

# ECM1

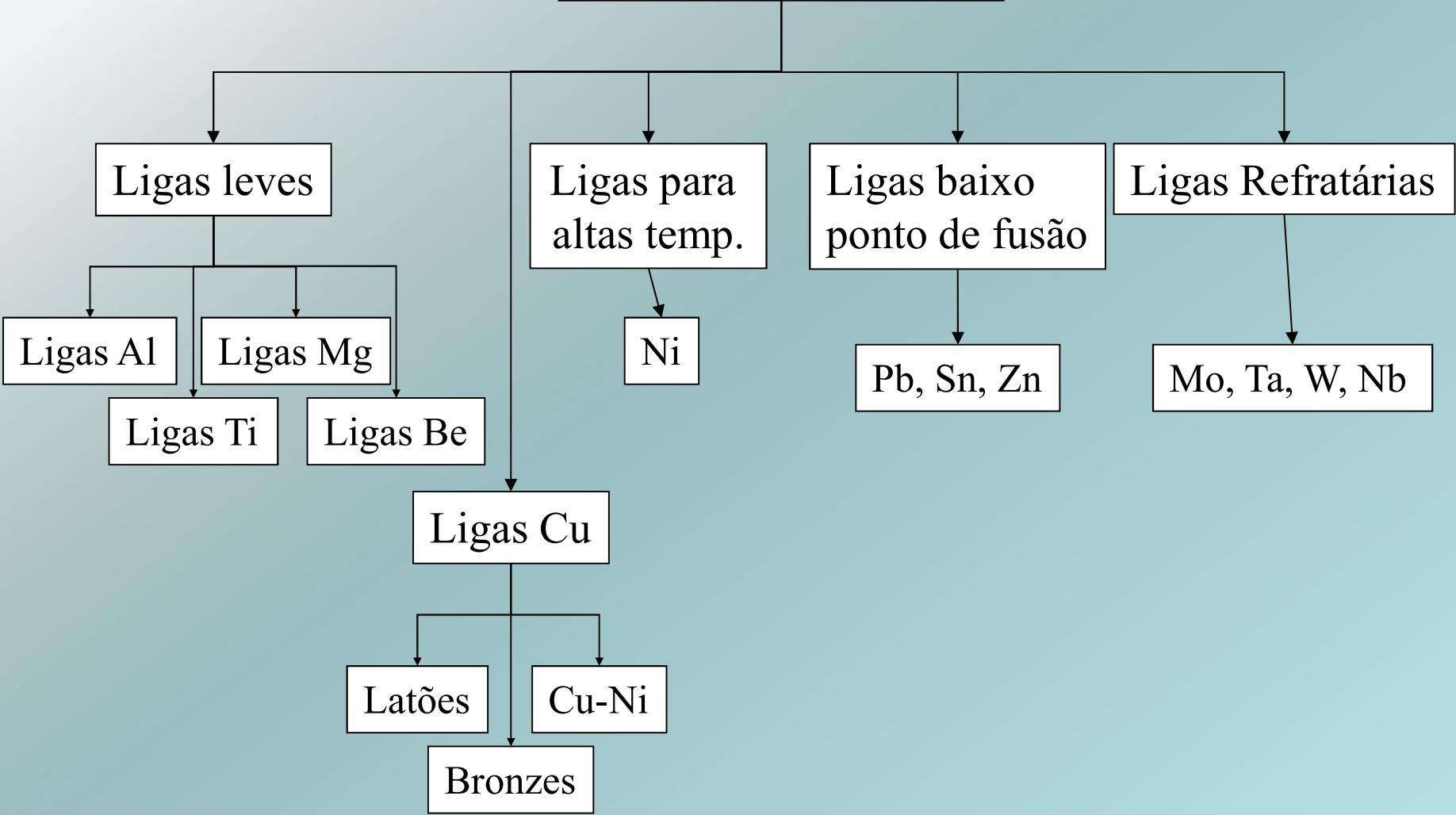
## Ligas de Alumínio

2019

Profa. Dra. Lauralice Canale

# LIGAS METÁLICAS NÃO FERROSAS

NÃO FERROSOS



# LIGAS METÁLICAS NÃO FERROSAS

Os diferentes grupos apresentam enormes diferenças.

Temperaturas de fusão podem variar de próximas a temperatura ambiente (galium) até 3000 graus C para o W.

Resistências variam de 1000 psi até 200.000 psi

# LIGAS METÁLICAS NÃO FERROSAS

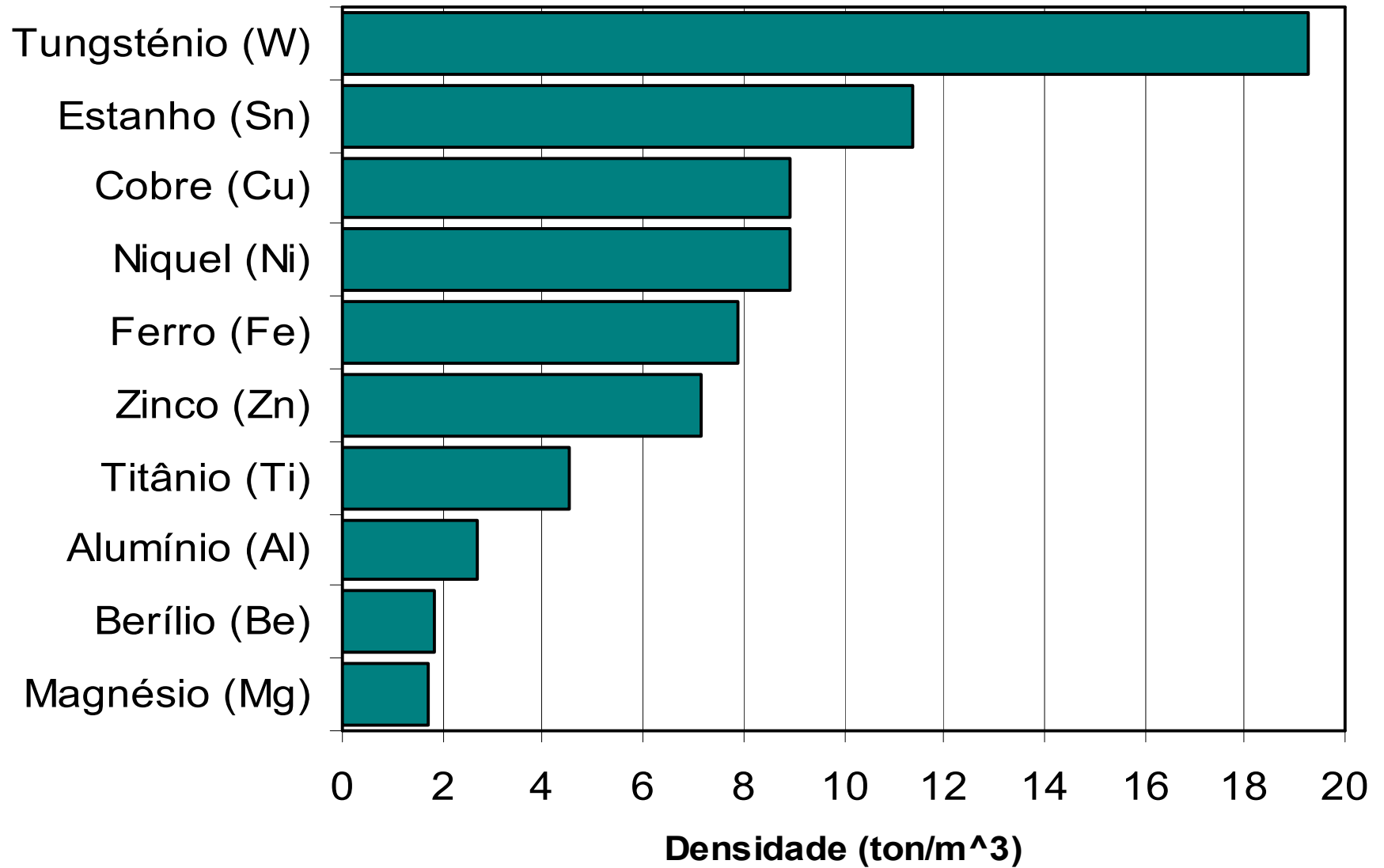
Al, Mg e Be (metais leves) tem baixa densidade.

Pb, W tem altas densidades

Em muitas aplicações, peso é um fator crítico.  
Para relacionar peso e resistência tem-se a

Resistência específica=resistência/densidade

# LIGAS NÃO FERROSAS (GENERALIDADES)



- Em geral mais caras que as ligas ferrosas
- Usadas para aplicações específicas:
  - Resist. à corrosão (Cu, Ni)
  - Alta condutividade (Cu, Al)
  - Baixo peso (Al, Mg, Ti)
  - Resistência a altas temperaturas (Ni)
- Utilização desde utensílios domésticos até aplicações aeroespaciais

**TABLE 13-1 ■ Specific strength and cost of nonferrous alloys, steels**

Metal	Density		Tensile Strength (psi)	Specific Strength (in.)	Cost relative to açç
	g/cm <sup>3</sup>	(lb/in. <sup>3</sup> )			
Aluminum	2.70	(0.097)	83,000	$8.6 \times 10^5$	<b>6</b>
Beryllium	1.85	(0.067)	55,000	$8.2 \times 10^5$	<b>3500</b>
Copper	8.93	(0.322)	150,000	$4.7 \times 10^5$	<b>7,1</b>
Lead	11.36	(0.410)	10,000	$0.2 \times 10^5$	<b>4,5</b>
Magnesium	1.74	(0.063)	55,000	$8.7 \times 10^5$	<b>15</b>
Nickel	8.90	(0.321)	180,000	$5.6 \times 10^5$	<b>41</b>
Titanium	4.51	(0.163)	160,000	$9.8 \times 10^5$	<b>40</b>
Tungsten	19.25	(0.695)	150,000	$2.2 \times 10^5$	<b>40</b>
Zinc	7.13	(0.257)	75,000	$2.9 \times 10^5$	<b>4</b>
Steels	~7.87	(0.284)	200,000	$7.0 \times 10^5$	<b>1</b>

# LIGAS METÁLICAS NÃO FERROSAS

➤ Usadas em geral para:

- Resistência à corrosão
- Resistência ao desgaste
- Cond. elétrica
- Peso reduzido (algumas)
- Resistência a altas temperaturas (outras)
- Boas resistência e rigidez específicas



# 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
- Ferramentas portáteis

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

<b>Material</b>	<b>Tensile Strength (psi)</b>	<b>Yield Strength (psi)</b>	<b>% Elongation</b>	<b>Ratio of Alloy-to-Metal Yield Strengths</b>
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

## Componentes da Crosta Terrestre:

Oxigênio (O)	46,60%
Silício (Si)	27,72%
Alumínio (Al)	8,13%
Ferro (Fe)	5,00%
Cálcio (Ca)	3,69%
Sódio (Na)	2,83%
Potássio (K)	2,59%
Magnésio (Mg)	2,00%

ALUMÍNIO : METAL MAIS ABUNDANTE DA TERRA.

Forma combinada: argila, safira, rubi, ametista, esmeralda, topázio, jade, turquesa e mica.

# MINERAÇÃO:

Fonte mais praticável: bauxita



(Al + O + H<sub>2</sub>O + 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.

Encontrada em todos os continentes exceto na Antártida

Depósitos mais ricos: zonas tropicais e sub tropicais

Situa-se em camadas ou depósitos relativamente rasos:

EUA, Jamaica, República Dominicana, Haiti, Guiana, Brasil, França, Itália, Hungria, África Equatorial

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:

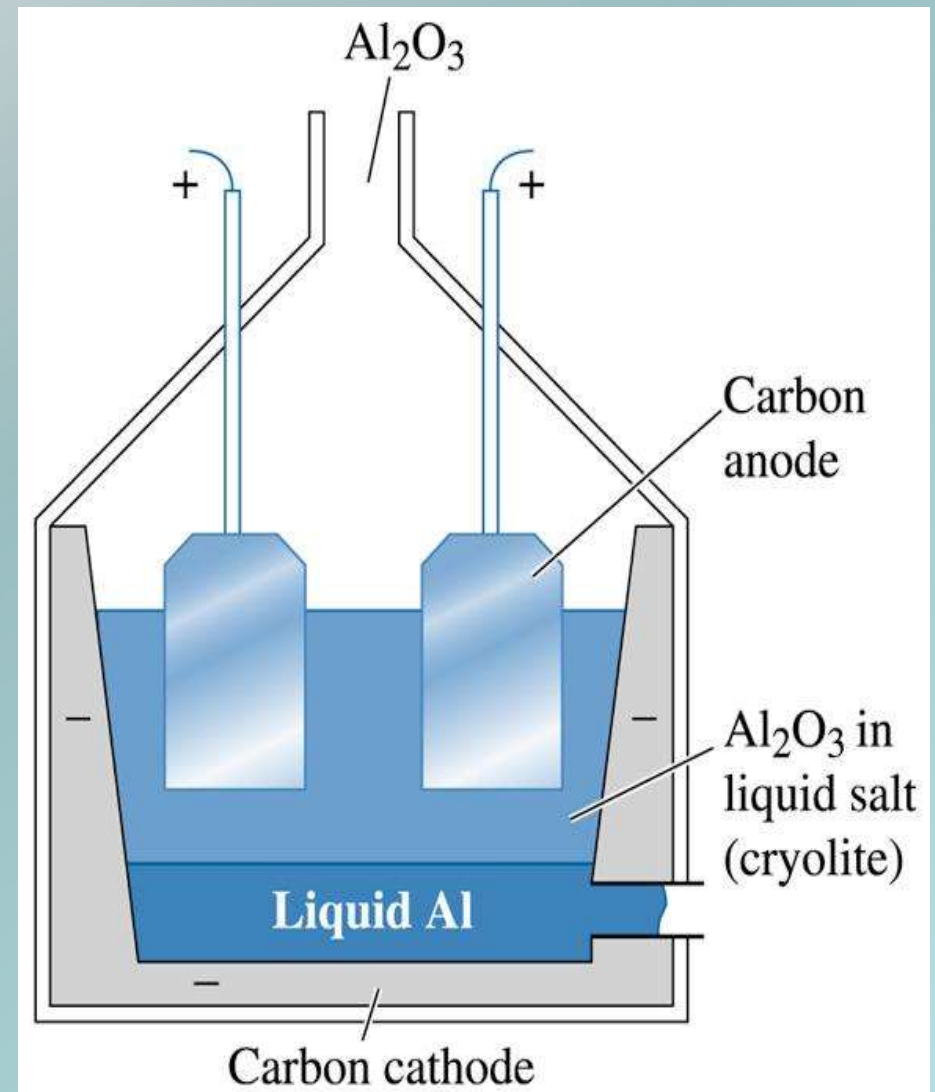
- Tratamento químico do minério para extrair a alumina

BAUXITA  $\Rightarrow$  ALUMINA ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

- 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 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

A operação ocorre a uma temperatura próxima a  $960^\circ \text{C}$ , 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 ( pólo 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 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

- 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 aquático: transatlânticos e cargueiros, motores de popa, embarcações de recreio.
- Submarinos pequenos para 1 ou 2 homens e esferas pressurizadas para exploração das profundezas.
- Navios hidrofólios (movem-se sobre colchões de ar)

## 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

Controle  
de  
impurezas  
(0 a 9)

Identifica a liga no  
grupo

Tipo da liga  
(Série)

# LIGAS DE ALUMÍNIO

## TRATAMENTOS

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

# 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

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

<b>Número da Associação do Alumínio</b>	<b>Número UNS (unified numbering system)</b>	<b>Composição (%p)*</b>	<b>Condição</b>	<b>Aplicações / Características Típicas</b>
<b>Ligas Forjadas, Tratáveis Termicamente</b>				
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.

## Tabela 3 – Designação básica das ligas de alumínio.

“F”	<b>Como Fabricado:</b> aplicado a produtos para os quais não há um controle especial após o aquecimento nem condições de endurecimento a frio são aplicados.
“O”	<b>Recozida:</b> aplicado a produtos forjados que foram aquecidos para gerar o efeito de recristalização, produzindo uma condição de baixa resistência mecânica; os produtos fundidos são recozidos para melhorar a ductilidade e estabilidade dimensional.
“H”	<b>Encruada:</b> aplicado a produtos forjados nos quais a resistência mecânica é aumentada através do encruamento por trabalho a frio. Este processo pode ser seguido de um tratamento térmico, o qual produz certa redução na resistência.
“W”	<b>Solubilizada:</b> uma têmpera instável aplicável somente às ligas que envelhecem espontaneamente na temperatura ambiente (envelhecimento natural) após solubilização. Esta designação é especificamente usada quando o período de envelhecimento natural é indicado.
“T”	<b>Tratada Termicamente:</b> aplicado a produtos que são tratados a quente, algumas vezes com encruamento posterior, para produzir têmperas mais estáveis e diferentes de F, O ou H.

# Ligas de Alumínio

Wilm (alemão)

começo século XX

Ligas leves para estruturas de Zepelins

Liga Al 4% Cu

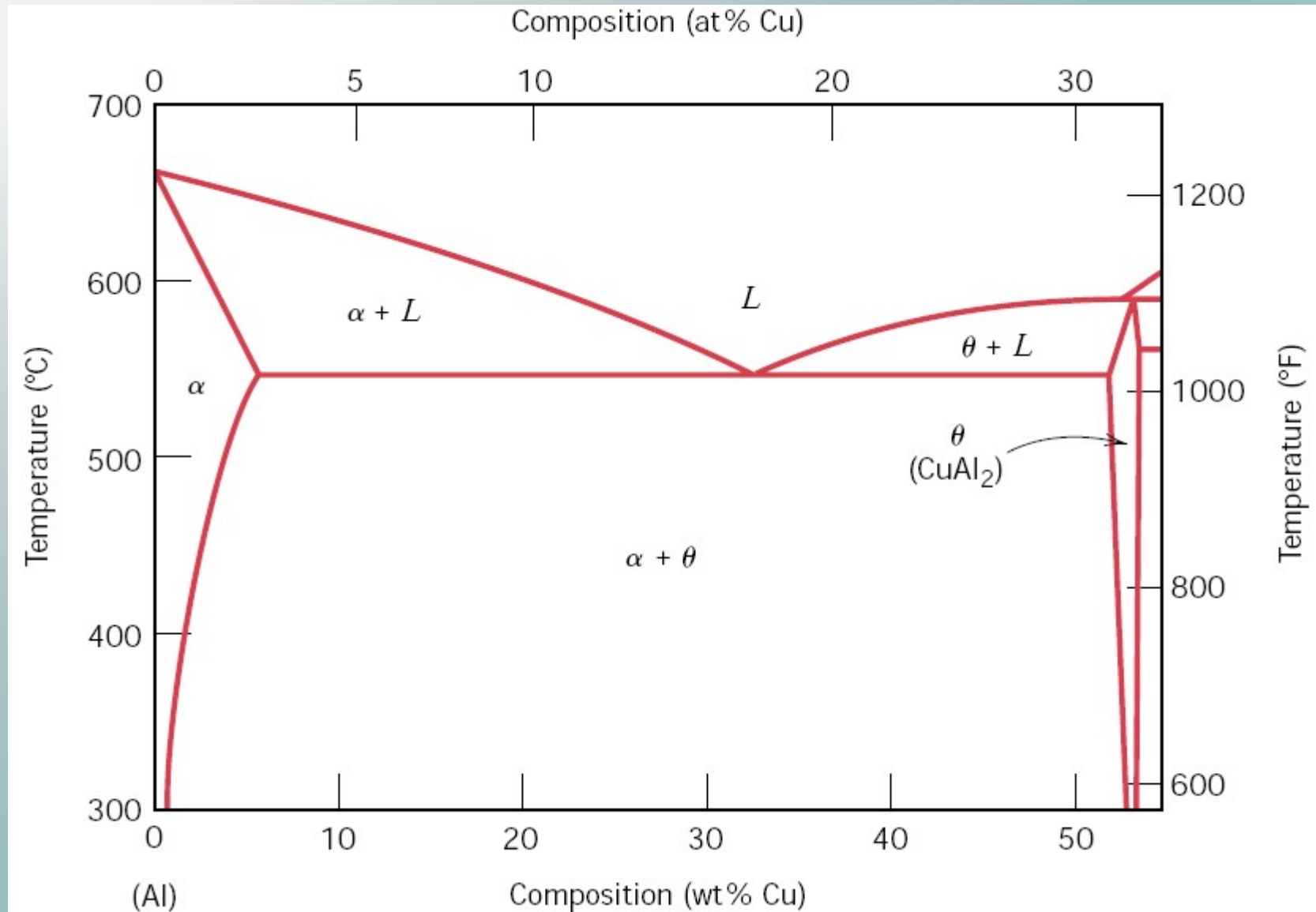
60 HB

280MPa

110HB

380MPa

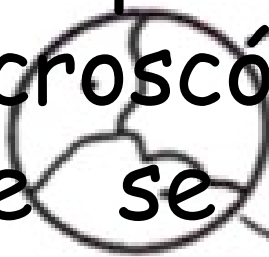
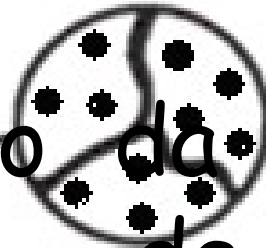
# Diagrama de Fase do Alumínio-Cobre



Recozido (formação de grandes precipitados)

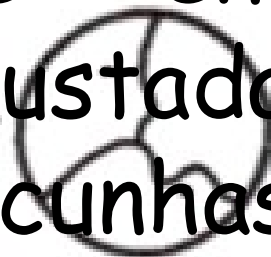
O endurecimento da liga se dá pela precipitação de partículas microscópicas da ordem de  $5 \cdot 10^{-5}$  mm que se formam na última fase do tratamento de envelhecimento e aparecem incrustadas na matriz, atuando como cunhas que fixam os cristais, e são necessárias cargas muito altas para produzir o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

Resfriamento lento até a temperatura ambiente

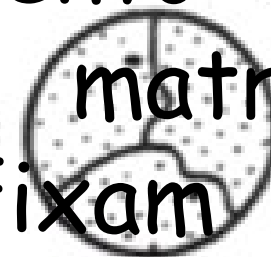


Resfriamento até a temperatura ambiente

(formação de partículas submicroscópicas)



Envelhecimento



Solubilizado

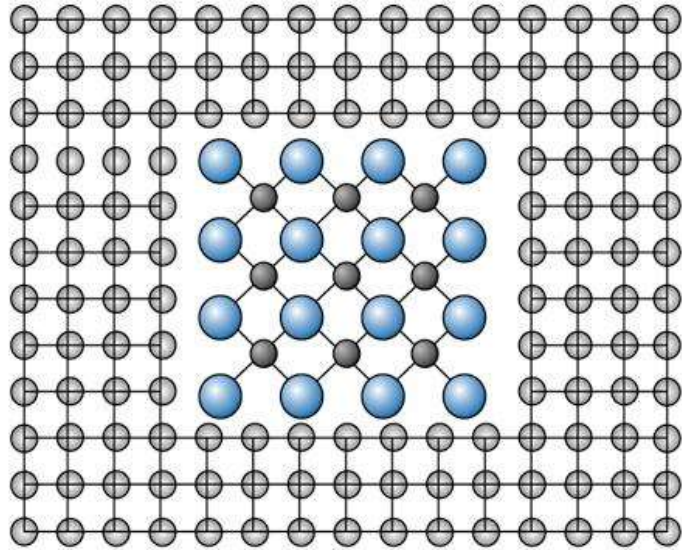
Após o envelhecimento



# Envelhecimento Artificial

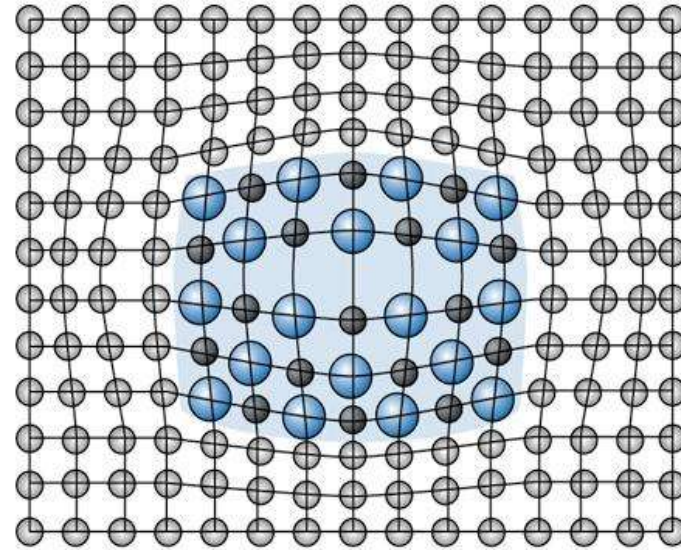
- É um tratamento térmico de endurecimento por dispersão especial.
- Se dá pela solubilização, têmpera, e envelhecimento: há a formação de um precipitado coerente de forma a produzir um grande efeito de fortalecimento. ZONAS DE GUINIER-PRESTON (ZONAS GP)
- Também conhecido como endurecimento por precipitação, é uma forma de fortalecimento por dispersão.

### Incoerente ( $\theta$ )

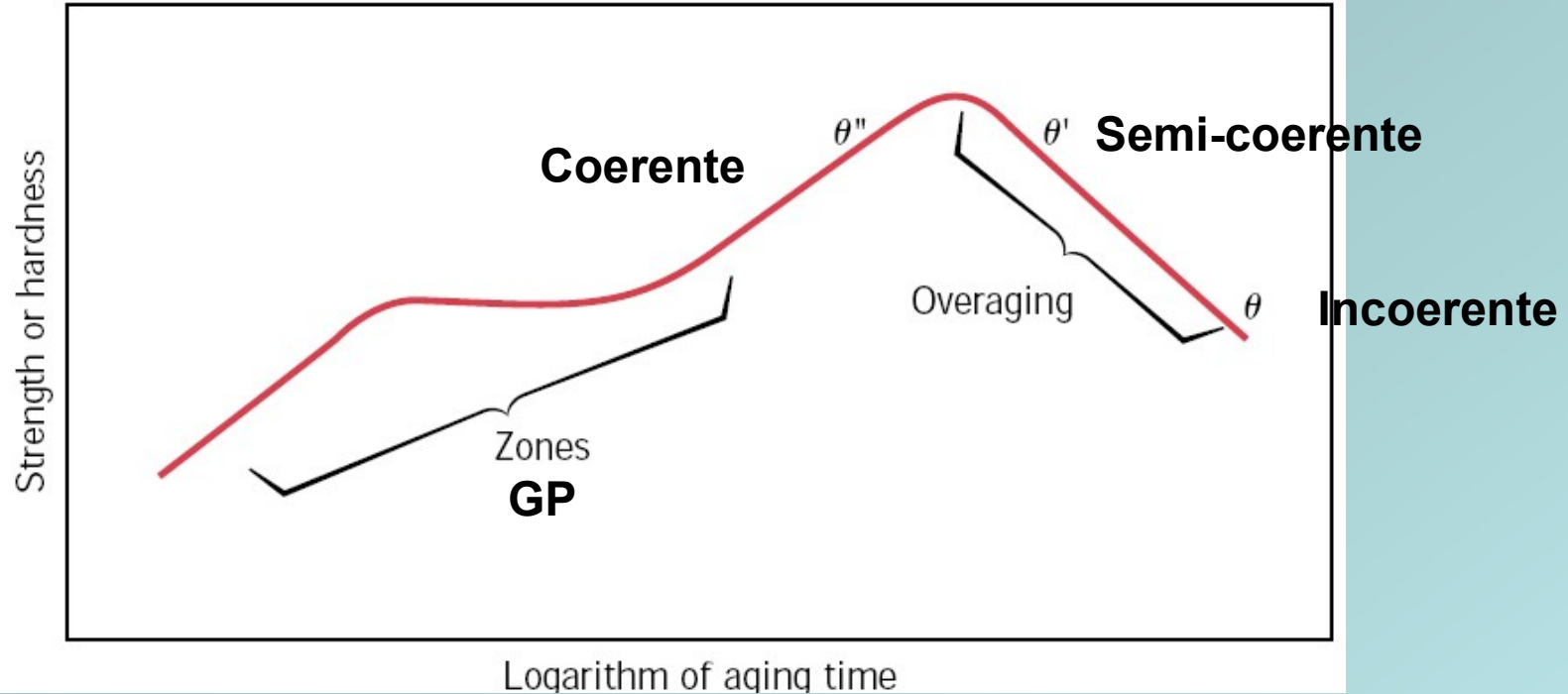


(a)

### Coerente

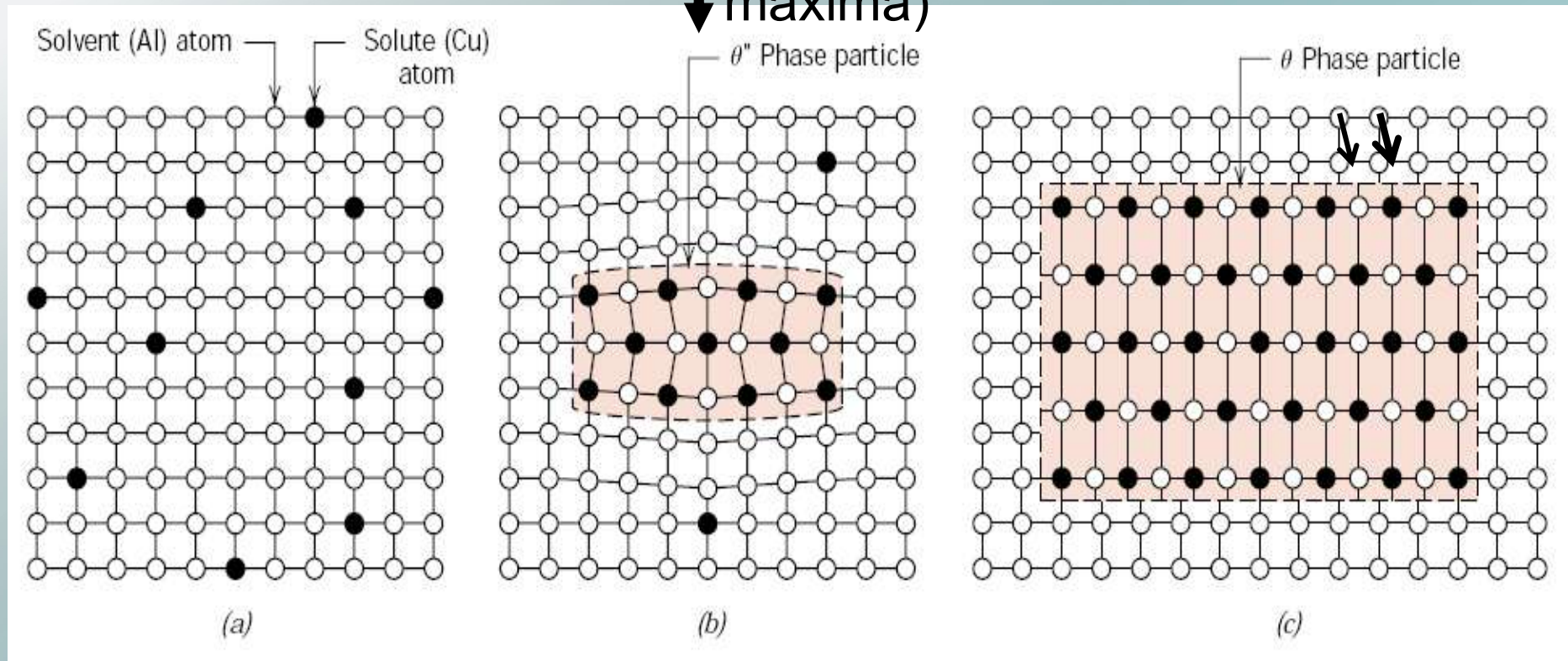


(b)



Zonas Guinier-Preston (GP): agrupamento de átomos muito pequeno que se precipita nos primeiros estágios do processo de endurecimento por envelhecimento. Superenvelhecido (dureza baixa)

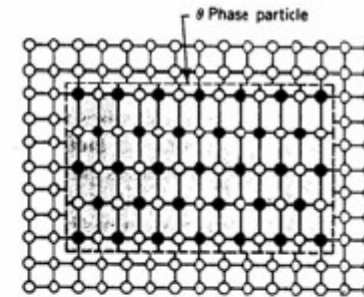
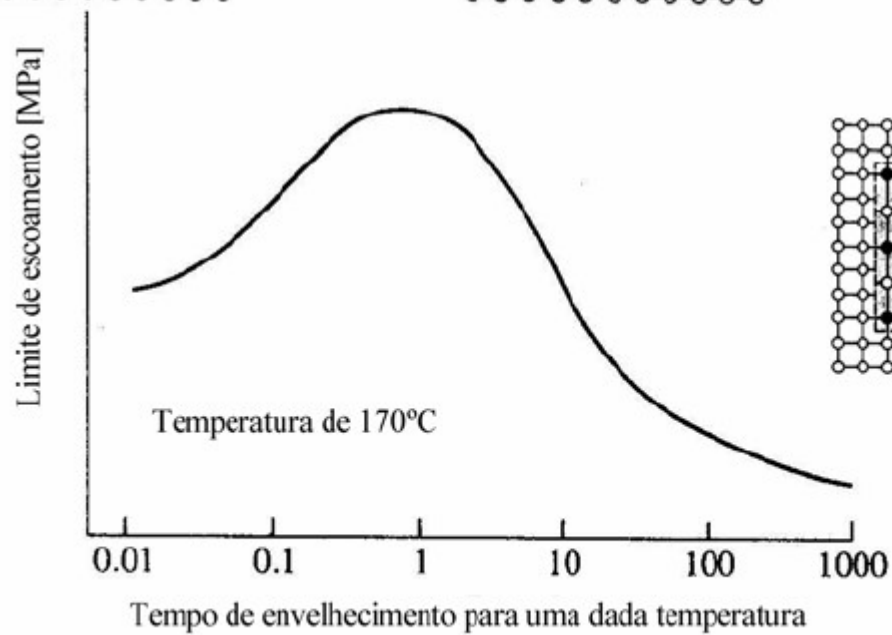
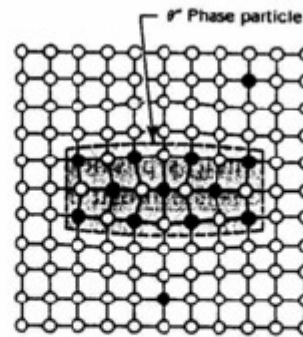
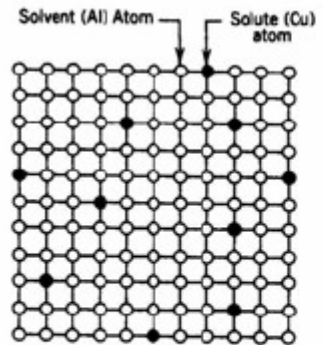
Envelhecido (dureza máxima)



**Coerente**

**Incoerente**





**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  $\alpha$ .

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

Superenvelhecimento (continuação do crescimento das partículas)

$\theta'$ : Tem esse nome em função da estrutura ser bastante semelhante à  $\theta$  ( $\text{CuAl}_2$ ). São ***semi-coerentes*** e podem ser considerados verdadeiros compostos. Rede menos deformada provocando queda da dureza.

Superenvelhecimento (continuação do crescimento das partículas)

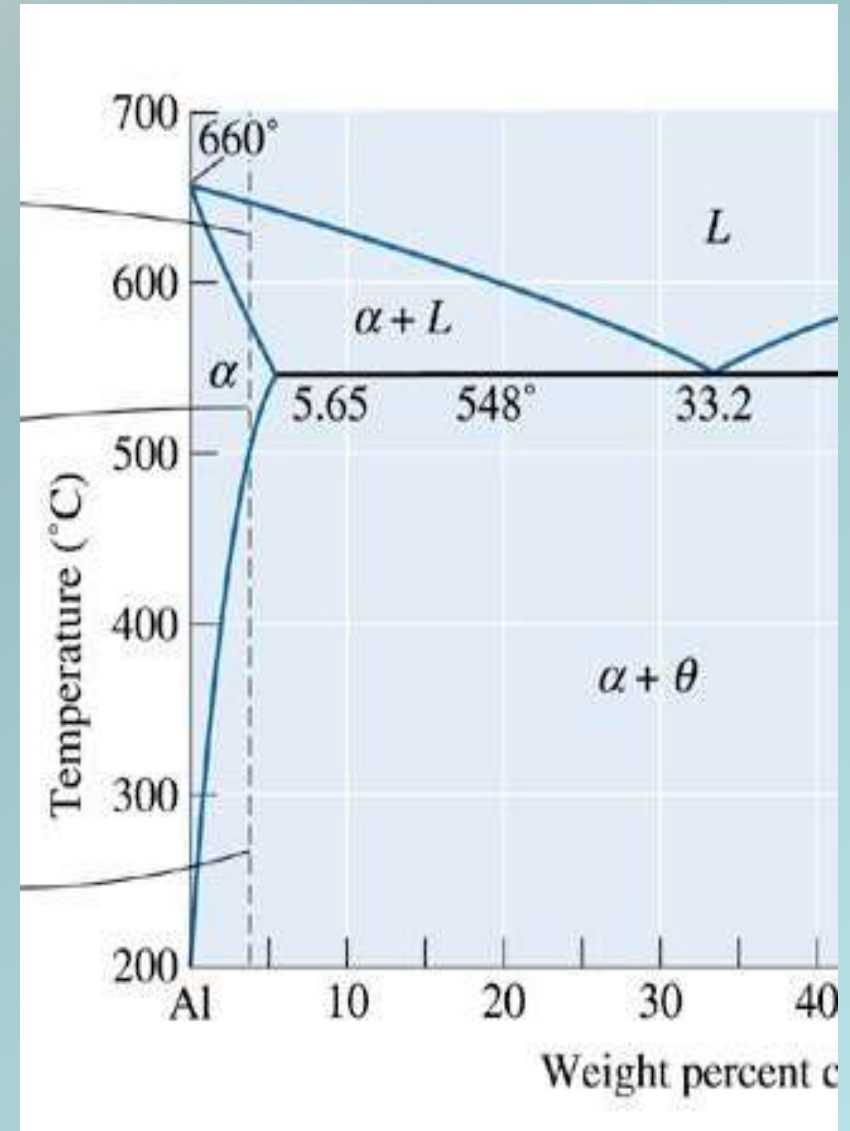
$\theta$ : Podem formar-se pela decomposição da fase alfa ao ser aquecido a temperatura elevada ou pela decomposição da fase  $\theta'$  pela ação do tempo ou da temperatura. A disposição dos átomos é independente do sistema cristalino. ***Interface incoerente***. Não provoca deformação da matriz. Dureza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

Dimensões: de 0.01 a 1 mm

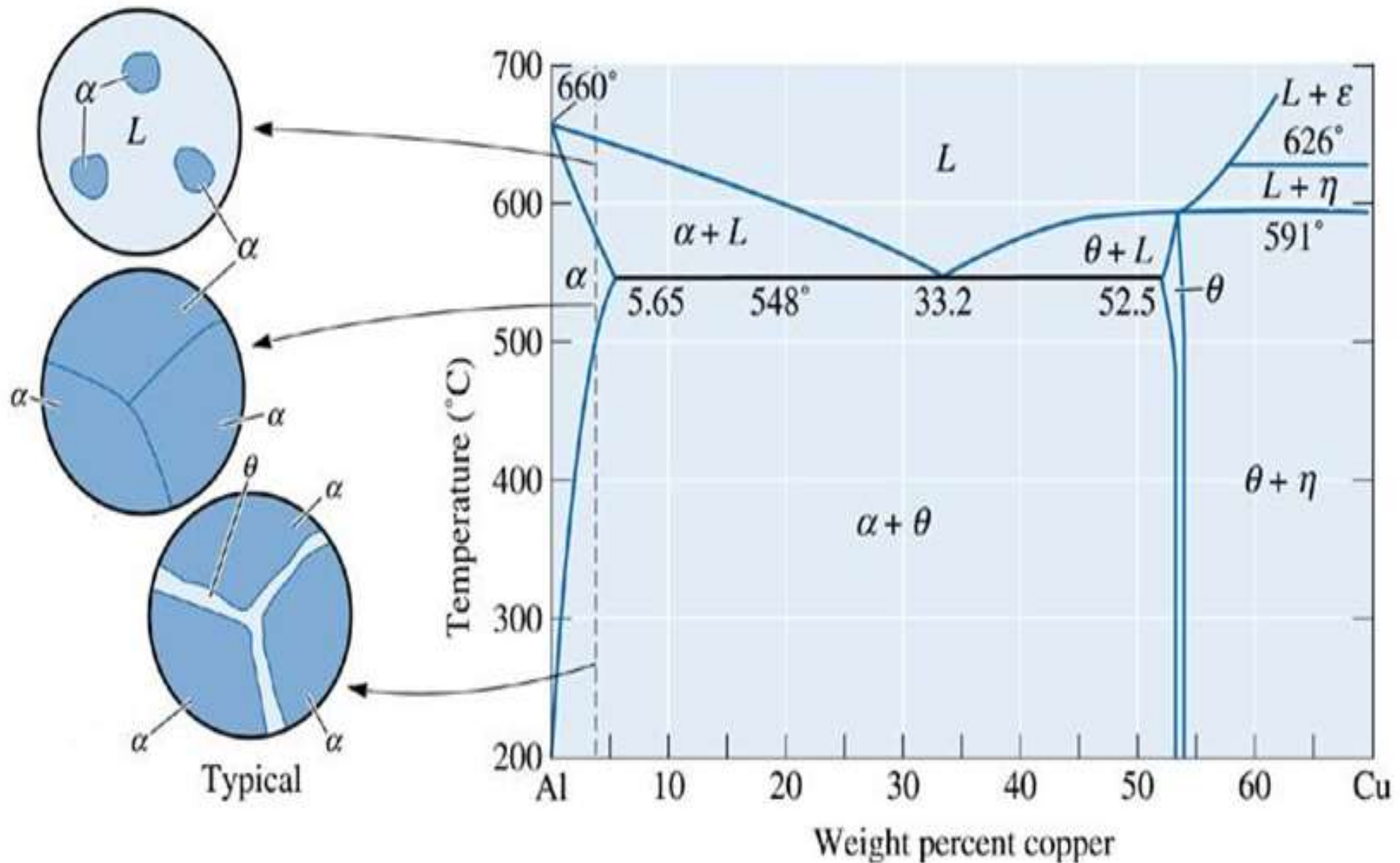


# Condições necessárias para realizar o endurecimento por envelhecimento

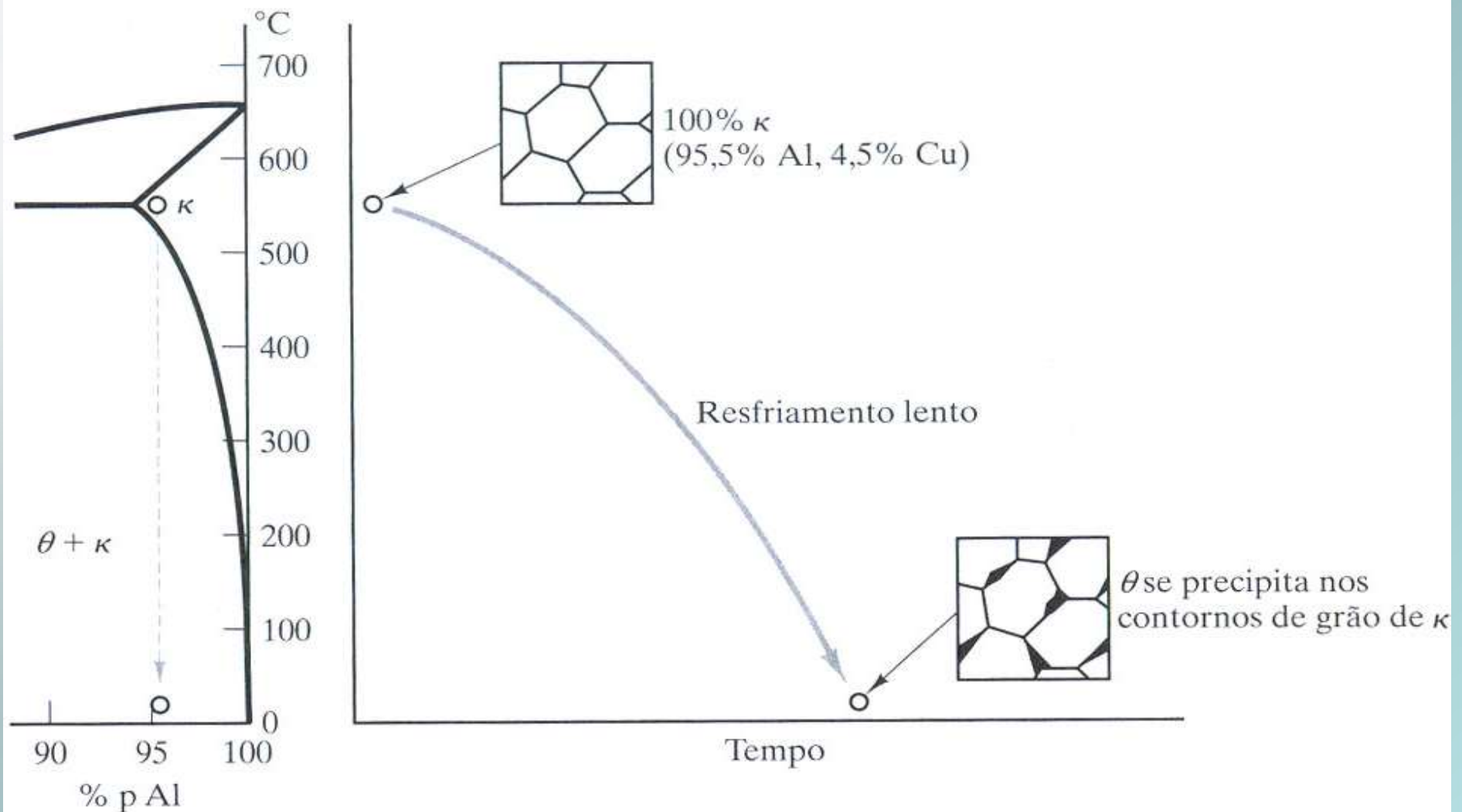
- O sistema da liga deve apresentar solubilidade sólida decrescente com a diminuição da temperatura.
- O sistema deverá formar uma única fase em uma ampla faixa de temperatura.



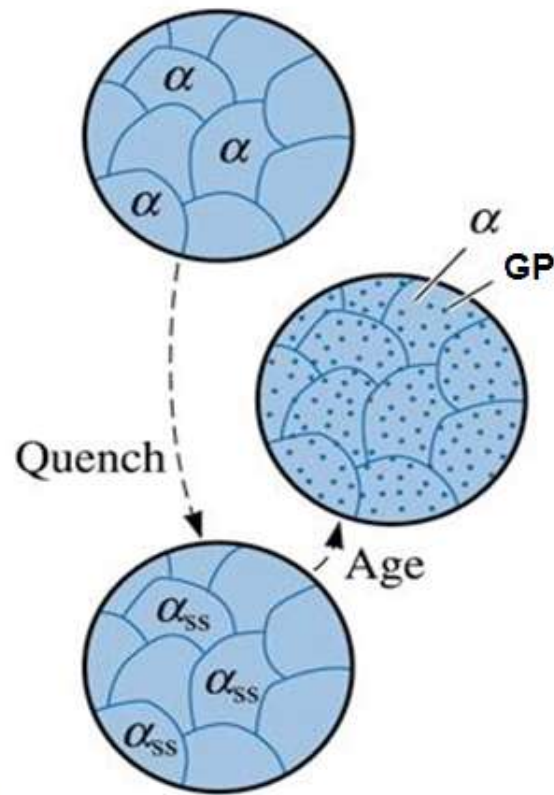
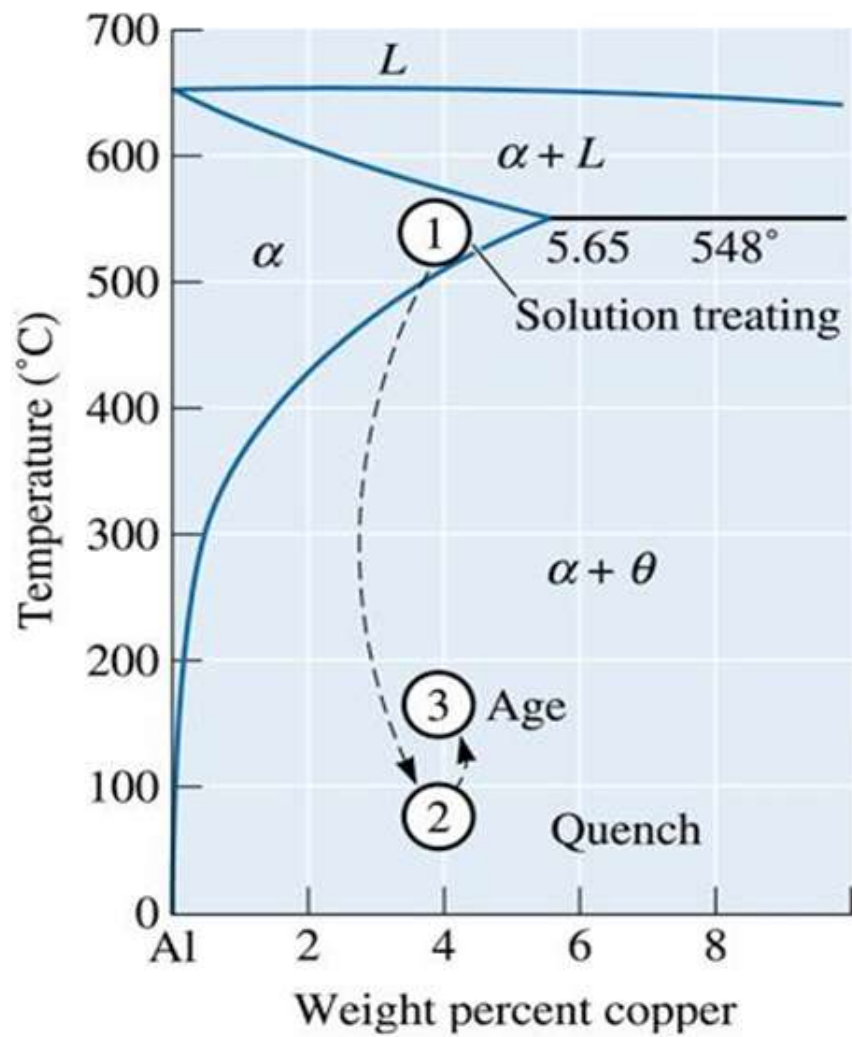
# Diagrama de Fase e Microestrutura do Al-4%-Cu



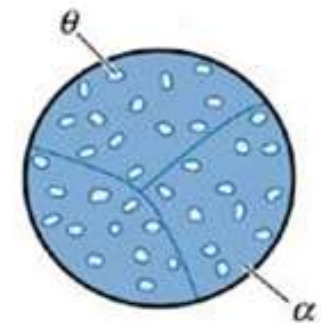
# Resfriamento Lento da Liga de Al (Têmpera)



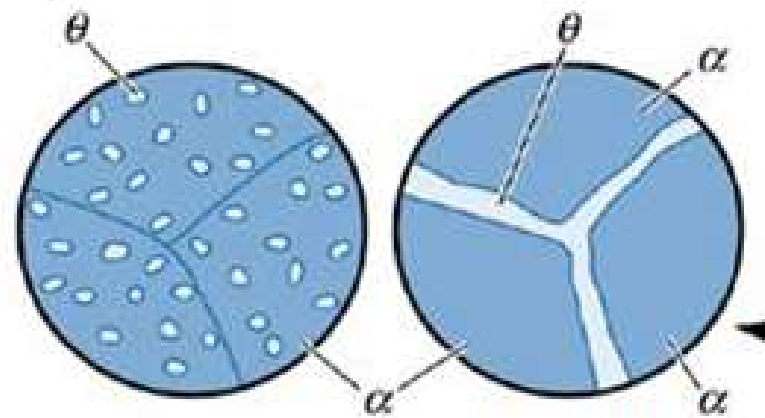
Precipitados grosseiros se formam em contornos de grão em uma liga Al-Cu (4,5% p) quando resfriados lentamente da região monofásica ( $\kappa$ ) do diagrama de fases para a região de duas fases ( $\theta + \kappa$ ). Esses precipitados isolados afetam muito pouco a dureza da liga.



### Superenvelhecido



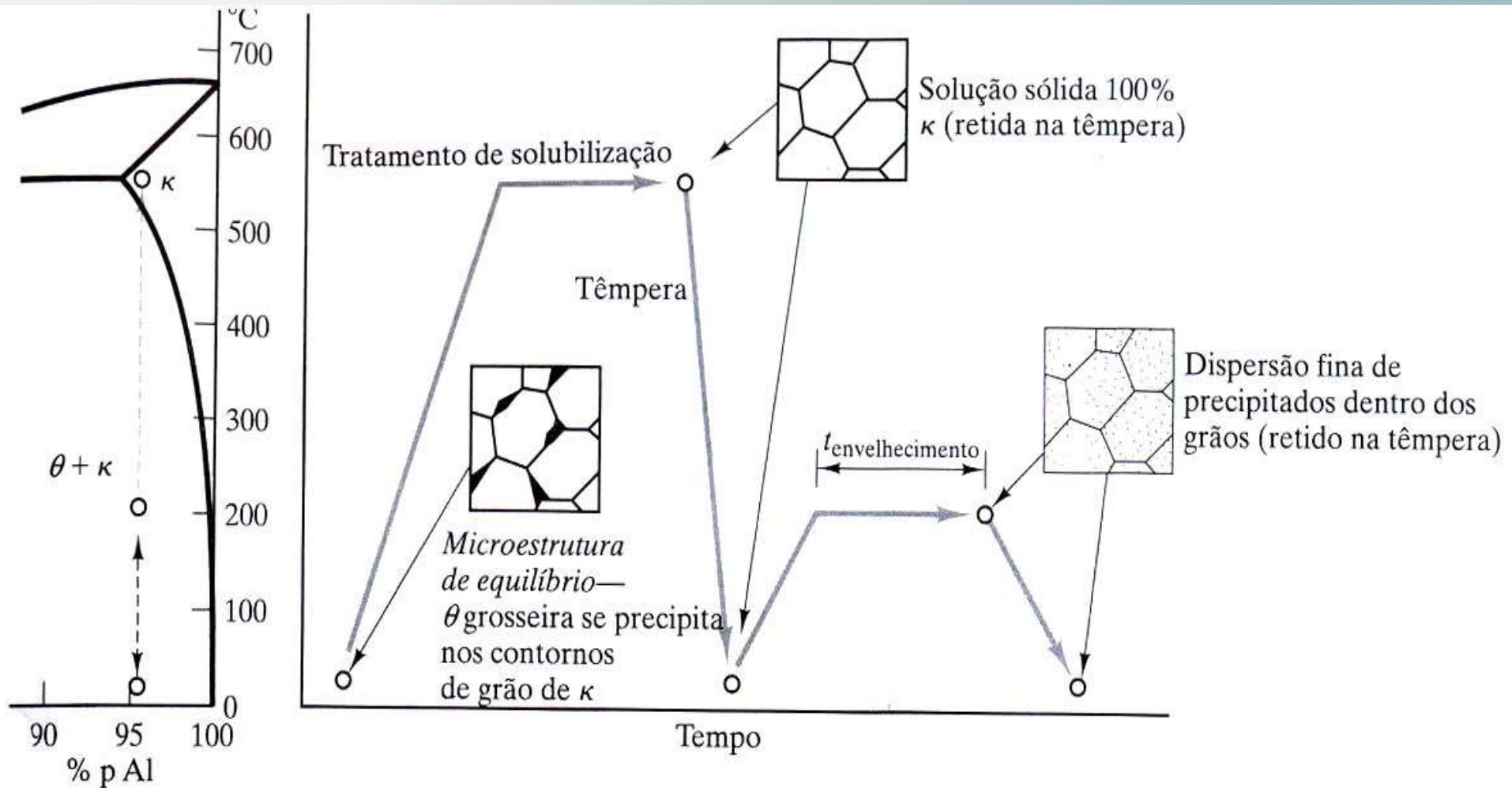
## Superenvelhecido



Recozido

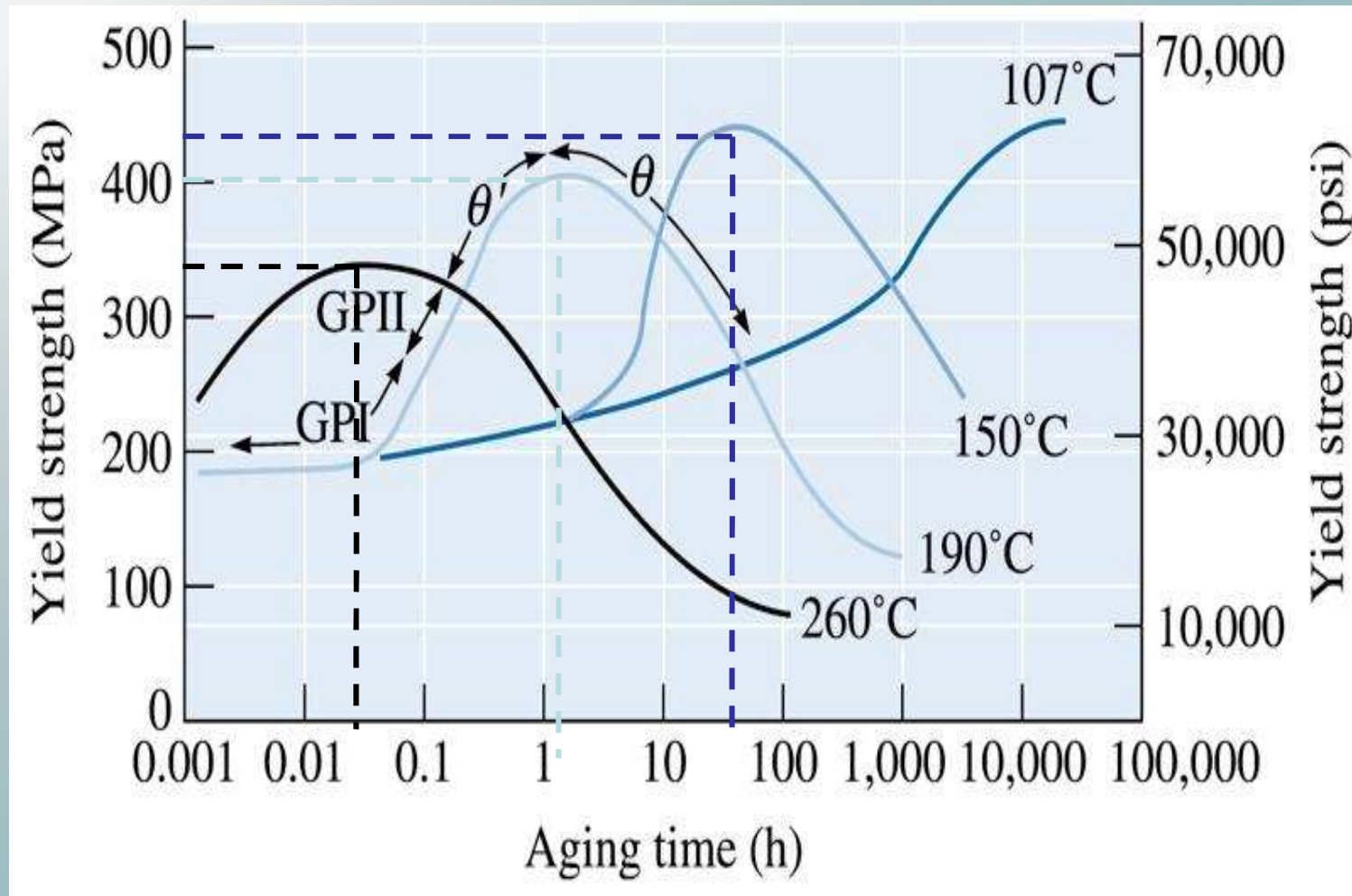


# Resfriamento Rápido da Liga de Al (Têmpera)



Resfriando rapidamente (temperando) e depois reaquecendo uma liga Al-Cu (4,5% p), uma dispersão fina de precipitados se forma dentro dos grãos de  $\kappa$ . Esses precipitados são eficazes em bloquear o movimento de discordâncias e, conseqüentemente, aumentar a dureza (e resistência) da liga. Esse processo é conhecido como endurecimento por precipitação, ou endurecimento por envelhecimento.

## 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.

## 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.





# Materiais Utilizados na Aeronave L1011

