

SMM0193 – ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS I

ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO

TRATAMENTO TÉRMICO: ENVELHECIMENTO (AGING)

Transformação de fase que
leva o material de um
estado estável a um **estado
metaestável**

Tratamento térmico

Aumentar a
**resistência
mecânica**

TÊMPERA E
REVENIMENTO

Perde em
tenacidade

TERMOQUÍMICOS
(SUPERFICIAIS)

**ENDURECIMENTO
POR PRECIPITAÇÃO
↓
ENVELHECIMENTO**

**Mantém boa
tenacidade**

TRATAMENTOS TÉRMICOS: OBJETIVO INVERSO

**Recuperação e
recristalização**



Processos de transformação de fase no estado sólido para **restaurar a estrutura e as propriedades** de um material metálico alteradas pela **deformação plástica**.

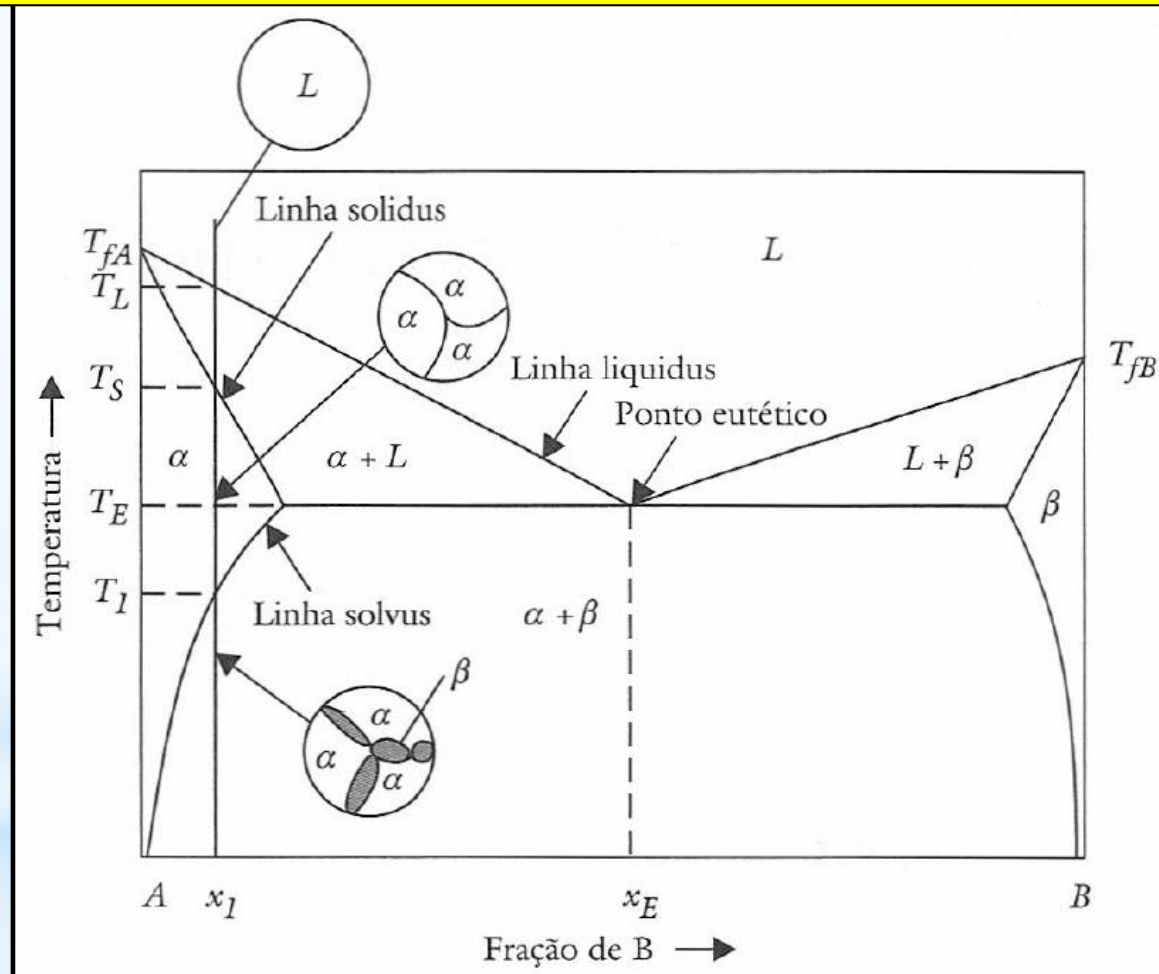


Recozimento

Estado **termodinâmico metaestável** para um **estado estável**

O SIGNIFICADO DA LINHA SOLVUS

A linha **solvus** representa a **variação da solubilidade** dos átomos de B na rede cristalina de A em função da temperatura.



SOLIDIFICAÇÃO COM RESFRIAMENTO LENTO DE UMA LIGA COM COMPOSIÇÃO x_1 (Fonte: Rezende)

O SIGNIFICADO DA LINHA SOLVUS

Temperaturas abaixo de T_1 a quantidade de átomos de **B** correspondente a X_1 fica acima do limite de solubilidade.



Precipitação de átomos de **B** para **aliviar a supersaturação** da fase α .



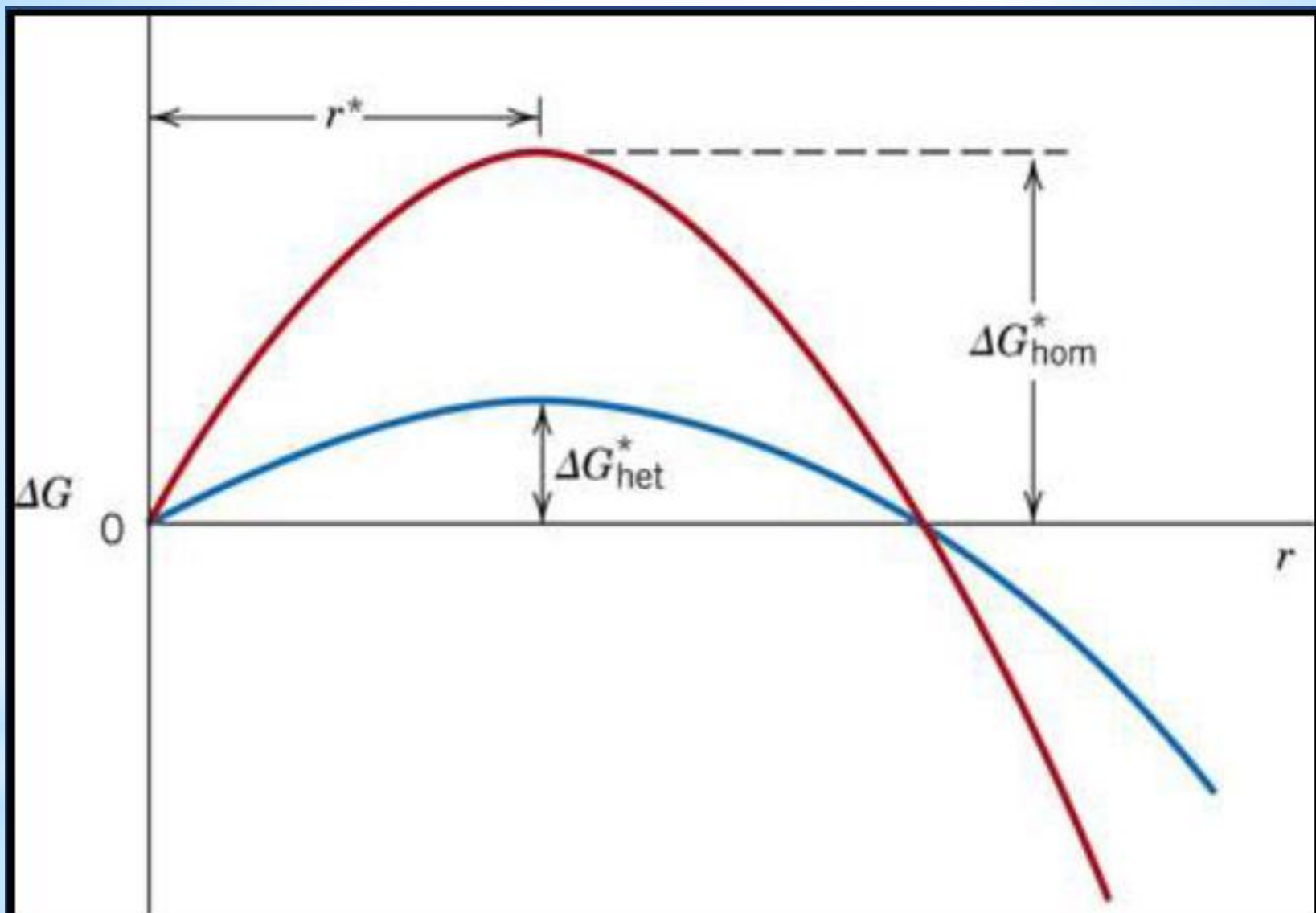
Átomos de B precipitados $\rightarrow$ segunda **fase β** .



Nucleação e Crescimento



Nucleação Heterogênea



Prof.Dr. José Benedito Marcomini

CONTORNOS DE GRÃO → ALTA ENERGIA



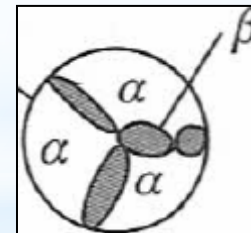
**SÍTIOS PREFERENCIAIS PARA A NUCLEAÇÃO
HETEROGÊNEA**



**ENERGIA DISPONÍVEL CONTRIBUI COM PARTE DA ENERGIA DE
ATIVAÇÃO**

T_1 é relativamente alta

DIFUSÃO



**Estrutura típica de
peças fundidas**

(Fonte:Rezende)

No início do **século XX** descobriu-se que a **resistência mecânica** de uma peça com esse tipo de estrutura poderia ser **aumentada sensivelmente** através de **um tratamento térmico conveniente**, que levasse a uma **redistribuição da segunda fase (β)** na forma de **partículas finas distribuídas homogeneamente no interior dos grãos**. Esse processo é denominado **endurecimento por precipitação**

(Fonte:Rezende)

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

O TRATAMENTO TÉRMICO ENVELHECIMENTO (“AGING”)

1ª. ETAPA - SOLUBILIZAÇÃO

→ Átomos de B se dissolvem novamente na fase α . A fase β desaparece.



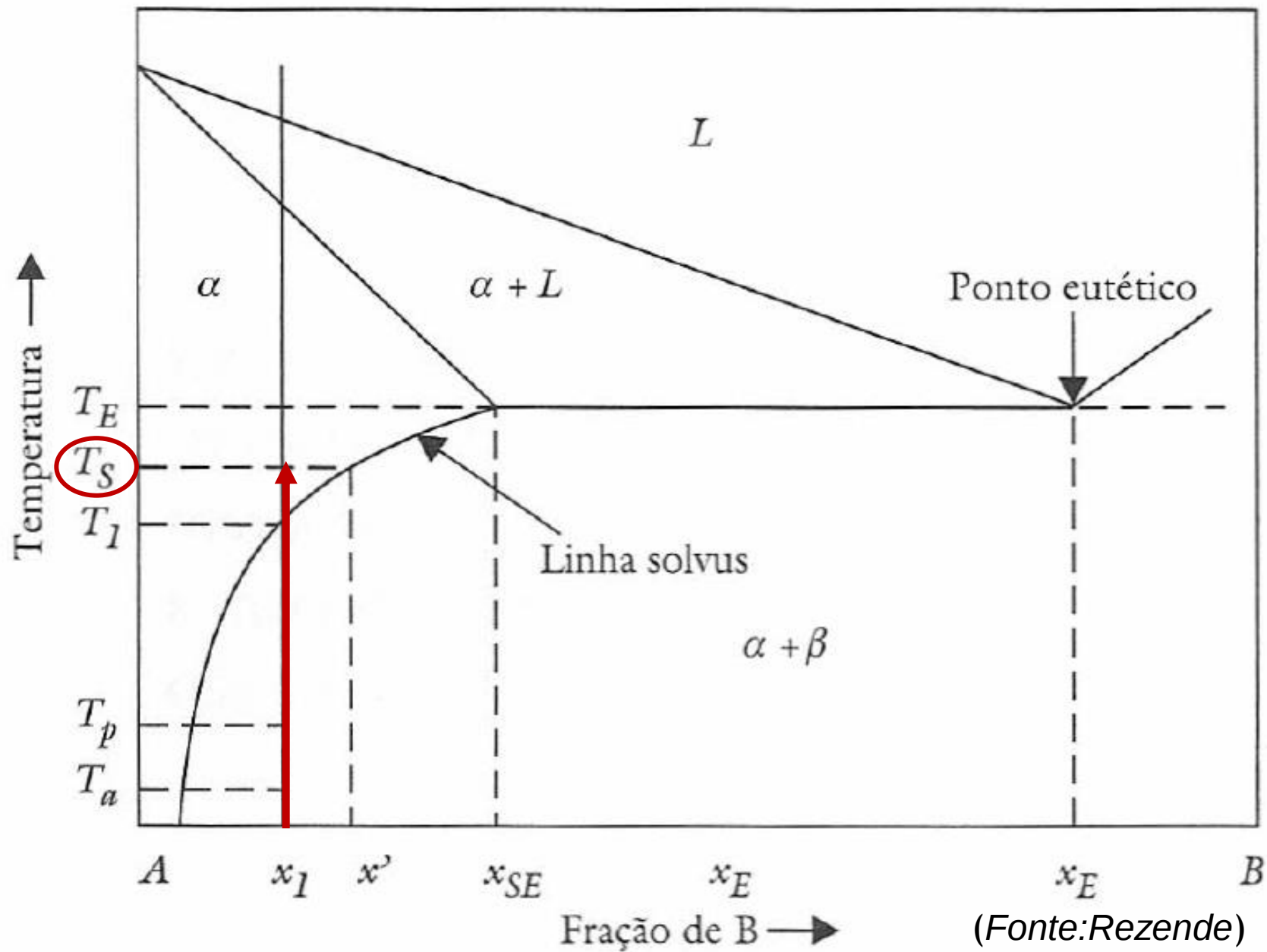
2ª. ETAPA – PRECIPITAÇÃO EM TEMPERATURA ADEQUADA

→ Precipitação controlada de β a partir da fase α supersaturada de B.

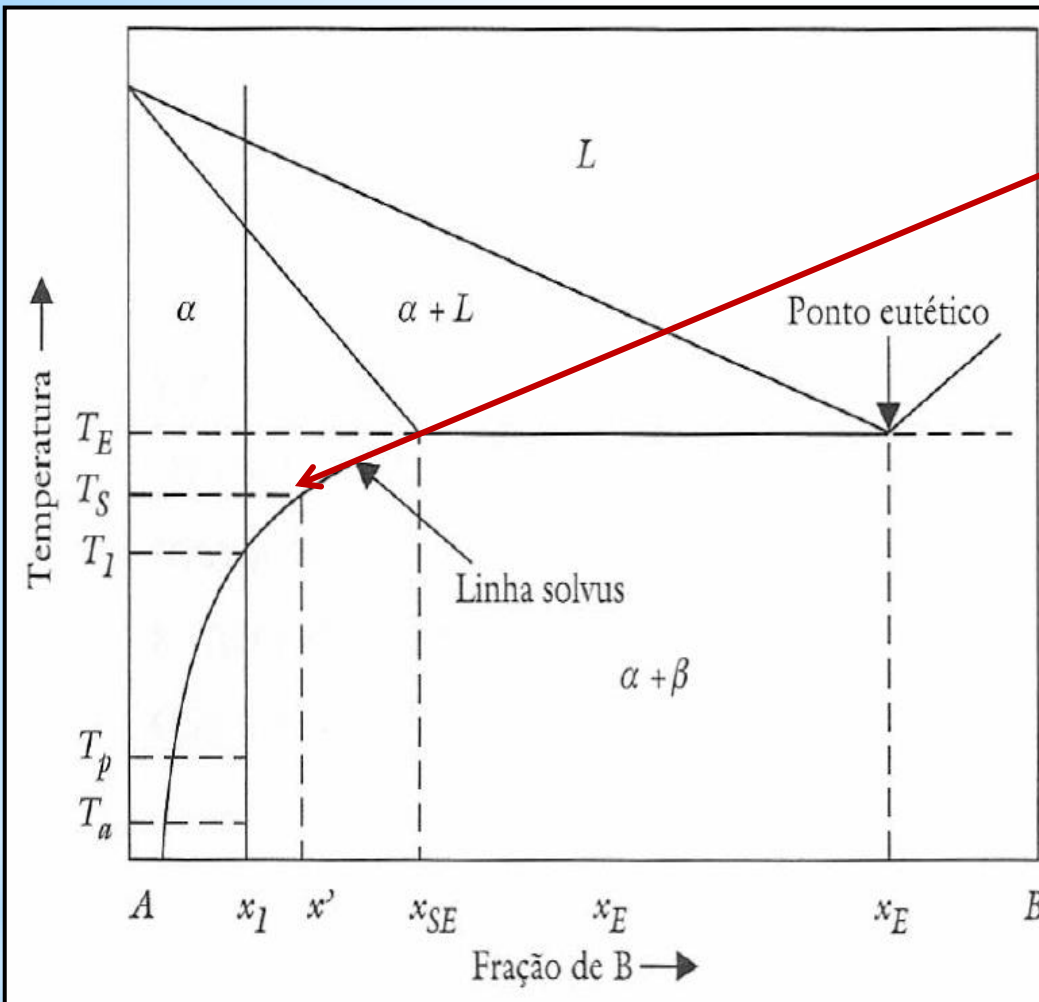
SOLUBILIZAÇÃO

Para se promover a **completa solubilização de B** na fase α , deve-se aquecer a liga de modo a passar da região de estabilidade da mistura $\alpha + \beta$ do diagrama para uma região de estabilidade da fase α apenas, elevando-se a temperatura até um valor T_s **acima de T_1** e **deixar um tempo suficiente**.

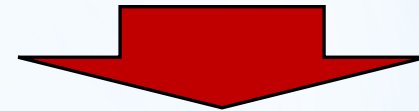
SOLUBILIZAÇÃO



SOLUBILIZAÇÃO



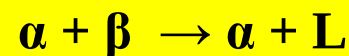
Solubilidade de B em T_S é $X' > X_1$ (Conc. Liga):
dissolução da fase β –
material volta a ser
monofásico



**A 1ª. CONDIÇÃO PARA
SOLUBILIZAÇÃO E
PRECIPITAÇÃO:
SOLUBILIDADE DO SOLUTO
AUMENTE COM A
TEMPERATURA.**

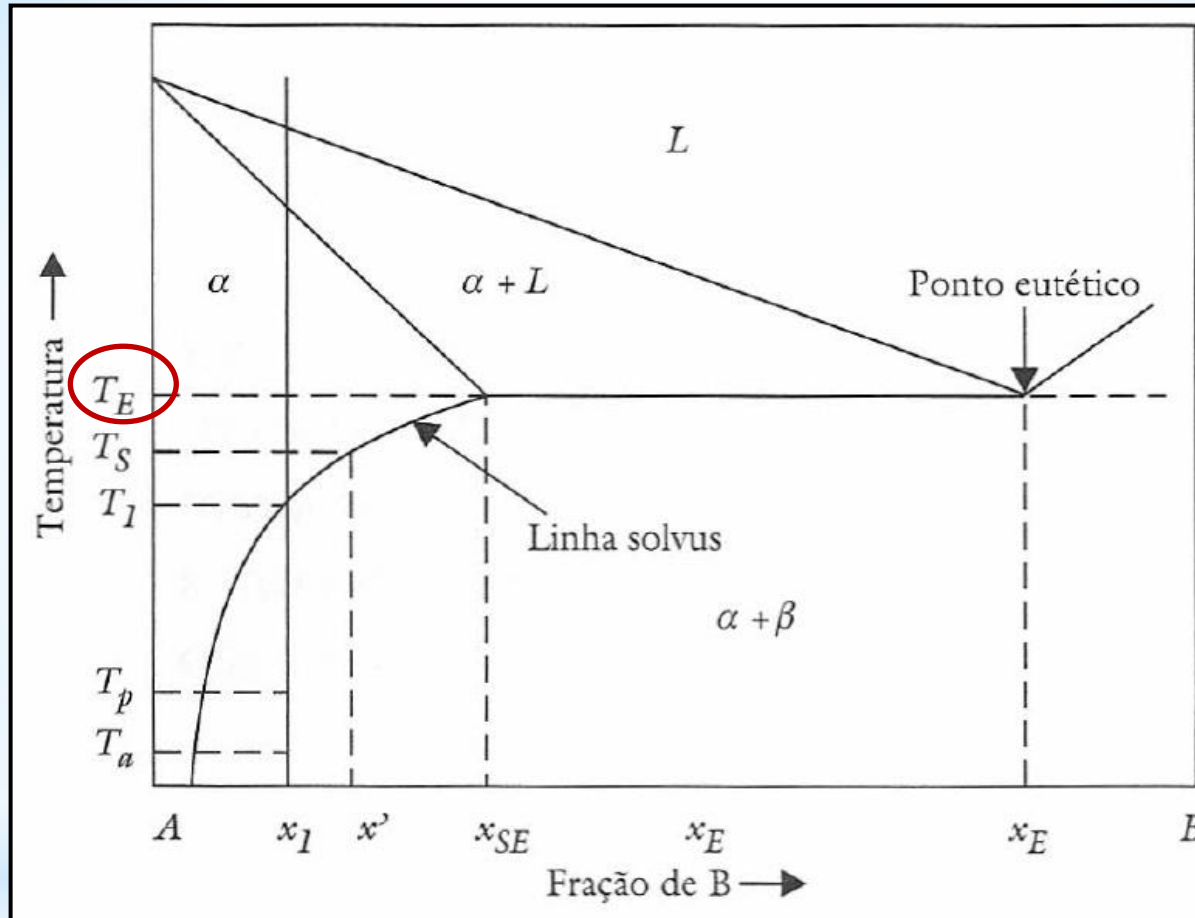
2ª. CONDIÇÃO: APENAS LIGAS CONTENDO $B < X_{SE}$ (MENOR QUE O EUTÉTICO)

LIGAS COM TEOR DE B MAIOR, DURANTE O AQUECIMENTO:



(Fonte: Rezende)

SOLUBILIZAÇÃO



(Fonte: Rezende)

DEVE-SE FAZER A **SOLUBILIZAÇÃO ABAIXO DE T_E** – ESPECIALMENTE PARA **PEÇAS FUNDIDAS** - ESPAÇO INTERDENDRÍTICO PODE CONTER EUTÉTICO (REDISTR. SOLUTO NA SOLID.) – **ATINGE x_{SE}** – **FUNDE EM T_E** .

**APÓS SOLUBILIZAÇÃO EM
TEMPO SUFICIENTE DE
PATAMAR**

**TEMPERATURA DE
SOLUBILIZAÇÃO**

RESFRIAMENTO BRUSCO

**TEMPERATURA DE DIFUSÃO
DESPREZÍVEL - T_{AMBIENTE}**

**PROMOVER A FORMAÇÃO DE SOLUÇÃO
SÓLIDA SATURADA DE ÁTOMOS DE B**

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

PRECIPITAÇÃO

SOLUÇÃO SUPERSATURADA

**FORMAÇÃO DE FASES
METAESTÁVEIS
INTERESSANTES**

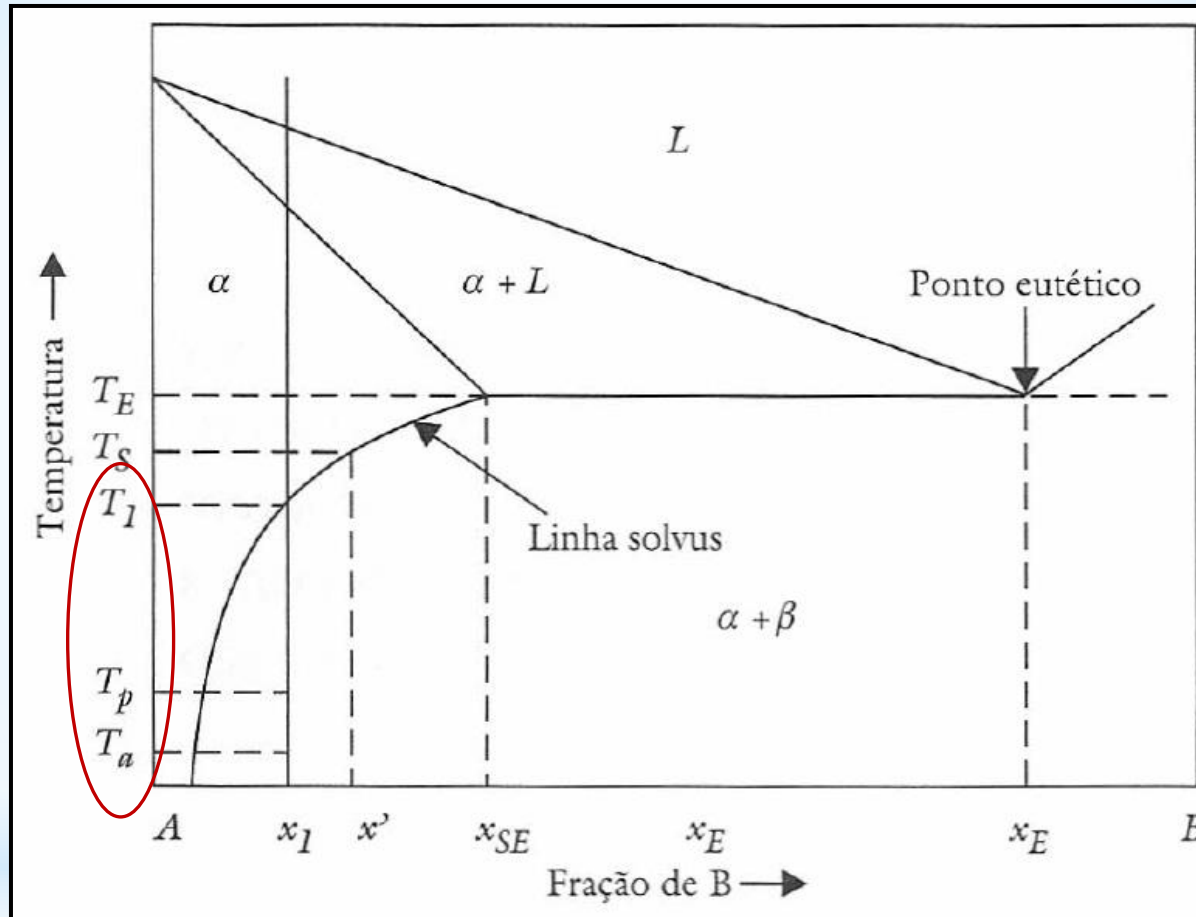
**TRATAMENTO ISOTÉRMICO
EM T_p - LONGOS PERÍODOS
(ENVELHECIMENTO)**

**Formação da segunda fase
↓
partículas finas dispersas
homogeneamente no interior
dos grãos**

**RESFRIAMENTO BRUSCO
EVITAR O CRESCIMENTO
EXCESSIVO DOS PRECIPITADOS**

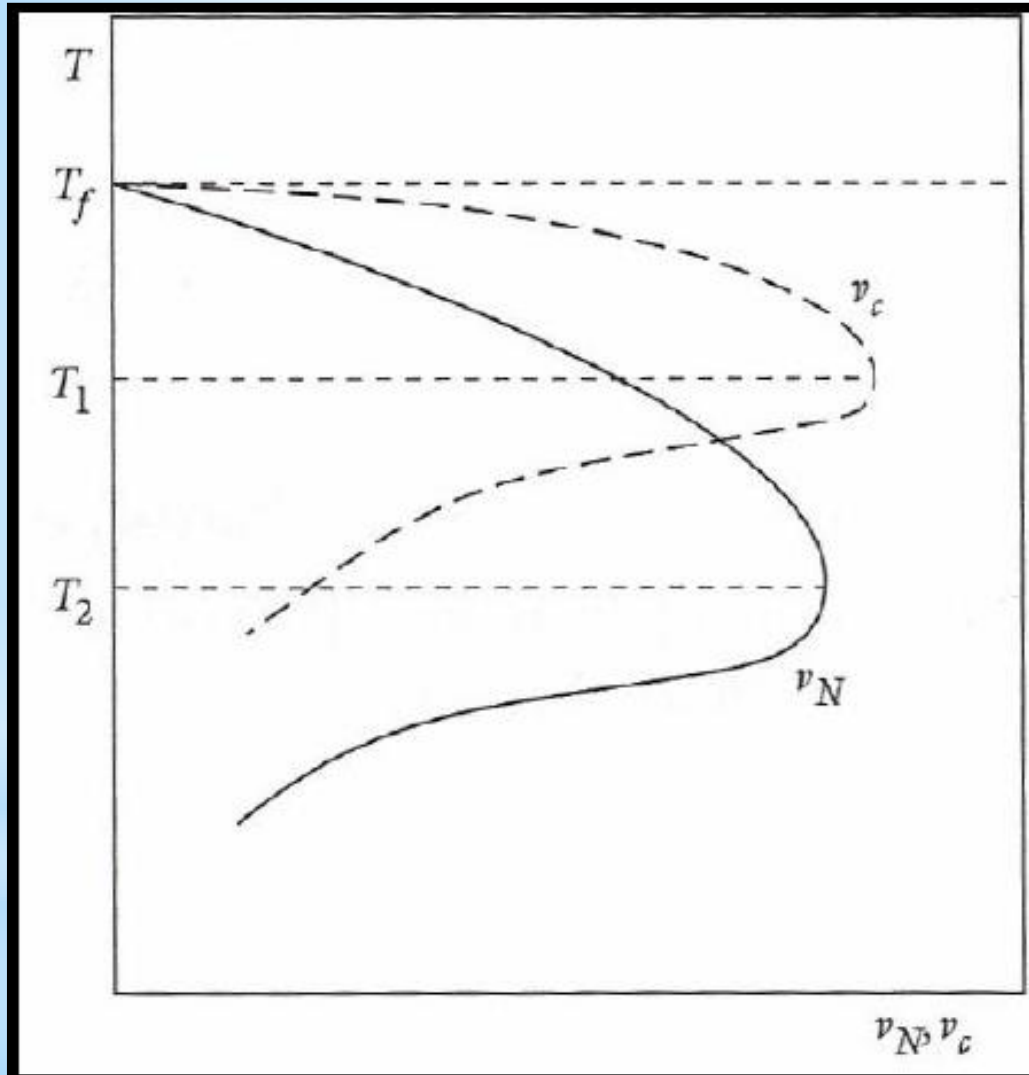
Prof.Dr. José Benedito Marcomini

PRECIPITAÇÃO



$$T_a < T_p \ll T_1$$

PRECIPITAÇÃO



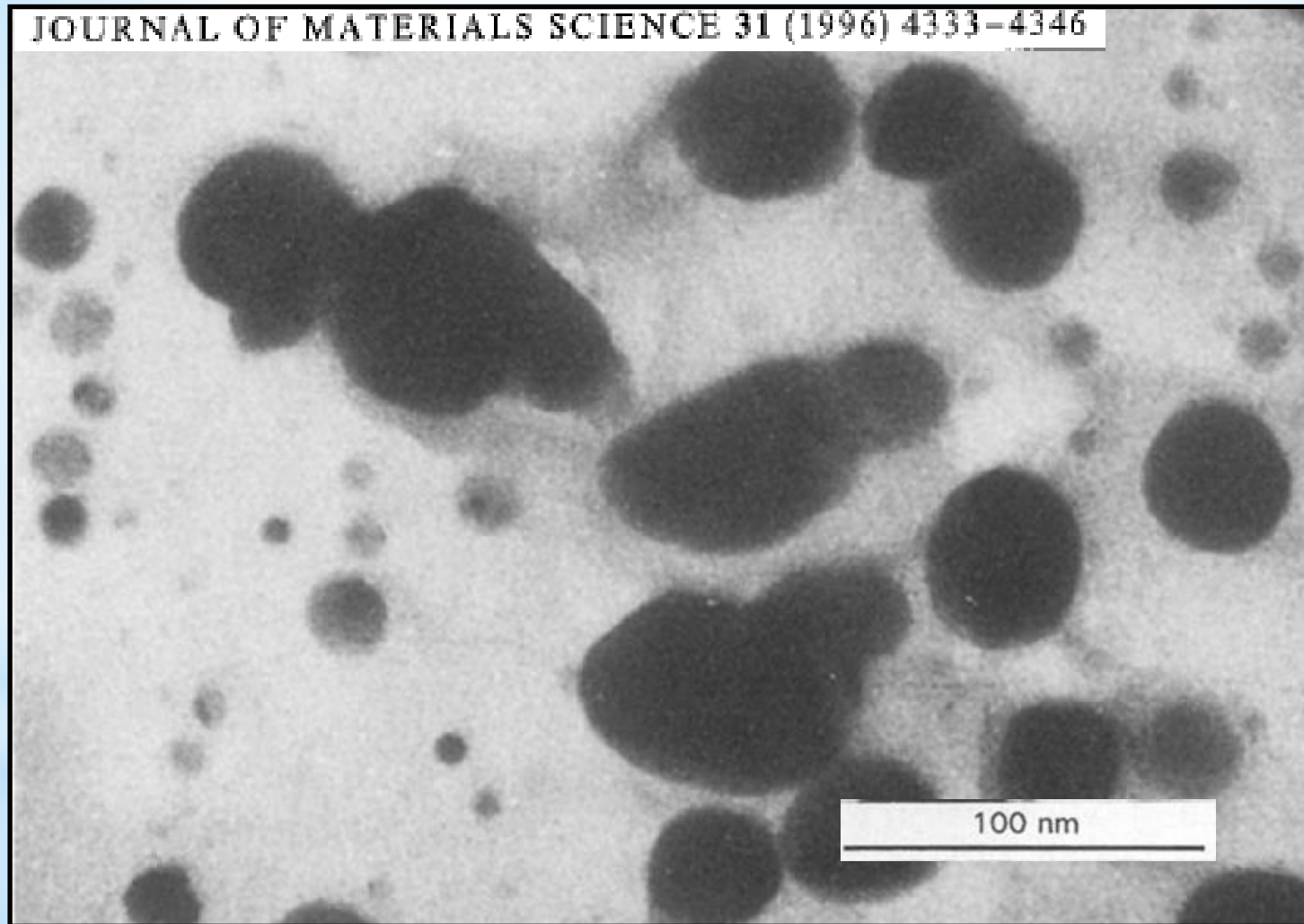
$$T_P : V_{\text{nucleação}} > V_{\text{crescimento}}$$

T_P Baixa o suficiente para não ter difusão de longo alcance – evitar precipitação em CG.

Para algumas ligas:
 $T_P = T_a$

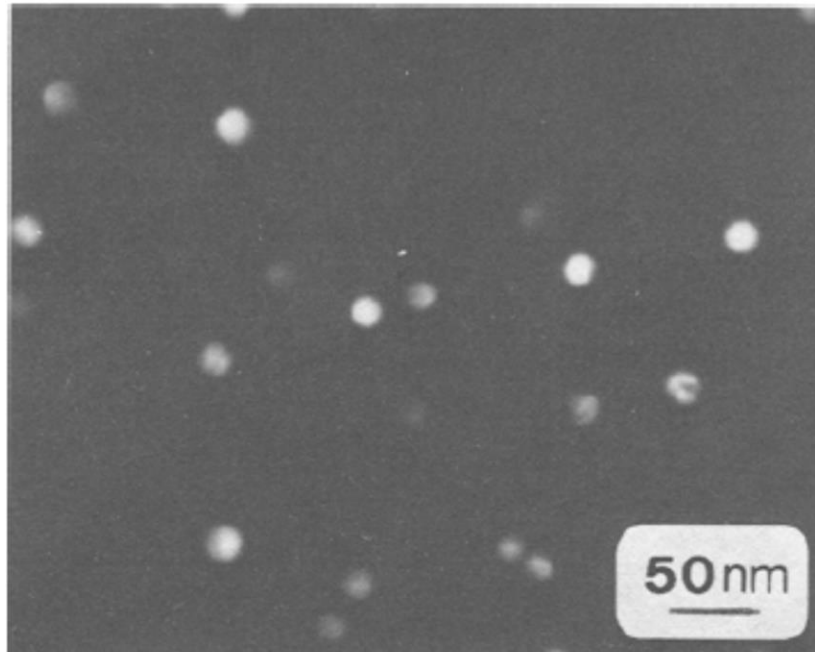
(Fonte: Rezende)

PRECIPITADOS – MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE TRANSMISSÃO (MET)

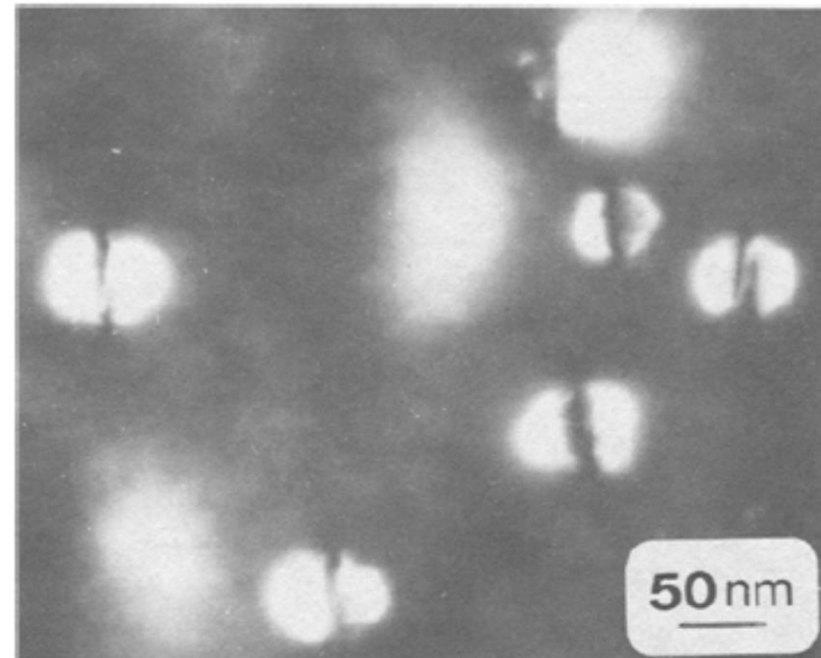


Prof.Dr. José Benedito Marcomini

PRECIPITADOS DE 2ª FASE -MET



(a)



(b)

Fig. 8—TEM micrographs documenting coarsening of cubic $L1_2$ Al_3Zr after 20 and 200 h of aging at 425 °C.

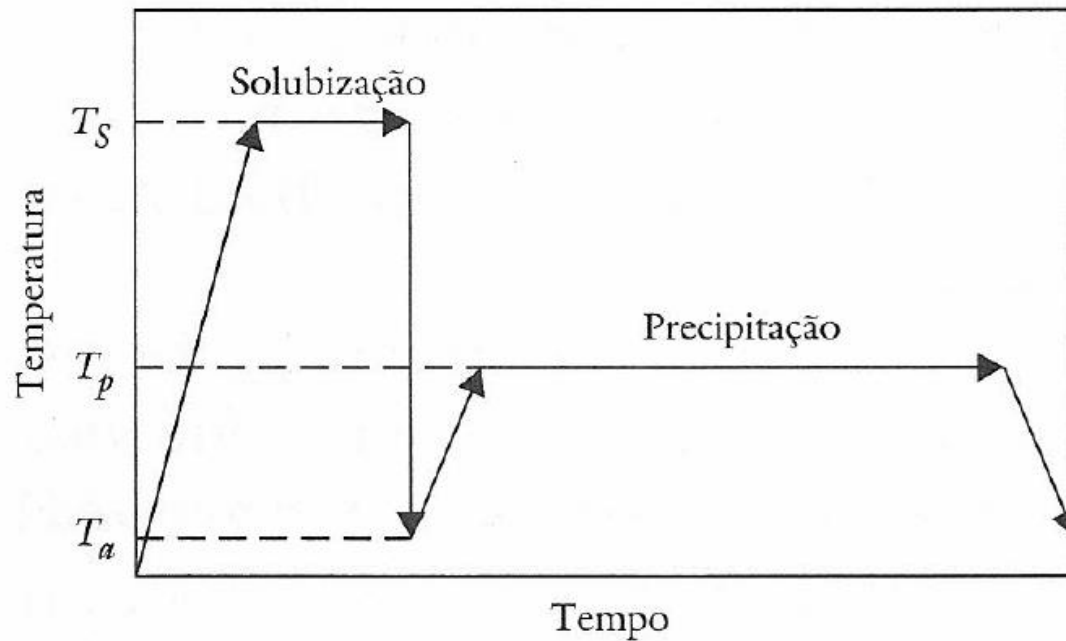
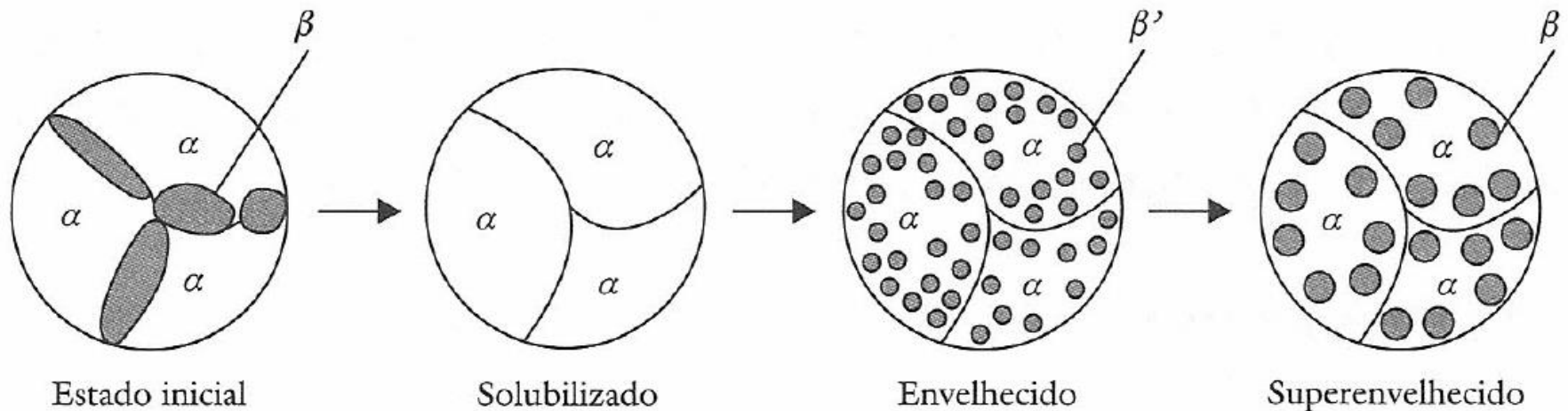


Figura 9.3 — Representação esquemática das etapas de solubilização e precipitação apresentando as temperaturas e os intervalos de tempo relativos a cada etapa

(Fonte: Rezende)



TEORIA DO ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO

PARTÍCULAS COERENTES



TENSÕES INTERNAS



DISCORDÂNCIAS

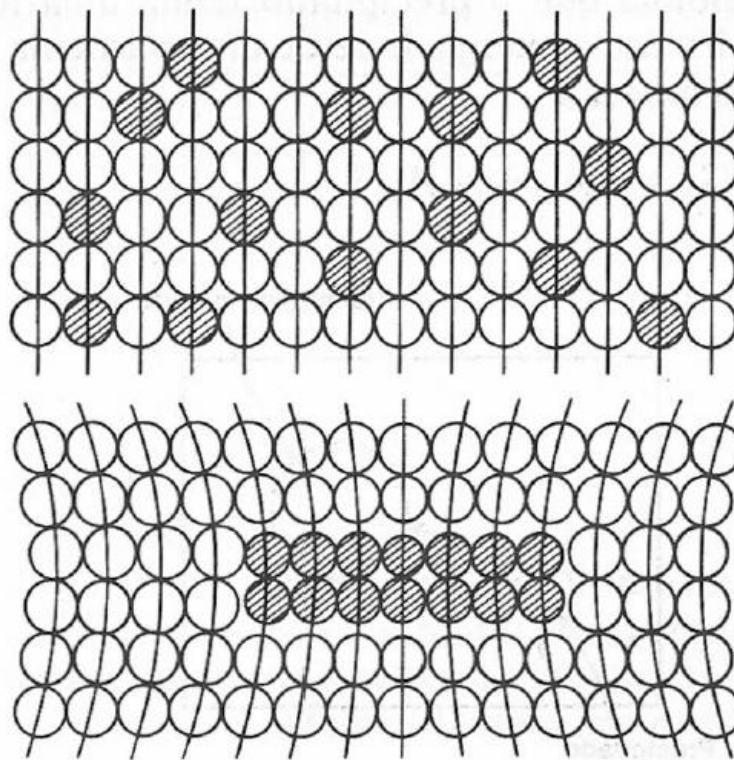
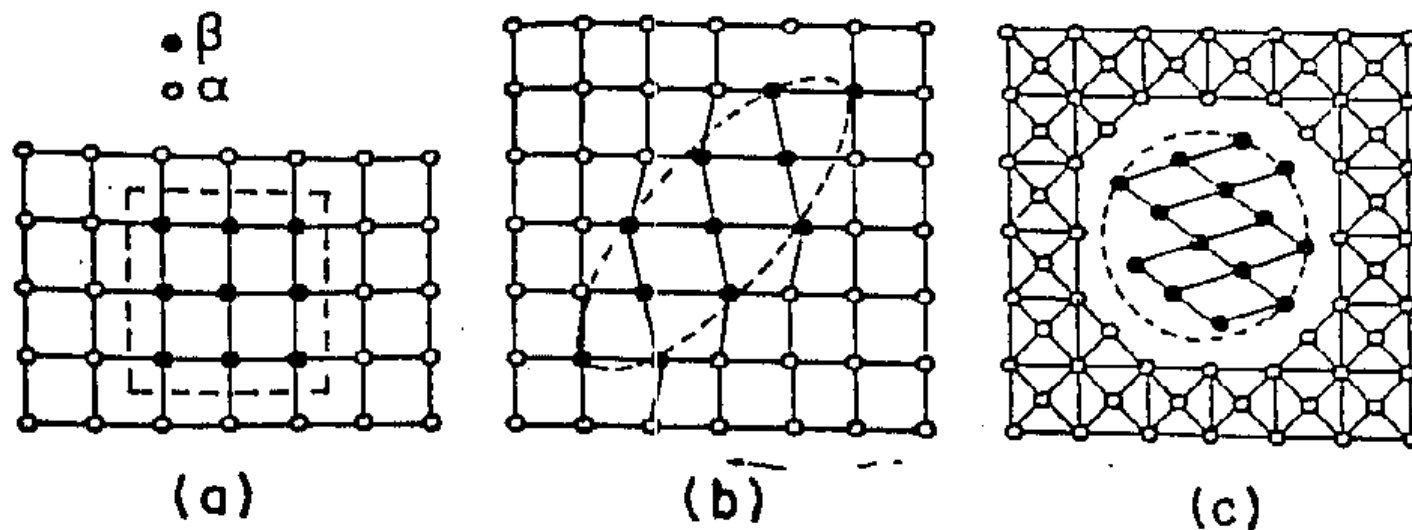


Fig. 9.13 Coerência. A figura superior representa uma solução sólida supersaturada de átomos de *B* (círculos escuros) em uma matriz de átomos de *A* (círculos claros). A figura inferior mostra um precipitado coerente, formado pelo agrupamento de átomos de *B*.

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

(Fonte:Reed-Hill)

TEORIA DO ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO



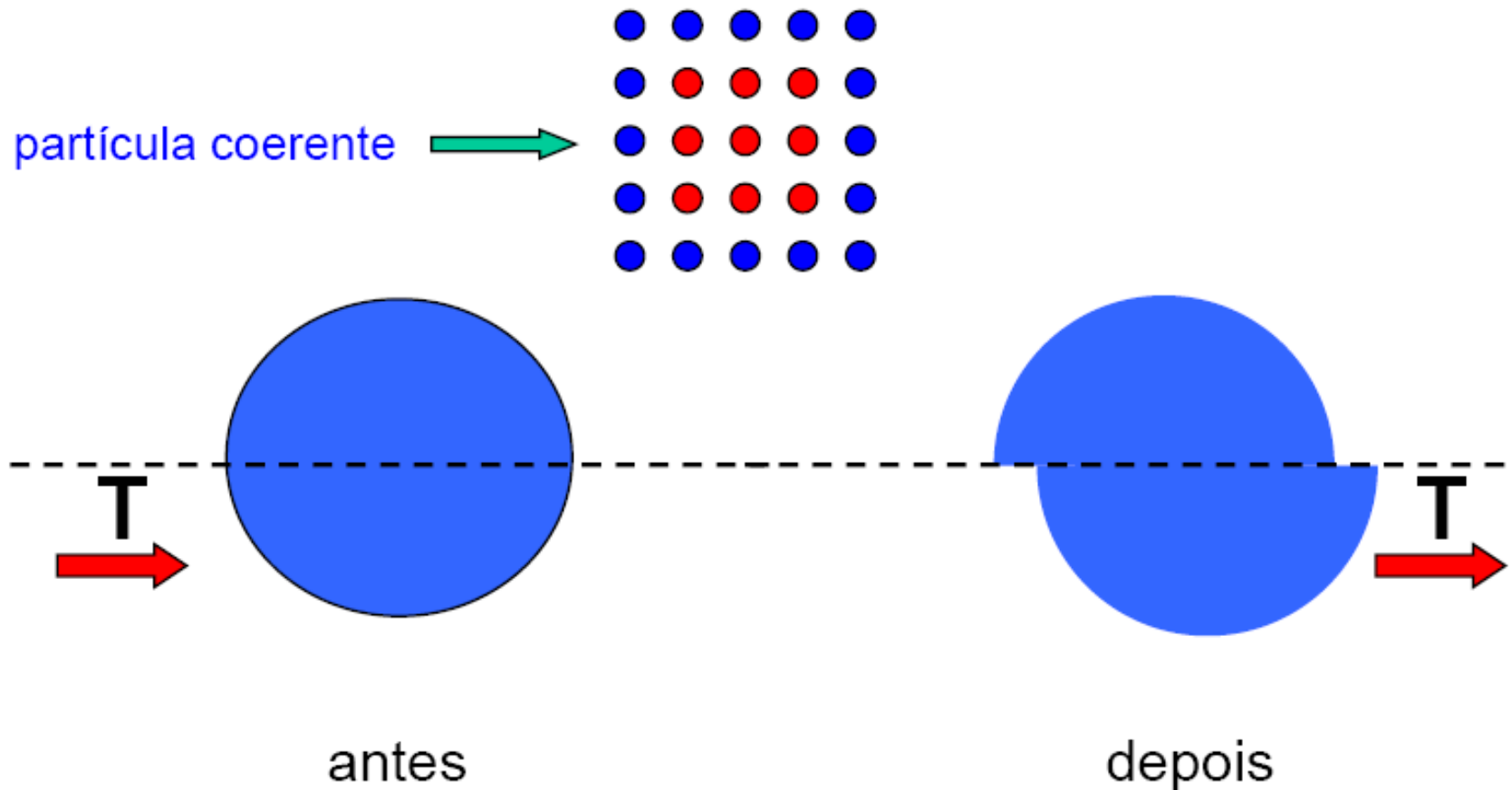
a - COERÊNCIA
b - SEMICOERÊNCIA
c - INCOERÊNCIA

(Fonte: Rezende)

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

TEORIA DO ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO

➤ **Endurecimento por precipitação:** se as partículas forem coerentes as discordâncias podem cisalhá-las.



TEORIA DO ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO

**PARTÍCULAS COERENTES COM DIMENSÃO DE
ALGUNS ÁTOMOS**



**O PLANO DE DESLIZAMENTO CONTÉM A
DISCORDÂNCIA E A PARTÍCULA**



DEVIDO Á TENSÃO EM TORNO DO PRECIPITADO



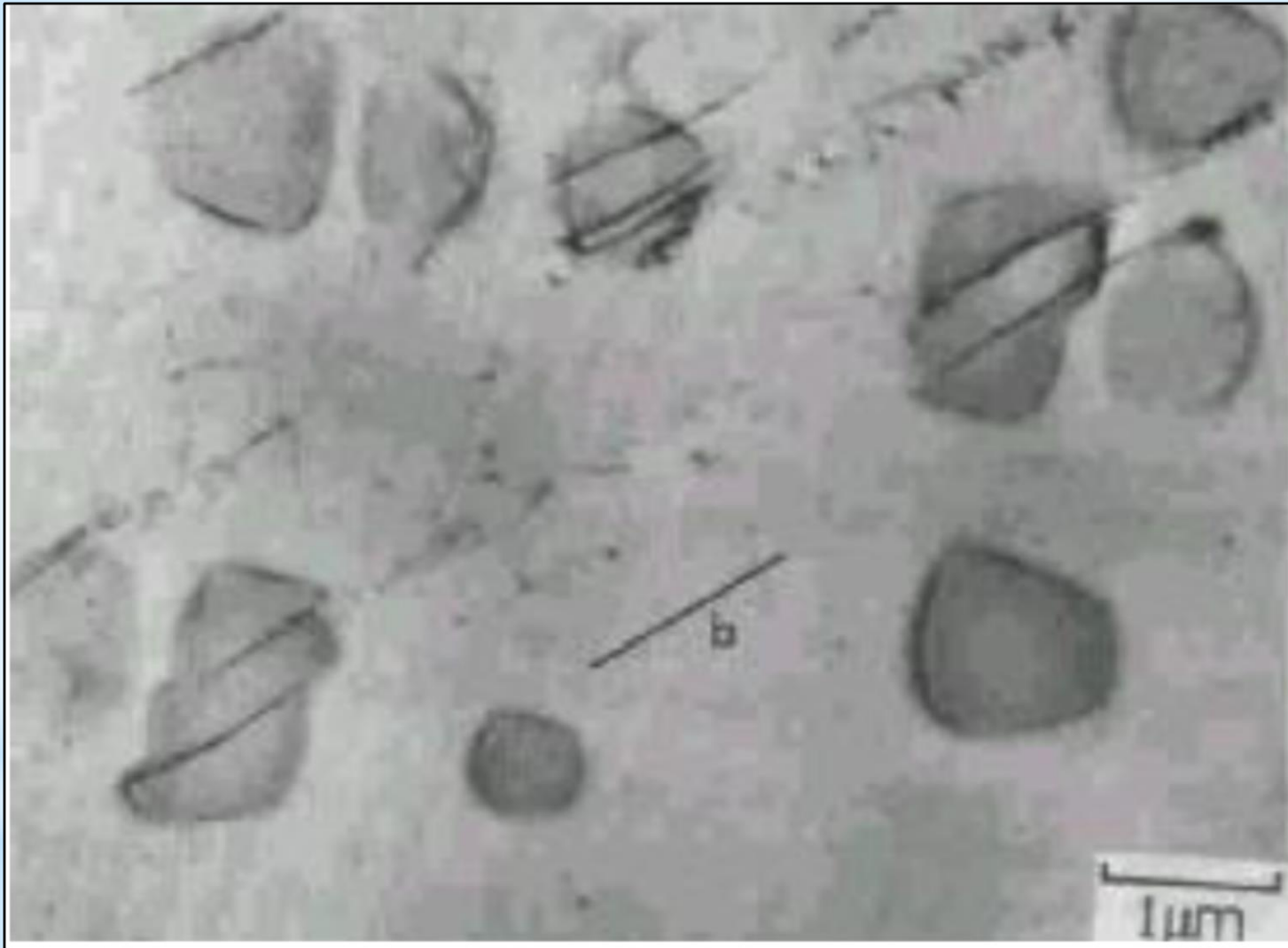
**AUMENTO DA TENSÃO APLICADA PARA A
DISCORDÂNCIA ATRAVESSAR A PARTÍCULA**



DEFORMAÇÃO

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

PRECIPITADOS DE 2ª FASE CORTADOS- MET



Prof.Dr. José Benedito Marcomini

TEORIA DO ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO

O SEGUNDO MECANISMO OCORRE QUANDO A TENSÃO NECESSÁRIA PARA A DISCORDÂNCIA ATRAVESSAR O PRECIPITADO É MUITO ALTA E É CARACTERÍSTICO DE PRECIPITADOS METAESTÁVEIS INTERMEDIÁRIOS.

MECANISMO DE OROWAN (1948)

ANÉIS DE DISCORDÂNCIA EM TORNO DOS PRECIPITADOS

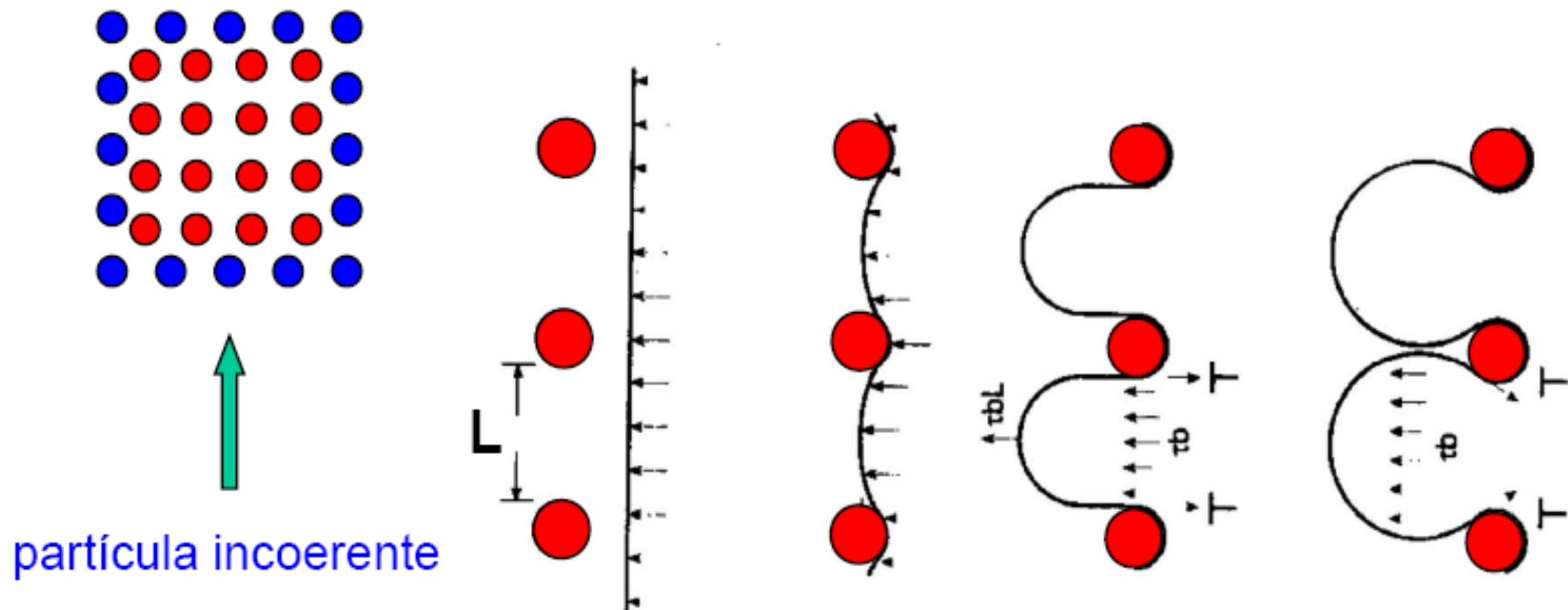
PRÓXIMA DISCORDÂNCIA ENFRENTA OS ANÉIS DA 1ª.

MAIOR ENCRUAMENTO DURANTE A DEFORMAÇÃO
MAIOR AUMENTO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

TEORIA DO ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO

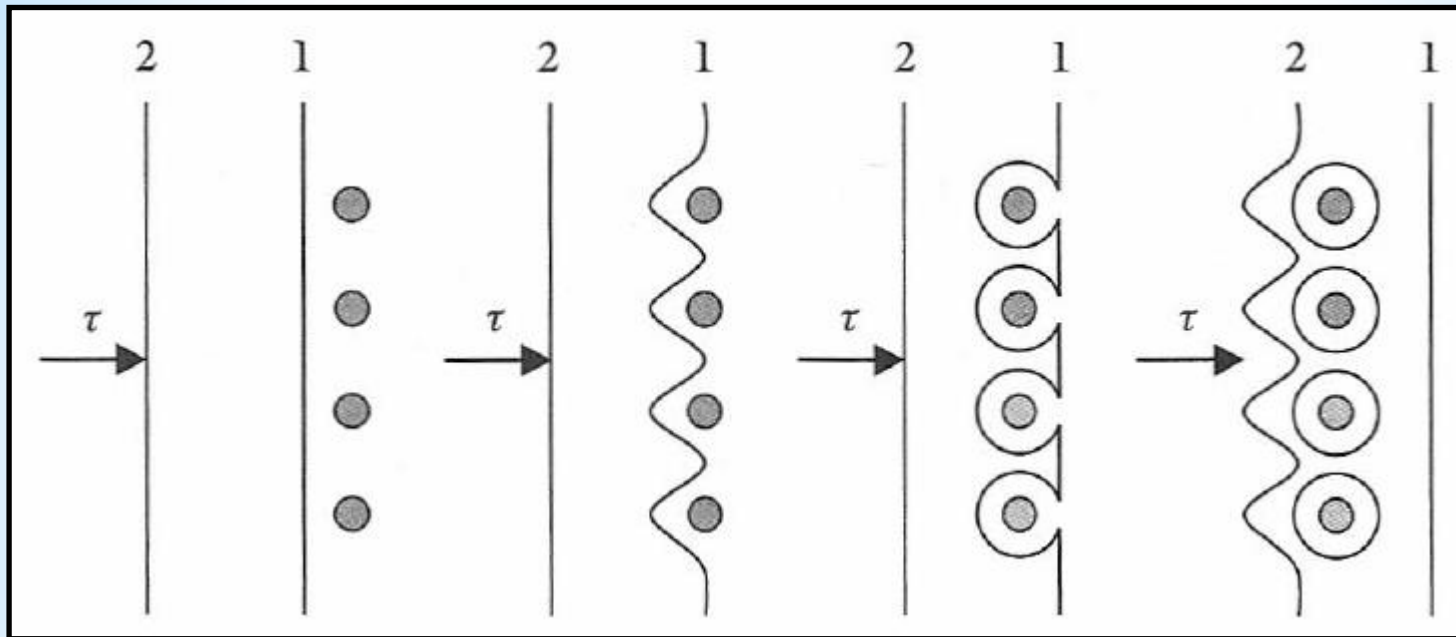
➤ **Endurecimento por precipitação:** se as partículas forem incoerentes as discordâncias devem ultrapassá-las.



Modelo de Orowan:

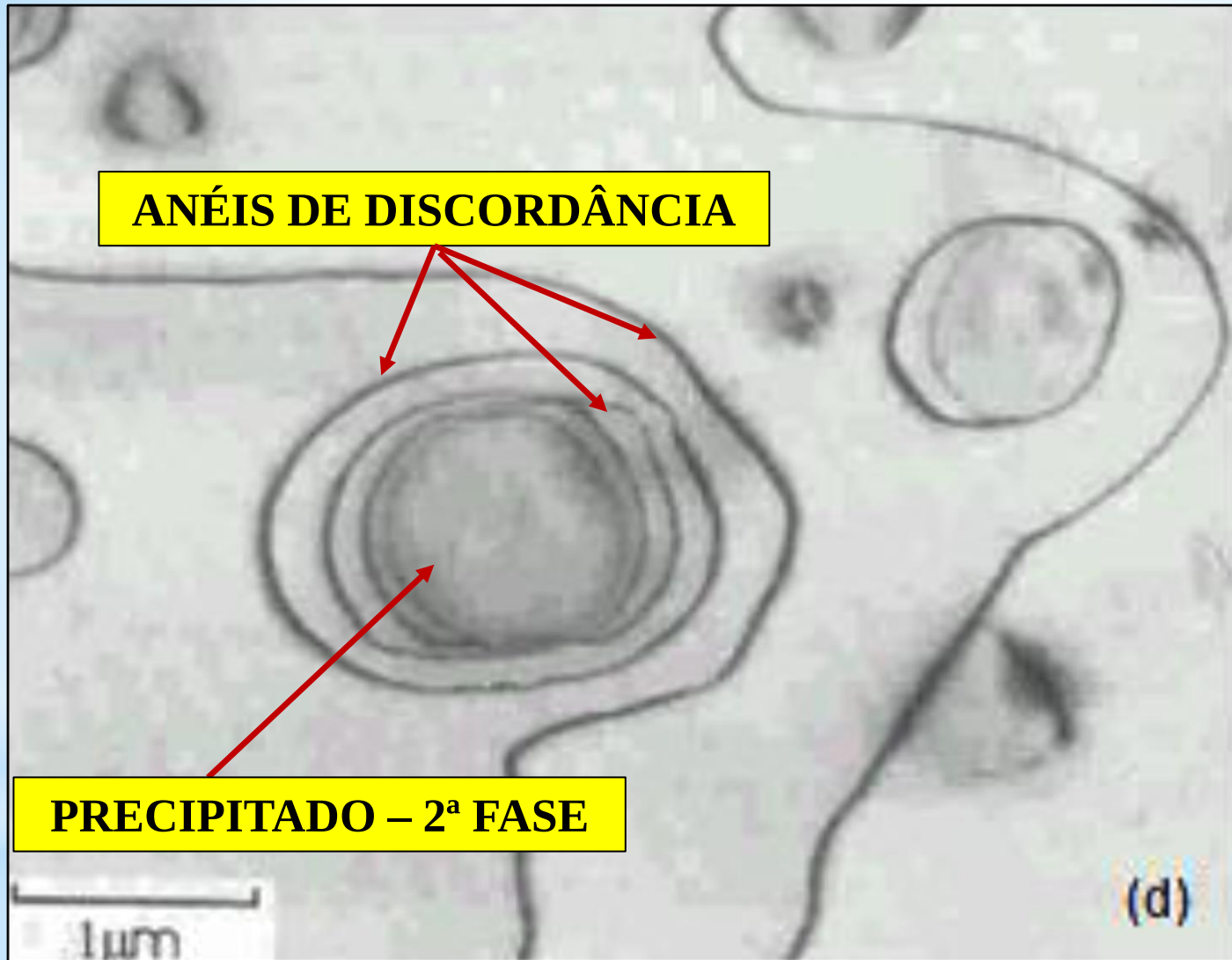
$$\Delta\sigma_p = \frac{G \cdot b}{L}$$

TEORIA DO ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO



- QUANTO MENOR O ESPAÇAMENTO, MAIOR O EFEITO DO ENDURECIMENTO;
- ALGUMAS LIGAS, O AUMENTO DO LIMITE DE ESCOAMENTO É DE 5 VEZES;
- NO SUPERENVELHECIMENTO, O AUMENTO DOS PRECIPITADOS LEVA AO AUMENTO DA DISTÂNCIA ENTRE ELES- A RESISTÊNCIA CAI.

MECANISMO DE OROWAN-MET



Prof.Dr. José Benedito Marcomini

FORMAÇÃO DOS PRECIPITADOS DE 2ªFASE

Fases metaestáveis intermediárias depende:

- **Tipo e teor** dos elementos na composição da liga
- **Temperatura da precipitação: difusão e velocidades de nucleação e crescimento.**
- **Algumas fases metaestáveis intermediárias podem não se formar,** se a precipitação for realizada a uma **temperatura mais alta** que a de sua precipitação;
- **Zonas iniciais** de aglomerados de solutos (coerentes) têm **características em comum** para a **maioria das ligas.**

FORMAÇÃO DOS PRECIPITADOS DE 2ªFASE

Zonas iniciais de aglomerados de solutos (coerentes):

- Apresentam dimensões da **ordem de 20 a 40 angstroms** e **não podem ser observadas por microscopia óptica**;
- São denominadas zonas de **Guinier- Preston (GP)** por terem sido detectadas pela primeira vez pelas técnicas de difração de raio X, por **A. Guinier, na França, e G. D. Preston, na Inglaterra**, realizando trabalhos independentes na década de 30 do século XX;

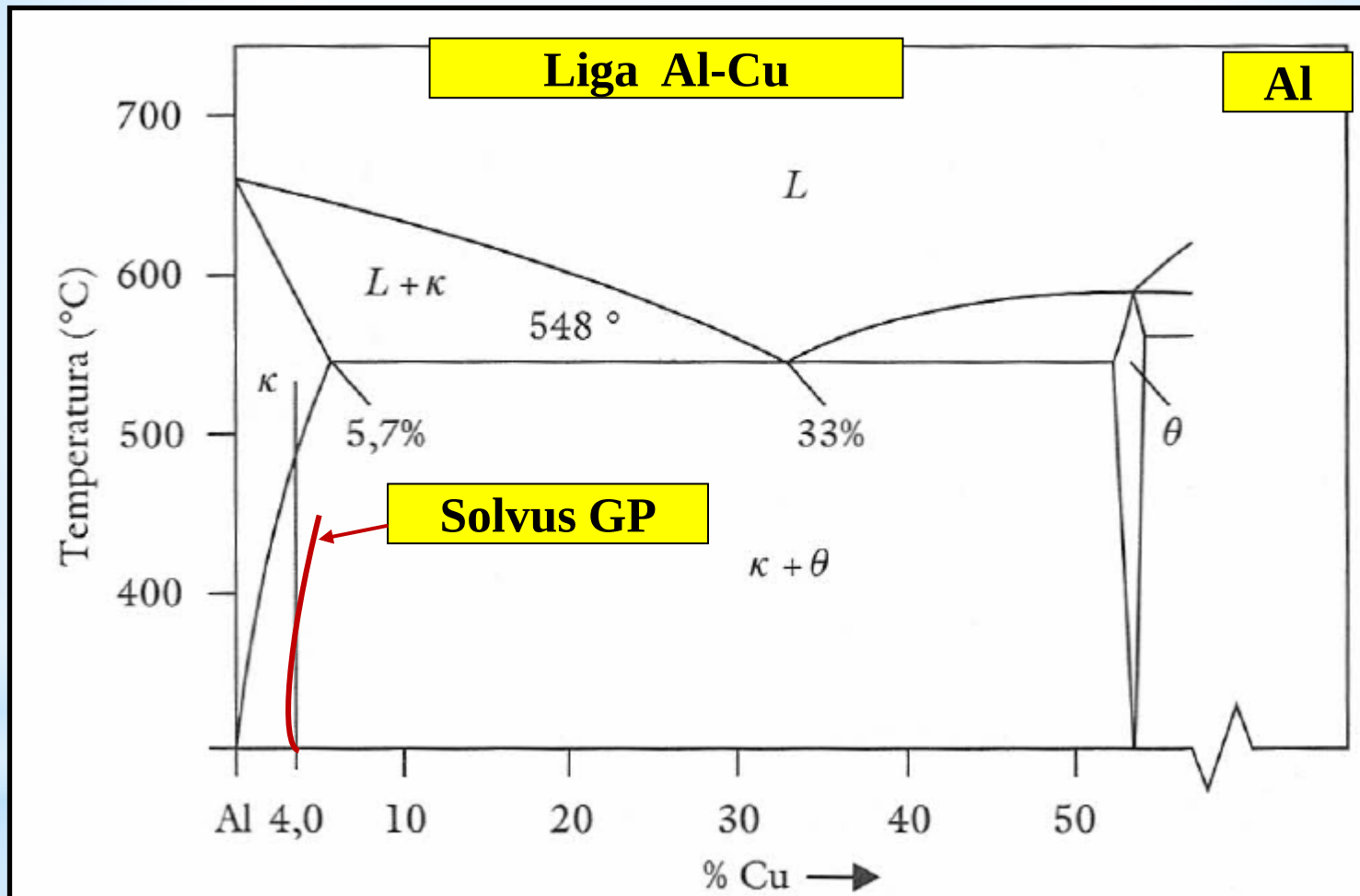
Zonas GP responsável pelo endurecimento

- 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);
- As fases **precipitadas** são altamente **coerentes** com a matriz, ou seja, é muito **difícil** determinar a sua estrutura mesmo com microscopia eletrônica de alta resolução (**HRTEM**);
- Por **exemplo**: no sistema **Al-Cu**, os átomos de **Cu** precipitam **paralelos** aos planos **{100}** da matriz de alumínio, então o **contraste** entre as fases depende muito da **espessura** da amostra.

FORMAÇÃO DOS PRECIPITADOS DE 2ªFASE

- Com a **continuidade** do processo, as zonas (partículas) **maiores crescem** com o **desaparecimento** de zonas **menores** (**Ostwald Ripening**);
- Essas zonas são estáveis em temperaturas mais baixas;
- Existe uma **temperatura limite**, acima da qual os átomos de **soluto** que compõem as zonas se **dissolvem** novamente na rede cristalina da matriz;
- Para uma **liga** com uma determinada **composição**, essa temperatura-limite é denominada **temperatura solvus da zona GP** e é bem **menor** que a temperatura **solvus** da liga.

FORMAÇÃO DOS PRECIPITADOS DE 2ª FASE



Prof.Dr. José Benedito Marcomini

(Fonte:Rezende)

FORMAÇÃO DOS PRECIPITADOS DE 2ªFASE

- Fator importante na formação das zonas GPé a **concentração de vazios** na rede cristalina da solução supersaturada de soluto;
- A concentração de vazios **aumenta com a temperatura**, sendo, portanto, **alta na temperatura de solubilização**;
- **Após resfriamento brusco**, mantém alta concentração: **supersaturada de vazios**;
- **Difusão dos átomos de soluto** necessários para a formação das zonas, explica a precipitação das zonas, **para algumas ligas**, mesmo à **temperatura ambiente**.

LIGAS DE Al - Cu

FORMAÇÃO DOS PRECIPITADOS DE 2ªFASE

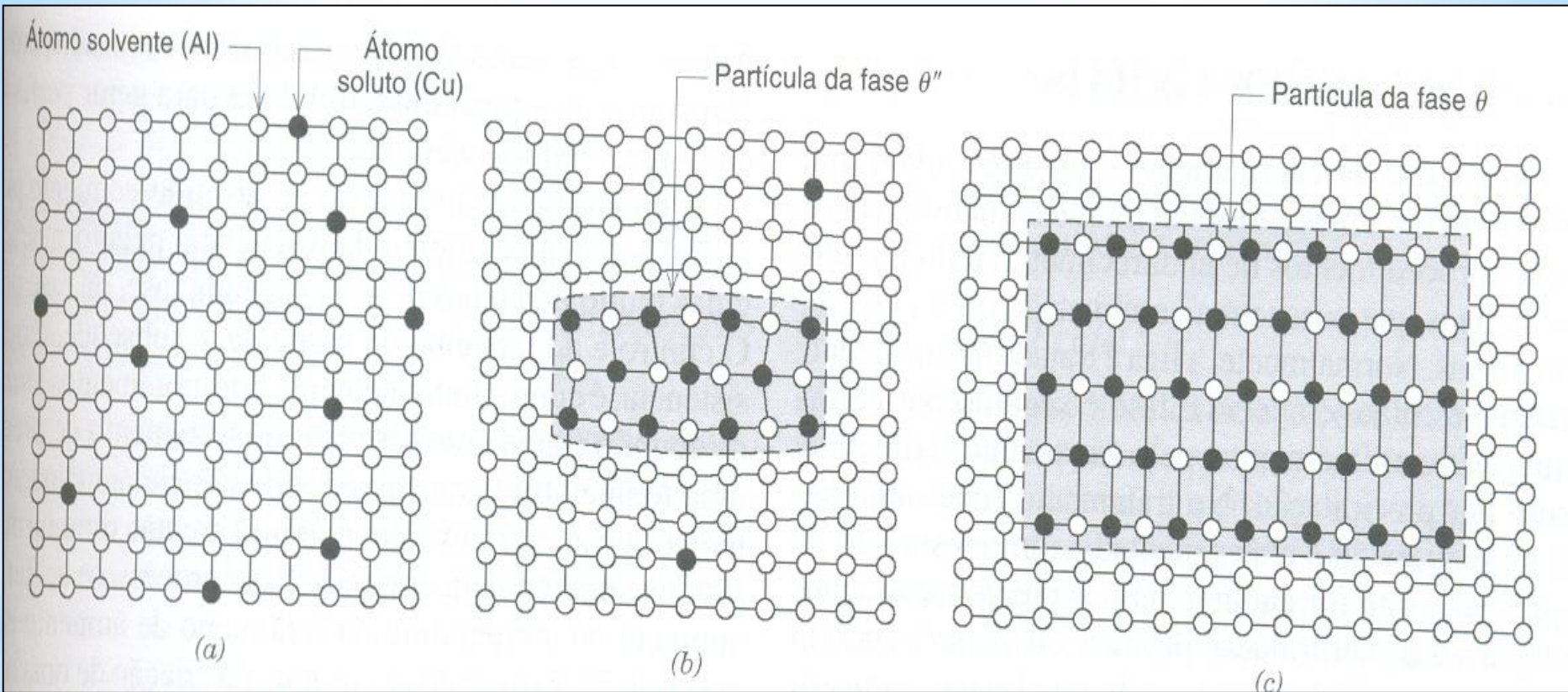
- A fase de equilíbrio **K**: matriz e é uma **solução sólida substitucional**, formada por átomos de **cobre dissolvidos na rede CFC do alumínio**;
- Fase de equilíbrio **Θ**: **CuAl₂ (tetragonal)**;
- **T_s = 520°C** – só a fase **K**;
- Resfriamento brusco: **K supersaturada de Cu**;
- Na precipitação: primeira zona **GP1** - **discos** de diâmetro de **100 Å** e **5 Å** de espessura nos planos **{001}** de **K**;
- Depois de um certo tempo: **GP2 ou Θ''** – **maior, tetragonal** com parâmetro de rede próxima à **CFC de K**, porém com algumas faces diferentes-**distorção**, planos **{100}** paralelos aos **{100}** de **K**;
- **GP2-menor energia, mais estável**-GP1 desaparece;

LIGAS DE Al - Cu

FORMAÇÃO DOS PRECIPITADOS DE 2ªFASE

- **GP2 ou Θ'' tem maior dureza;**
- Após intervalo de tempo maior: **Θ' - tetragonal, semicoerentes-maiores (visível em MO), menor energia de deformação elástica (ΔG), menor distorção da rede-menor dureza;**
- **Θ' e Θ'' convivem por algum tempo e depois, Θ'' desaparece;**
- Com o tempo, surge **Θ , fase de equilíbrio incoerente;**
- Quanto **maior** o teor do **soluto maior** o efeito do **endurecimento** por precipitação. **Ex:** para o caso citado, **o efeito maior** é para **4% de Cu** em comparação a **2% de Cu**.

FORMAÇÃO DOS PRECIPITADOS DE 2ª FASE



EVOLUÇÃO DOS PRECIPITADOS DE 2ª FASE

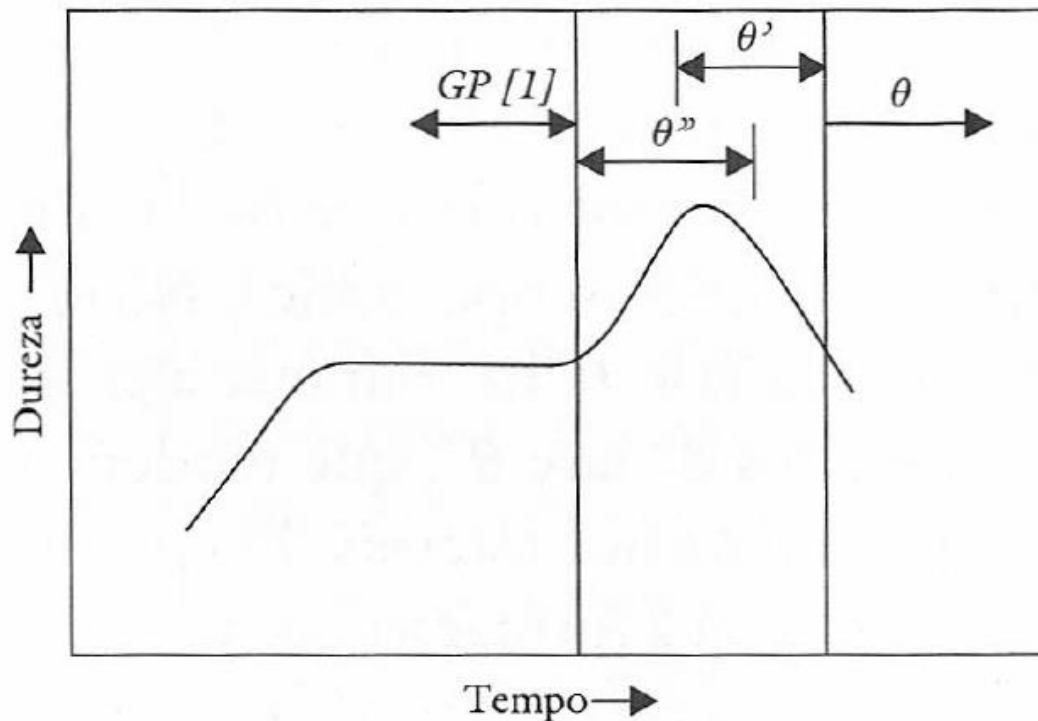


Figura 9.8 — Representação esquemática da seqüência de precipitados formados ao longo do tempo para uma liga *Al-Cu* e sua influência na dureza

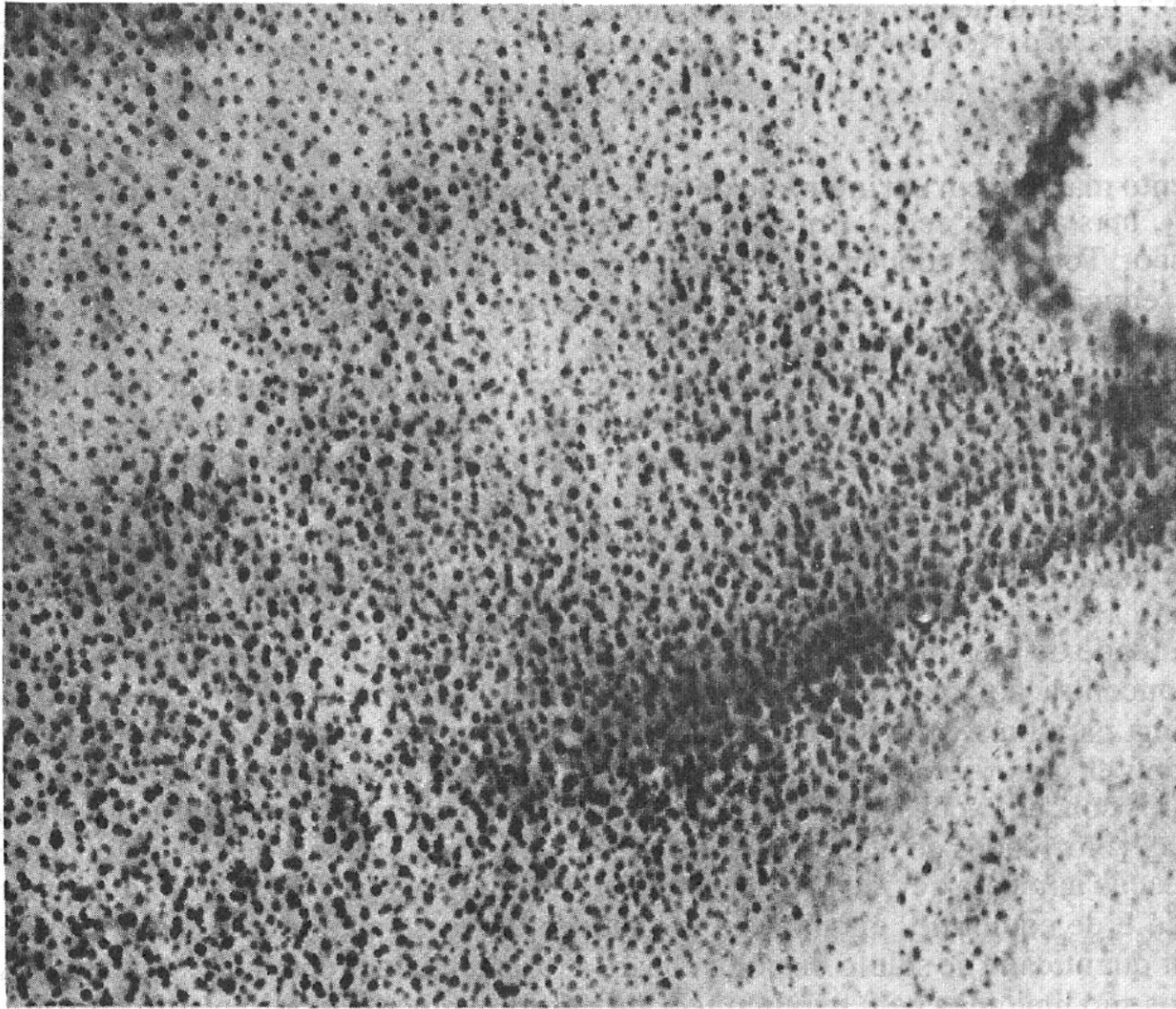
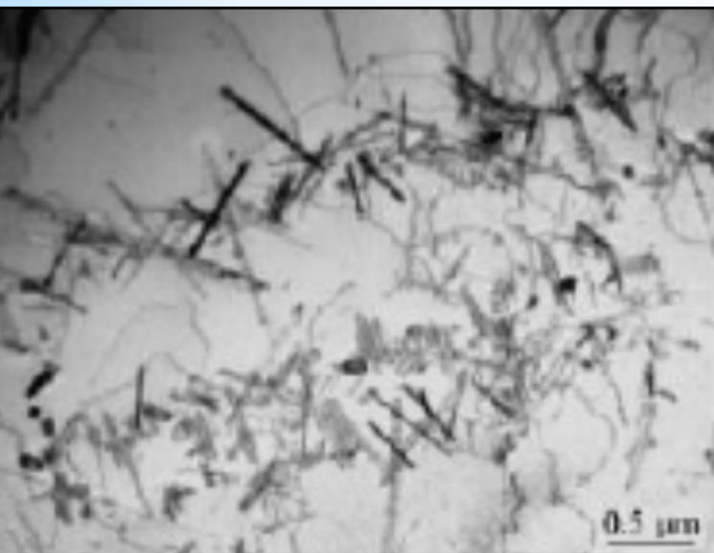
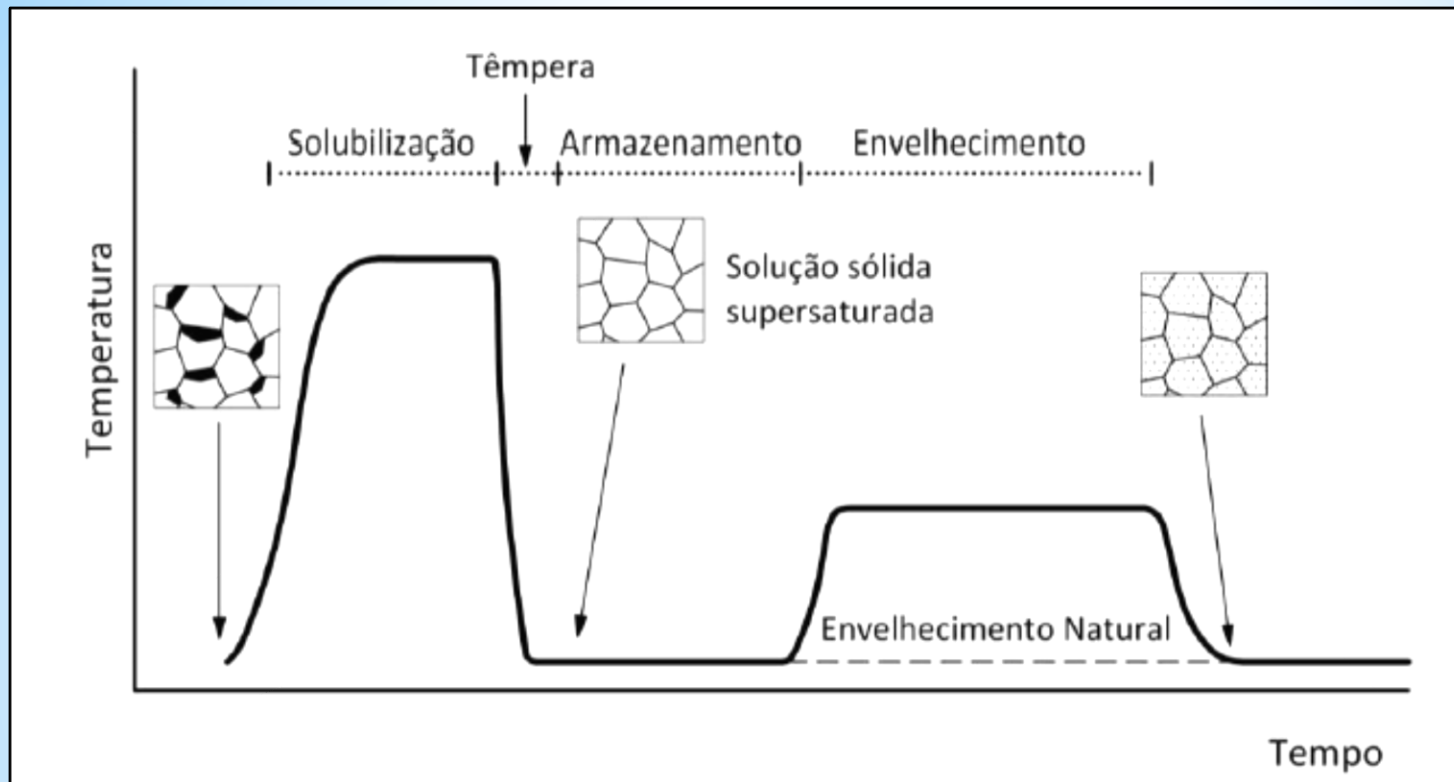


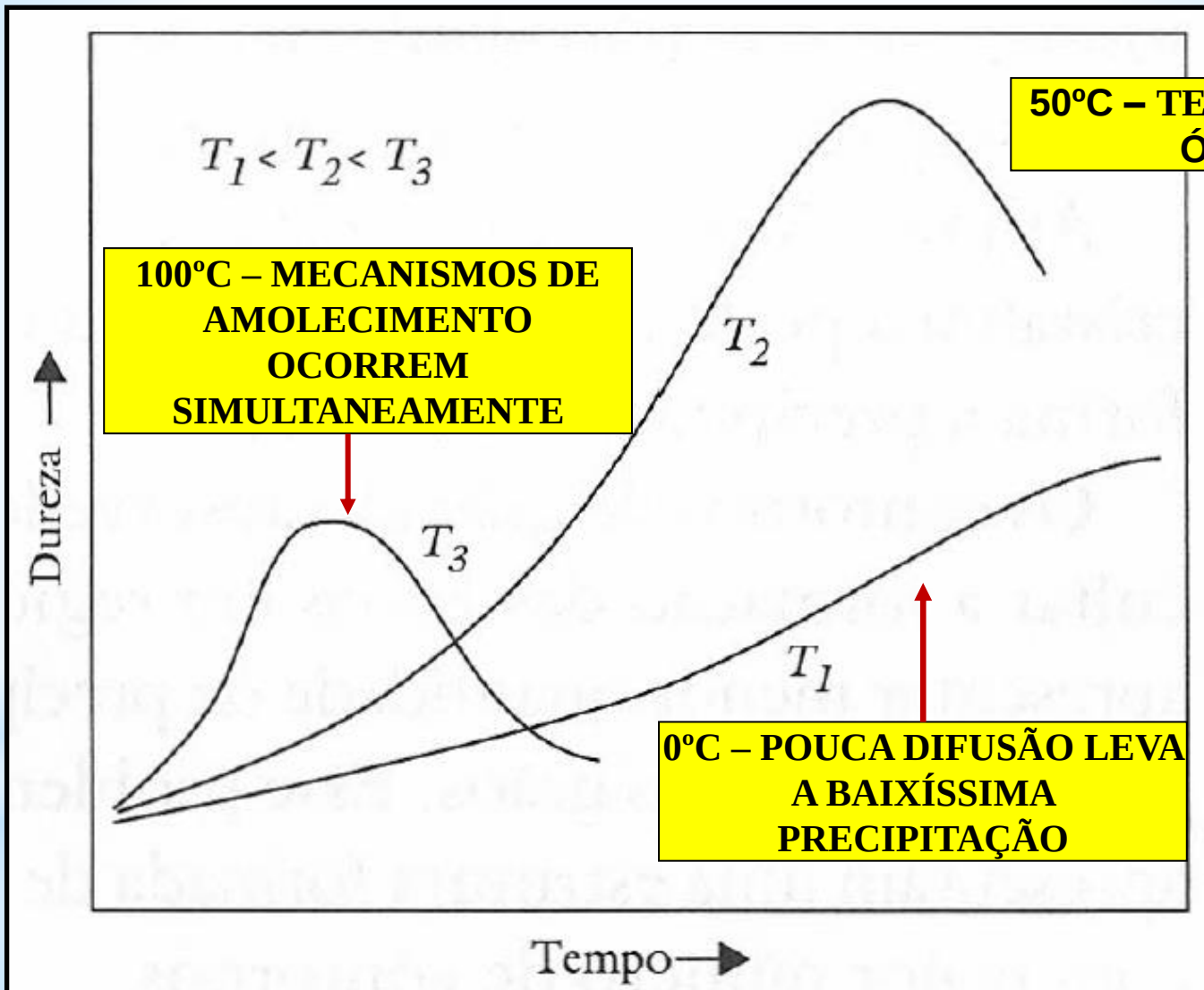
Fig. 9.8 Zonas de Guinier-Preston numa liga de alumínio com 16% de prata. (De Nicholson, R. B. e Nutting, J., *Acta Met.*, **9**, 332 [1961]. Cortesia de R. B. Nicholson.)

(Fonte:Reed-Hill)



**INTERAÇÃO ENTRE
PRECIPITADOS E
DISCORDÂNCIAS EM
LIGAS DE AL**

EFEITO DA TEMPERATURA DE PRECIPITAÇÃO



Prof.Dr. José Benedito Marcomini

(Fonte:Rezende)

EFEITO DA T_p E CONCENTRAÇÃO DE SOLUTO

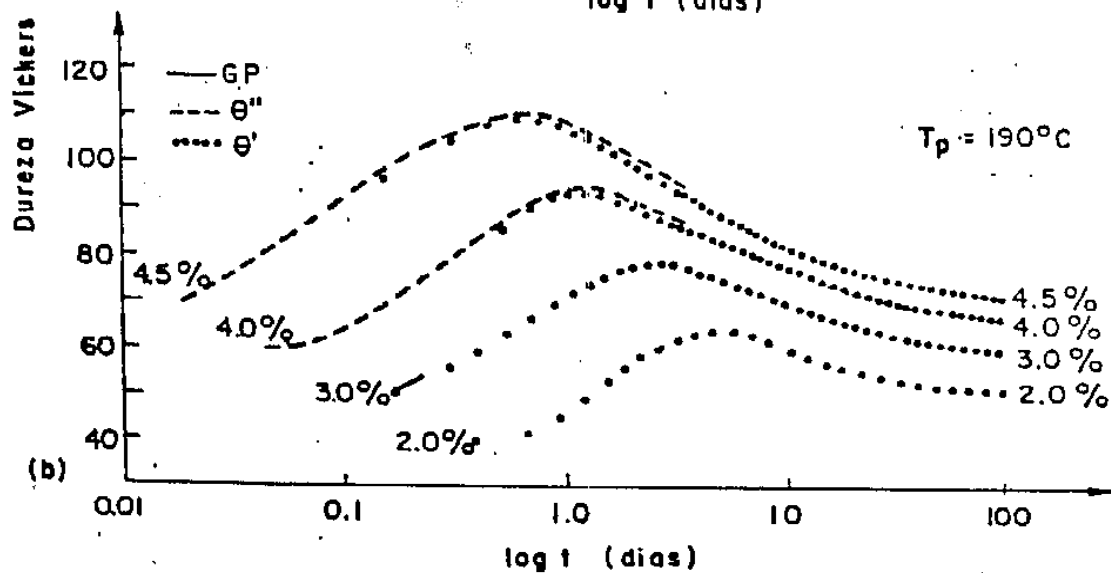
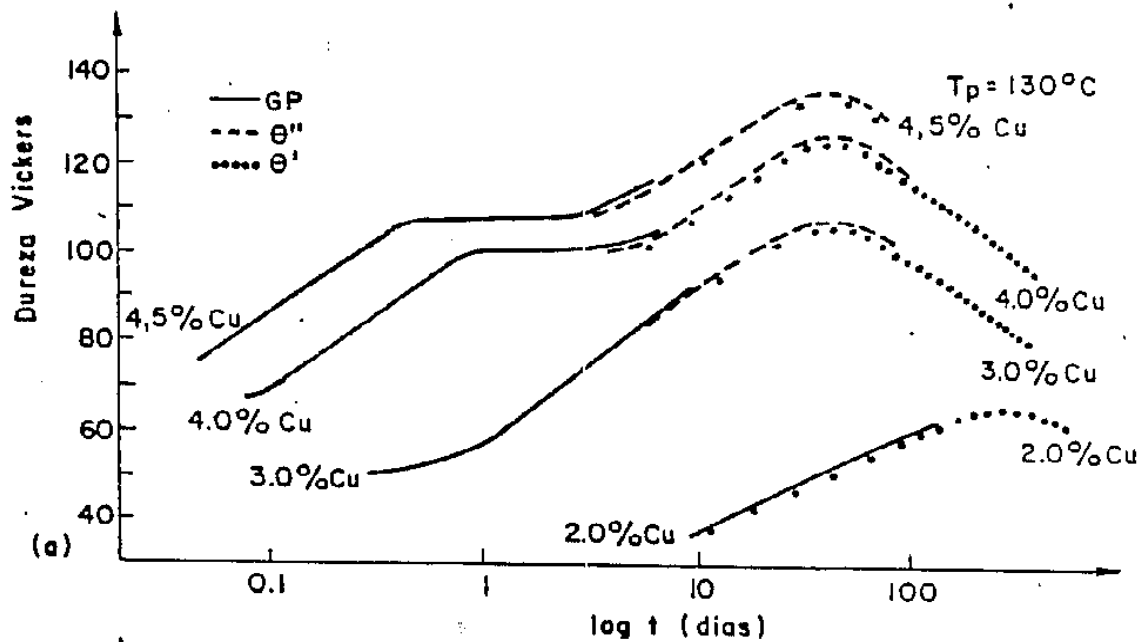
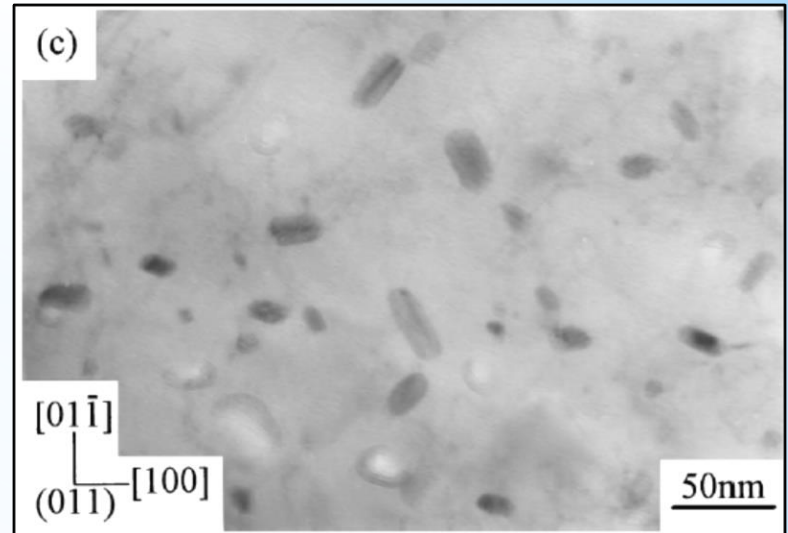
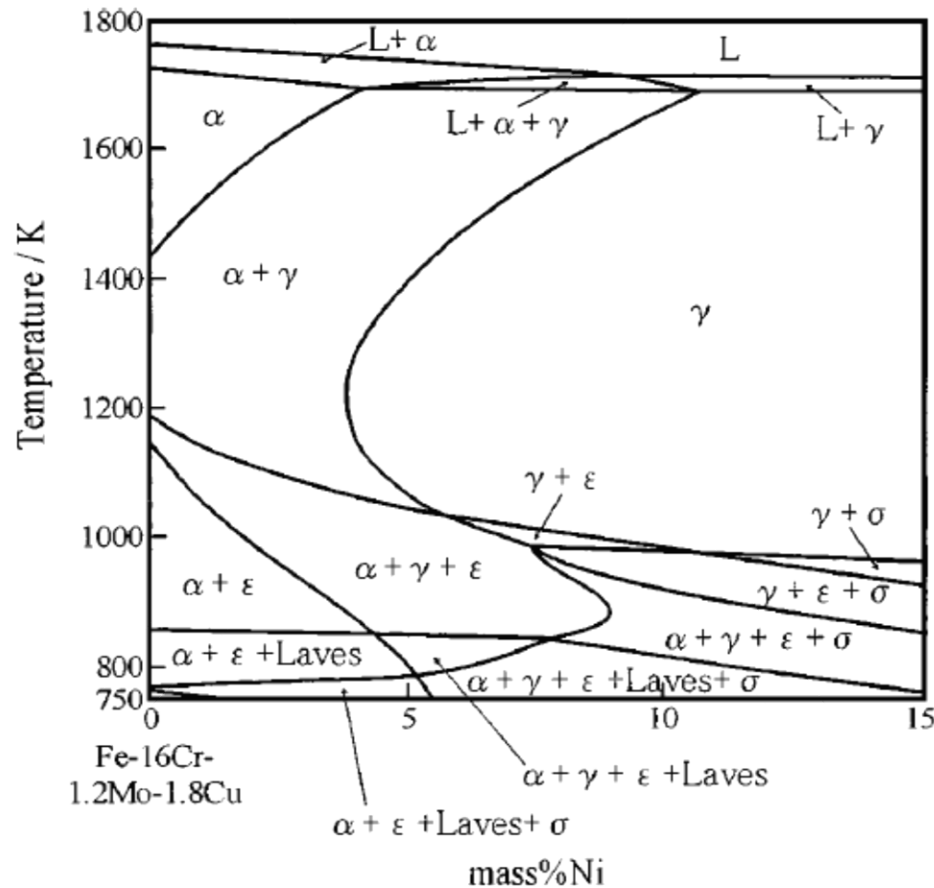


TABLE I Chemical composition of the present steel (mass%)

C	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	N	Fe
0.008	1.78	7.29	15.91	1.16	0.08	0.017	Bal.



JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE 35 (2000) 2245–2253

Aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação-PH (martensítico):
ASTM A 564-81 – tipo 630
(Villares Metals-V630)
ASTM A 705-80-tipo 630, ou
17-4 PH.

FATORES QUE AFETAM A PRECIPITAÇÃO

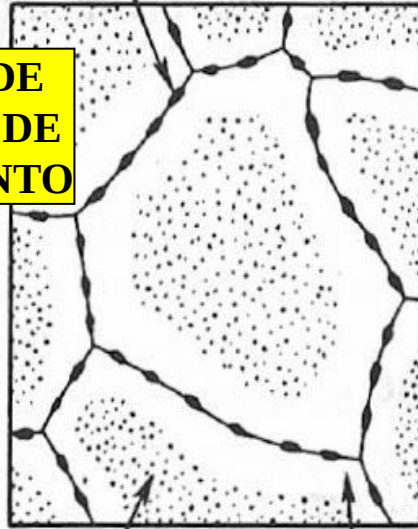
- 1. Temperatura: a precipitação depende da difusão atômica;**
- 2. Vazios: facilitam a difusão;**
- 3. Trabalho a frio: inibe a precipitação pois as discordâncias introduzidas durante a deformação podem absorver os vazios;**
- 4. Impurezas: interagem com os vazios;**
- 5. Contornos de grão: também podem absorver os vazios;**
- 6. Velocidade de resfriamento após a solubilização(nucleação heterogênea em CG);**
- 7. Recristalização durante a precipitação;**

OBS: Precipitados nem sempre são esféricos: estruturas de Widmanstätten.

FATORES QUE AFETAM A PRECIPITAÇÃO

**VELOCIDADE
MODERADA DE
RESFRIAMENTO**

Precipitado em contorno de grão

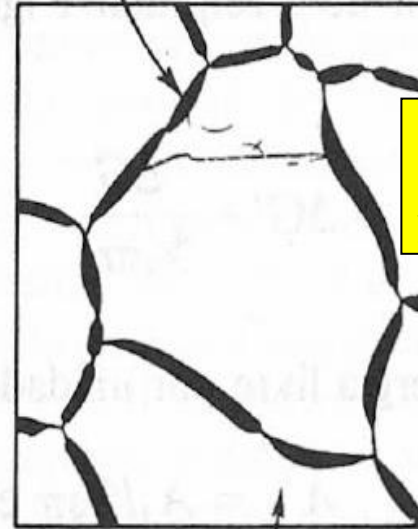


Precipitado
generalizado fino

Região
empobrecida

(A)

Precipitado em contorno de grão



Matriz empobrecida

(B)

**VELOCIDADE
BAIXA DE
RESFRIAMENTO**

Fig. 9.15 Nucleação heterogênea em contornos de grão. (A) Velocidade moderada de resfriamento pode resultar tanto em nucleação heterogênea nos contornos de grão, como nucleação homogênea no centro dos grãos. (B) Resfriamento muito lento pode acarretar precipitação apenas nos contornos de grão.

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

(Fonte:Reed-Hill)

CONDIÇÕES PARA A APLICAÇÃO DO ENVELHECIMENTO

Nem todas as ligas podem ser envelhecidas.

Quatro condições principais :

1.A liga deve possuir campo monofásico em temperatura elevada e um campo bifásico em baixa temperatura;

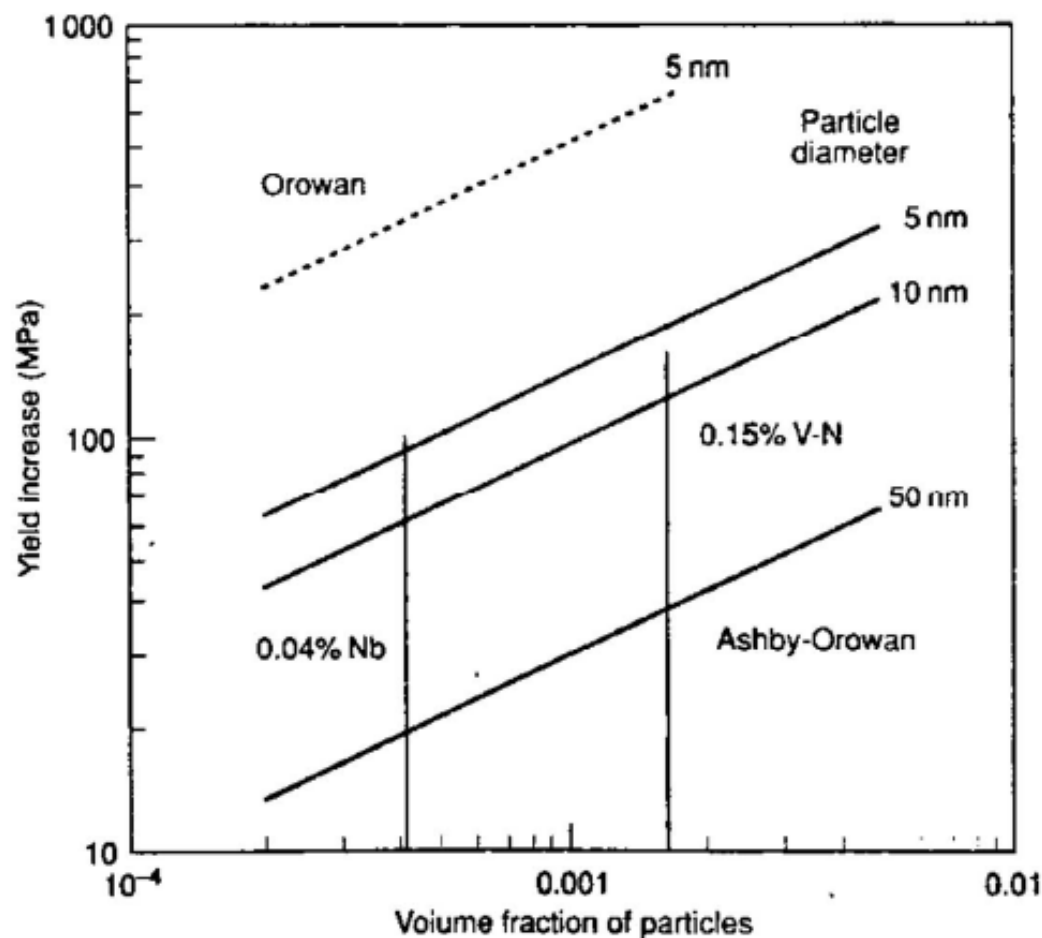
2.O precipitado deve ser mais duro que a matriz. Geralmente, o precipitado é um composto intermediário duro e frágil;

3.A liga deve suportar um resfriamento rápido. Algumas ligas não podem ser resfriadas com taxa suficiente para suprimir a formação do precipitado de equilíbrio. O **resfriamento** pode introduzir **tensões residuais** que causam a **distorção da peça**;

4.Há necessidade de precipitar uma fase coerente em condições de tempo e temperatura exequíveis;

Nota: as ligas de Al são resfriadas em água aquecida a cerca de 80°C, para minimizar as tensões residuais.

➤ Endurecimento por precipitação:



Processo industrial



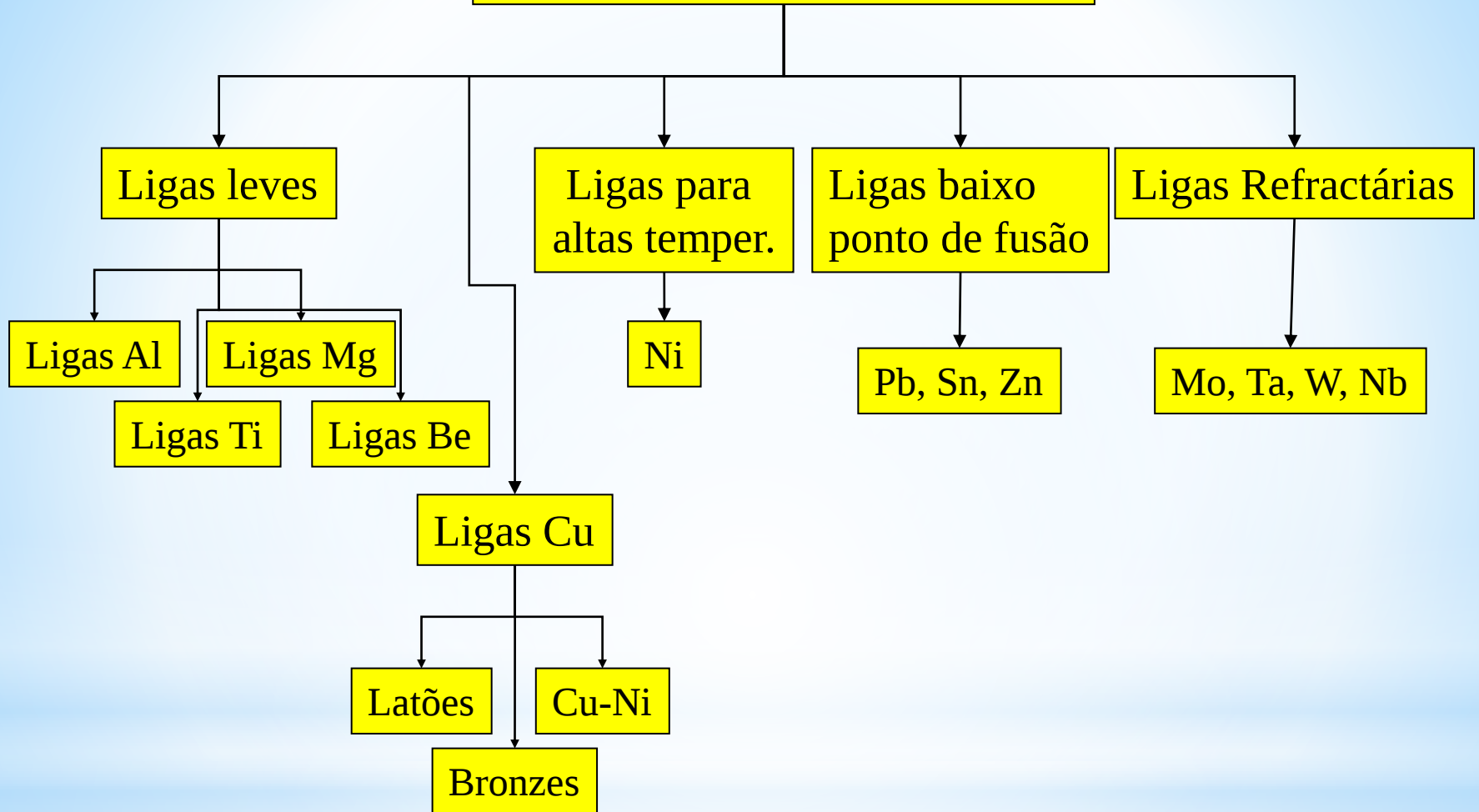
adição de microligantes (Nb, Ti, V)

■ modelo de Orowan-Ashby:

f – fração volumétrica
 d – tamanho partícula [nm]

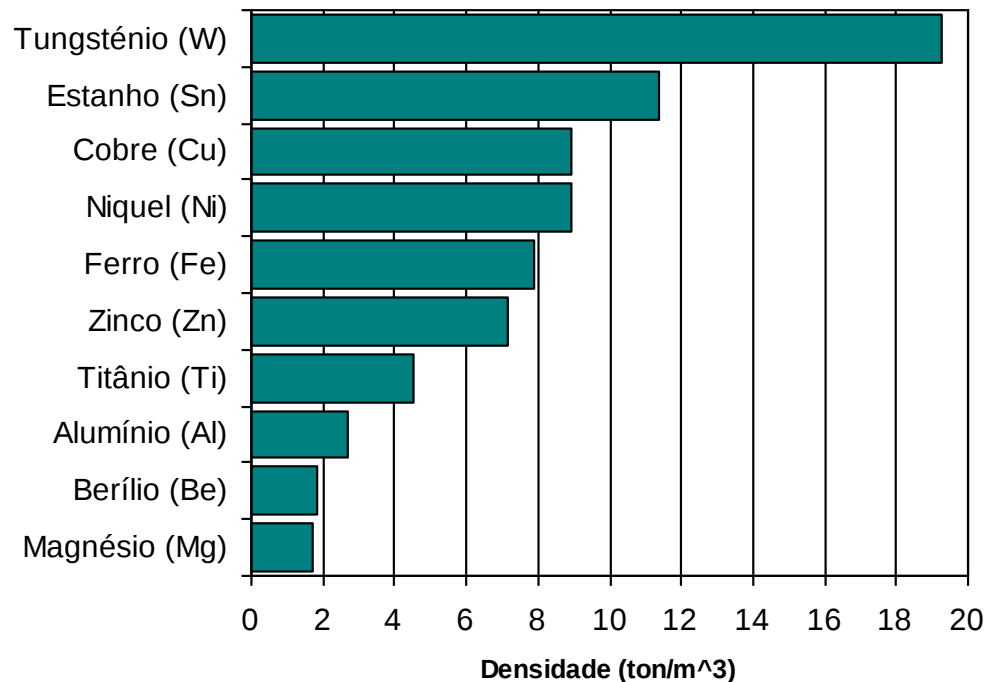
$$\Delta\sigma_p = 10800 \cdot \frac{\sqrt{f}}{d} \cdot \ln(1,63 \cdot d)$$

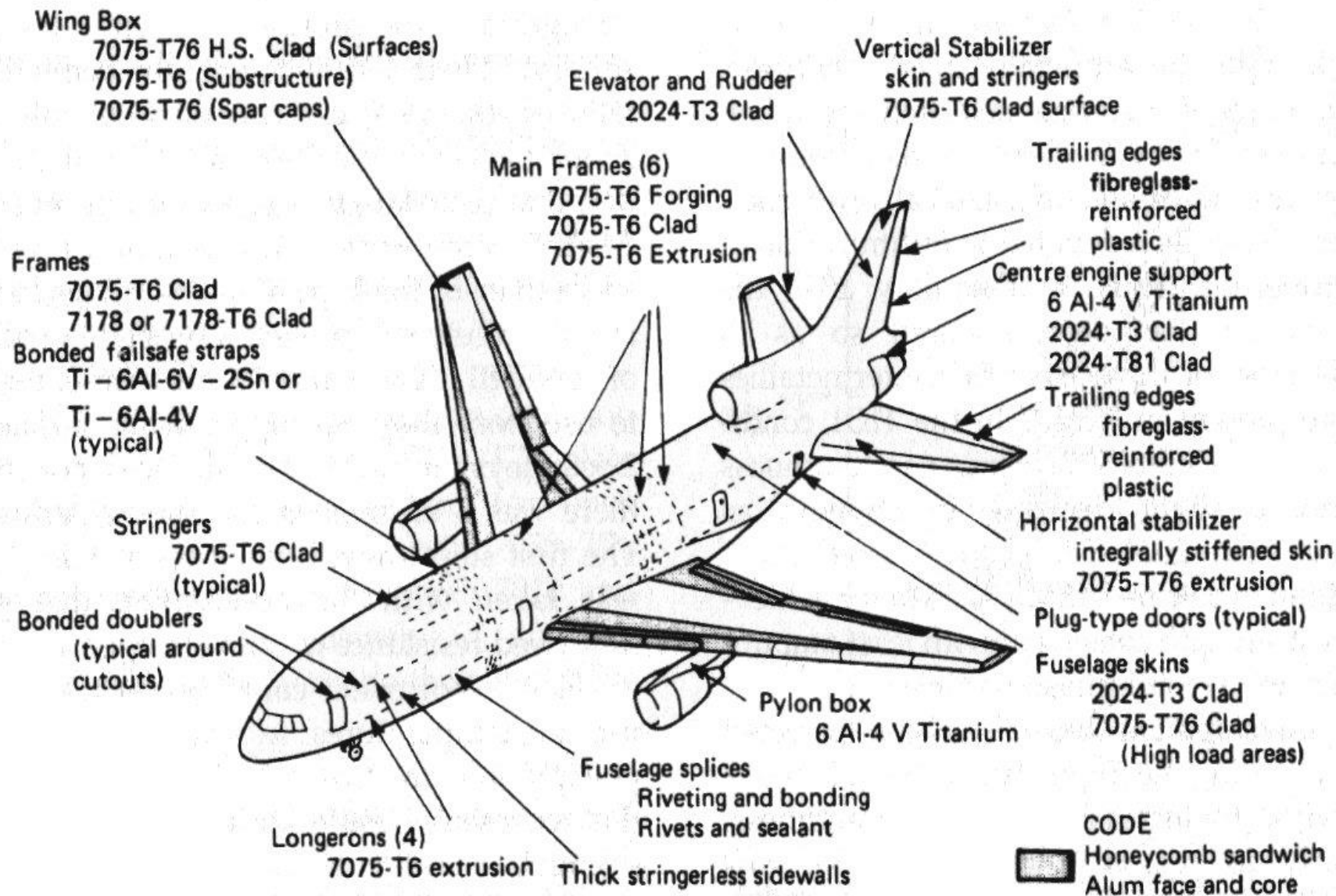
LIGAS NÃO FERROSAS



LIGAS NÃO FERROSAS (GENERALIDADES)

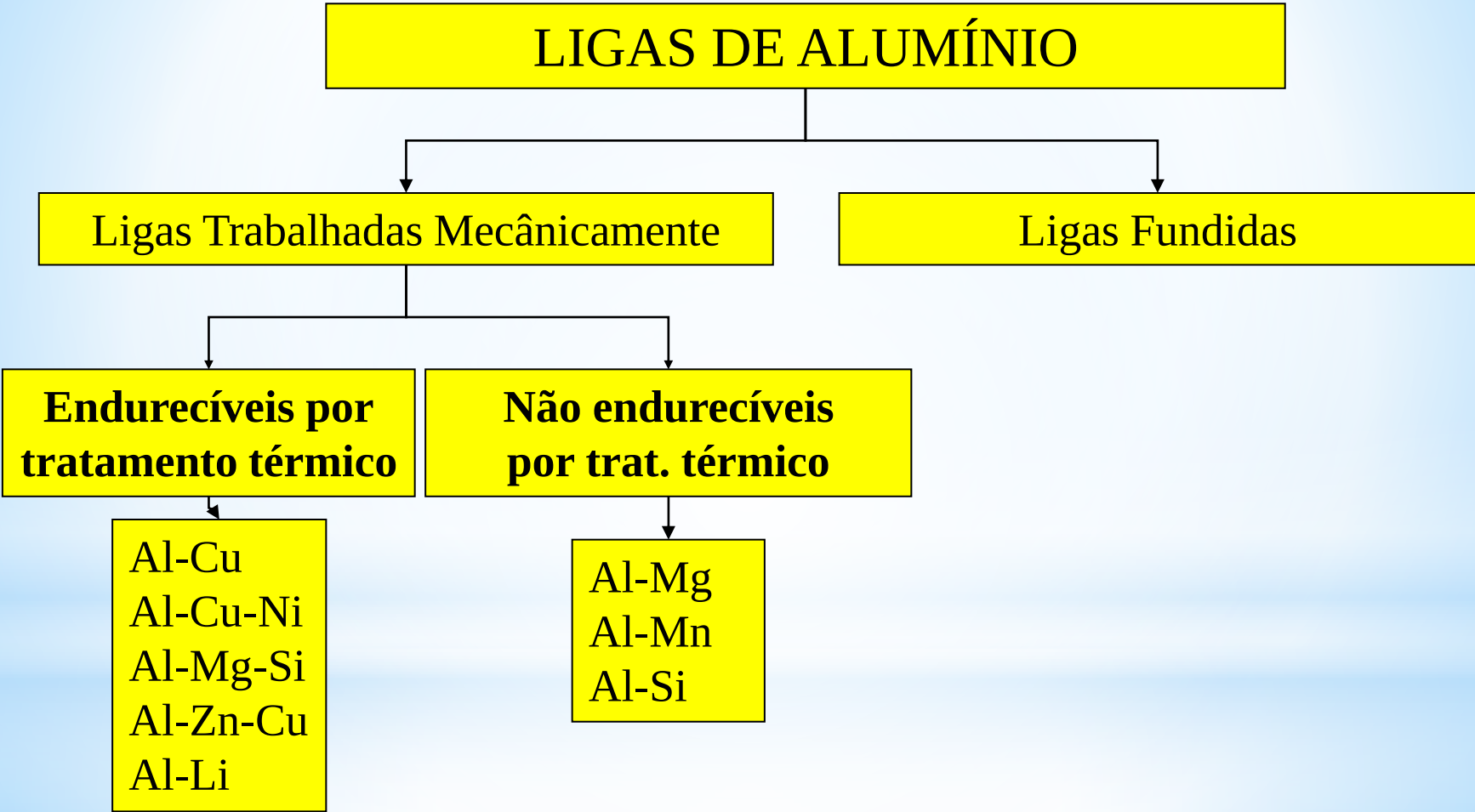
- Em geral mais caras que as ligas ferrosas
- Usadas para aplicações específicas:
 - Resist. à corrosão (Cu, Ni)
 - Alta condutividade (Cu, Al)
 - Baixo peso (Al, Mg, Ti)
 - Resistência a altas temperaturas (Ni)
- Utilização desde utensílios domésticos até aplicações aeroespaciais





L1011 basic materials and design features.

LIGAS DE ALUMÍNIO



```
graph TD; A[LIGAS DE ALUMÍNIO] --> B[Ligas Trabalhadas Mecanicamente]; A --> C[Ligas Fundidas]; B --> D[Endurecíveis por tratamento térmico]; B --> E[Não endurecíveis por trat. térmico]; D --> F["Al-Cu<br/>Al-Cu-Ni<br/>Al-Mg-Si<br/>Al-Zn-Cu<br/>Al-Li"]; E --> G["Al-Mg<br/>Al-Mn<br/>Al-Si"];
```

Ligas Trabalhadas Mecanicamente

Ligas Fundidas

**Endurecíveis por
tratamento térmico**

**Não endurecíveis
por trat. térmico**

Al-Cu
Al-Cu-Ni
Al-Mg-Si
Al-Zn-Cu
Al-Li

Al-Mg
Al-Mn
Al-Si

LIGAS DE ALUMÍNIO

- O alumínio é o **metal mais abundante** na crosta terrestre;
- Al comercialmente puro é um metal branco, lustroso, **leve e resistente à corrosão**;
- Principais elementos de liga de Al : Mn, Mg, Cr e Si;
- Baixa **densidade (1/3 do aço)**;
- **Boa** condutividade **térmica e eléctrica**;
- Tratamentos: Recozimentos, **envelhecimento (algumas ligas)**;
- **Endurecível** por deformação plástica a frio (**encruamento**);
- Fácil **usinagem e fundição**;
- **Aplicações** diversas: utensílios de cozinha, embalagens, eletroeletrônica, construção civil, automotiva, ferroviária. Naval e aeroespacial.

NOMENCLATURA DAS LIGAS DE ALUMÍNIO

Consiste em 4 dígitos: $X_1X_2X_3X_4$

$X_1 \rightarrow$ elemento **majoritário** da liga

$X_2 \rightarrow$ **zero** se é liga normal, 1, 2 e 3 indica uma variante específica da liga normal (como teor mínimo e máximo de um determinado elemento)

X_3 e $X_4 \rightarrow$ são para diferenciar as várias ligas do grupo. São arbitrários

- 1xxx – Alumínio puro (99%)
- 2xxx – Ligas com Cu
- 3xxx – Ligas com Mn
- 4xxx – Ligas com Si
- 5xxx – Ligas com Mg
- 6xxx – Ligas com Mg e Si
- 7xxx – Ligas com Zn
- 8xxx – Outros elementos (Li...)

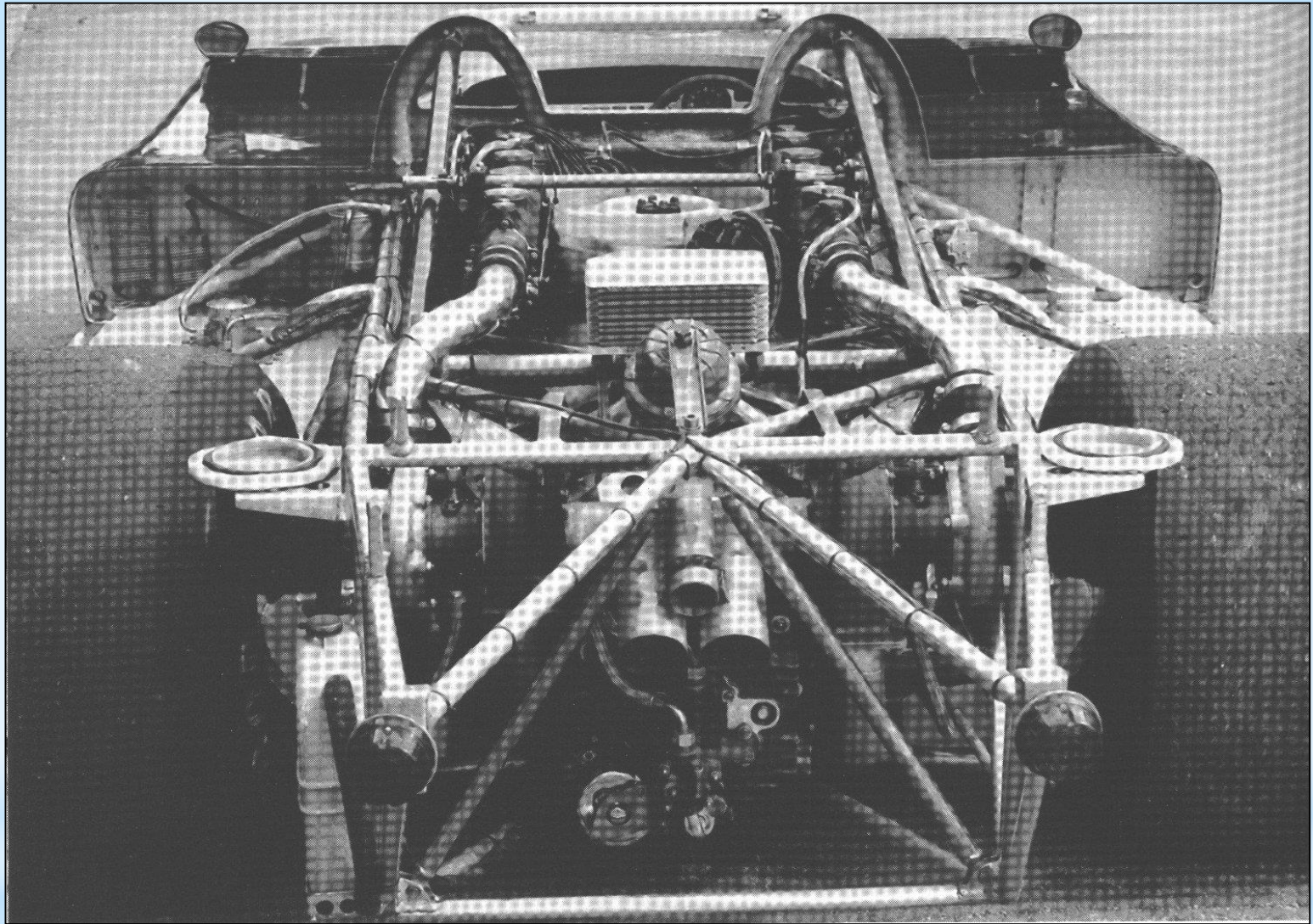
Alumínio não ligado $\rightarrow$ 1000

- Os dois últimos algarismos representam os centésimos do teor de alumínio
- Ex: 1065 $\rightarrow$ Al com 65% de pureza

LIGAS DE MAGNÉSIO

- **Mais leve dos metais estruturais;**
- 3º metal mais abundante na crosta;
- Principais elementos de liga: Al, Zn, Mn, Th, Ce;
- Inflamável (cuidados na usinagem);
- Boa resistência à corrosão;
- Baixa ductilidade,
- Baixo ponto de fusão-bom para fundição;
- Boa resistência à fadiga;
- Alta resistência ao impacto;
- Tratamentos: envelhecimento, recozimento;
- Endurecível por deformação em pequeno grau;
- Aplicações diversas: Bloco de motor, patins, tacos, raquetes, rodas, **aeroespacial**, anodo de sacrifício;
- Atualmente: **ligas para armazenamento de hidrogênio-fonte alternativa de energia;**

				Propriedades mecânicas			
ASTM	UNS	Composição	Condição	Res.(MPa)	Esc.MPa)	Al%)	Aplicações/Características
LIGAS DE TRABALHO MECÂNICO							
AZ80A	M11800	8.5Al, 0.5Zn, 0.12Mn		340	250	11	Elementos estruturais, peças forjadas
HK31A	M13310	3.0Th, 0.6Zr	Def. frio e parcialmente recozido	255	200	9	Elementos estruturais com boa resistência até 315°C
ZK60A	M16600	5.5Zn, 0.45Zr	Envelhecido artificialmente	350	285	11	Peças forjadas de grande resistência para aeronaves
LIGAS DE FUNDIÇÃO							
AM60A	M10600	6.0Al, 0.13Mn		220	130	6	Peças de automóveis
EZ33A	M12330	2.7Zn, 0.6Zr, 3.3Terr. raras	Envelhecido artificialmente	160	110	3	Peças fundidas para utilização até 260°C
AZ91A	M11910	9.0Al, 0.13Mn,0.7Zn		230	150	3	Peças para automóveis, cortarelva e malas de viagem



**Porsche 917 com estrutura tubular em Magnésio –
peso 15kg menor em relação ao Al**

LIGAS DE TITÂNIO

- Desenvolvimento recente (a partir da década de 50);
- Fase α – HC – pouco dúctil;
- Fase β – CCC – muito dúctil;
- Elementos de liga: Al, Sn, V, Mo, Nb, Mn, Cr, Fe, Co, Ta;
- Tratamentos: recozimento, **envelhecimento** (algumas ligas);
- Baixa densidade (4.5 ton/m^3);
- Alto ponto de **fusão** (1668°C);
- **Alta resistência mecânica;**
- **Alta resistência à fluência;**
- Excelente resistência corrosão abaixo de 550°C ;
- Aplicações diversas: **Implantes**, aeroespacial (**motores a reação**), trocadores de calor.

LIGAS DE TITÂNIO

Ti puro

- Excelente **resistência à corrosão**
- Alguma ductilidade (apesar de ser HC)
- **Baixa resistência mecânica**

Ligas α

Al, O, N, H, Ga

- Ligas **não endurecíveis por T.T.** – endurecimento por solução sólida
- **Al** principal elemento de liga – **até 5~6%**
- Resistência moderada a alta temperatura
- Boas tenacidade, **resist fluência**, soldabilidade

Ligas quase α

V, Mo (peq.quant.)

- Alguma fase β numa microestrutura essencialmente α
- Adiciona-se **Sn e Zr** para manter a resistência **diminuindo o Al**
- Altas resist mecânica, tenacidade, **resist fluência**, soldabilidade
- Resist aumentada com **envelhecimento** ($\Rightarrow$ **menor resist corrosão**)

Ligas $\alpha \beta$

(ou duplex)

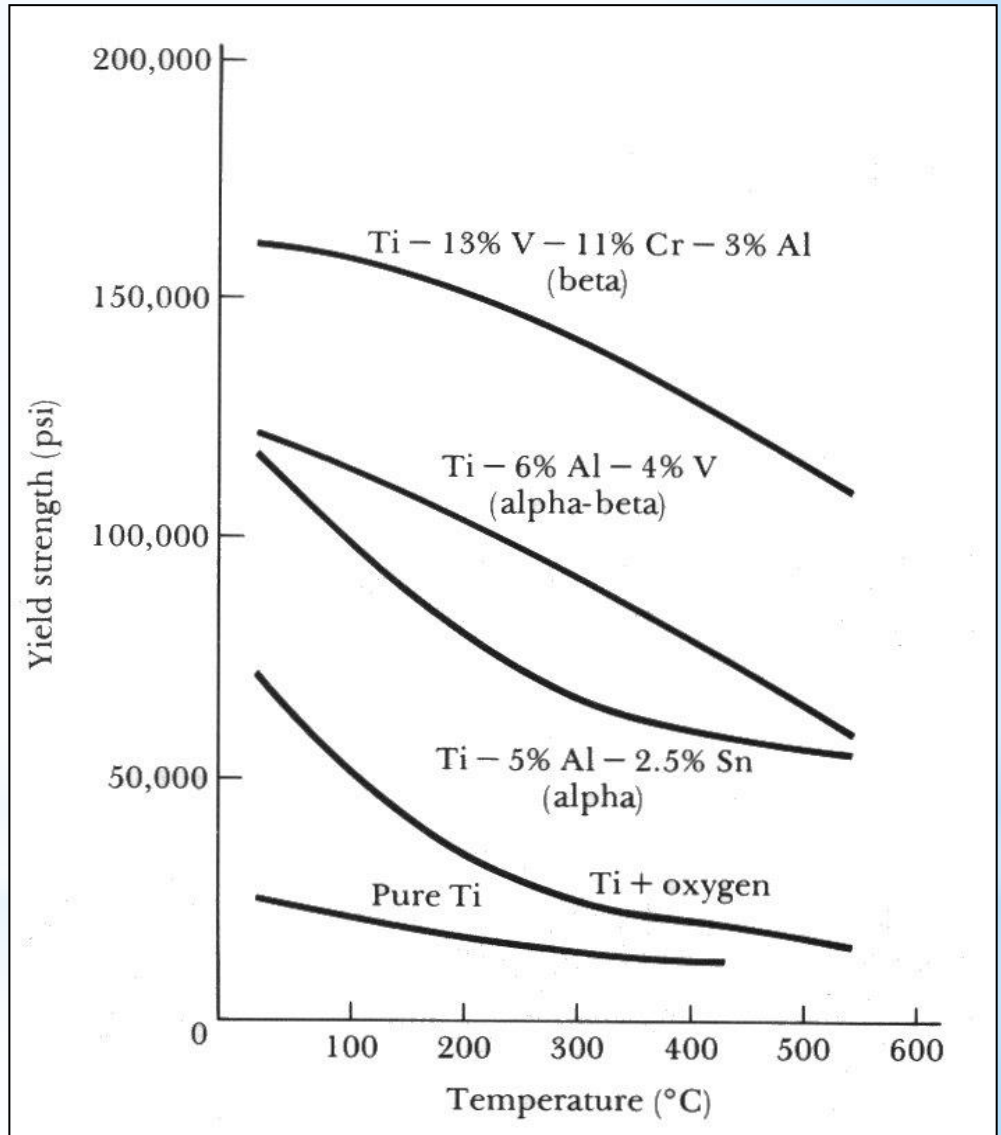
- Balanço conveniente de elementos $\Rightarrow$ Microestrutura bifásica
- Os **tratamentos térmicos controlam microestrutura e propriedades**

Ligas β

V, Mo, Nb, Cr, Fe, Ta

- Grande adição de **V e Mo** $\Rightarrow$ **β à temp ambiente (não é usual)**
- Estrutura β obtida com tratamento de **envelhecimento**
- Grande ductilidade – fácil deformação a frio
- São soldáveis
- Ligas **mais pesadas**

LIGAS DE TITÂNIO



LIGAS DE TITÂNIO

Tipo de liga	Comum (UNS)	Composição	Condição	Propriedades mecânicas		Al (%)	Aplicações/Características
				Resi. (MPa)	Esc. (MPa)		
Comercial/ Puro	(R50500)	99.1Ti	Recozido	517	448	25	Blindagem de motores jacto, Cascas de aeronaves, equipamento resist à corrosão em navios e ind química
a	Ti-5Al-2.5Sn (R54520)	5.0Al, 2.5Sn	Recozido	862	807	16	Caixas de turbinas de gás, equipamento químico com resistência mecânica até 480°C
Quase a	Ti-8Al-1Mo-1V (R54810)	8.0Al, 1.0Mo, 1.0V	Recozido (duplex)	1000	951	15	Peças forjadas para motores a jacto (discos de compressor, cubos, etc)

FIM

Prof.Dr. José Benedito Marcomini