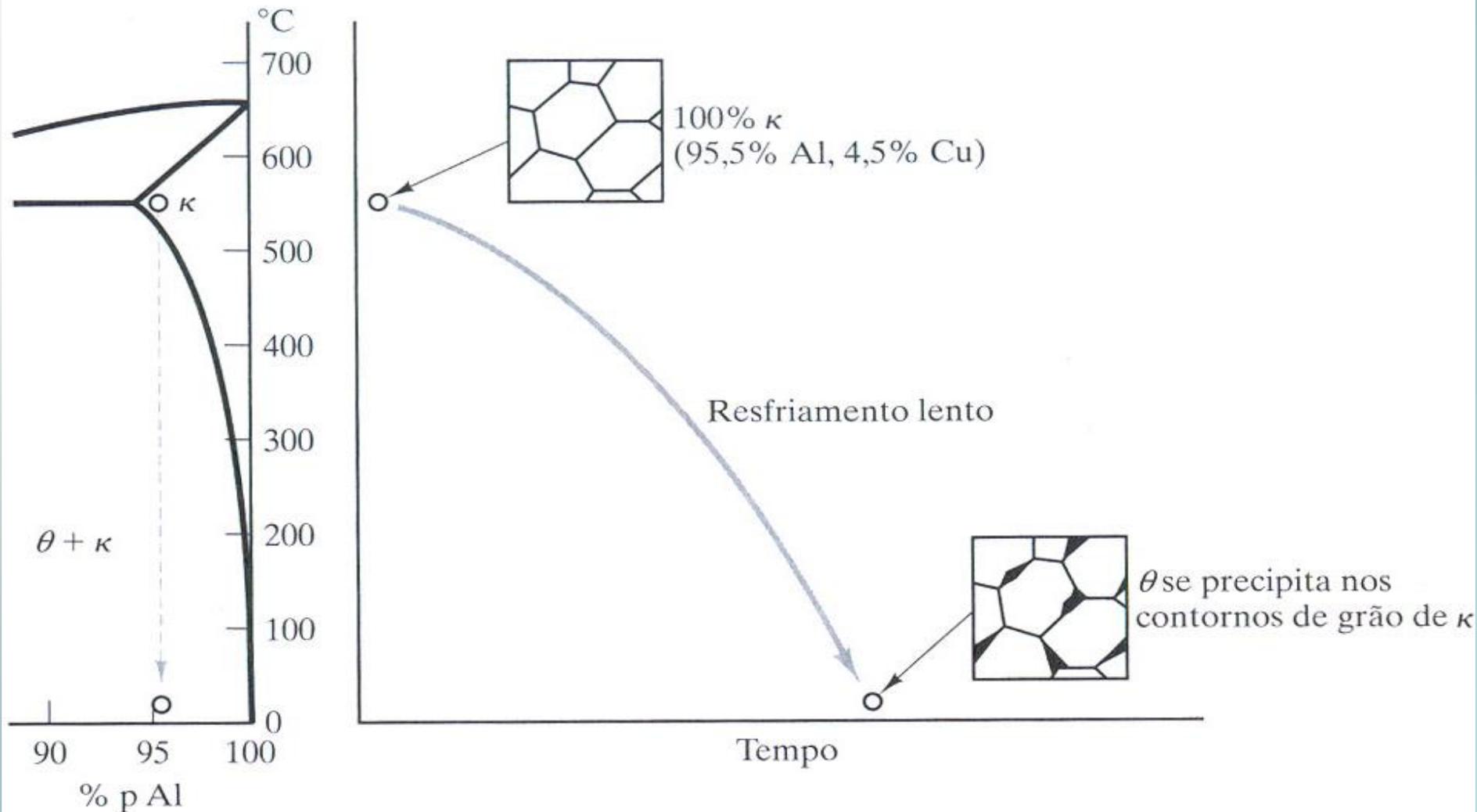


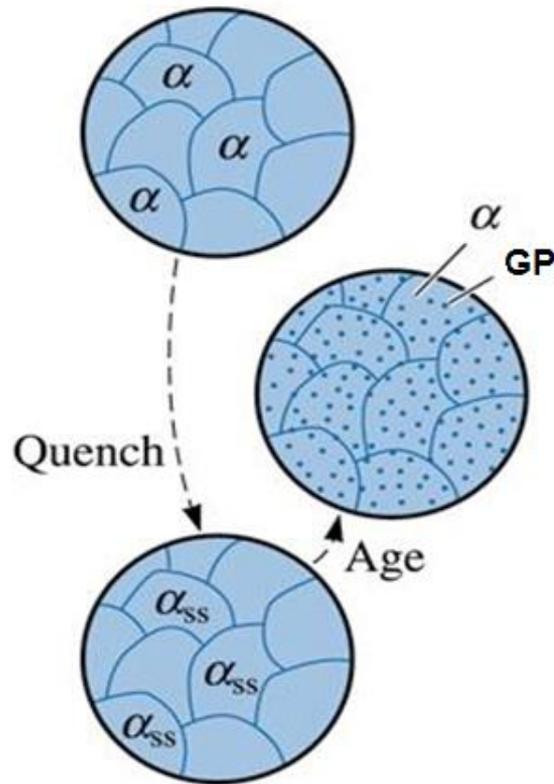
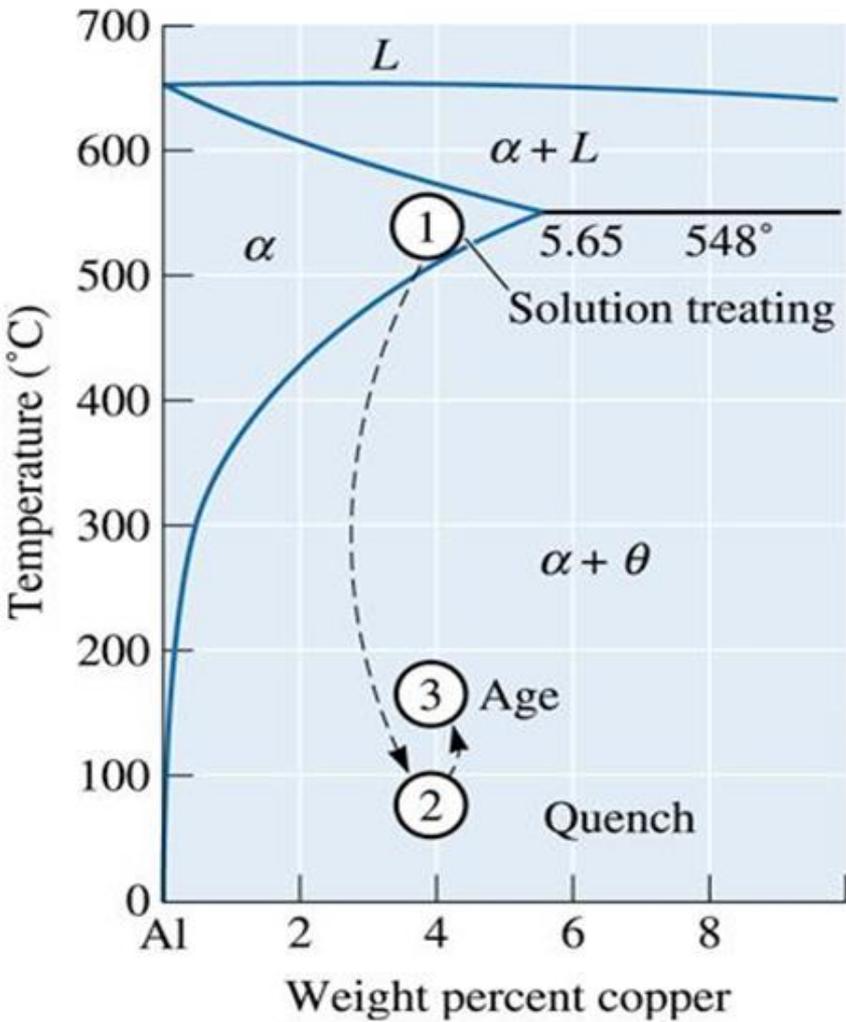
Diagrama de Fase e Microestrutura do Al-4%-Cu



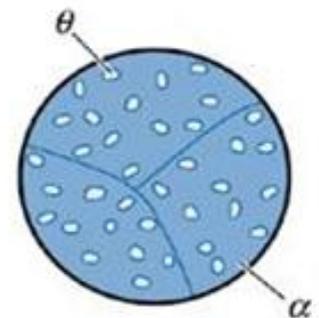
Resfriamento Lento da Liga de Al (Têmpera)



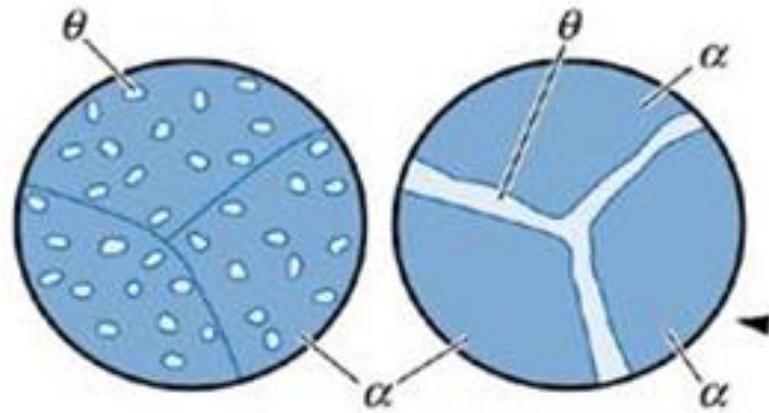
Precipitados grosseiros se formam em contornos de grão em uma liga Al-Cu (4,5% p) quando resfriados lentamente da região monofásica (κ) do diagrama de fases para a região de duas fases ($\theta + \kappa$). Esses precipitados isolados afetam muito pouco a dureza da liga.



Superenvelhecido



Superenvelhecido



Recozido

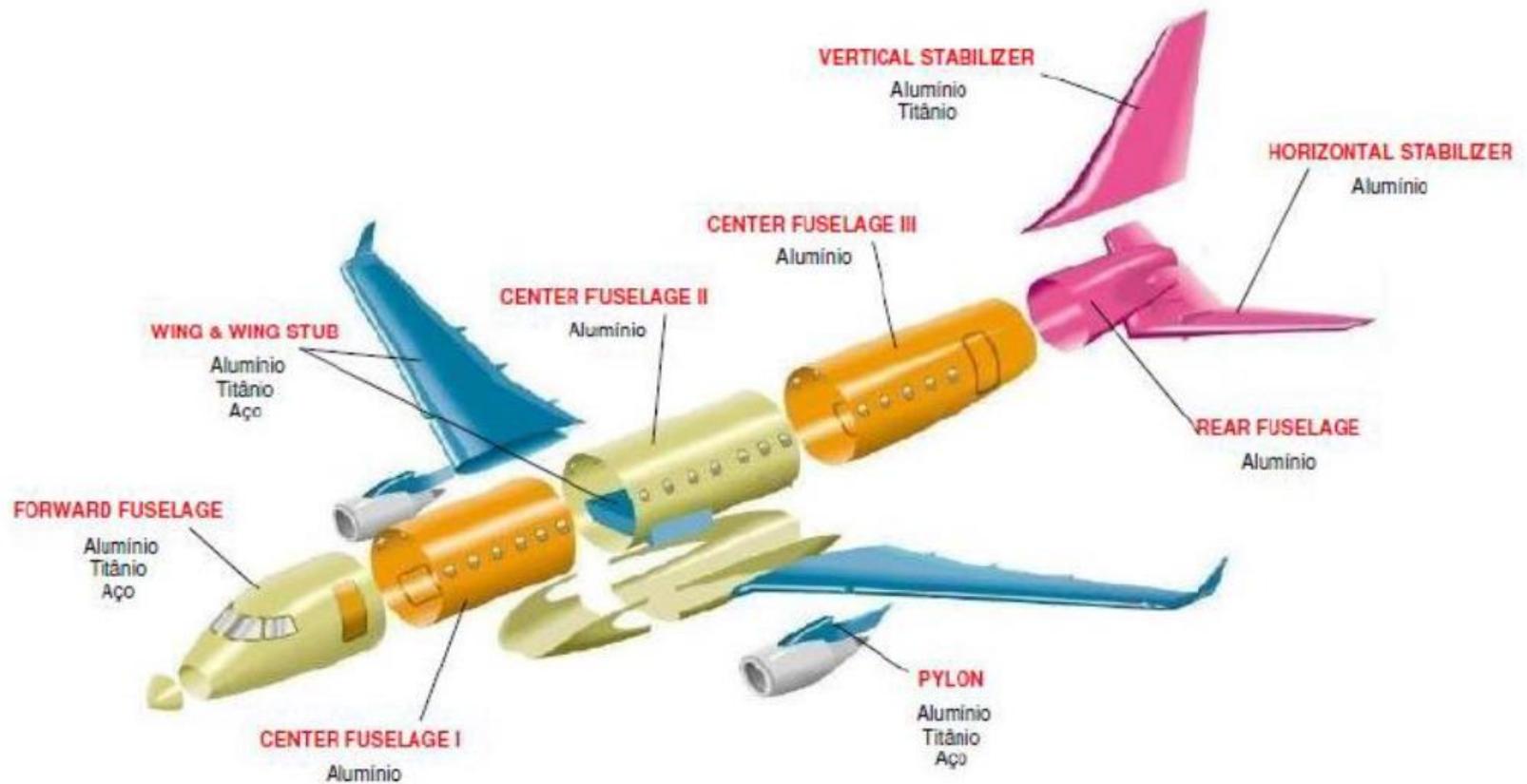
Envelhecimento Natural

As ligas que apresentam um endurecimento por precipitação apreciável à temperatura ambiente e após intervalos de tempo relativamente curtos devem ser temperadas e armazenadas sob condições refrigeradas.

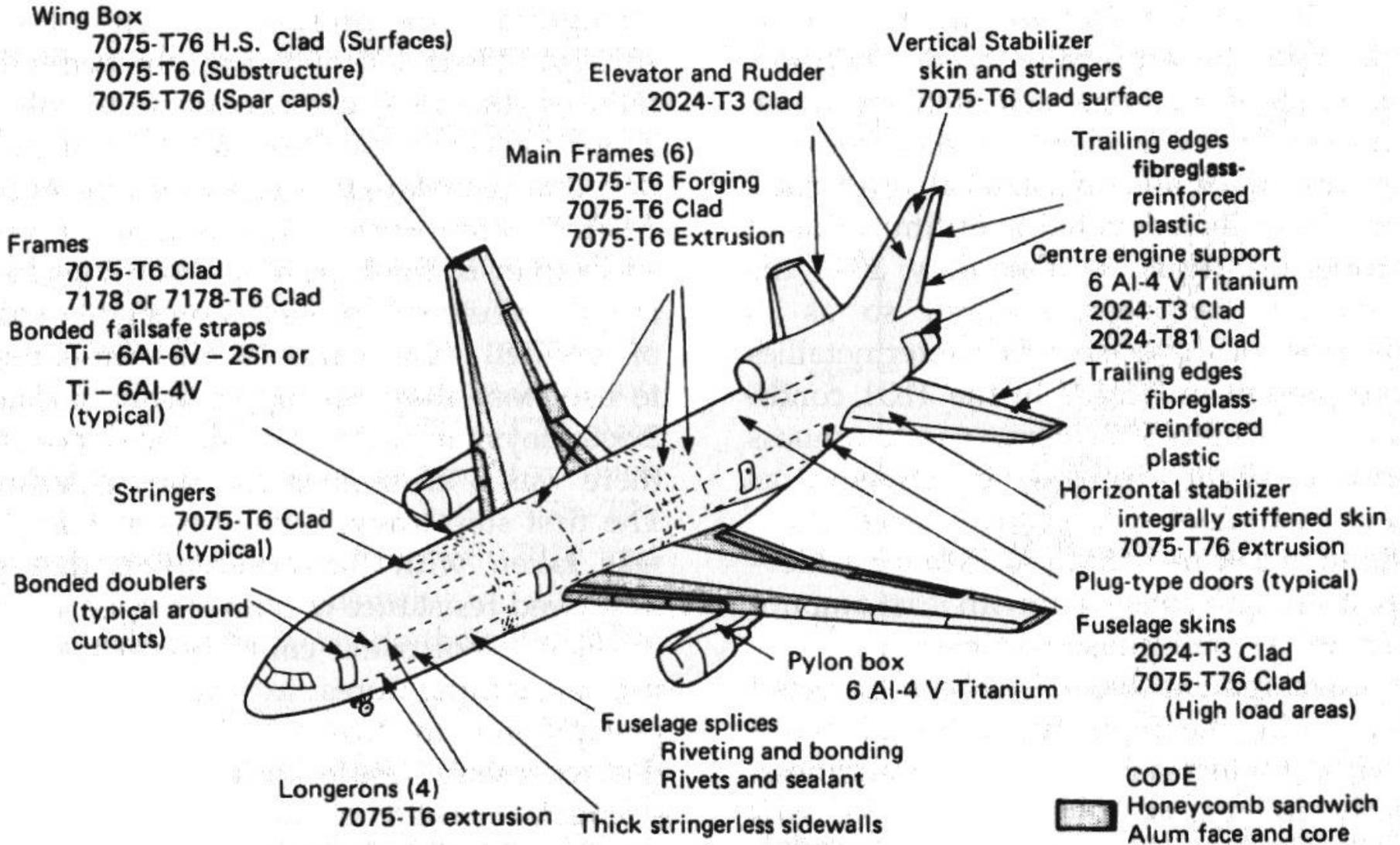
Exemplo: Várias ligas de alumínio utilizadas na confecção de rebites onde são aplicados enquanto dúcteis e são deixados envelhecer naturalmente na temperatura ambiente.



Embraer E 170/195- 2004



Materials Utilizados na Aeronave L1011



L1011 basic materials and design features.

ALCLADS

- Foi desenvolvida para melhorar a resistência à corrosão dos duralumínios
- São chapas de duraalumínio revestidas em ambas as faces com alumínio puro
- Promovem uma diminuição de cerca de 10% da resistência à tração
- O revestimento compreende cerca de 10% da seção transversal