

SMM 0193 – ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS I



MECANISMOS DE AUMENTO DE RESISTÊNCIA



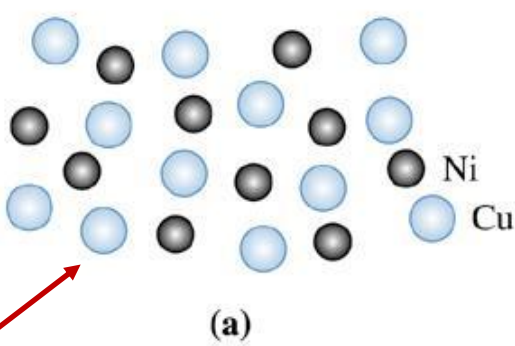
ENDURECIMENTO POR SOLUÇÃO SÓLIDA



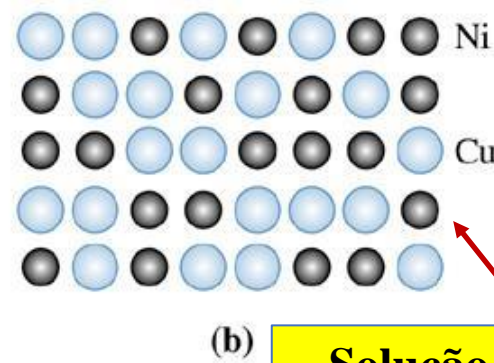
Quando combinamos **diferentes substâncias**, como a adição de um **metal em outro** para formar uma **liga metálica**, nós **produzimos soluções**. Neste caso, estamos interessados em saber **quanto de cada material** pode ser combinado **sem** produzir uma **fase adicional** (como o **sal precipitado** na solução **Sal+água**).

Solubilidade – Quantidade de um material que se dissolverá completamente em um segundo material sem a criação de uma segunda fase:

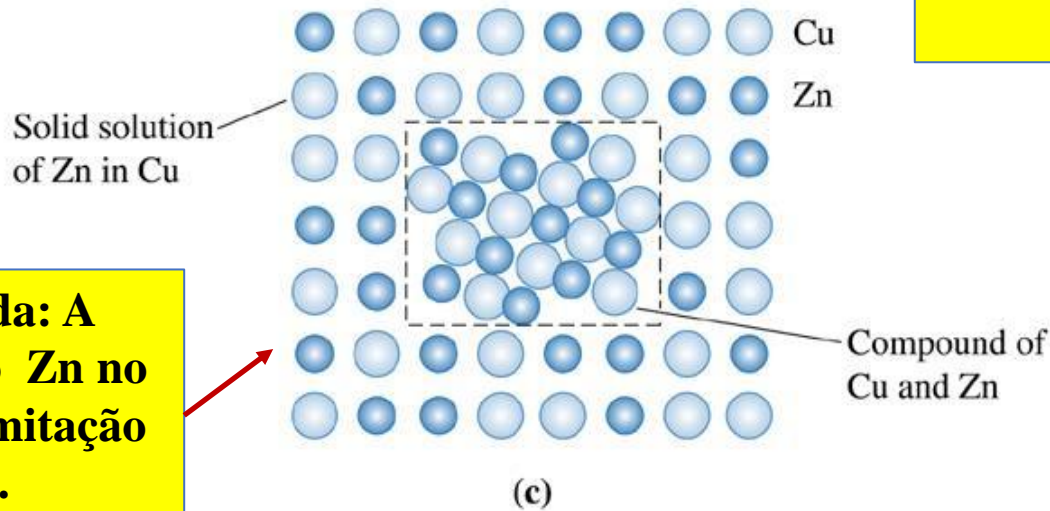
- **Solubilidade Ilimitada**
- **Solubilidade Limitada**



Solução líquida



Solução sólida: Cu é completamente solúvel no Ni



Solução sólida: A solubilidade do Zn no Cu tem uma limitação em 30%.

(a) Cu e Ni líquidos são **completamente solúveis** um no outro. (b) Ligas de Cu e Ni sólidas apresentam **solubilidade completa** com os átomos de Ni ocupando ao acaso os lugares no retículo. (c) Nas ligas de Cu – Zn contendo mais do que 30% Zn, uma segunda fase é formada por causa da **solubilidade limitada** do Zn no Cu.

Condições para Solubilidade Sólida “Ilimitada”

Regras de Hume-Rothery – As condições que uma liga ou sistema cerâmico deve apresentar para que o **soluto seja completamente solúvel** no **solvente** no estado sólido. As regras de Hume-Rothery são necessárias mas **não suficientes** para o material apresentar solubilidade ilimitada. Foram desenvolvidas entre **1920-1930**.

1.Fator Tamanho: os átomos devem ter **tamanho similar**, com não mais de 15% de diferença, de maneira a minimizar distorções no retículo cristalino;

2.Estrutura Cristalina: devem possuir **mesma estrutura cristalina**, ou de outra forma existirá a possibilidade de ocorrência de segunda fase;

3.Eletronegatividade: devem possuir **eletronegatividade similar**, caso contrário favorece a formação de compostos ao invés de solução;

4.Valência: devem possuir a **mesma valência**, pois valências diferentes favorecem a formação de compostos ao invés de solução.



WILLIAM HUME-ROTHERY
1899-1968



- Ligas Si-Ge

Regra 1: $r_{Si} = 0.117$ nm and $r_{Ge} = 0.122$ nm.

$$\Delta R\% = \frac{r_{solute} - r_{solvent}}{r_{solvent}} \times 100\% = 4\% \quad \text{favorável } \checkmark$$

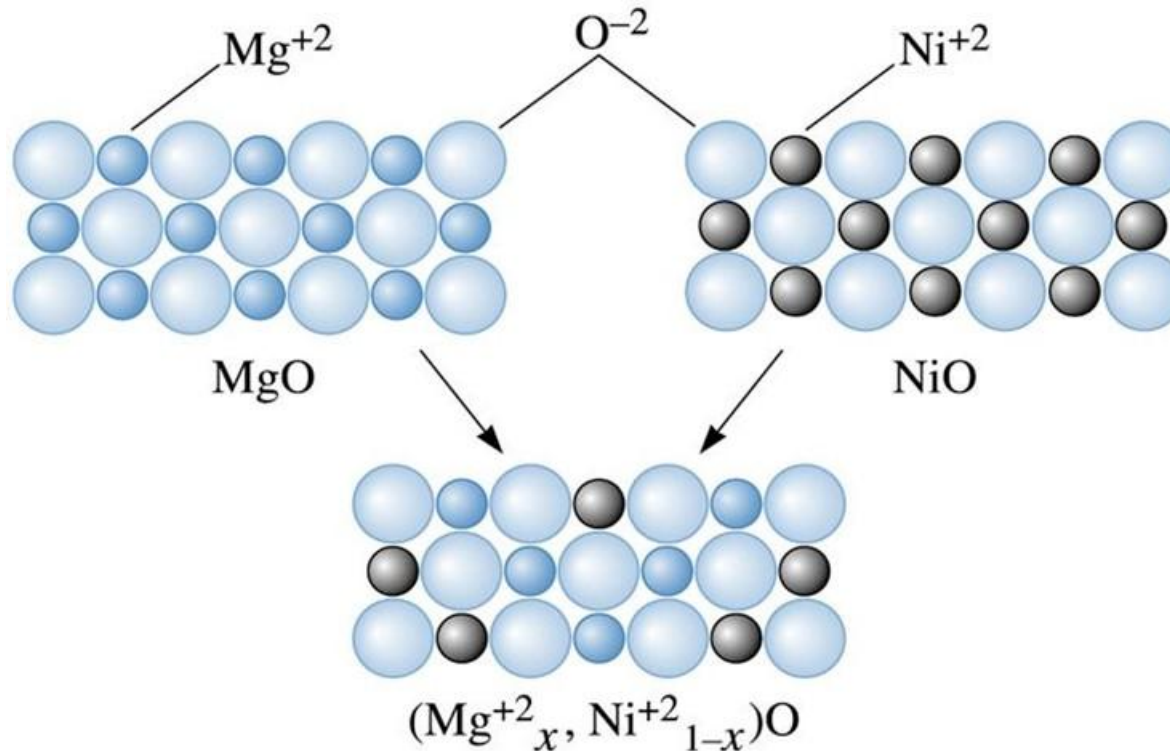
Regra 2: Si e Ge tem mesma estrutura cristalina. favorável \checkmark

Regra 3: $E_{Si} = 1.90$ and $E_{Ge} = 2.01$. Assim, $\Delta E\% = 5.8\%$ favorável \checkmark

Regra 4: Valência do Si e Ge são ambas = 4. favorável \checkmark

É esperado que Si e Ge formem S.S. sob uma ampla faixa de composição.

Este tipo de comportamento pode ser observado em **alguns compostos**, incluindo **materiais cerâmicos**. Os **ions Mg e Ni** possuem o **mesmo tamanho e valência** e conseqüentemente, um **pode substituir o outro na rede cristalina**.



©2003 Brooks Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning is a trademark used herein under license.

MgO e NiO tem estrutura cristalina similar, raio iônico e valência; assim as duas cerâmicas podem formar soluções sólidas.

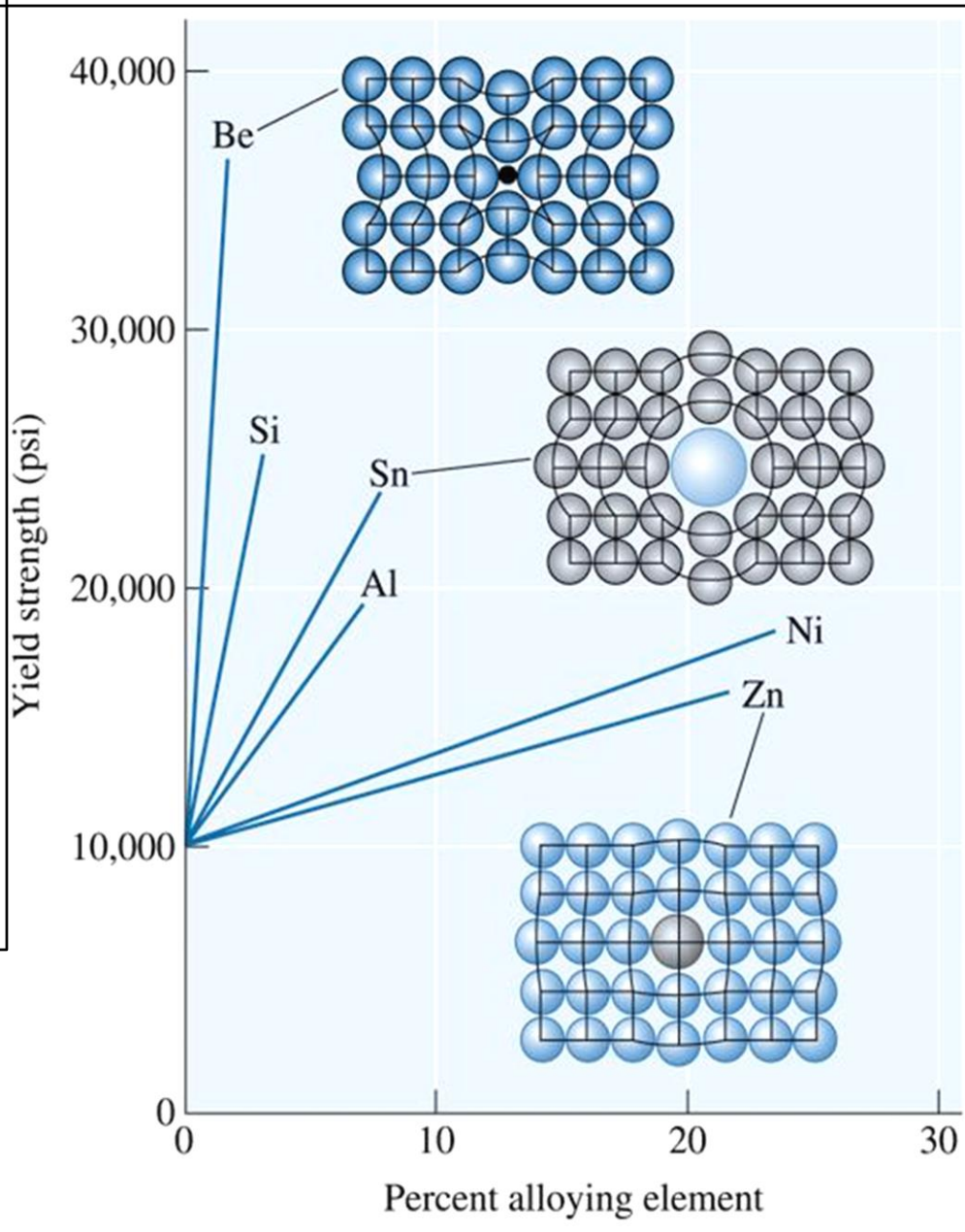
Endurecimento por Solução Sólida



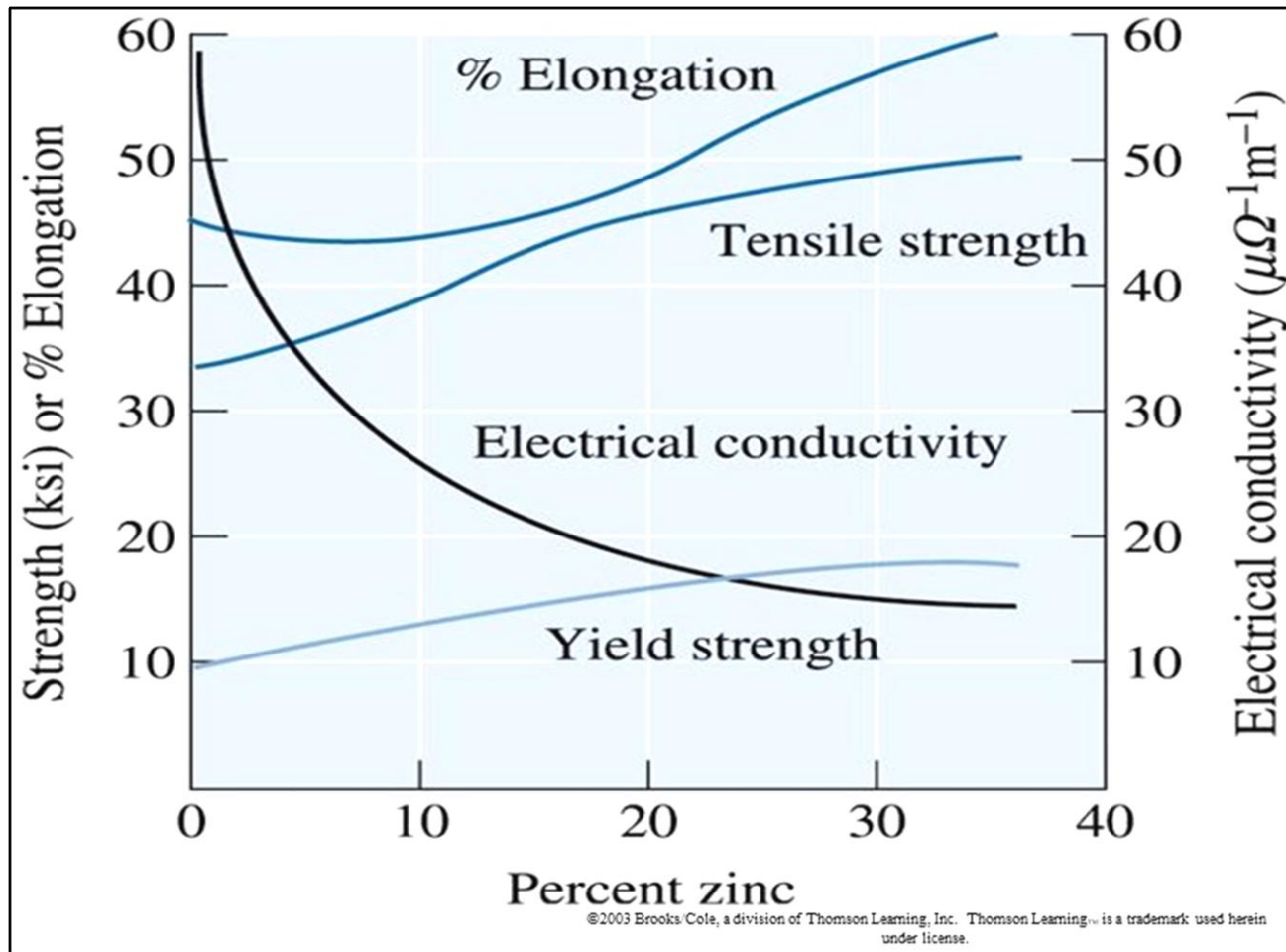
É o aumento de resistência de um material metálico via a formação de uma solução sólida.

O grau de endurecimento por solução sólida depende de dois fatores:

- **Diferença de tamanho** entre os átomos de soluto e solvente. Quanto - maior a diferença, maior é o distúrbio criado no retículo cristalino;
- **Quanto maior a quantidade**, maior é o efeito de endurecimento, até que o **limite de solubilidade** seja atingido.



O efeito de vários elementos de liga sobre o limite de escoamento do Cu. Átomos de Zn e Ni são aproximadamente do mesmo tamanho dos átomos de Cu, mas o Be e o Sn são bem diferentes. Aumentando ambos a diferença entre o tamanho dos átomos e a quantidade, aumenta-se a resistência mecânica por solução sólida.



O efeito da adição de Zn ao Cu sobre as propriedades da solução sólida. O aumento da resistência mecânica por solução sólida permite um aumento no alongamento (nem sempre).



Endurecimento por precipitação

**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.**



Estado termodinâmico metaestável para um estado mais estável

transformação de fase que leva o material de um estado mais estável a um estado metaestável

tratamento térmico



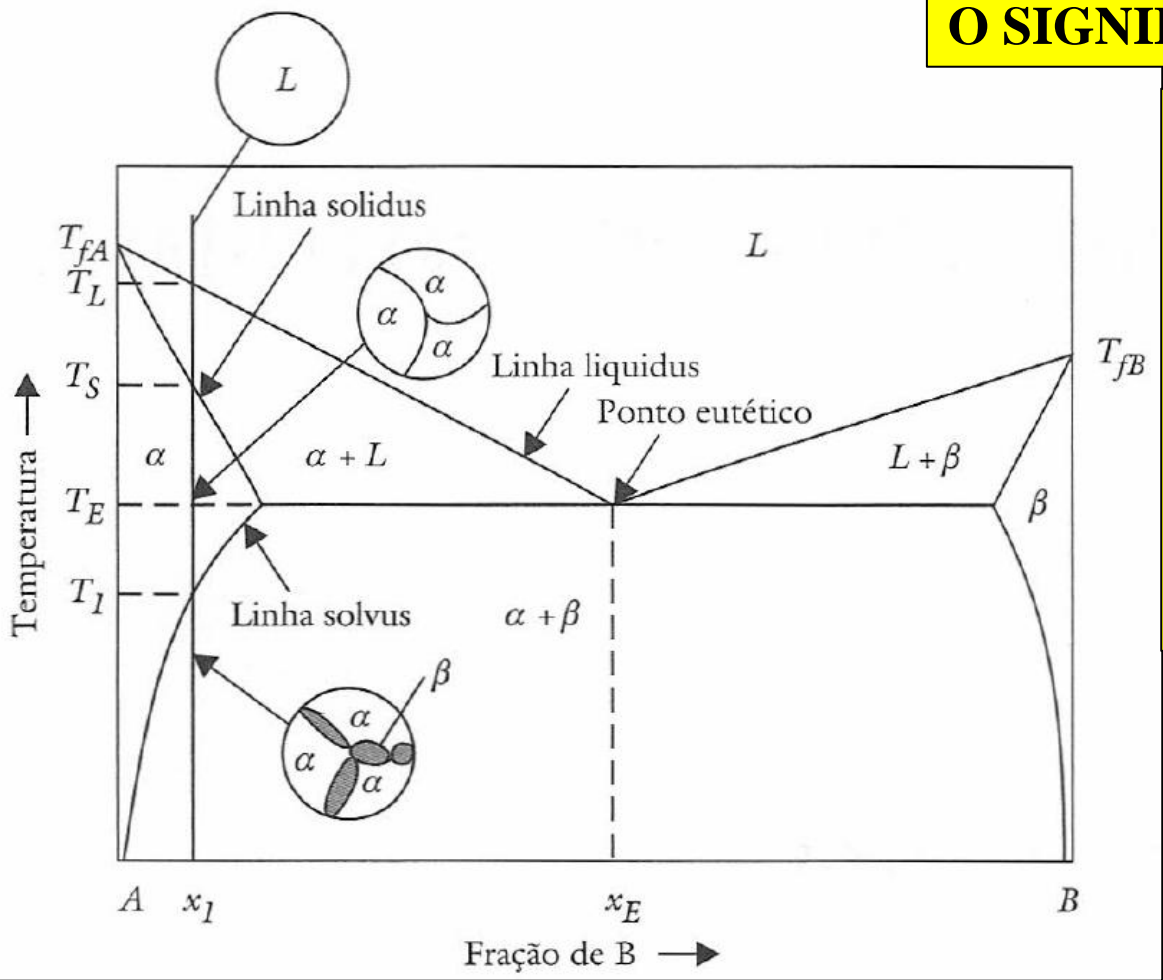
**ENDURECIMENTO
POR PRECIPITAÇÃO
= ENVELHECIMENTO**

**Aumentar a
resistência
mecânica**

DIAGRAMA DE FASES DE UMA LIGA NÃO FERROSA

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

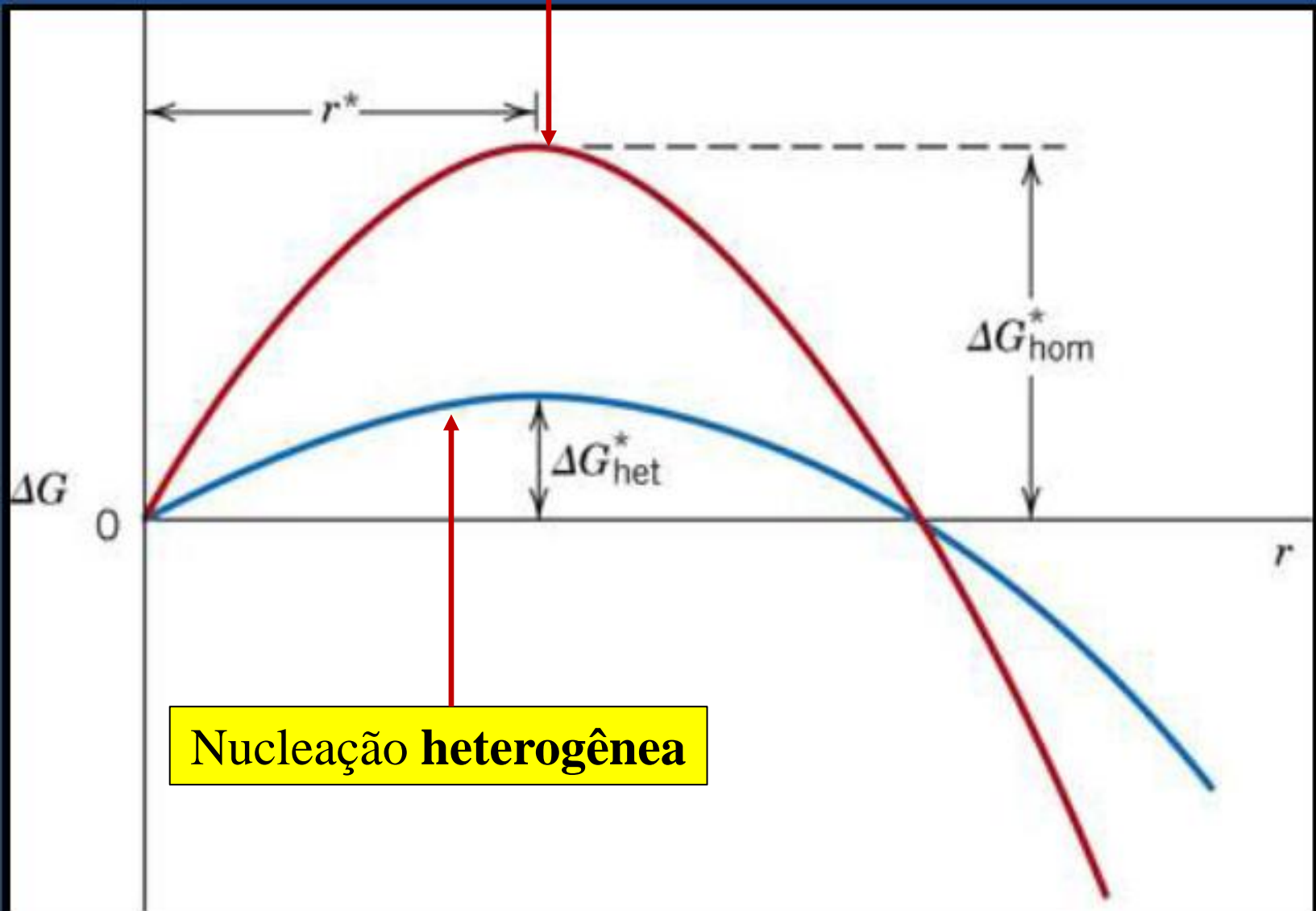
(Fonte: Rezende)



EESC • USP

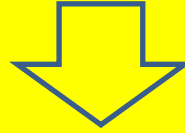


Nucleação homogênea

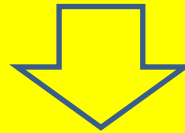


Nucleação heterogênea

CONTORNOS DE GRÃO \Rightarrow ALTA ENERGIA



**SÍTIOS PREFERENCIAIS PARA A NUCLEAÇÃO
HETEROGÊNEA**

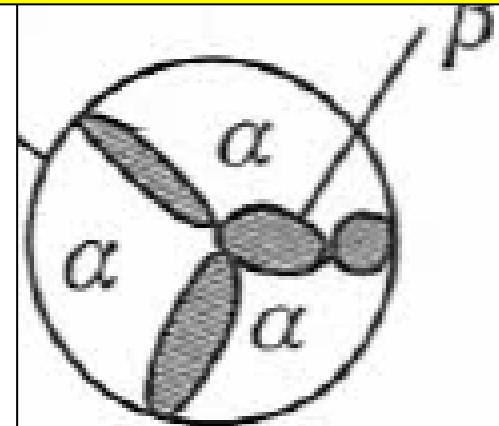


**ENERGIA DISPONÍVEL CONTRIBUI COM PARTE DA
ENERGIA DE ATIVAÇÃO**

**Estrutura típica de peças fundidas:
baixa resistência/alta fragilidade**

T_1 é relativamente alta

DIFUSÃO



(Fonte: Rezende)

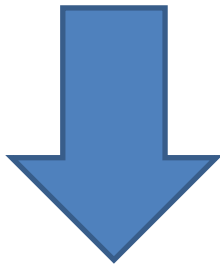
No início do **século XX** descobriu-se que a **resistência mecânica** de uma peça com esse tipo de estrutura poderia ser **aumentada sensivelmente** por meio de **um tratamento térmico conveniente**, que levasse a uma **redistribuição da segunda fase (β)** na forma de **partículas finas distribuídas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

(Fonte:Rezende)

O TRATAMENTO TÉRMICO ENVELHECIMENTO (“AGING”)

**1ª. ETAPA -
SOLUBILIZAÇÃO**

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



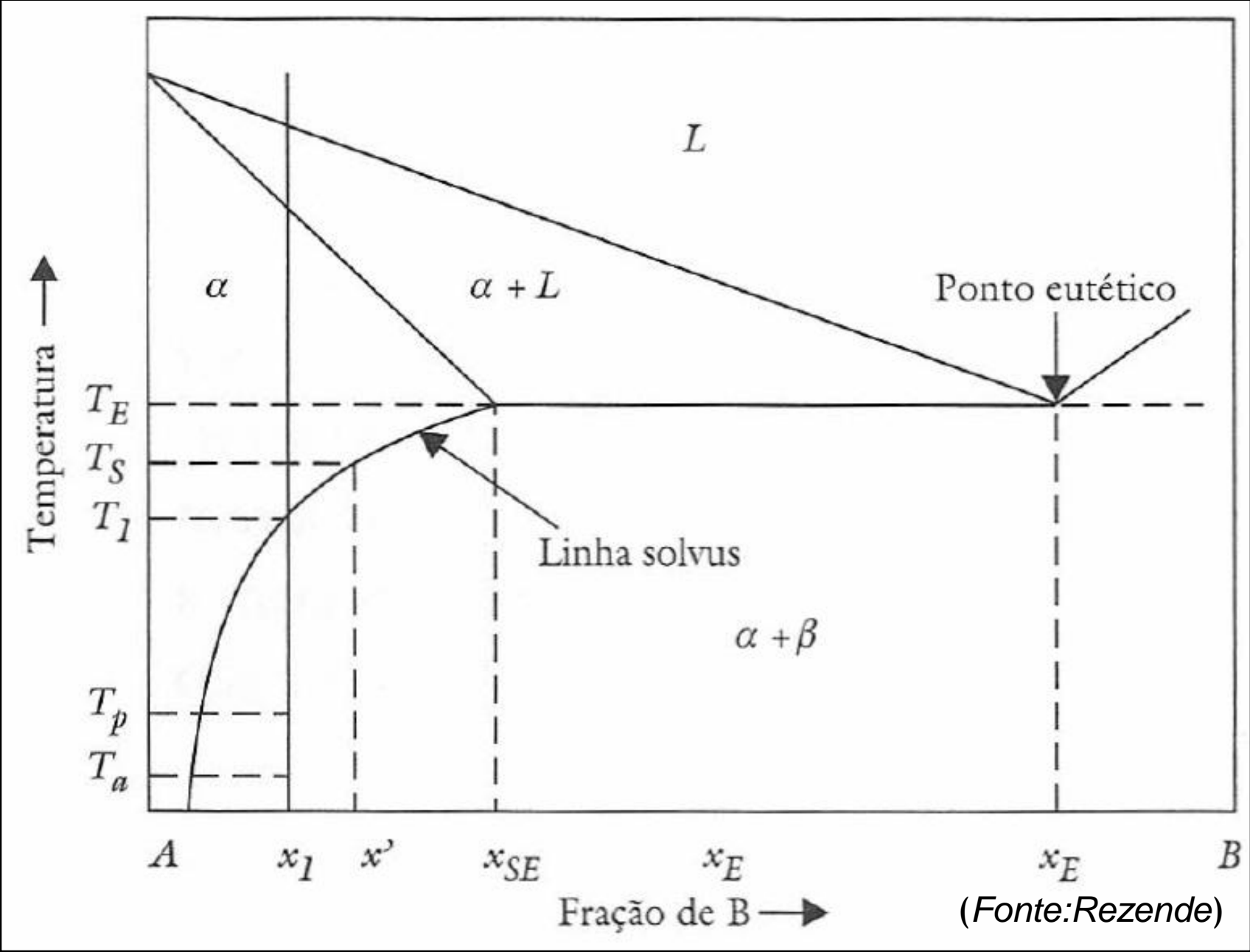
**2ª. ETAPA –
PRECIPITAÇÃO
EM TEMPERATURA
ADEQUADA**

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



**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**

PRECIPITAÇÃO

**SOLUÇÃO
SUPERSATURADA**

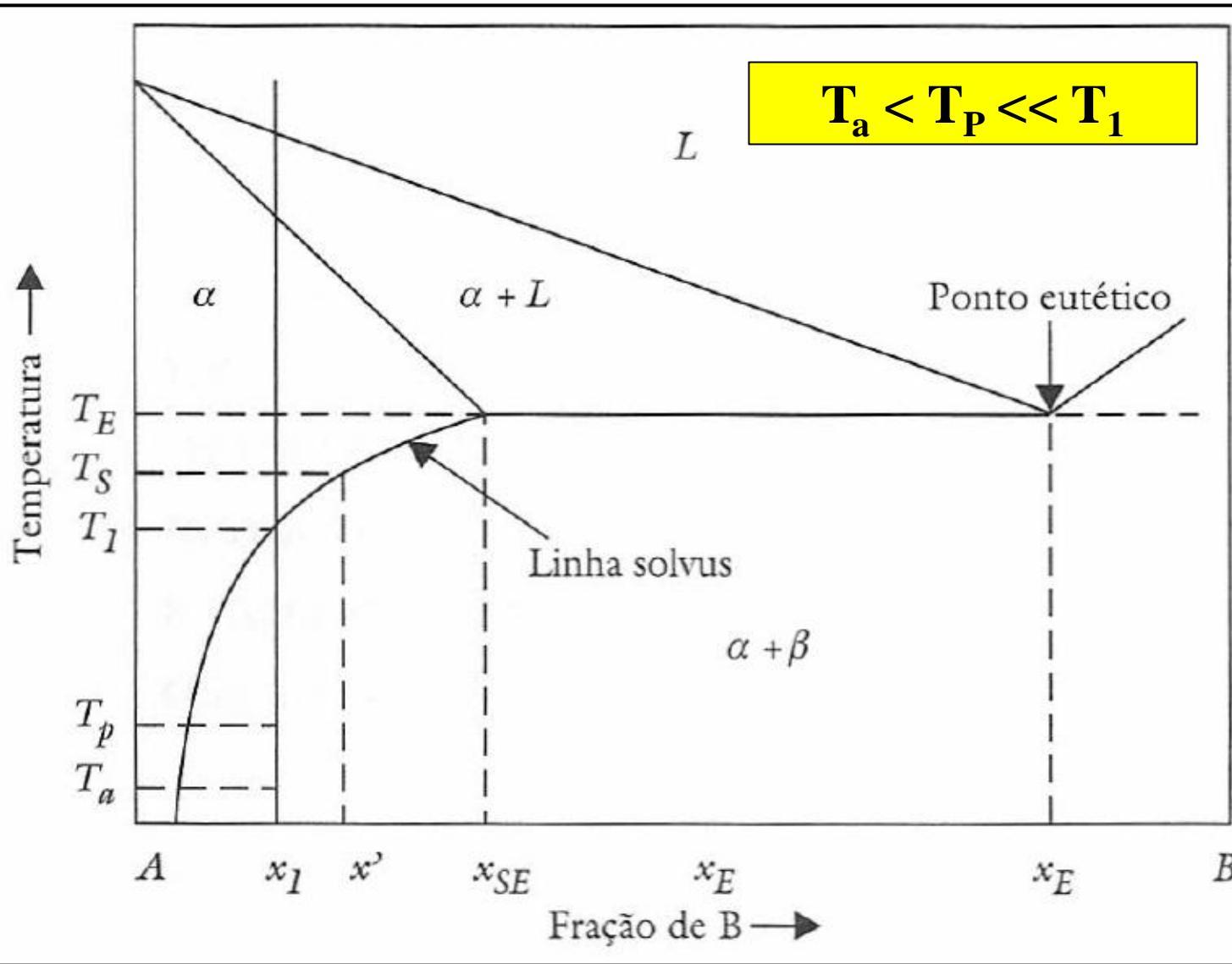
**TRATAMENTO ISOTÉRMICO
EM T_p - LONGOS PERÍODOS
(ENVELHECIMENTO)**

Formação da segunda fase

**partículas finas dispersas homogeneamente no
interior dos grãos**

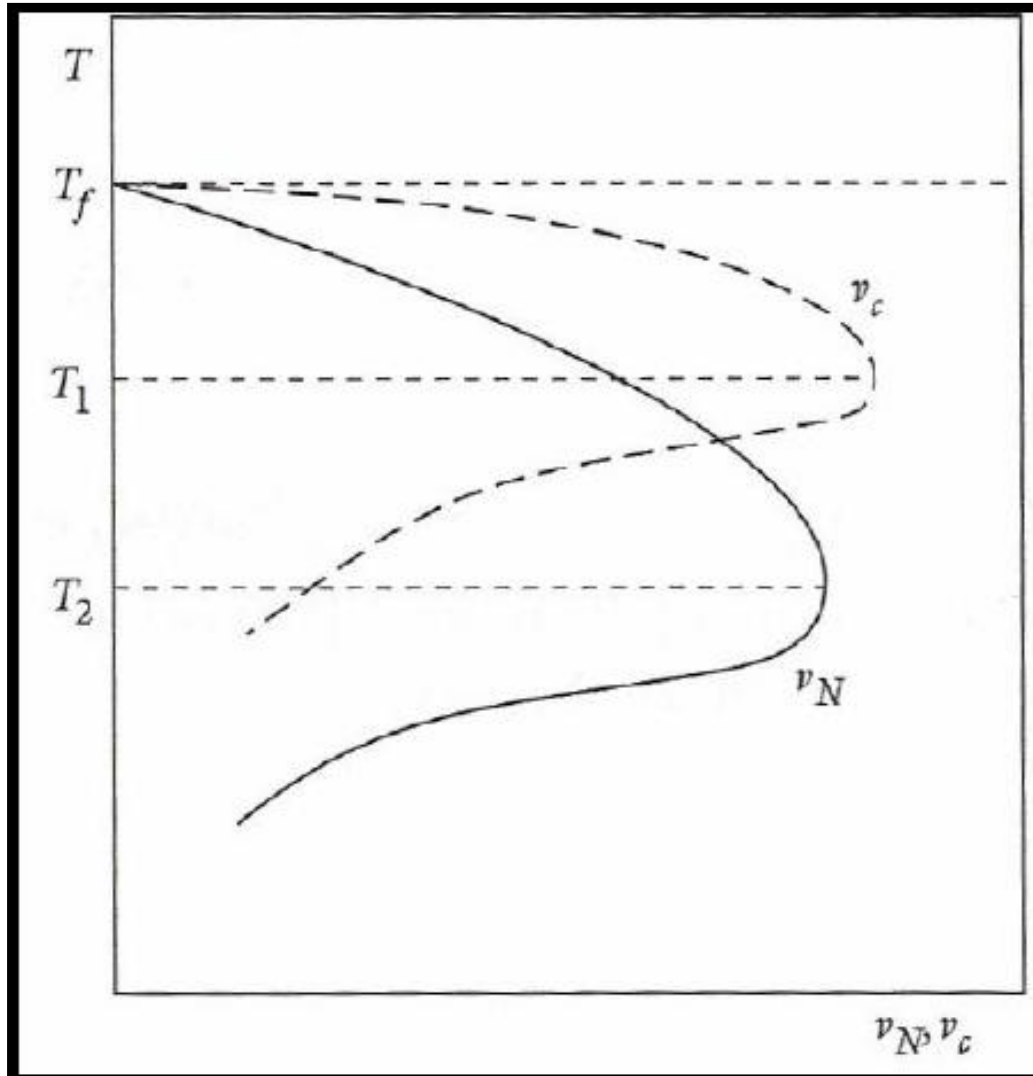
**RESFRIAMENTO BRUSCO
EVITAR O CRESCIMENTO
EXCESSIVO DOS PRECIPITADOS**

PRECIPITAÇÃO



(Fonte: Rezende)

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.

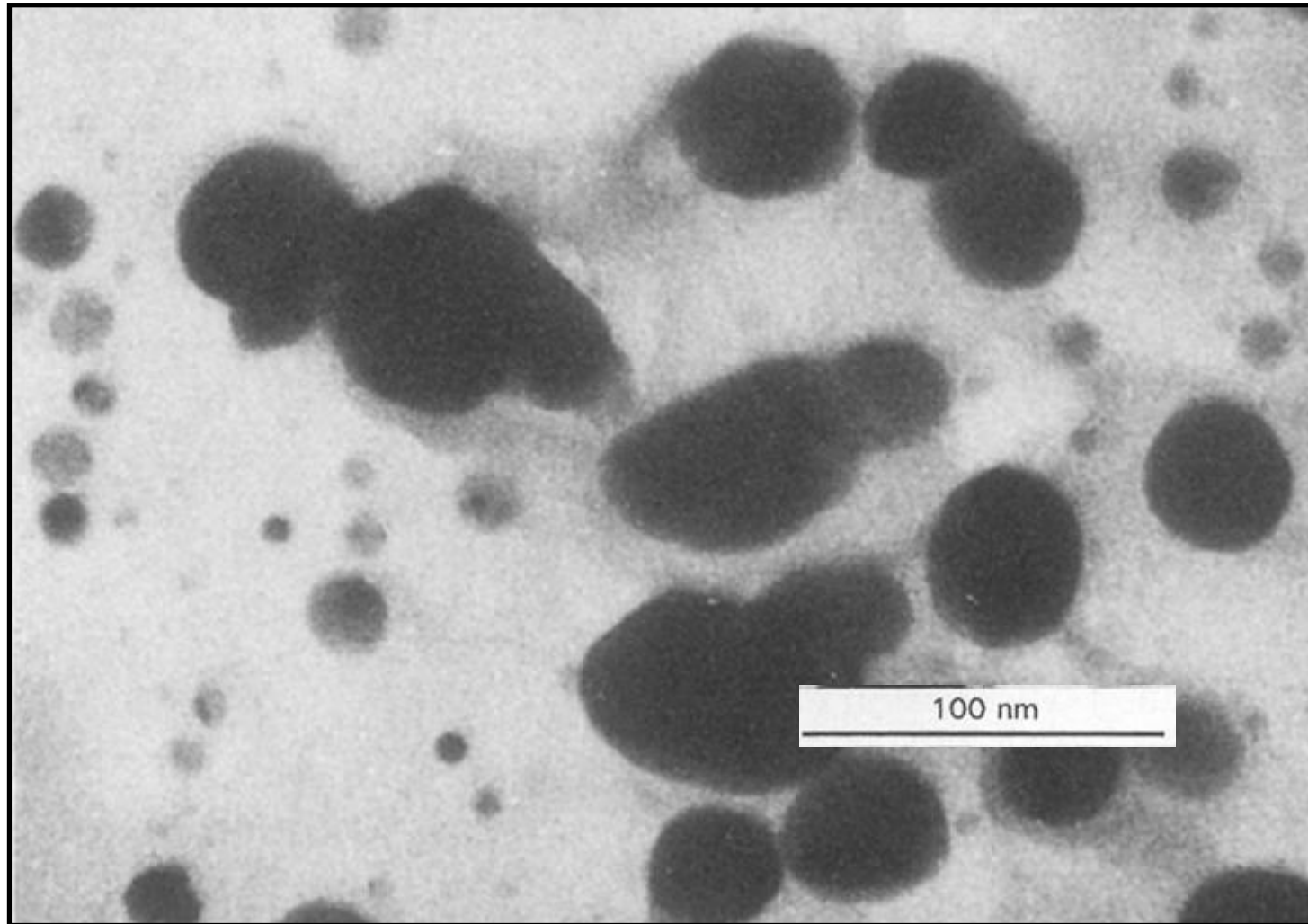
Para algumas ligas:

$$T_P = T_a$$

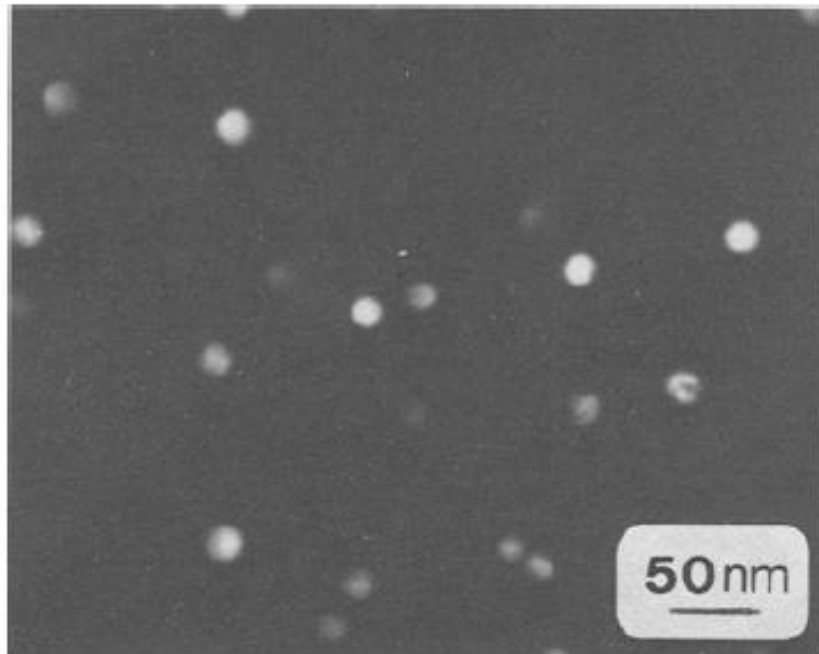
(Fonte: Rezende)

PRECIPITADOS – MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE TRANSMISSÃO (MET)

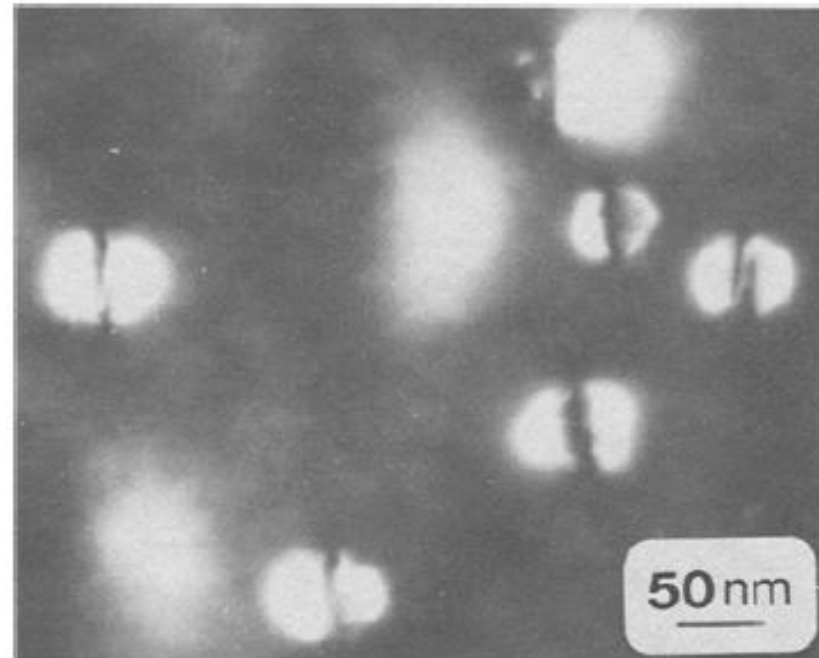
JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE 31 (1996) 4333–4346



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.

ESQUEMA DO TRATAMENTO TÉRMICO

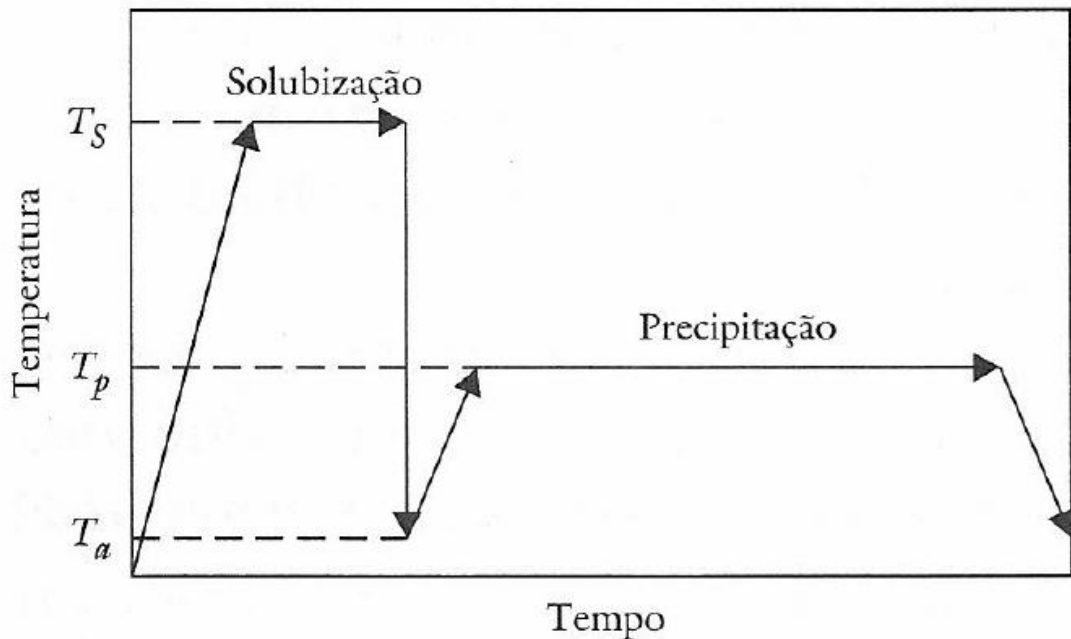
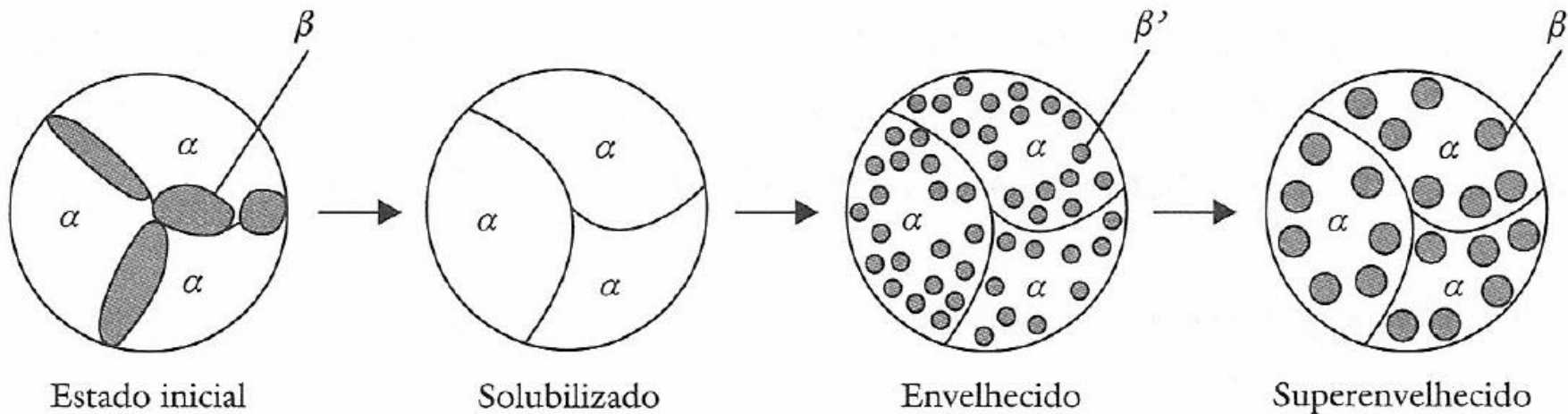


Figura 9.3 — Representação esquemática das etapas de solubilização e precipitação apresentando as temperaturas e os intervalos de tempo relativos a cada etapa

(Fonte: Rezende)



TEORIA DO ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO

PARTÍCULAS COERENTES



TENSÕES INTERNAS



DISCORDÂNCIAS

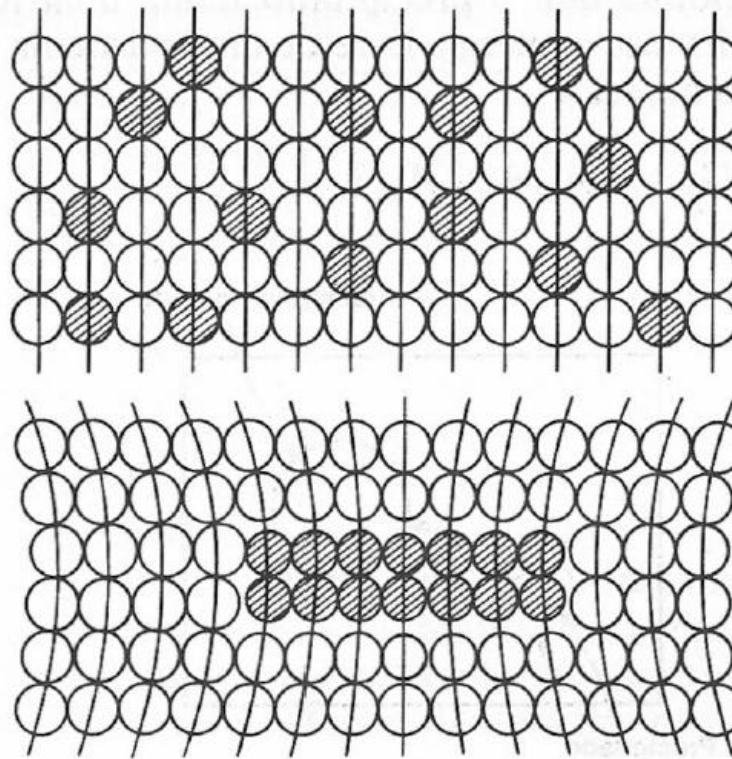
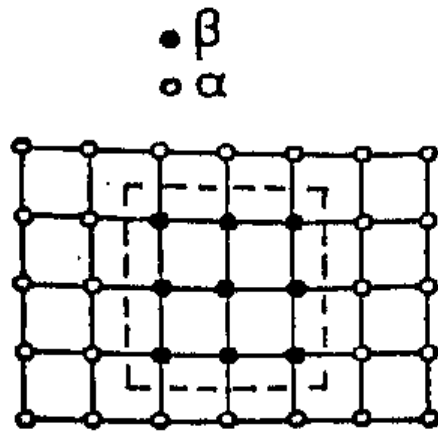
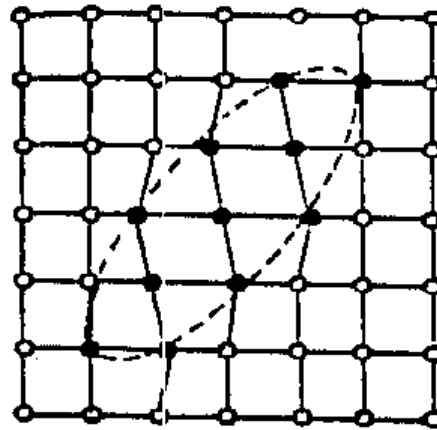


Fig. 9.13 Coerência. A figura superior representa uma solução sólida supersaturada de átomos de *B* (círculos escuros) em uma matriz de átomos de *A* (círculos claros). A figura inferior mostra um precipitado coerente, formado pelo agrupamento de átomos de *B*.

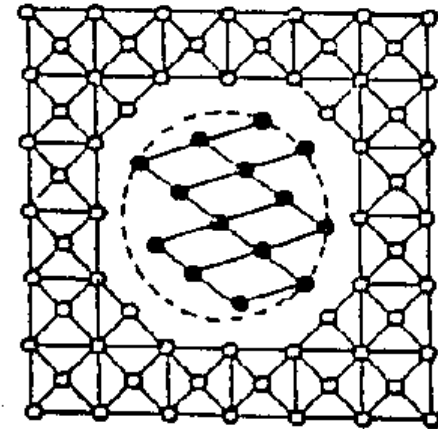
TEORIA DO ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO



(a)



(b)



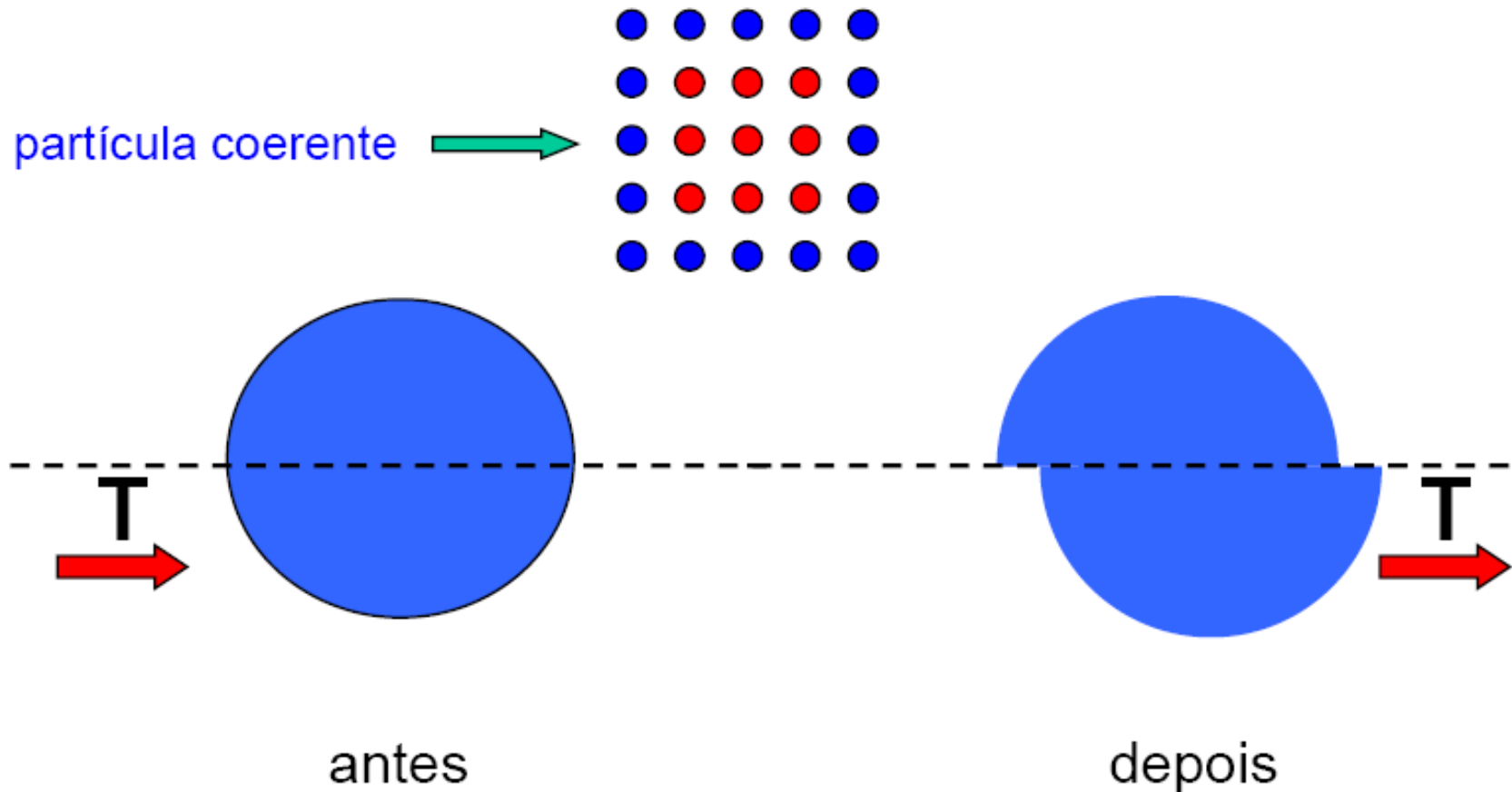
(c)

- a - COERÊNCIA
- b - SEMICOERÊNCIA
- c - INCOERÊNCIA

(Fonte: Rezende)

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**

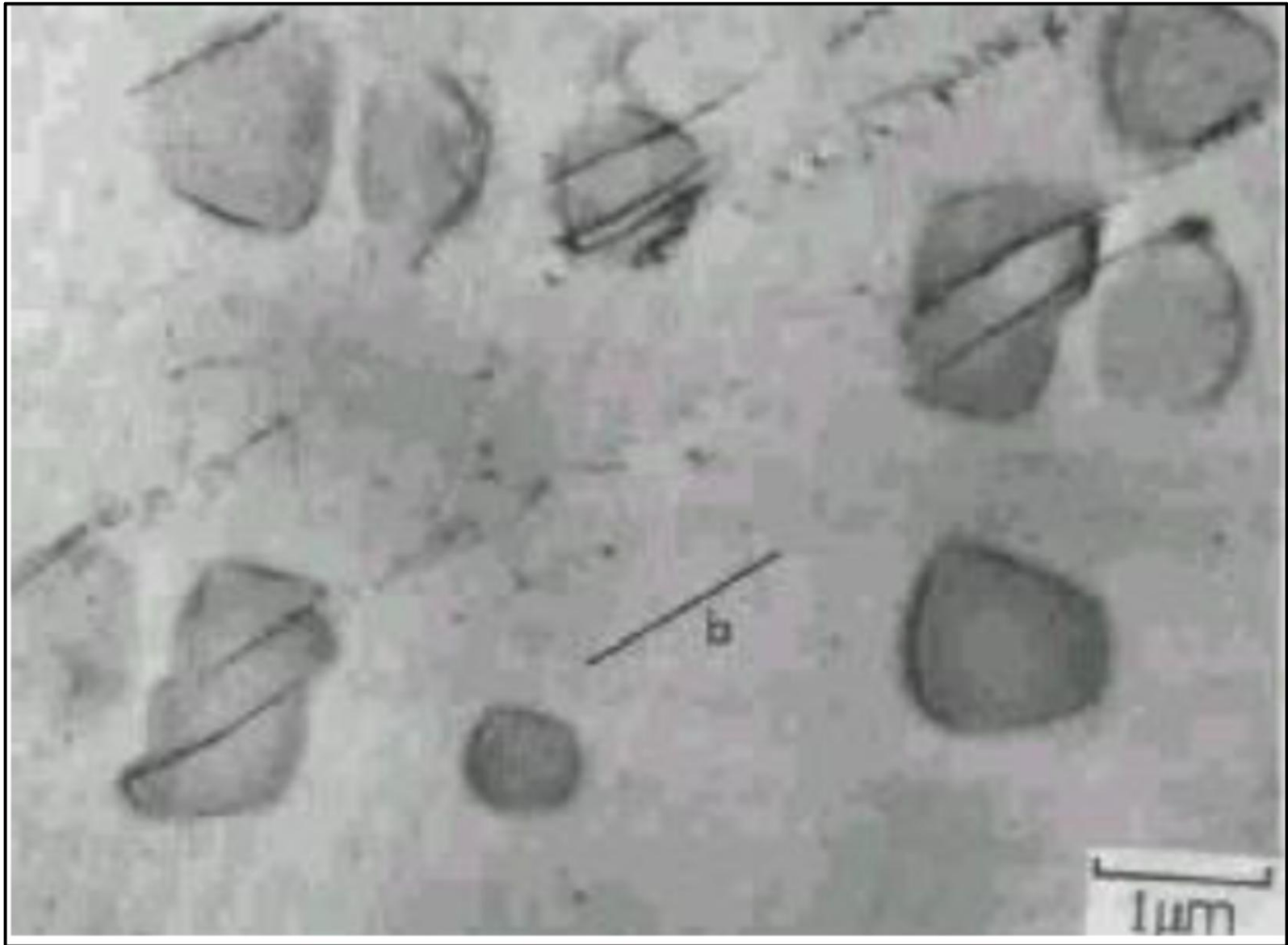
**O PLANO DE DESLIZAMENTO CONTÉM A
DISCORDÂNCIA E A PARTÍCULA**

DEVIDO Á TENSÃO EM TORNO DO PRECIPITADO

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

DEFORMAÇÃO

PRECIPITADOS DE 2ª FASE CORTADOS- MET



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.

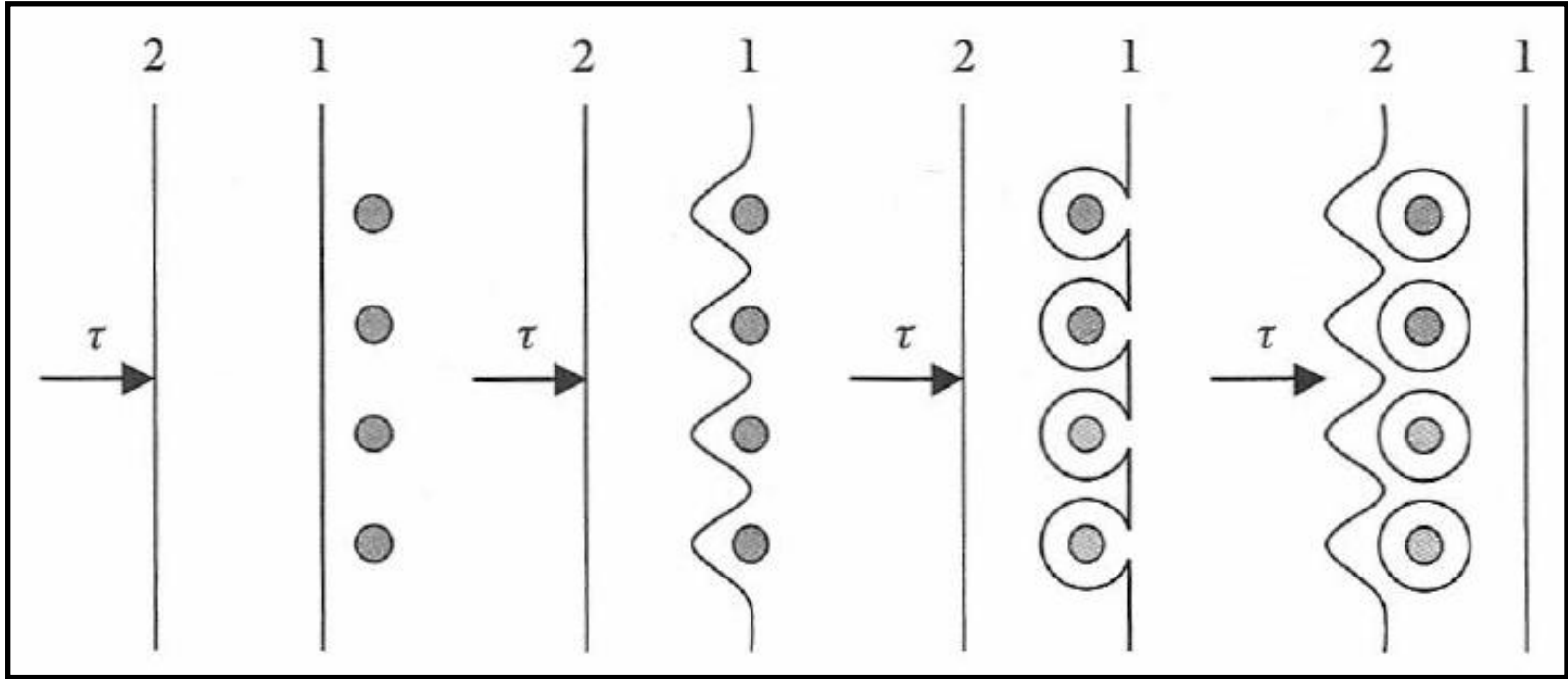
MECANISMO DE OROWAN (1948)

ANÉIS DE DISCORDÂNCIA EM TORNO DOS PRECIPITADOS

PRÓXIMA DISCORDÂNCIA ENFRENTA OS ANÉIS DA 1ª.

MAIOR ENCRUAMENTO DURANTE A DEFORMAÇÃO
MAIOR AUMENTO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

TEORIA DO ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO

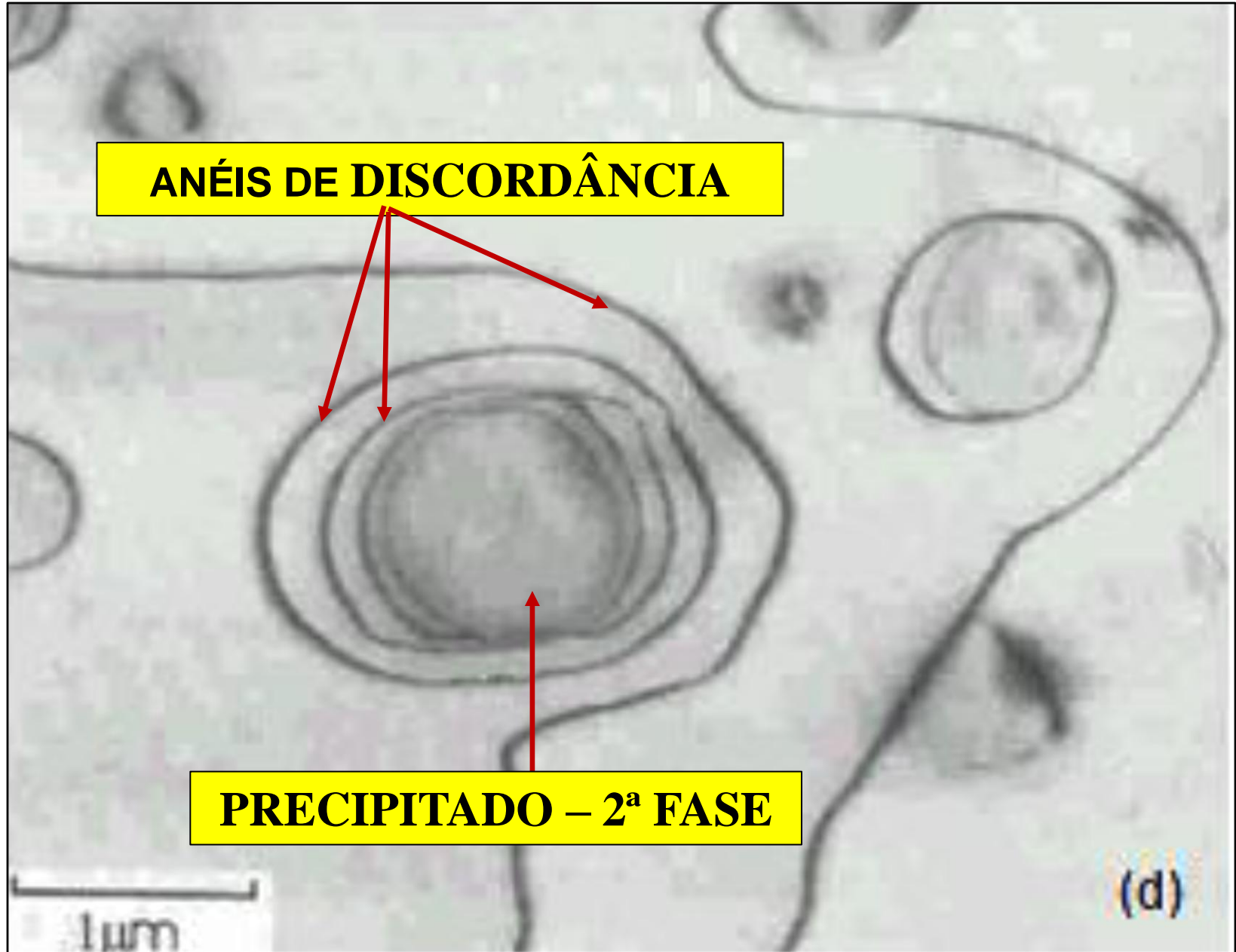


- QUANTO MENOR O ESPAÇAMENTO, MAIOR O EFEITO DO ENDURECIMENTO;
- ALGUMAS LIGAS, O AUMENTO DO LIMITE DE ESCOAMENTO É DE 5 VEZES;
- NO SUPERENVELHECIMENTO, O AUMENTO DOS PRECIPITADOS LEVA AO AUMENTO DA DISTÂNCIA ENTRE ELES- A RESISTÊNCIA CAI.

MECANISMO DE OROWAN-MET

ANÉIS DE DISCORDÂNCIA

PRECIPITADO – 2ª FASE



Zonas de Guinier- Preston (GP)

FORMAÇÃO DOS PRECIPITADOS DE 2ª.FASE

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

LIGAS DE Al - Cu

FORMAÇÃO DOS PRECIPITADOS DE 2ª.FASE

- A fase **K** é matriz e é uma solução sólida substitucional, formada por átomos de cobre dissolvidos na rede CFC do alumínio;
- Fase de equilíbrio **Θ**: CuAl_2 (tetragonal);
- **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** 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;

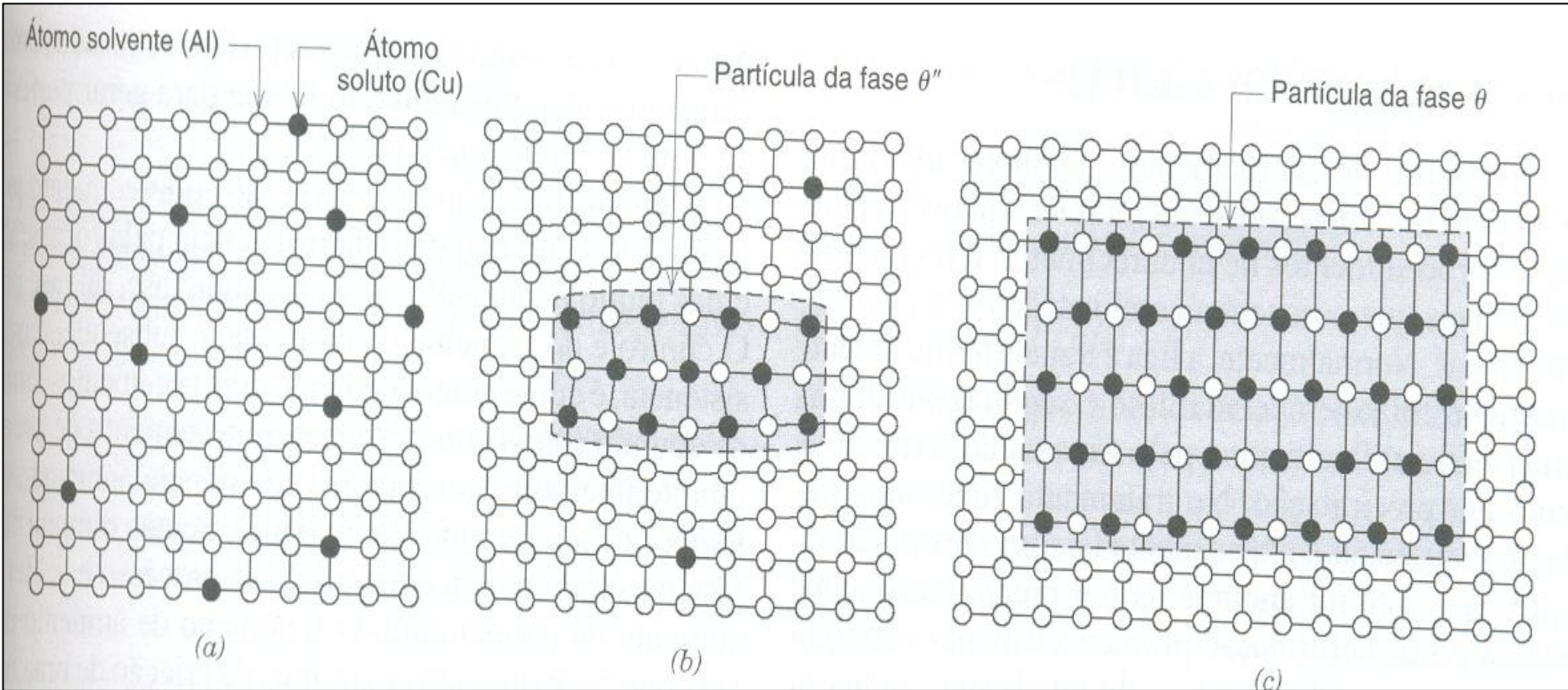
LIGAS DE Al - Cu

FORMAÇÃO DOS PRECIPITADOS DE 2ª.FASE

- **Maior dureza – GP2 – Θ'' ;**
- **Após intervalo de tempo maior: Θ' - tetragonal-semicoerentes-maiores (MO)- menor energia livre – menor distorção da rede-menor dureza;**
- **Θ' e Θ'' convivem por algum tempo e depois, Θ'' desaparece;**
- **Continuando o processo: Θ , fase de equilíbrio incoerente;**
- **Quanto maior o teor do soluto maior o efeito. Ex: para o caso citado, o efeito maior é para 4% de Cu em comparação a 2% de Cu.**

LIGAS DE Al - Cu

COERÊNCIA DAS PARTÍCULAS



EVOLUÇÃO DOS PRECIPITADOS DE 2ª.FASE

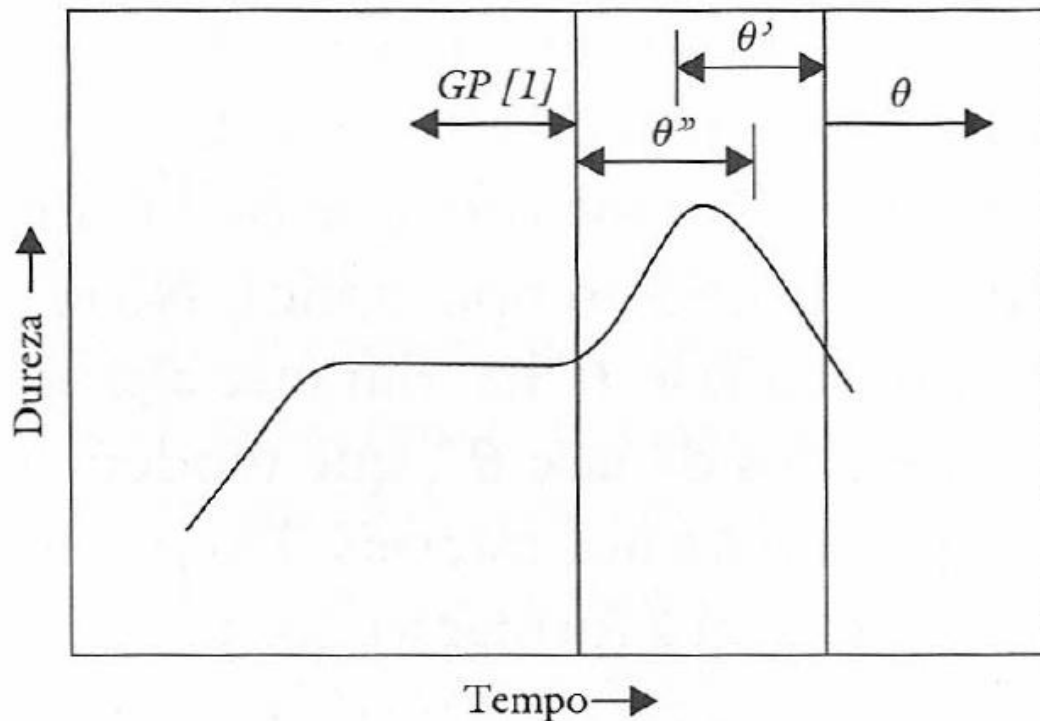


Figura 9.8 — Representação esquemática da seqüência de precipitados formados ao longo do tempo para uma liga *Al-Cu* e sua influência na dureza

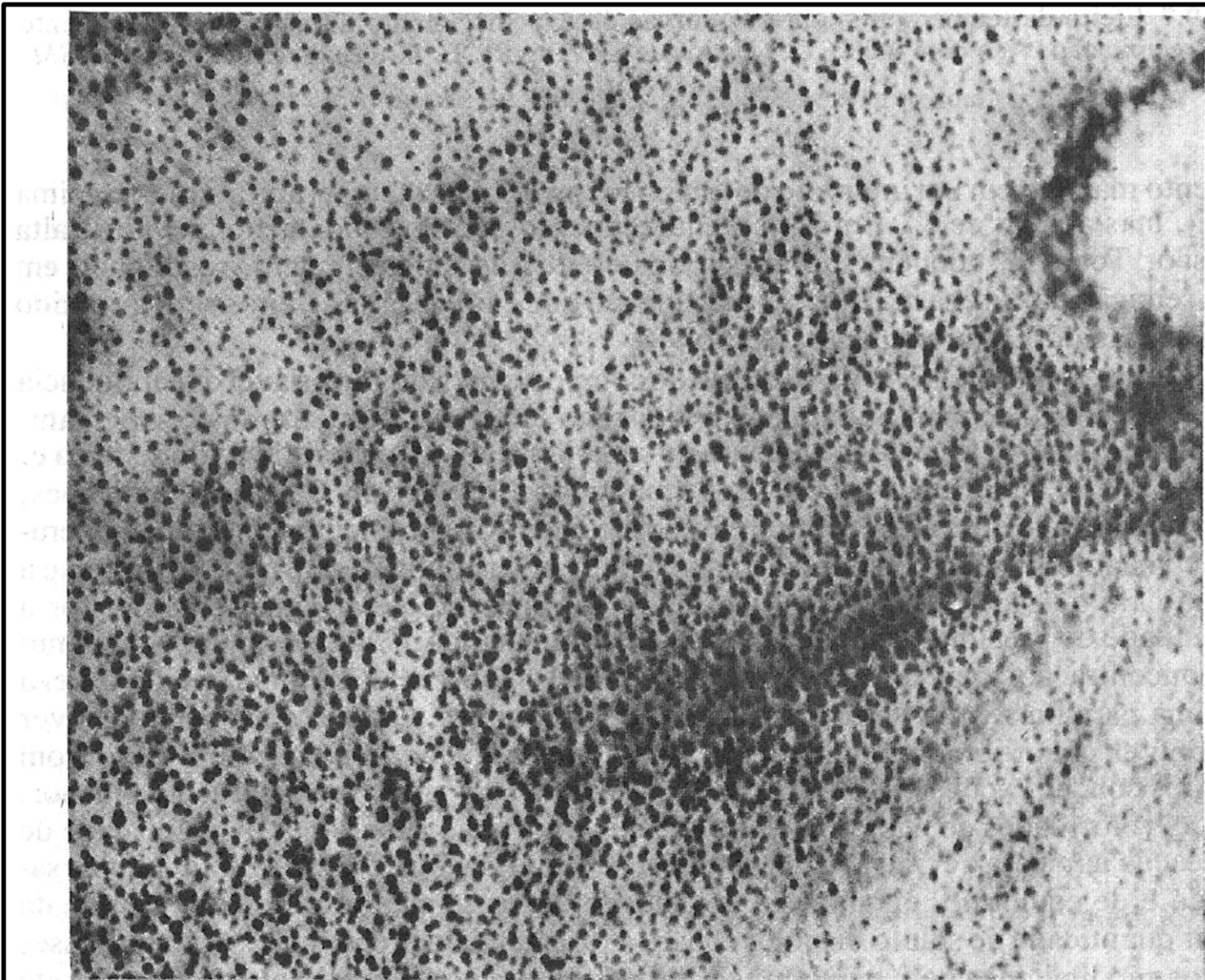
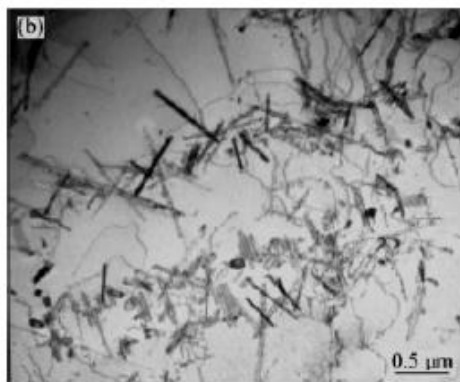
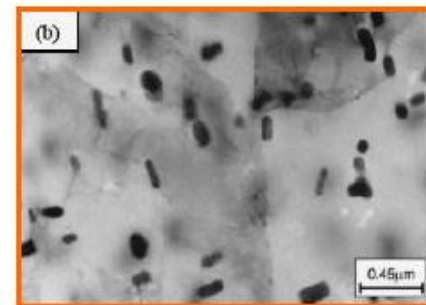
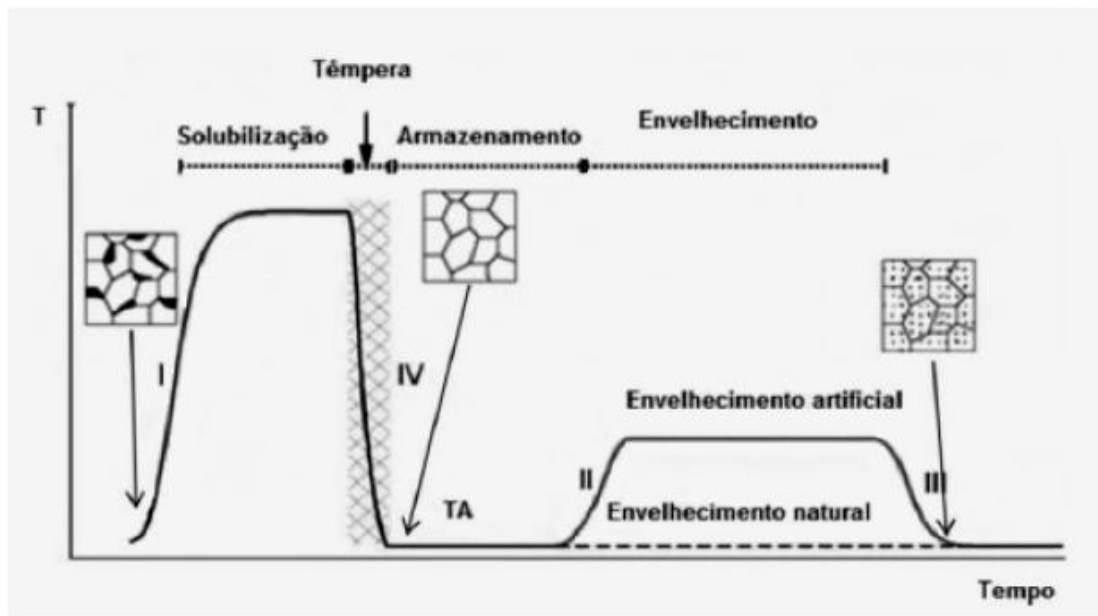


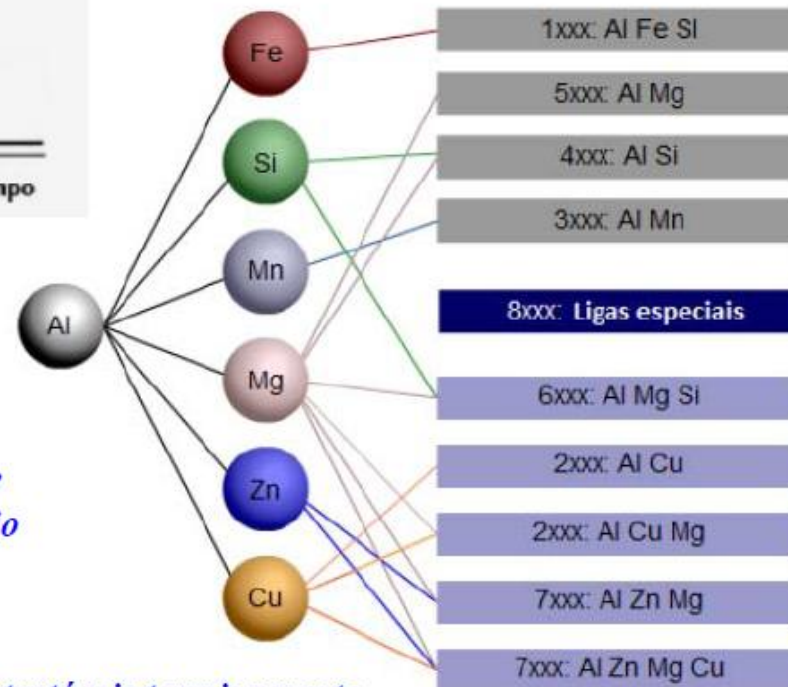
Fig. 9.8 Zonas de Guinier-Preston numa liga de alumínio com 16% de prata. (De Nicholson, R. B. e Nutting, J., *Acta Met.*, **9**, 332 [1961]. Cortesia de R. B. Nicholson.)

(Fonte:Reed-Hill)

TRATAMENTOS DE SOLUBILIZAÇÃO E ENVELHECIMENTO



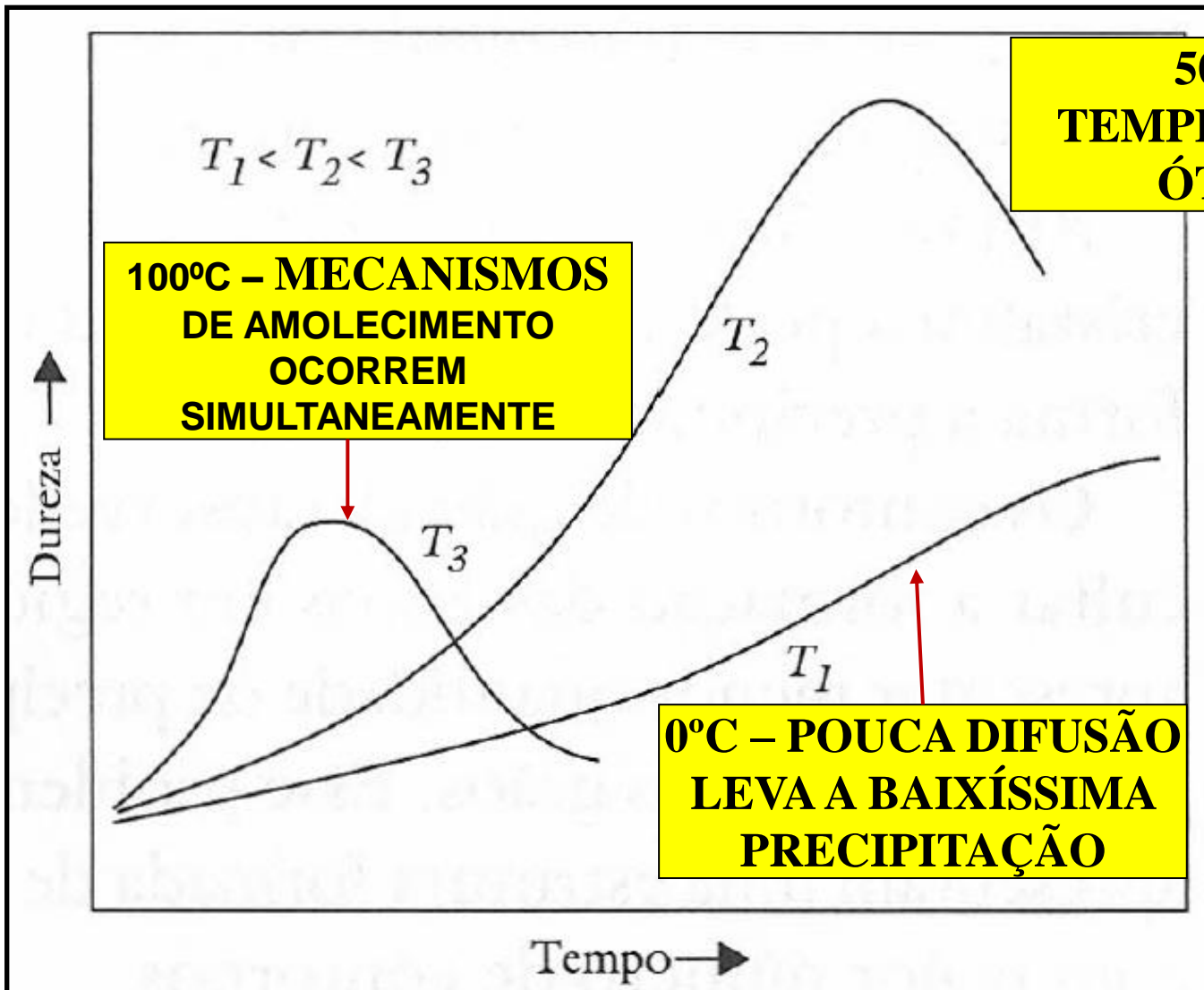
Interação entre discordâncias e precipitados em liga de alumínio



Ligas de alumínio tratáveis termicamente

(Prof.Dr. Carlos Baptista – EEL-USP)

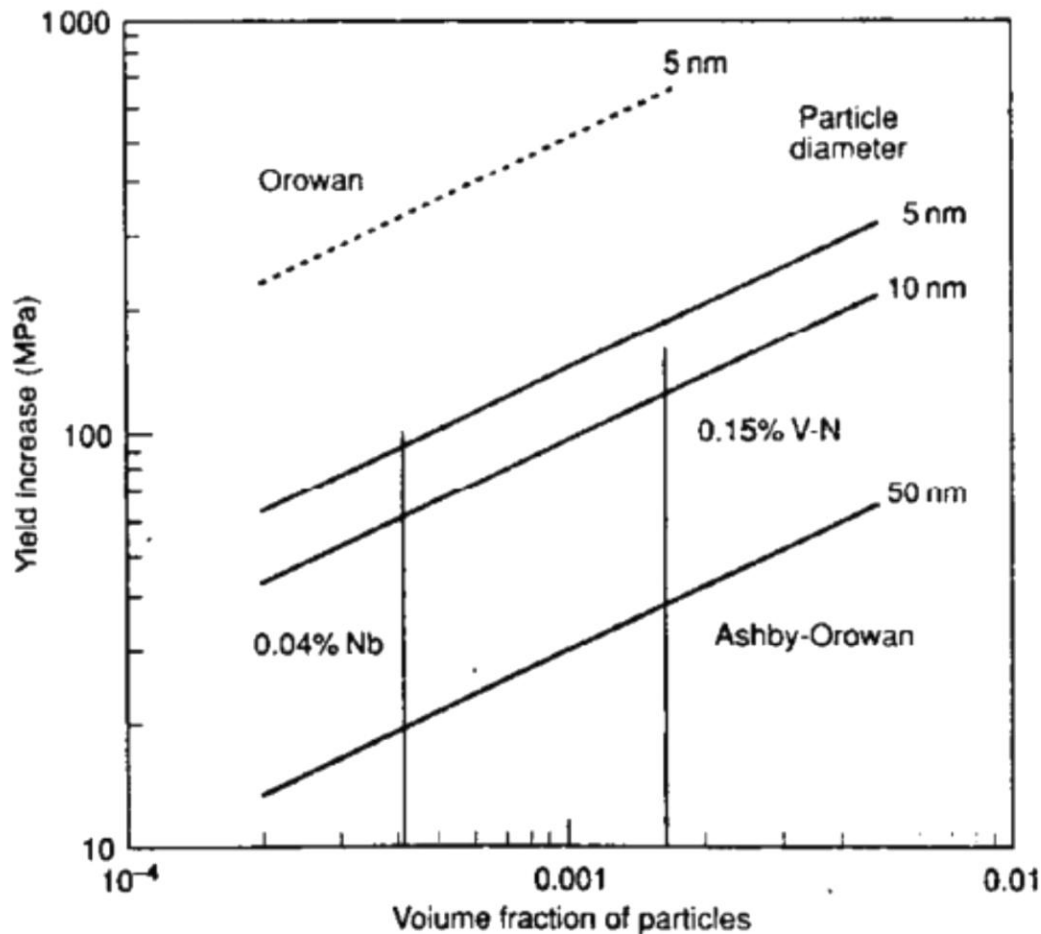
EFEITO DA TEMPERATURA DE PRECIPITAÇÃO



Aços Microligados

TMCP- Thermomechanical Controlled Process

➤ Endurecimento por precipitação:



Processo industrial

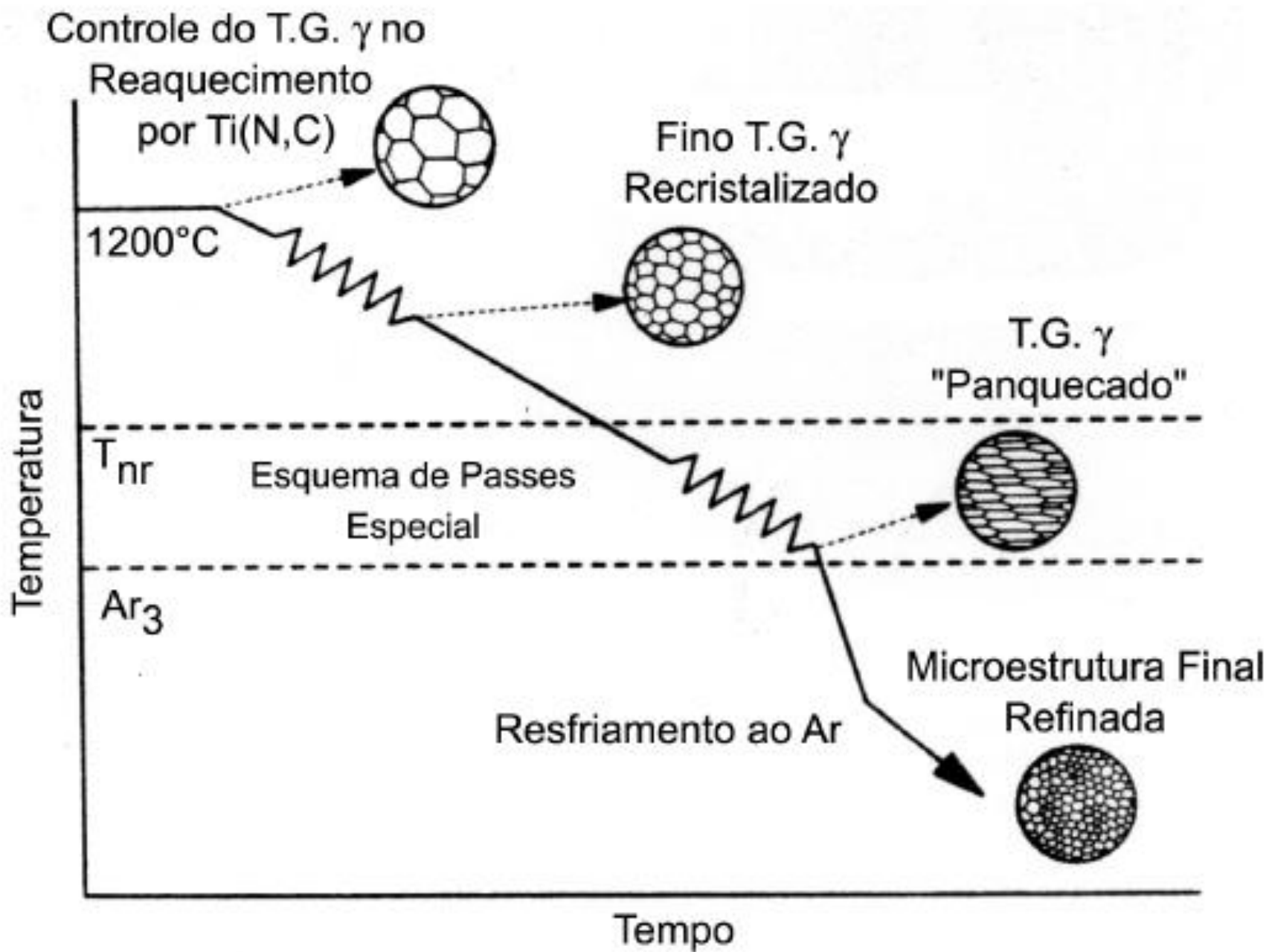


adição de microligantes (Nb, Ti, V)

▪ modelo de Orowan-Ashby:

f – fração volumétrica
 d – tamanho partícula [nm]

$$\Delta\sigma_p = 10800 \cdot \frac{\sqrt{f}}{d} \cdot \ln(1,63 \cdot d) \quad 11>$$





Endurecimento por encruamento: trabalho a frio

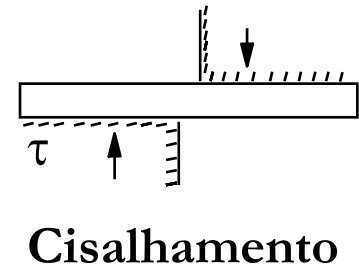
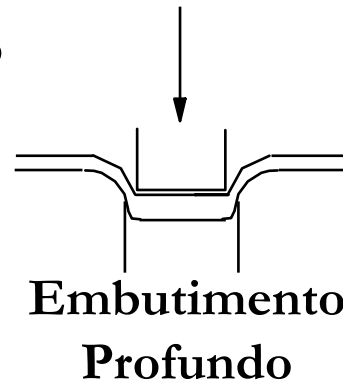
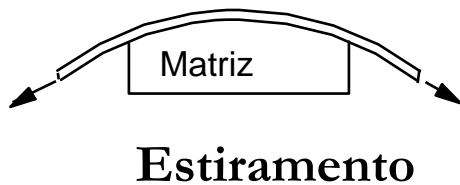
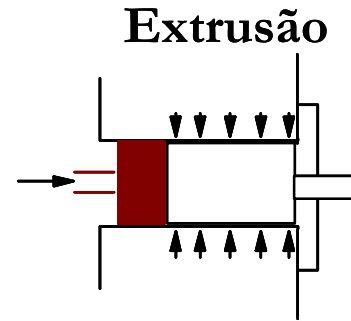
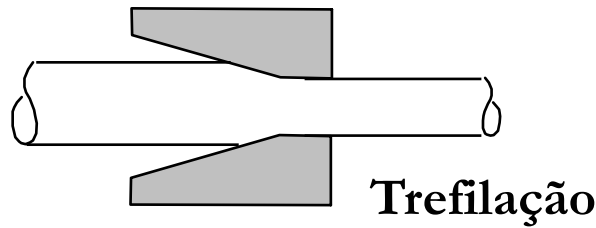
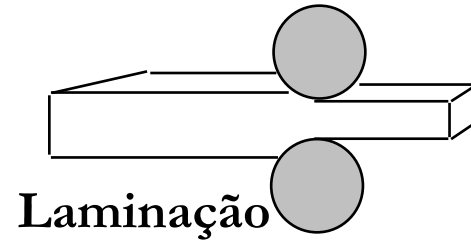
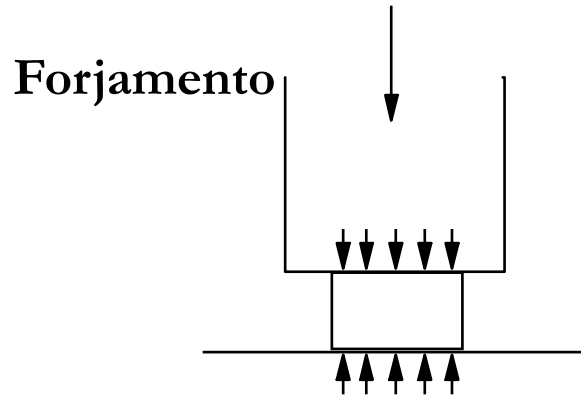
TRABALHO (DEFORMAÇÃO) A QUENTE E A FRIO

- **2% A 10%** da energia nos processos de **conformação (deformação)** é armazenada no material, em forma de **defeitos cristalinos (energia de deformação)**. A maior parte é dissipada em forma de calor;
- **Trabalho (deformação) a frio:** realizado em **temperatura** na qual **não** ocorrem processos de **recuperação e/ou recristalização**.
Conserva a energia de deformação: não há eliminação de defeitos;
- **Trabalho (deformação) a quente:** realizado em **temperatura** na qual **ocorrem** processos de **recuperação e/ou recristalização**. **A energia de deformação é reduzida: ocorre a eliminação de defeitos.**

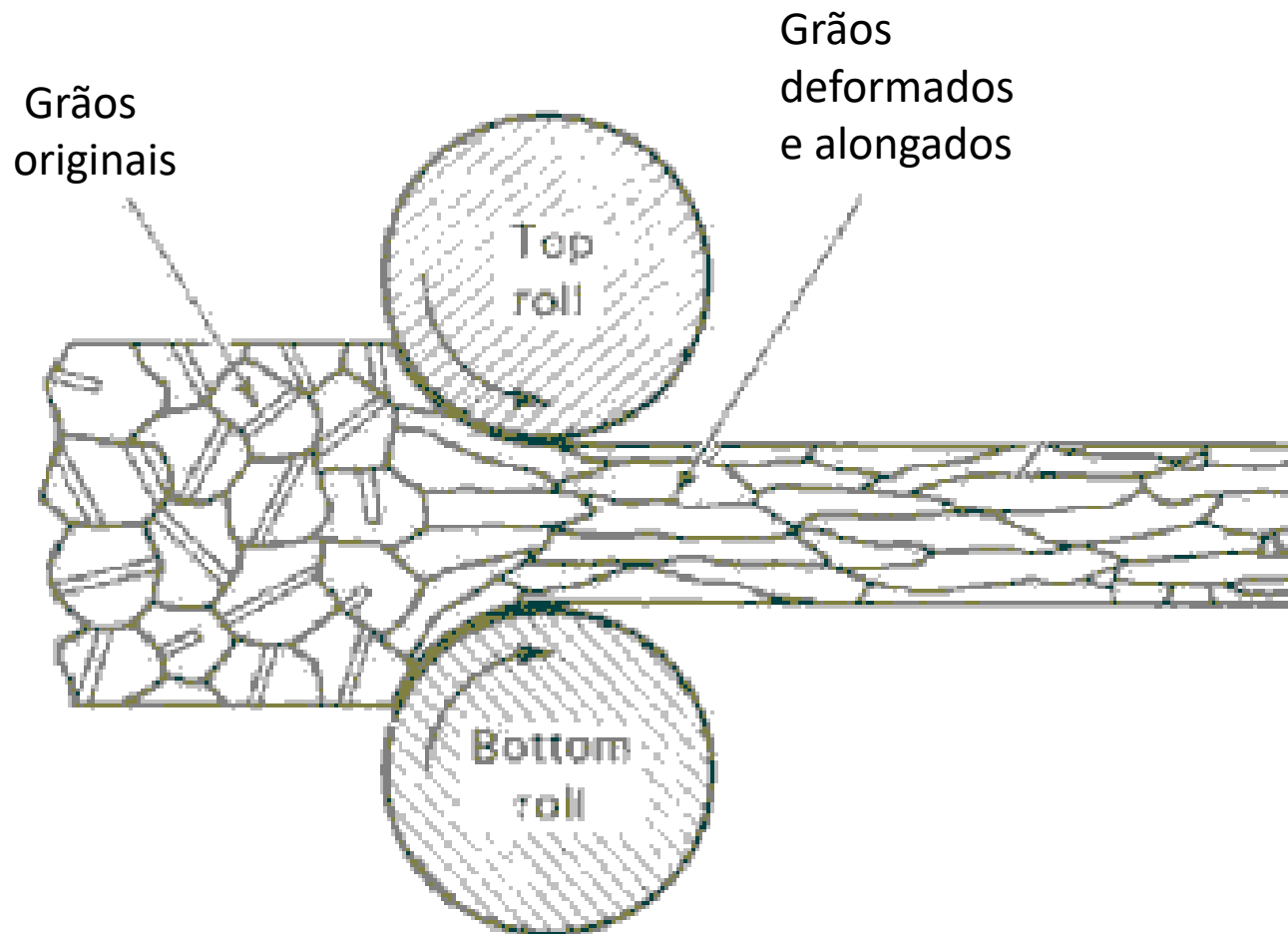


- A definição de **temperatura** de trabalho a **quente** ou a **frio** é **complexa** mas pode-se definir um **limite aceitável**, em relação à **temperatura de fusão (T_f) em K** [TOMIZ at el, 2000-ISIJ]
- **Trabalho a quente, acima de $0,5T_f$;**
- **Trabalho a frio, abaixo de $0,5T_f$.**

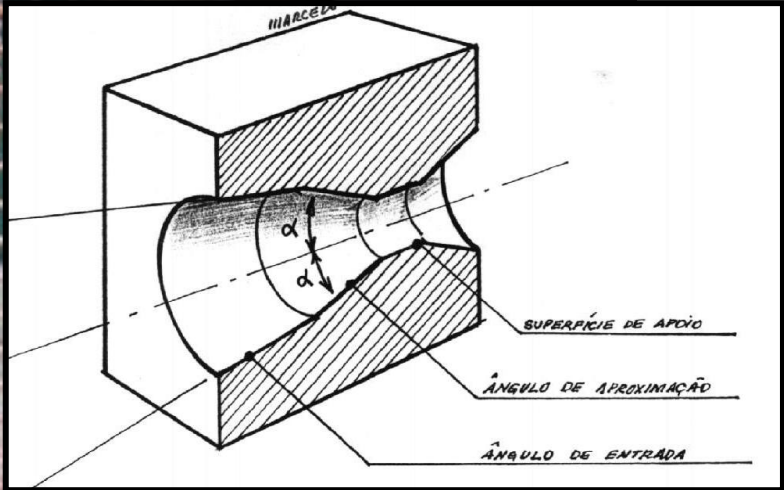
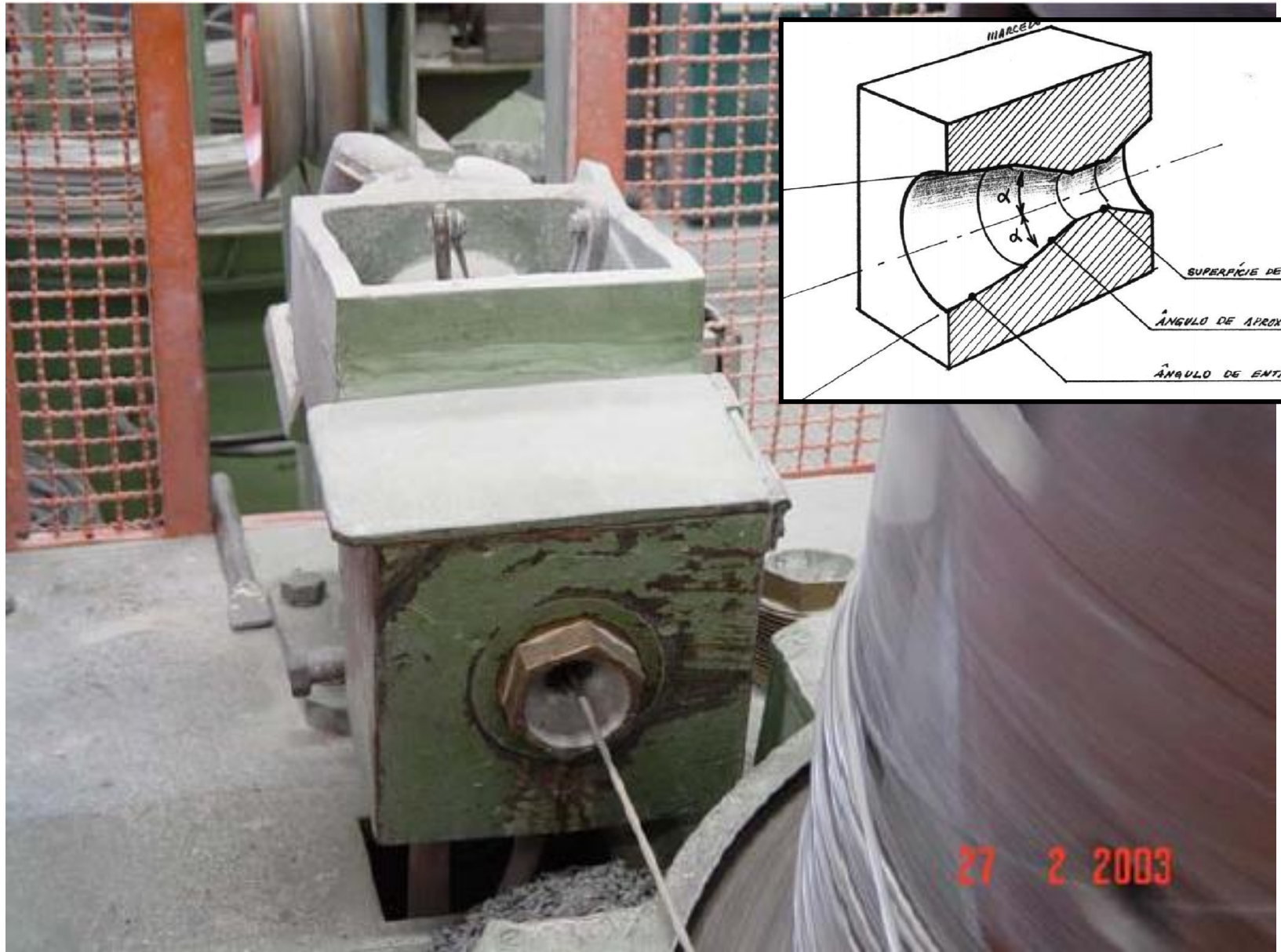
PRINCIPAIS TIPOS DE CONFORMAÇÃO



LAMINAÇÃO A FRIO



TREFILAÇÃO



27 2 2003

TRABALHO A FRIO

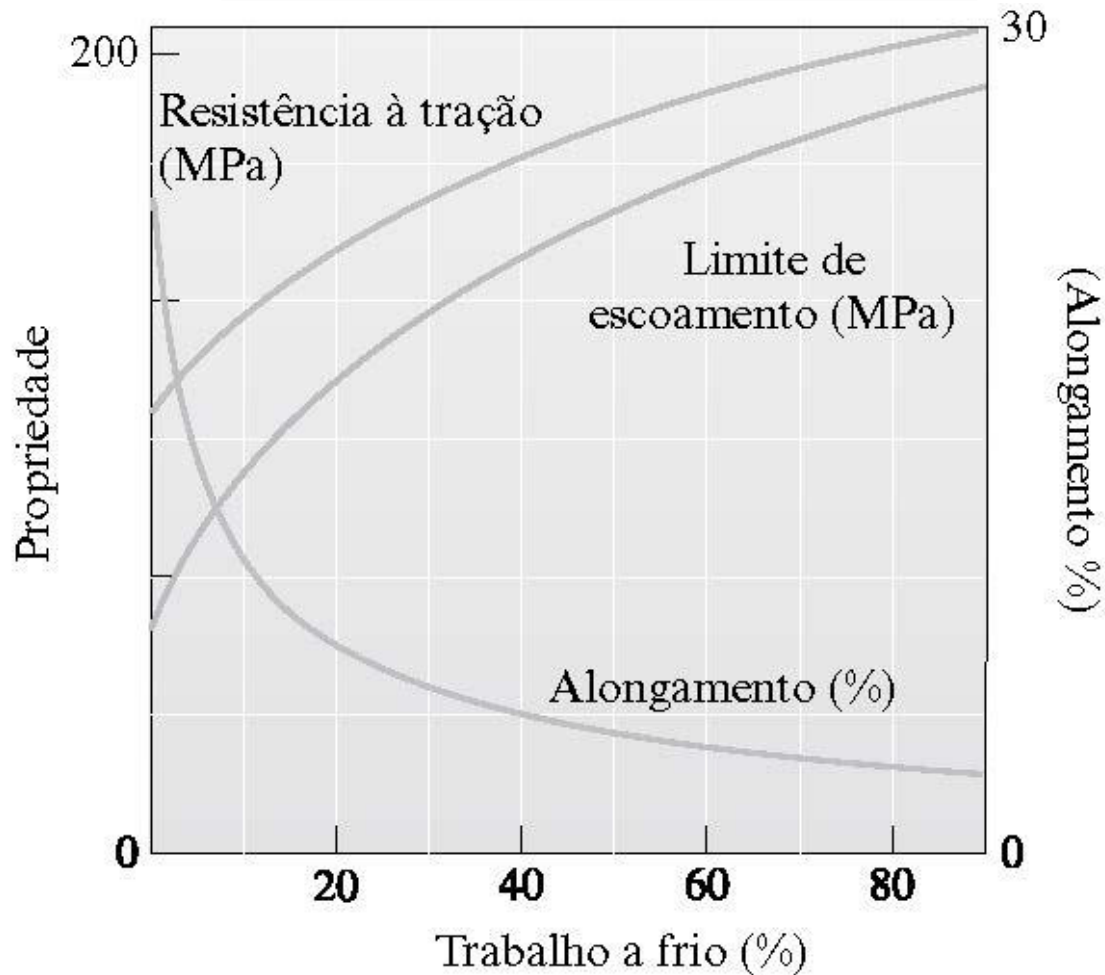


Figura 8-24 O efeito do percentual de trabalho a frio nas propriedades de uma liga de alumínio 3105 (para os Problemas 8-12, 8-14, 8-16 e 8-20). Crédito: © Cengage Learning 2014.

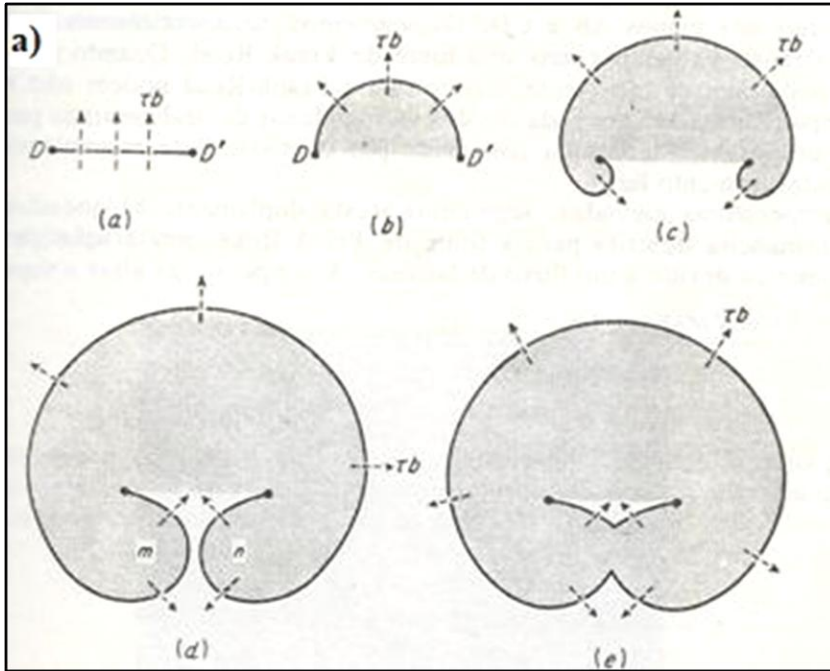


- Aumenta a dureza e a resistência dos materiais, mas a ductilidade diminui
- Permite a obtenção de dimensões dentro de tolerâncias estreitas
- Produz melhor acabamento superficial

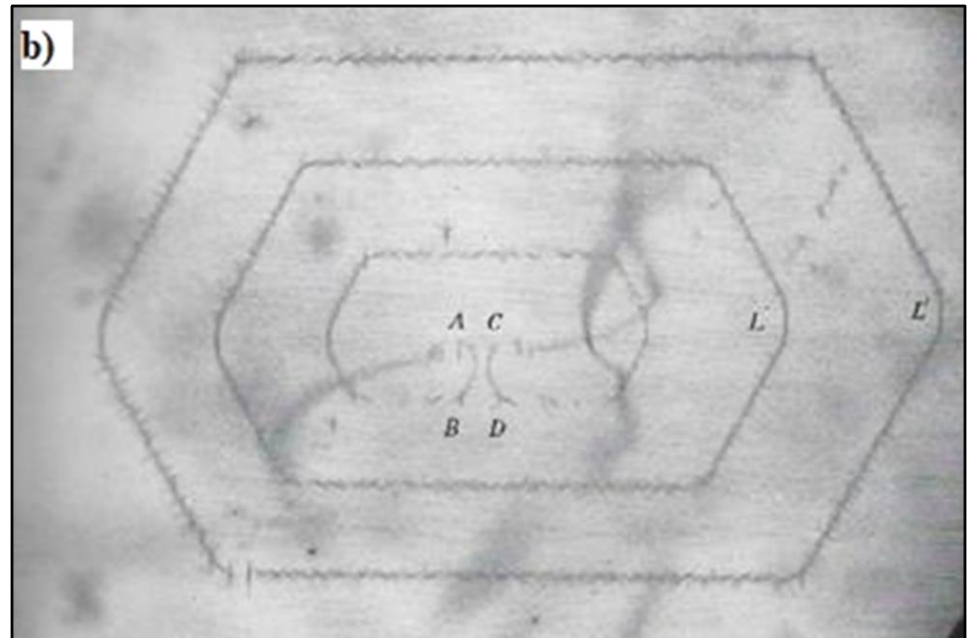
ENCRUAMENTO OU ENDURECIMENTO PELA DEFORMAÇÃO À FRIO

- É o fenômeno no qual um **material endurece** devido à **deformação plástica (realizado pelo trabalho à frio)**;
- Esse endurecimento dá-se devido ao **aumento de densidade de discordâncias** e imperfeições promovidas pela deformação;
- A medida que se **aumenta o encruamento maior é a força** necessária para produzir **deformação plástica**;
- O **encruamento** pode ser **removido** por **tratamentos térmicos** que reduzem a densidade discordâncias: **Recozimento/Alívio de tensões**, que promove a **recuperação** e/ou **Recozimento para recristalização**.

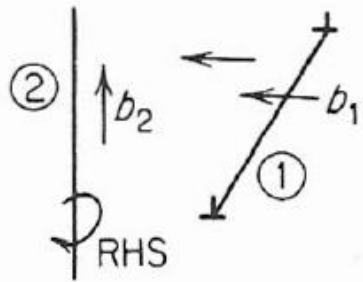
FONTES DE FRANK-REED



Geração de linhas de discordância

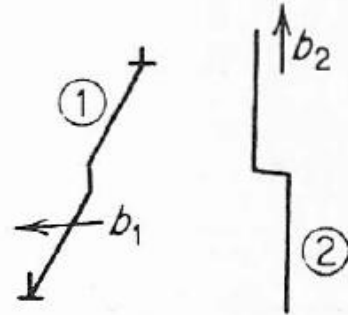


INTERAÇÃO ENTRE LINHAS DE DISCORDÂNCIAS

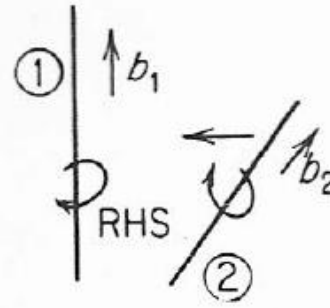


Antes

(a)

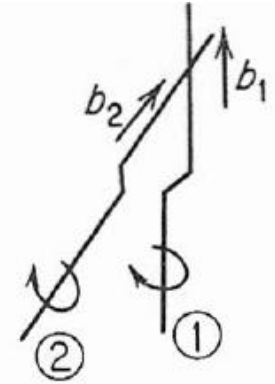


Após



Antes

(b)



Após

(ADAPTADO: DIETER)



DENSIDADE DE DISCORDÂNCIAS

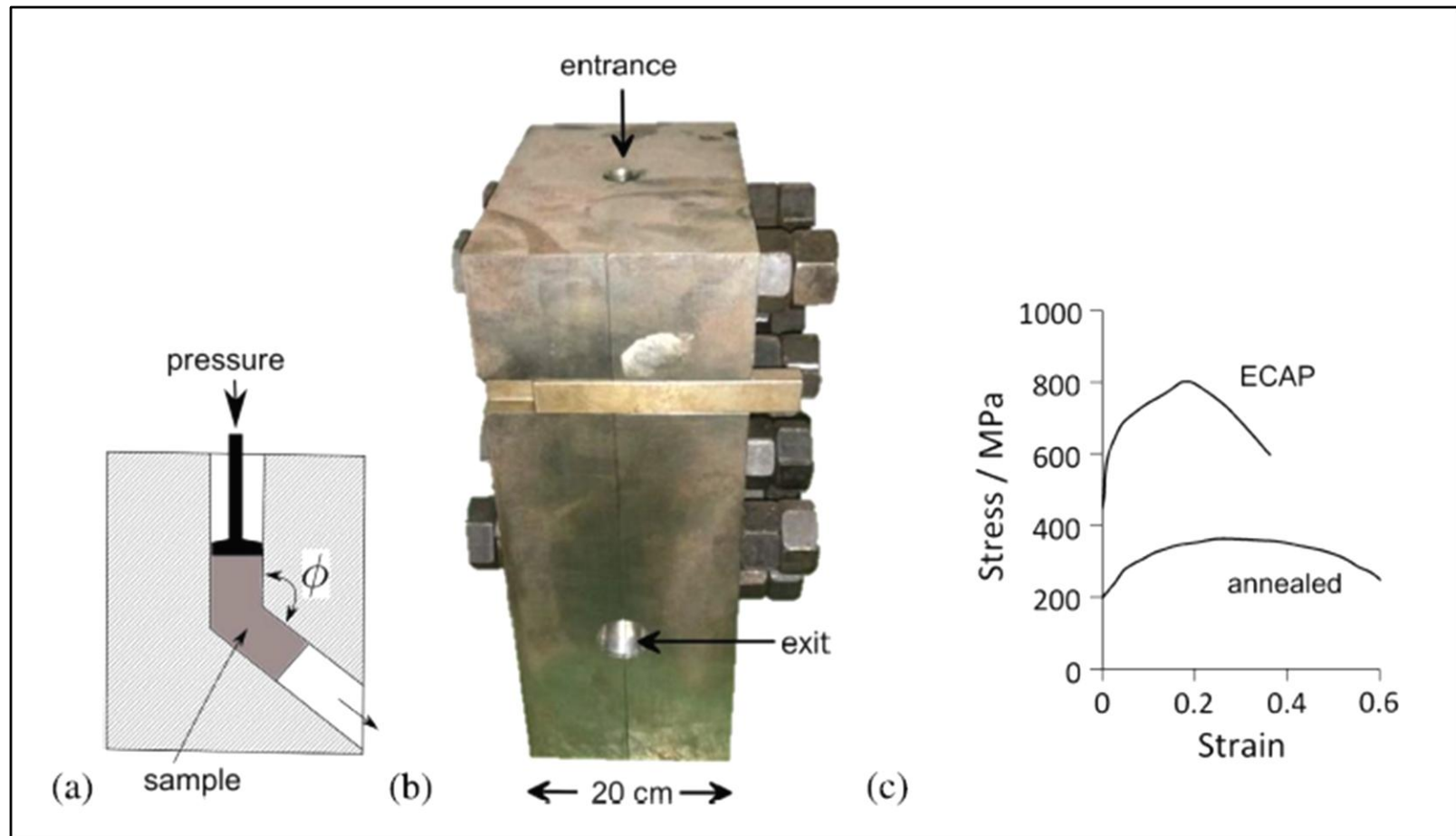
- 10^5 a 10^6 cm^{-2} para um metal totalmente recozido;
- 10^{10} a 10^{12} cm^{-2} para um metal trabalhado a frio (encruado);

O processo de recozimento envolve normalmente três etapas: **recuperação, recristalização e crescimento de grão.**

A **recuperação** é um processo de **aniquilação de discordâncias**, que promove um **rearranjo** das linhas de discordância para uma **configuração de menor energia.**

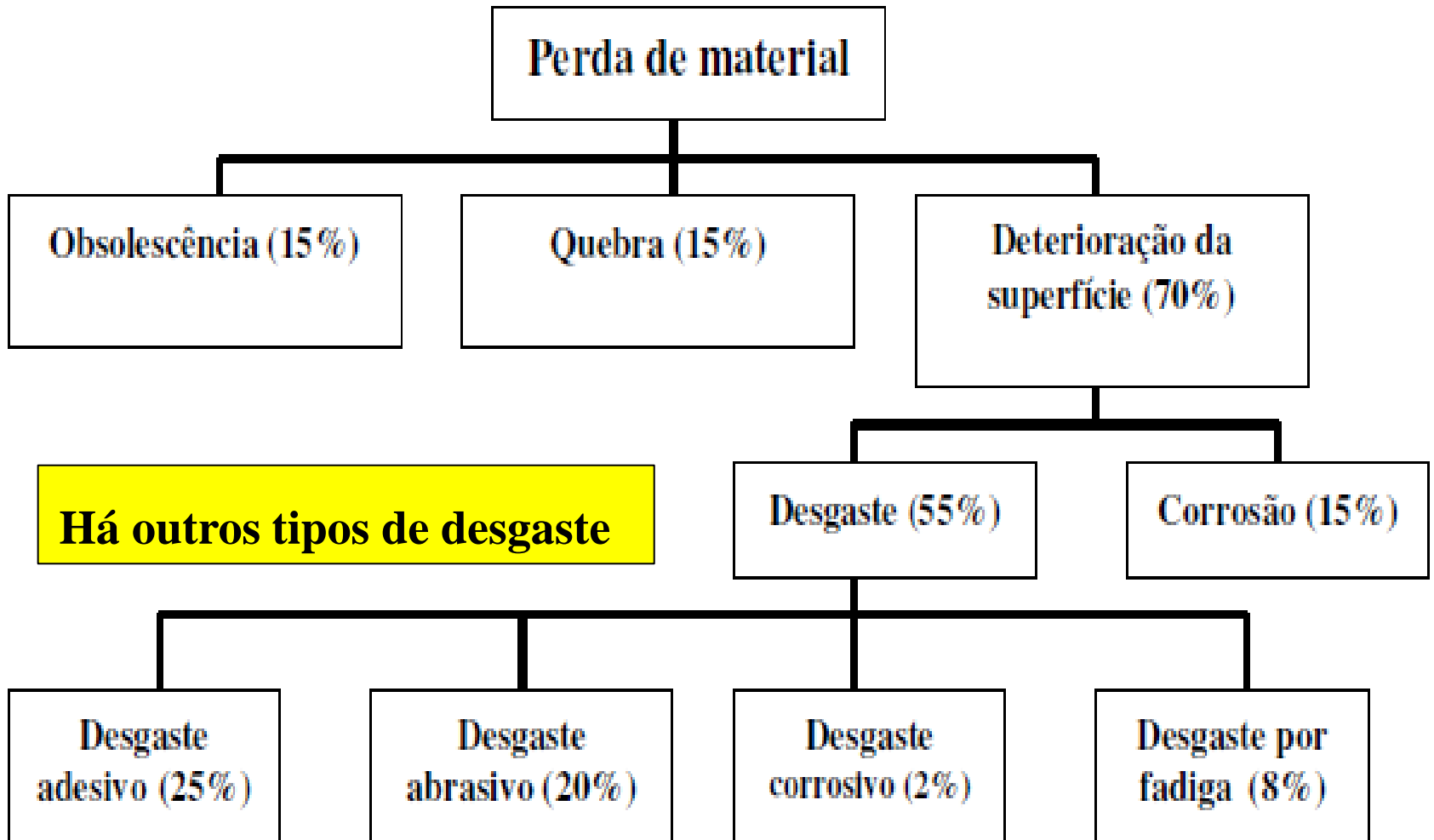
Materiais Nanoestruturados

- **Tamanho de grão muito menor que 100nm;**
- **$1\text{nm}=10^{-6}\text{ mm} = 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}$ - TG 8 (ASTM E 112)= $22,5\mu\text{m}$;**
- **Fabricação por deformação plástica severa, *Equal Channel Angular Processing (ECAP)*.**



Desgaste e Tratamentos Termoquímicos

DESGASTE



Custo anual de 4,5% PIB: R\$ 9.9 Trilhões (2022)

DESGASTE

- **Definição (ASTM):** **degradação** da **superfície** de um **sólido** que, geralmente, envolve **perda progressiva** de material, devido ao **movimento relativo** desta superfície com uma ou mais substâncias em **contato**;
- **Tribologia:** **ciência** que estuda o **desgaste** e o **atrito**, ou seja, a interação de superfícies em movimento e de técnicas relacionadas;
- Onde há **atrito**, há **desgaste**;



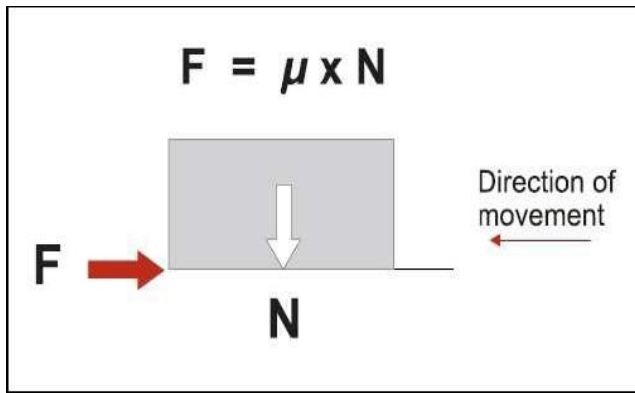
ATRITO

EFEITOS NEGATIVOS

- **Redução na eficiência** de motores, transmissões, rolamentos, eixos, devido a **deterioração por desgaste, fadiga, etc;**
- **Redução do tempo de vida** de componentes e equipamentos;
- **Causa desgaste, desajustes, vibrações e ruídos.**

EFEITOS POSITIVOS

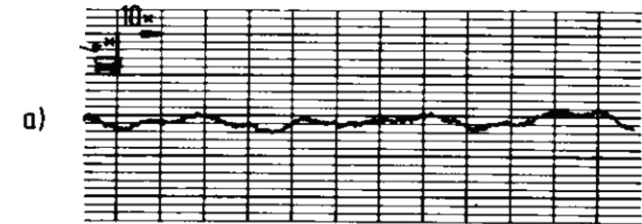
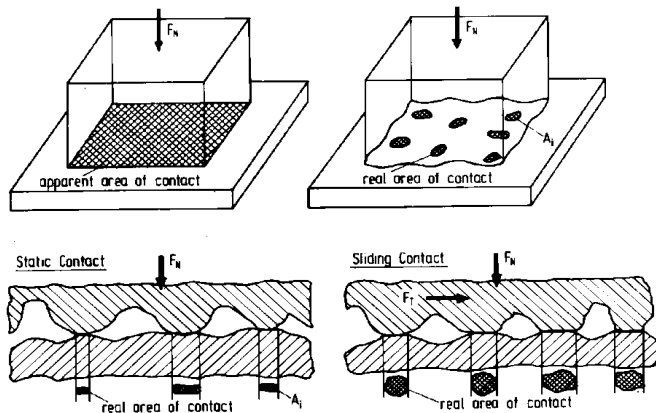
- **Possibilita escrever** com um lápis;
- **Permite caminhar,** possibilita o **deslocamento** ou **frenamento de veículos;**
- **Permite montagem/ construção/processos:** qualquer **objeto** colocado sobre um **plano** levemente **inclinado não pararia** no lugar.



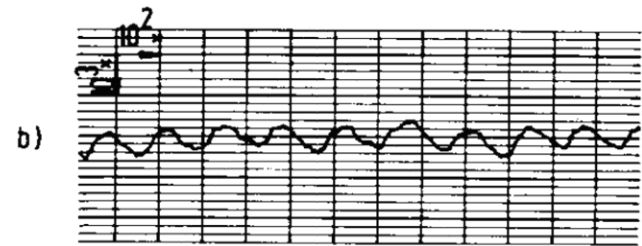
- a) polimento eletrolítico
- b) superfície torneada
- c) superfície laminada

Atrito depende da:

- **Rugosidade** das superfícies;
- **Área de contato real**, que é diferente da **área aparente**.



$R_a = 0.11 \mu\text{m}$, $R_t = 0.58 \mu\text{m}$



$R_a = 0.72 \mu\text{m}$, $R_t = 3.7 \mu\text{m}$



$R_a = 0.42 \mu\text{m}$, $R_t = 3.21 \mu\text{m}$

Os principais fatores de desgaste são:

- **Material:** Dureza, tenacidade, composição química e microestrutura.
- **Processo:** Materiais em contato, pressão, velocidade, temperatura e acabamento superficial.
- **Outros:** Lubrificação, corrosão.

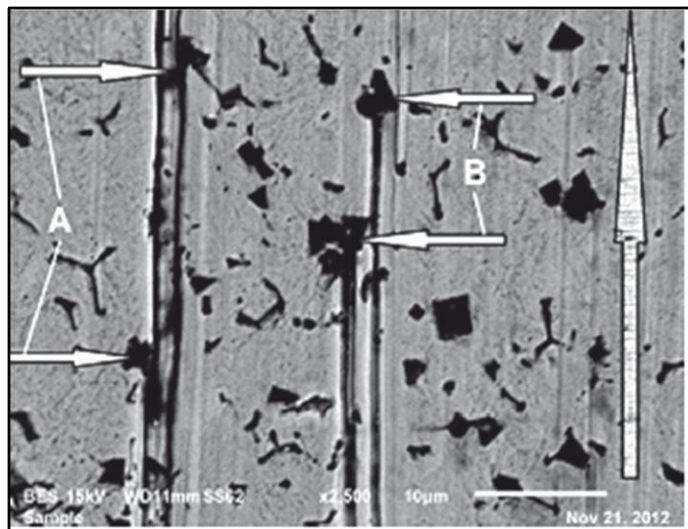
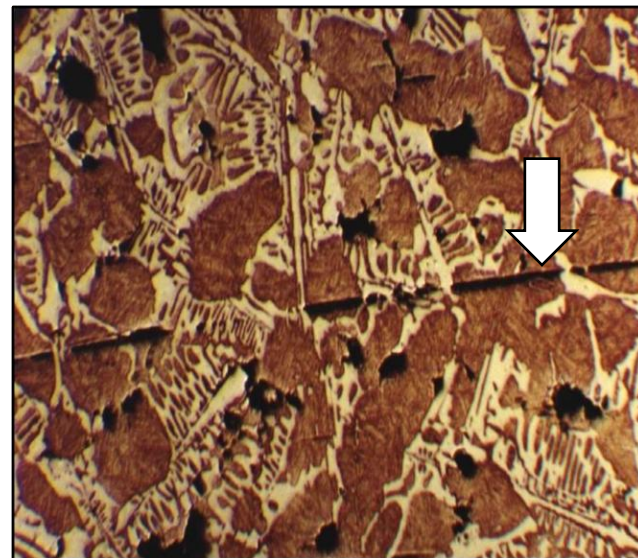


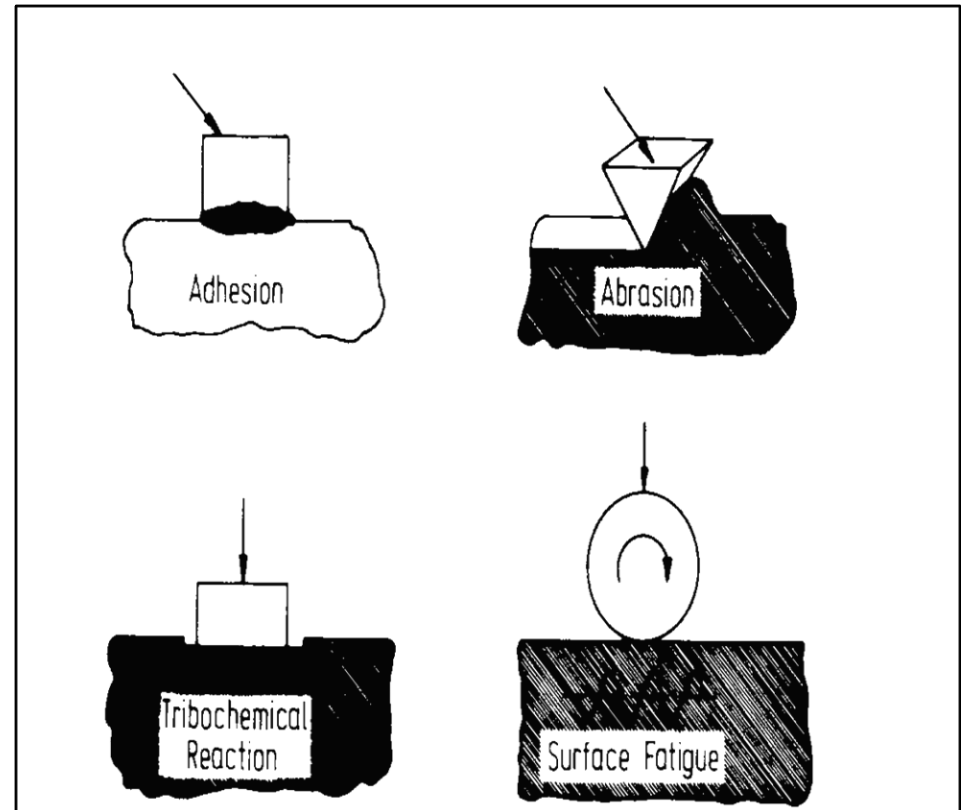
Imagem em **MEV** do mecanismo de desgaste, em **revestimento duro de Fe-Cr-C-Ti** em aço 1020. Nota-se que as partículas de **TiC maiores** barram o risco de desgaste (B)



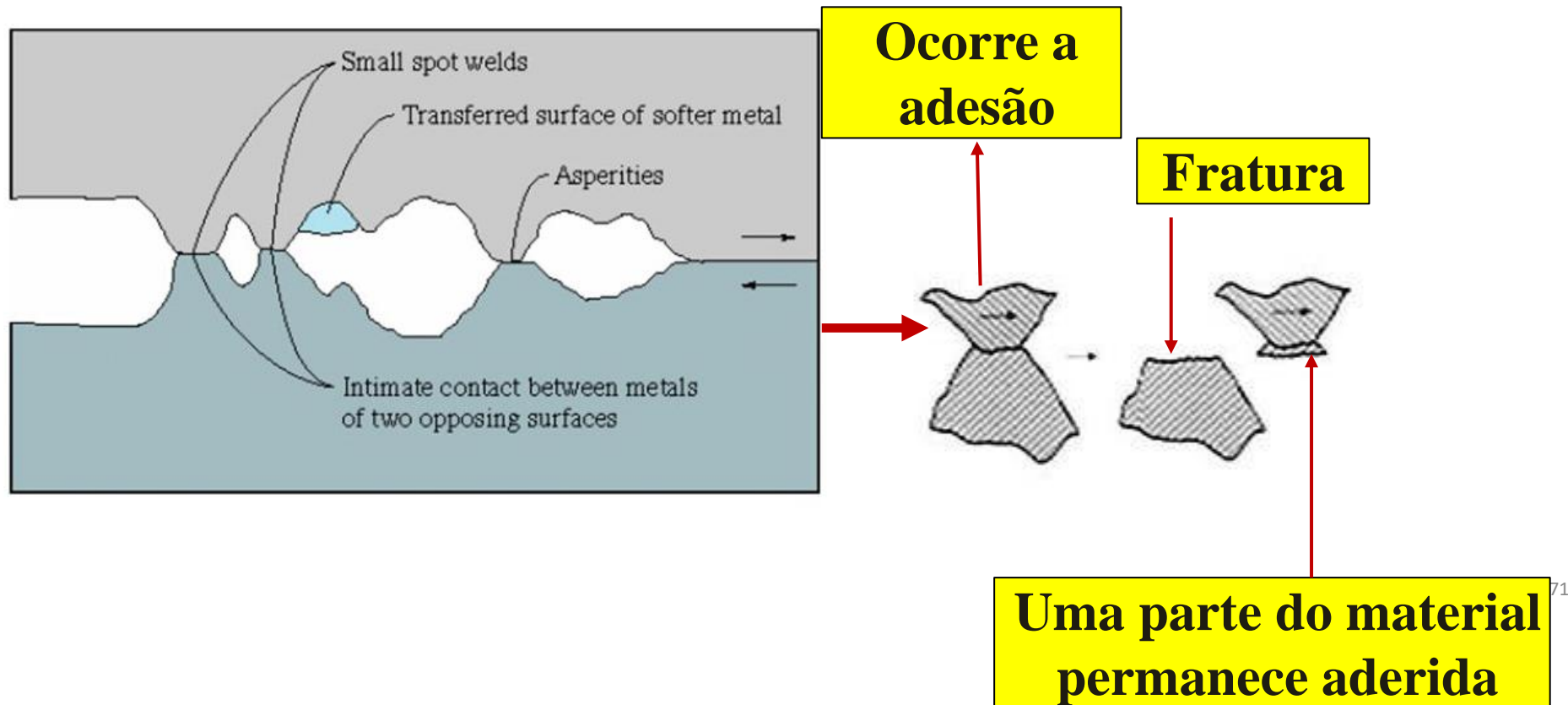
Risco de Desgaste em Cilindro de laminação (seta). Imagem de MO.

De acordo com a norma **DIN 50320** há **quatro** mecanismos básicos de desgaste :

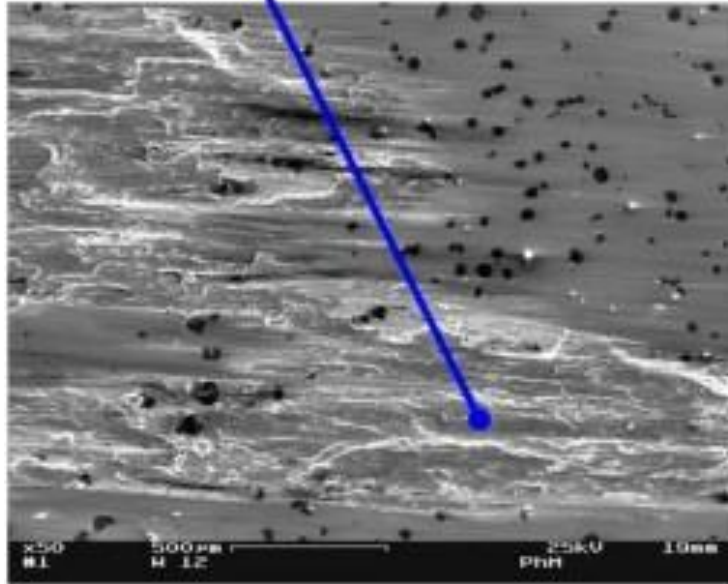
- Adesão;
- Abrasão;
- Reação tribo-química;
- Fadiga de superfície (contato/fretting).



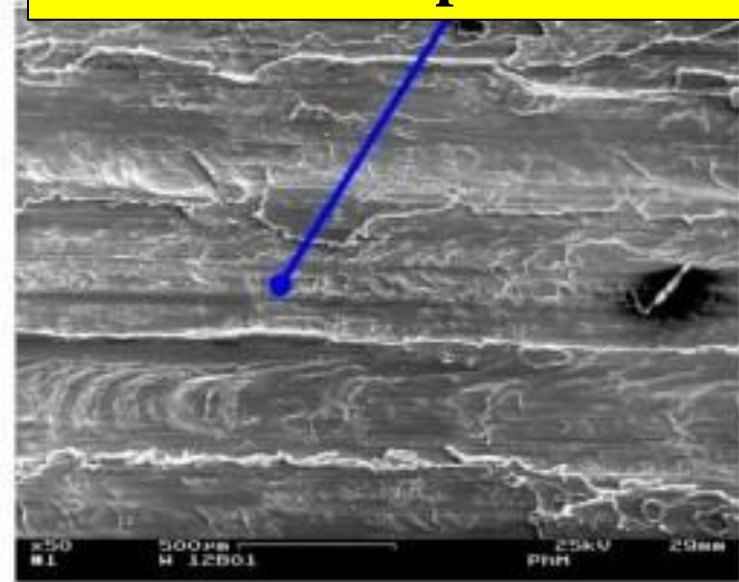
Desgaste adesivo: ocorre quando há **deslizamento** relativo entre **duas superfícies**. **Pressões** locais **muito altas** são exercidas pelas **asperezas** em contato, **com deformação plástica**, **adesão** e **formação de junções**.



**Desgaste adesivo na
ferramenta**



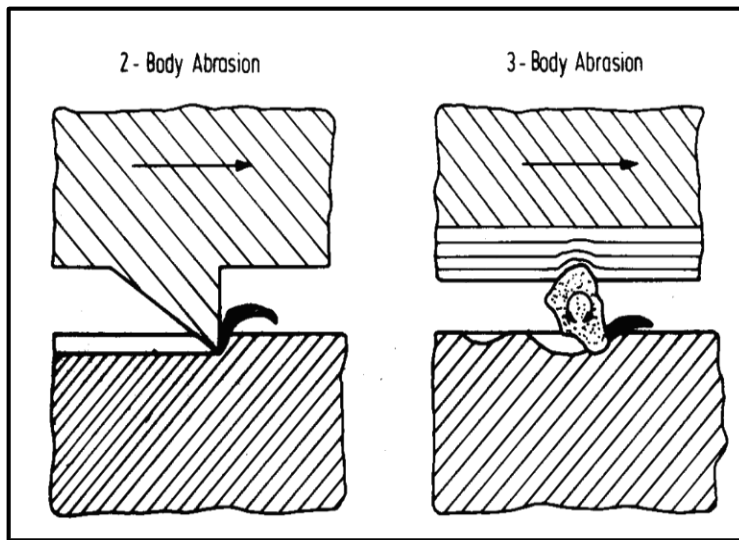
**Zonas de cisalhamento na
chapa**



**Desgaste adesivo ocorrido durante a conformação de chapas de
alumínio na indústria automotiva**

Desgaste abrasivo: ocorre quando há **descolamento** de material provocado por **partículas de alta dureza** existentes entre as duas superfícies em movimento.

As **partículas de alta dureza** podem ter diversas origens como: produto do **processamento** de minérios (**sílica, alumina, etc.**), **fragmentos** metálicos altamente **encruados** removidos das superfícies em contato ou **partículas** que se desprendem das **rebarbas de usinagem**.



Abrasão a dois corpos e a três corpos

Antes

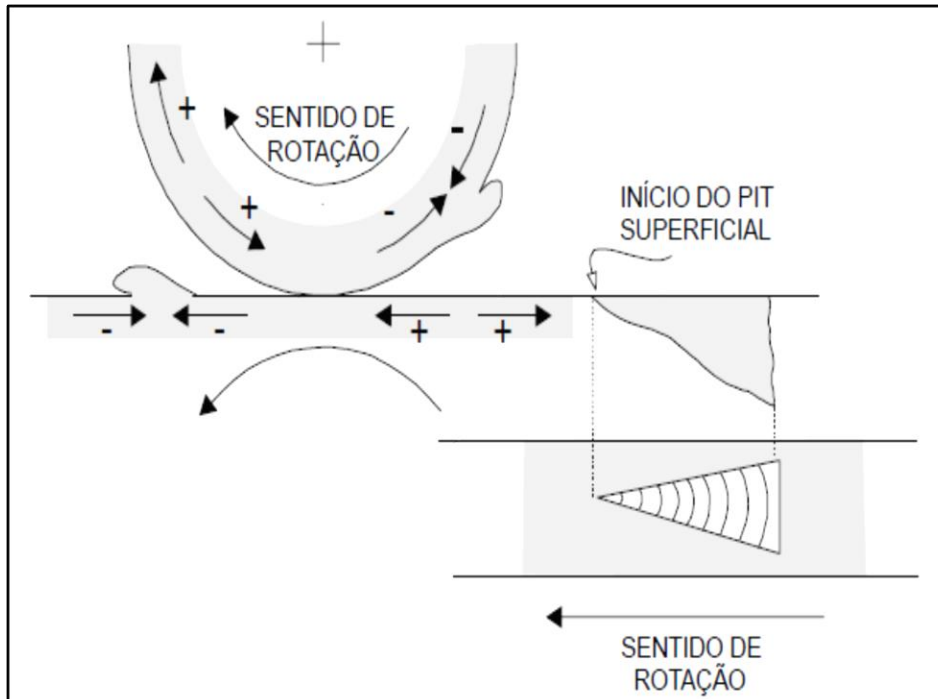


Depois



Desgaste por fadiga (fadiga de contato): ocorre pela formação de trincas **superficiais ou sub-superficiais** devido a aplicação de cargas alternadas repetidas, formando **“pites” de fadiga** (em forma de triângulos), que podem evoluir para o **lascamento** do material (**“spalling”**)

Sequência do fenômeno: deformação elástica, seguida de deformação plástica, encruamento, nucleação de trinca e propagação da trinca.



Contato intermitente

FRETTING-FADIGA

Duas superfícies em **contato constante** sob **vibração**: pode ocorrer **“desgaste adesivo”**, formação de **“debris”** (rebarba, dano), que acelera a **nucleação da trinca de fadiga**. Principal característica: a **nucleação da trinca** ocorre a certa **distância do local de maior concentração de tensão** ou de concentradores de tensão.

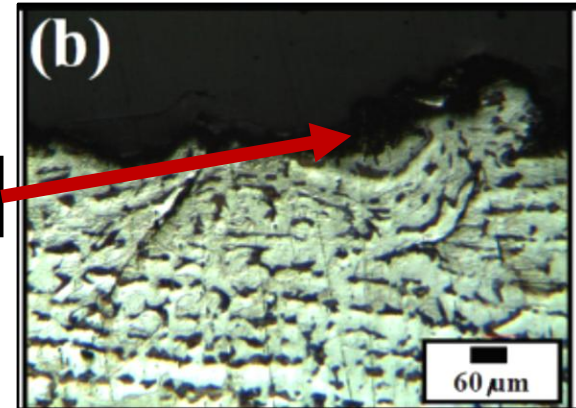
Diferença em relação à fadiga de contato: **no fretting, contato é constante e não intermitente.**

Teoria da delaminação: com a **vibração**, partículas se desprenderiam do metal que se **oxidariam** (**formando um pó de cor escura – indício de fratura por fretting**), tendo sua **dureza incrementada**. Essas partículas provocariam **microdesplacamento** nas peças em contato, criando **espaço** para o **movimento relativo** entre as mesmas, levando ao **desgaste abrasivo de terceiro corpo**, favorecendo a **nucleação de uma trinca**. Caso haja o **esforço cíclico envolvido: fretting-fadiga**.

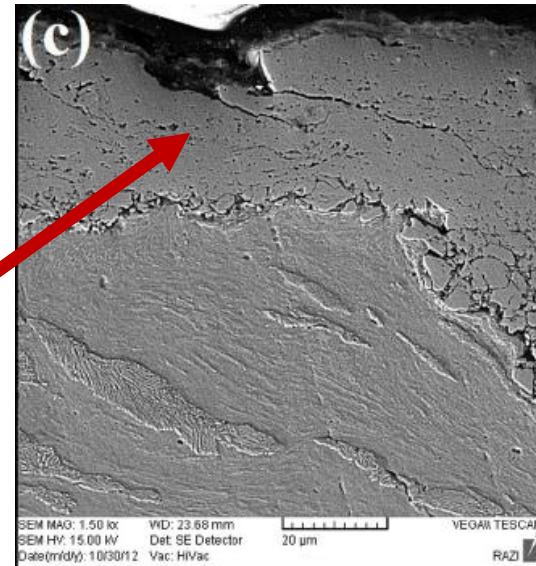
FRETTING-FADIGA



DEBRIS



NUCLEAÇÃO DAS
TRINCAS DE FADIGA A
PARTIR DOS “DEBRIS”



M. Mehdizadeh, F. Khodabakhshi / Case Studies in Engineering Failure Analysis 2 (2014) 61–68

Tratamentos Termoquímicos

Aumentar a dureza superficial: aumento da resistência ao desgaste

Os Principais tipos de tratamentos termoquímicos são:

- Cementação (C);
- Nitretação (N);
- Cianetação (CN);
- Carbonitretação (C + N);
- Nitrocarbonetação (N + C);
- Boretção (B);
- Tratamentos Termorreativos ($C_x + N_x + C_y N_{2x}$) (V, Nb, Ta, Cr, W e Mo).

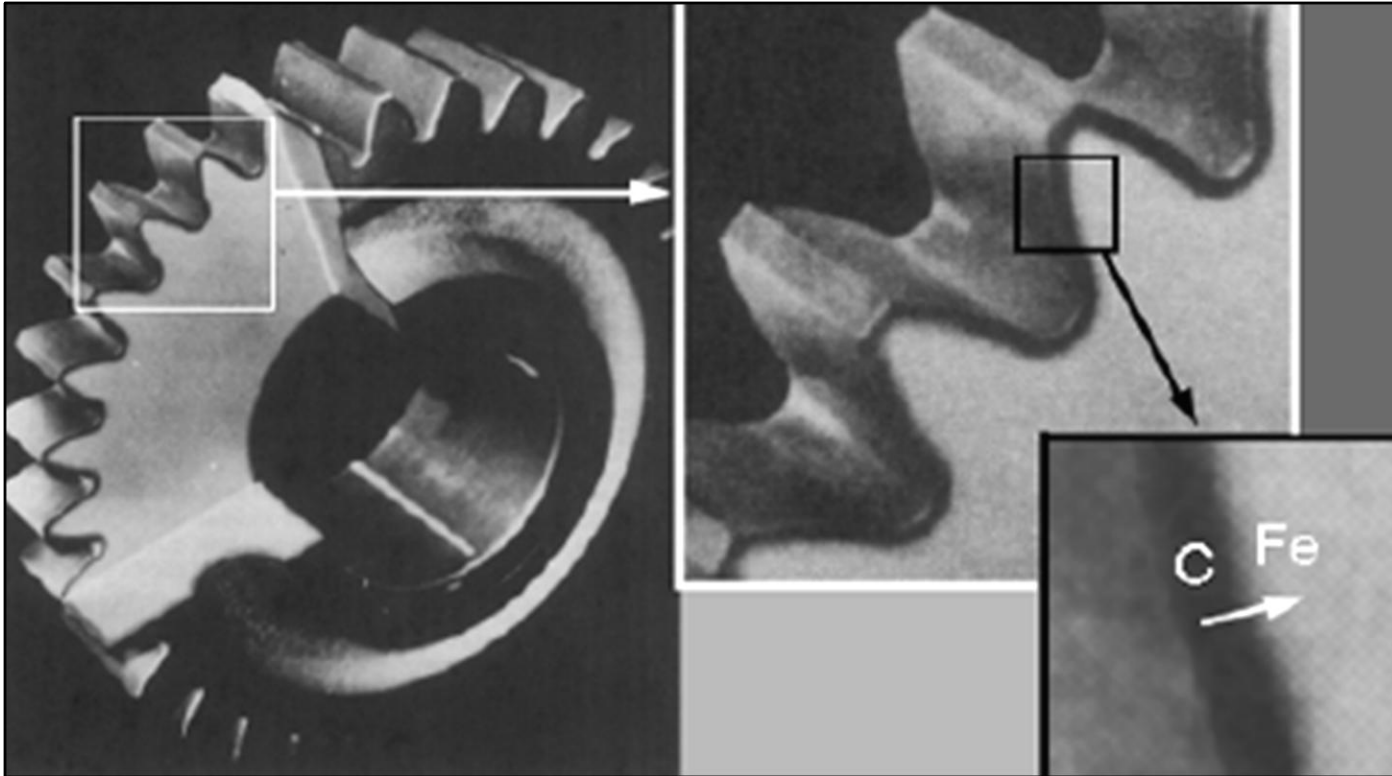
Cementação/Carbonetação

Definição: Define-se como *Cementação* ou *Carbonetação* a introdução de *Carbono* na *superfície* do aço de modo que, depois de temperado, esta superfície apresente-se mais *dura* que as demais partes da peça tratada.

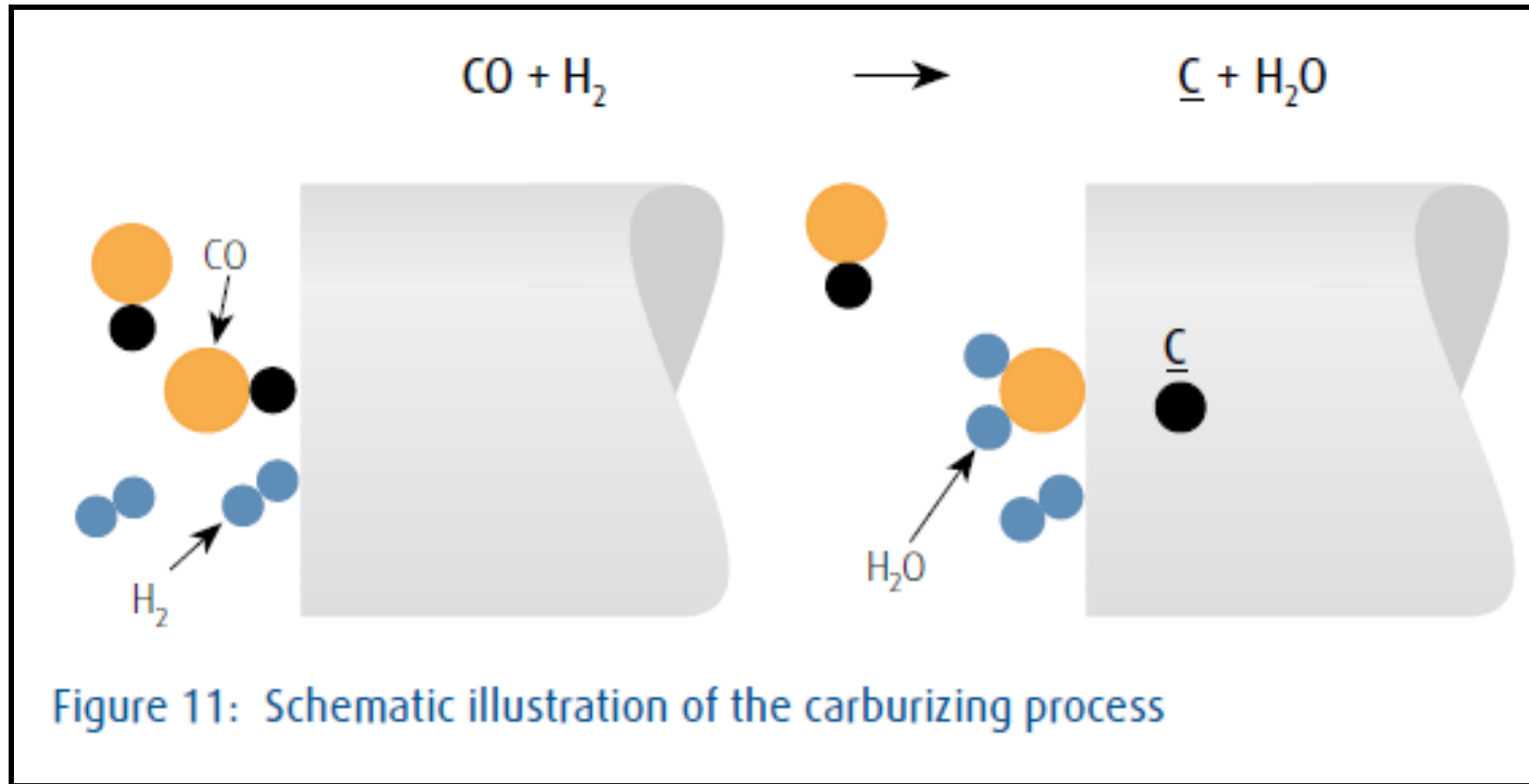
Tipos Cementação:

- Sólida ou “em caixa” - (Resfriamento lento e C sólido);
- Líquida – Através de banhos de sais fundidos;
- Gasosa – Utilização de gases (CH₄, C₂H₆, C₃H₈,etc.);

Cementação



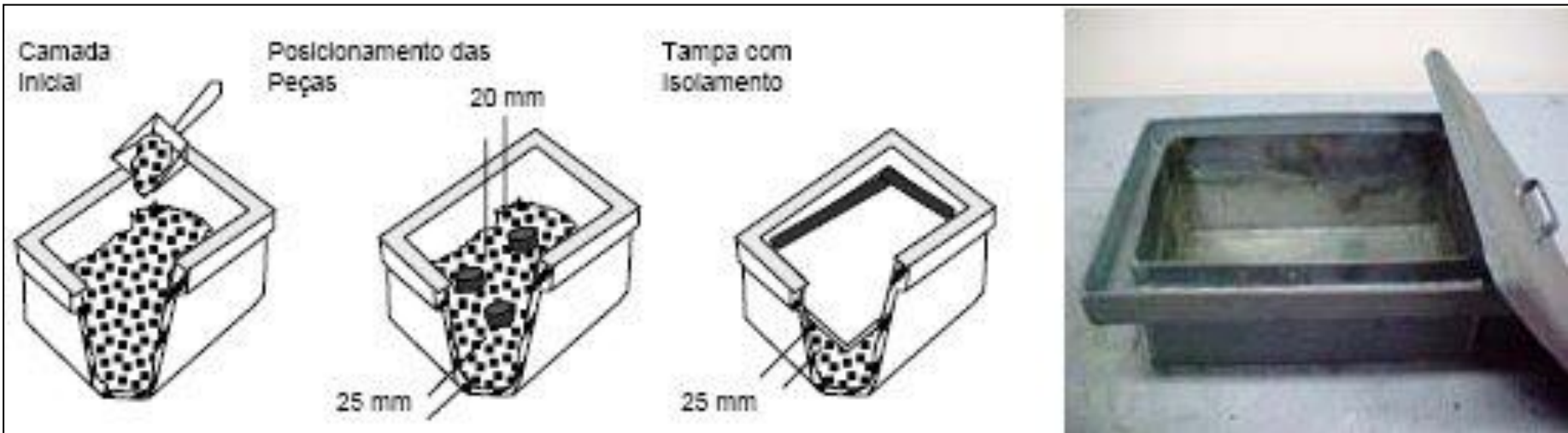
CEMENTAÇÃO



(Adaptado de : <http://www.techgaz.ru/>)

Cementação sólida ou em caixa

- Substâncias carbonáceas sólidas são utilizadas por isso é chamada de cementação sólida;
- Misturas carburizantes (fonte de carbono): carvão de madeira; aglomerado com 5% à 20% de óleo comum ou óleo de linhaça;
- Substância ativadora (50% à 70% de carbonato de bário).





Cementação Gasosa

- $\text{CH}_4 \rightarrow (\text{C}) + \text{H}_2$
80 a 90% do gás natural (gás metano);
- $\text{C}_2\text{H}_6 \rightarrow (\text{C}) + \text{CH}_4 + \text{H}_2$
10 a 20% do gás natural (gás etano);
- $\text{C}_3\text{H}_8 \rightarrow (\text{C}) + \text{XC}_2\text{H}_6 + \text{YCH}_4 + 2\text{H}_2$
(gás propano)



Cementação Gasosa

Características

- Cementação mais limpa que a sólida;
- Tratamento mais complexo (segurança, controle e técnica de operação);
- Profundidade da camada cementada: 0,5 a 2,0mm;
- Equipamento de cementação gasosa é bastante caro (Possibilidade de processo contínuo);
- Temperatura e tempo (profundidade de difusão);
- Possibilita têmpera direta (Evitando o resfriamento).



Cementação por banho de sais: Cementação Líquida.

- $2 \text{NaCN} \rightarrow \text{Na}_2\text{CN}_2 + (\text{C})$
- $2 \text{CO} + 3\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}_3\text{C} + \text{CO}_2$
- $\text{NaCN} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{NaCNO} + \text{CO}$
- Profundidade da camada cementada:
 - Banhos para baixa temperatura: 0,13 a 0,25mm;
 - Banhos para alta temperatura: 0,5 a 3,0mm;
- Proteção efetiva contra a descarbonetação;
- Produz resíduos tóxicos de cianeto.

Cementação por banho de sais: Cementação Líquida



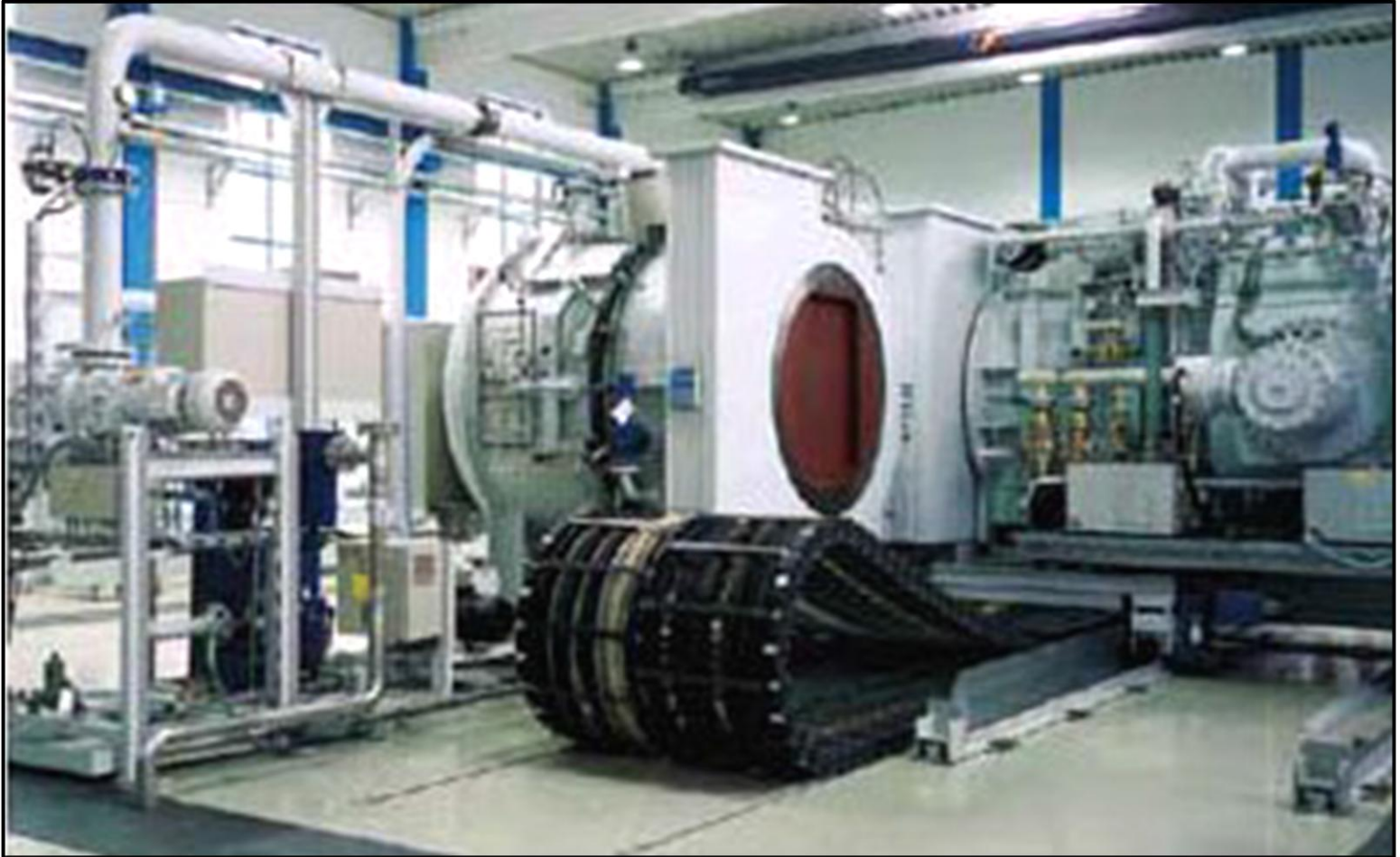
Forno para cementação líquida- com aquecimento externo.

Cementação a Vácuo



Forno de câmara simples.

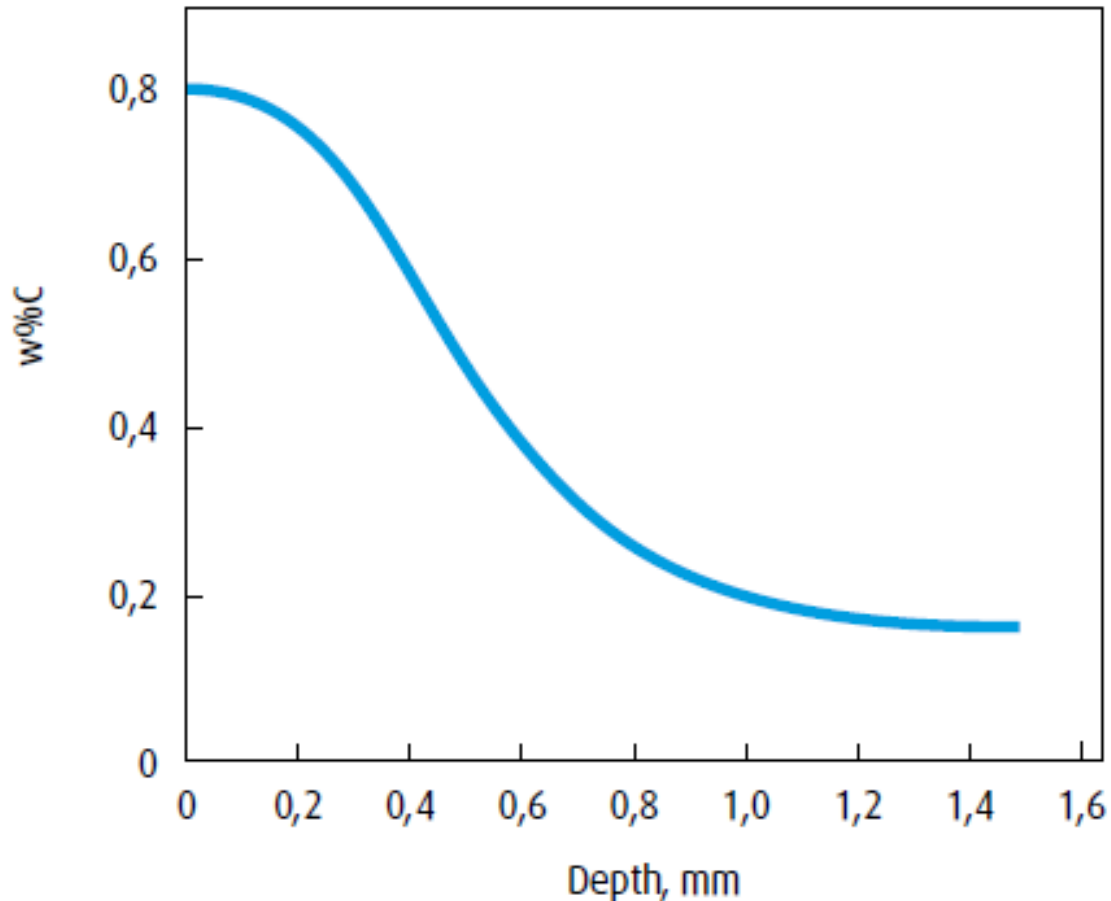
Cementação a Vácuo



Forno de câmara dupla.

CEMENTAÇÃO

VARIAÇÃO DO TEOR DE CARBONO COM A PROFUNDIDADE



(Adaptado de : <http://www.techgaz.ru/>)

Sequência de Tratamentos Térmicos na Cementação

Normalização: Refina a estrutura e melhora o resultado final da cementação. É realizada antes do processo de cementação.

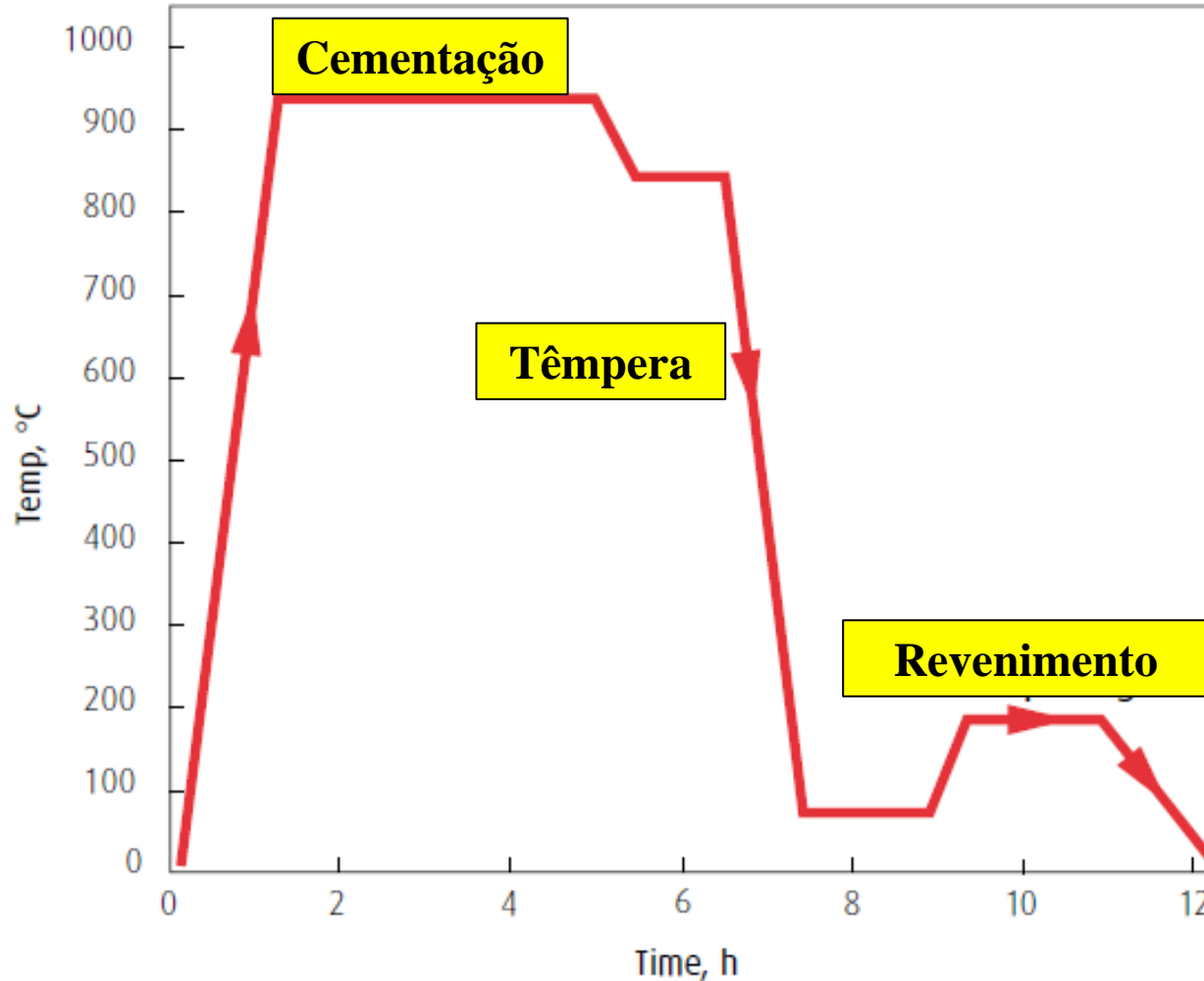


CEMENTAÇÃO

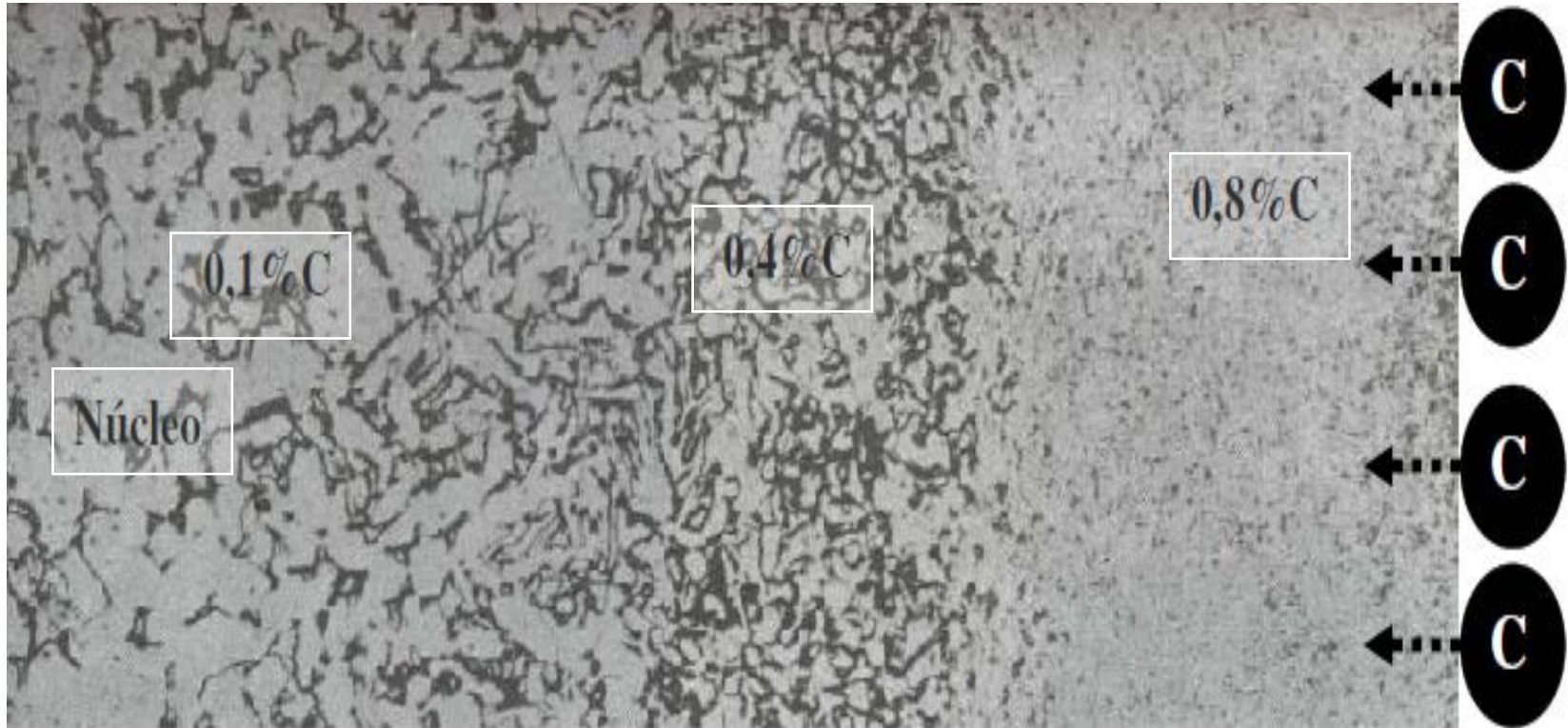


Têmpera e revenimento: Aumento da dureza (maximização da capacidade de endurecimento conseguida pela cementação).

PROCESSO DA CEMENTAÇÃO



CEMENTAÇÃO



CEMENTAÇÃO

Microhardness through case depth

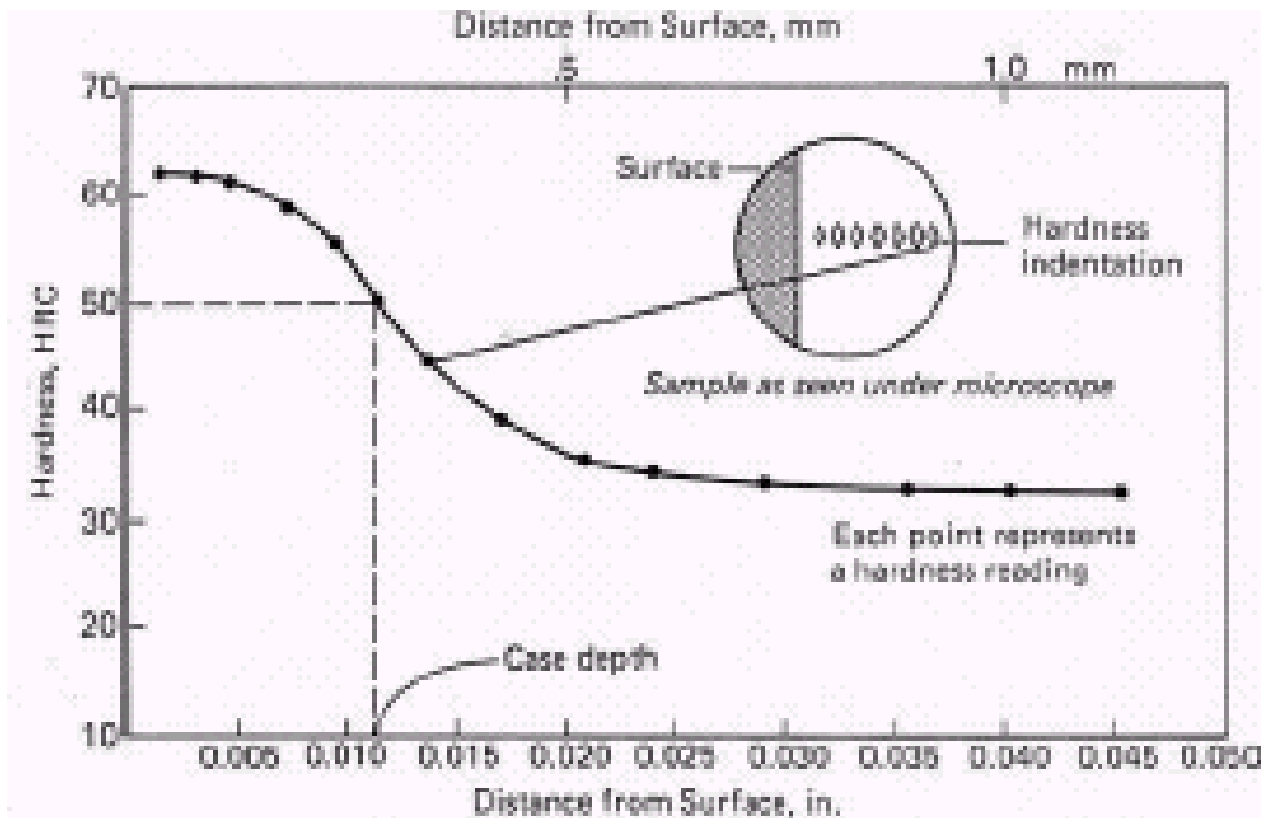


Figure 8-6 Determination of case depth by microhardness survey.

CEMENTAÇÃO

Properly carburized gear teeth

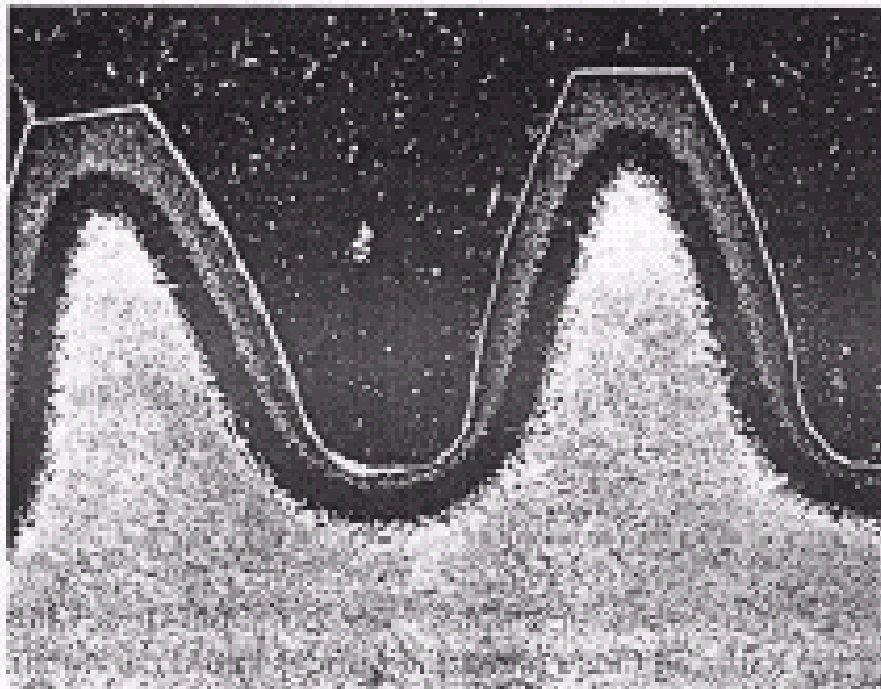
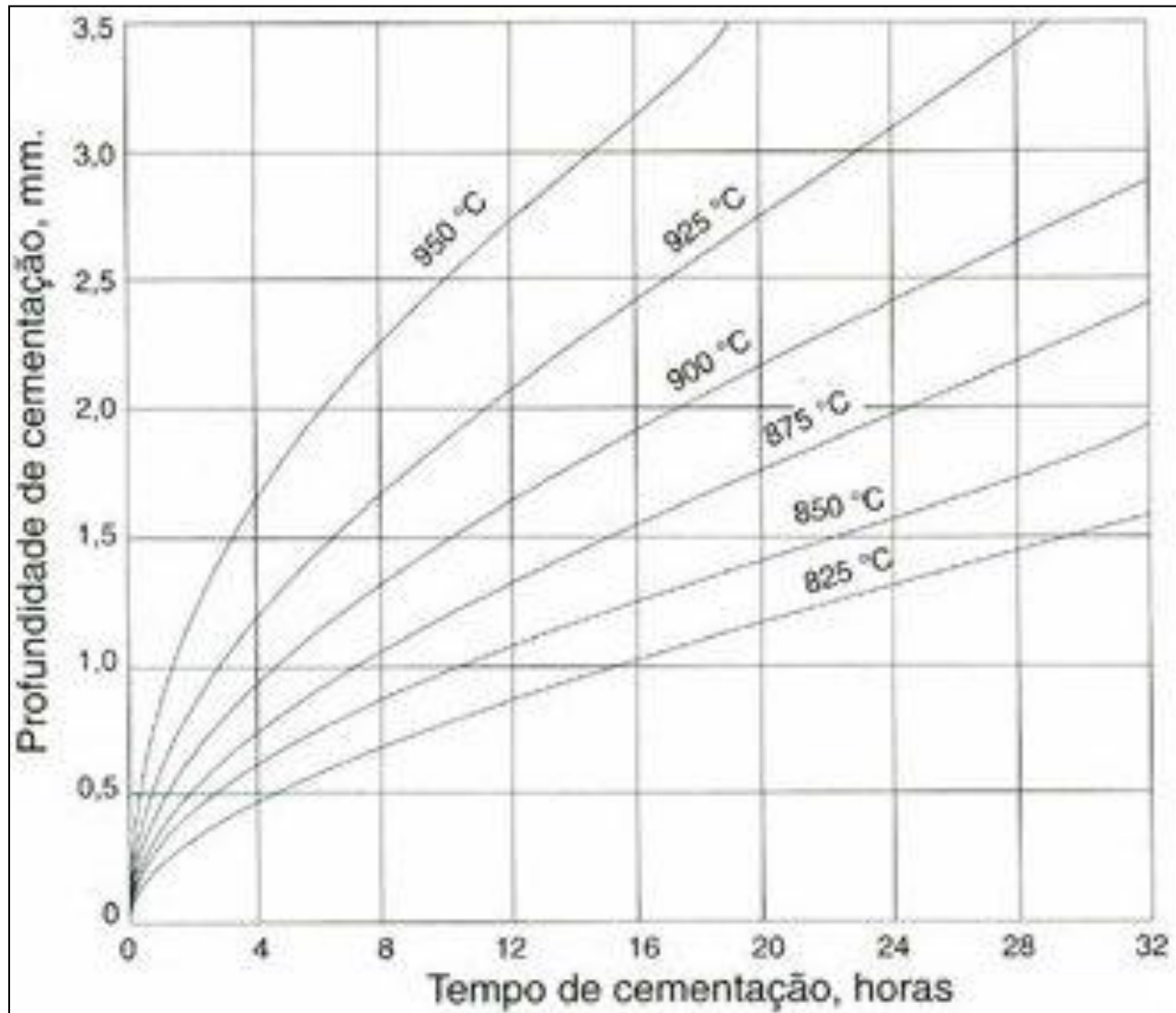


Fig. 8-75 A properly carburized, hardened, and tempered gear. Etched in 2 percent nital. 7X.

Cementação



Relação entre profundidade e temperatura na cementação

DIFUSÃO EM ESTADO NÃO ESTACIONÁRIO

2ª. LEI DE FICK - CEMENTAÇÃO

SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DIFERENCIAL DA 2ª LEI DE FICK PARA CEMENTAÇÃO

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{d^2 C}{dX^2}$$

=

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

ou

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

C_s : concentração na superfície do gás que difundi-se ao interior;
 C_0 : concentração inicial, uniforme, do elemento no sólido
 C_x : concentração do elemento, a x da superfície no instante t
 x : distância à superfície
 D : coeficiente de difusão do elemento soluto que se difunde

$$D = D_0 \exp(-Q_d / RT)$$

D_0 = constante (m²/s)

Q_d = energia de ativação para difusão (eV/átomo)

R = Cons. do gás = 8,62 x 10⁻⁵ eV/átomo

T = temperatura absoluta (K)

Aços para Cementação

Aços Carbono

- Superfície resistente ao desgaste com núcleo tenaz
- 1016 / 1018 / 1019 / 1022
- Peças pequenas / temperadas em água;
- Aplicações onde não é exigido baixa distorção.

ARBL (Alta Resistência Baixa Liga)

- Superfície resistente ao desgaste/núcleo resistente e dútil;
- 4023 / 5110 / 4118 / 8620 / 4620;
- 4320 / 4817 / 9310.
- Temperados em óleo / baixa distorção;

Nitretação

Definição: Introdução de Nitrogênio na superfície do aço

- Temperatura do tratamento: 500 a 570°C
- Não é necessário têmpera posterior;
- Profundidade de camada da ordem de 200-400µm.

Tipos de nitretação:

- Gasosa;
- Líquida;
- Iônica ou a plasma.

Aplicações:

- Obter altíssima dureza de camada (1000-1500HV) e alta resistência ao desgaste;
- Melhorar a resistência à fadiga e a corrosão (exceto para os aços inoxidáveis).

NITRETAÇÃO

Nitretação

- Todos os processos de nitretação possuem em comum a criação de nitrogênio atômico necessário para a formação da camada nitretada, mudando apenas o meio saturante.
- O processo de nitretação consiste de três etapas:
 - 1 → A formação do nitrogênio atômico como resultado das diversas reações químicas;
 - 2 → A adsorção dos átomos de nitrogênio na superfície da peça; e,
 - 3 → A difusão dos átomos adsorvidos desde a superfície para o interior da peça.



Nitreção a gás

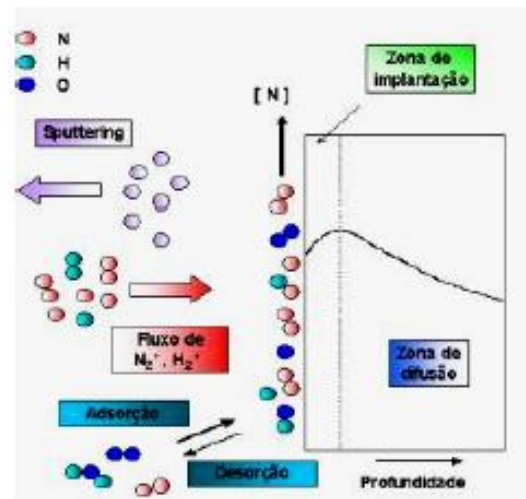
Aços empregados:

- Aços de baixa liga contendo alumínio;
- Aços de médio carbono, ao cromo, das séries 41xx, 43xx, 51xx, 61xx, 86xx, 87xx e 98xx;
- Aços ferramenta com 5% cromo;
- Aços inoxidáveis nitrônicos, Ferríticos, Martensíticos;
- Aços com alumínio ou cromo (Ideal série Nitraloy – 1% Al e 1,2% Cr).

PLASMA

Nitreção

- Nitreção a Plasma: realizado em níveis de vácuo que variam entre 100 Pa e 1.000 Pa. O processo de nitreção inicia-se pela aplicação de uma diferença de potencial entre dois eletrodos, na presença de uma mistura gasosa composta basicamente de N_2 e H_2 parcialmente ionizados. os íons carregados positivamente são acelerados para a superfície do anodo (peça) e os elétrons são direcionados para o catodo (carcaça). Após a implantação, estes íons neutralizam-se e penetram por difusão térmica no material.



PEÇA DURANTE NITRETAÇÃO A PLASMA



NITRETAÇÃO

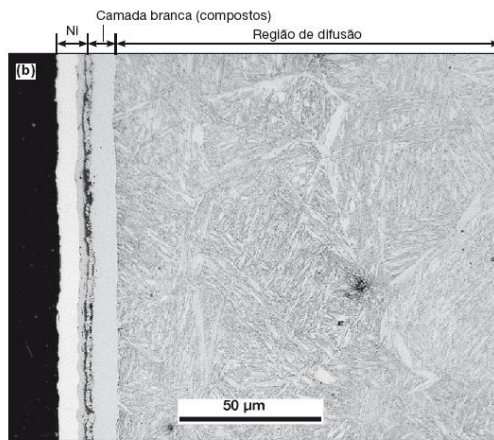
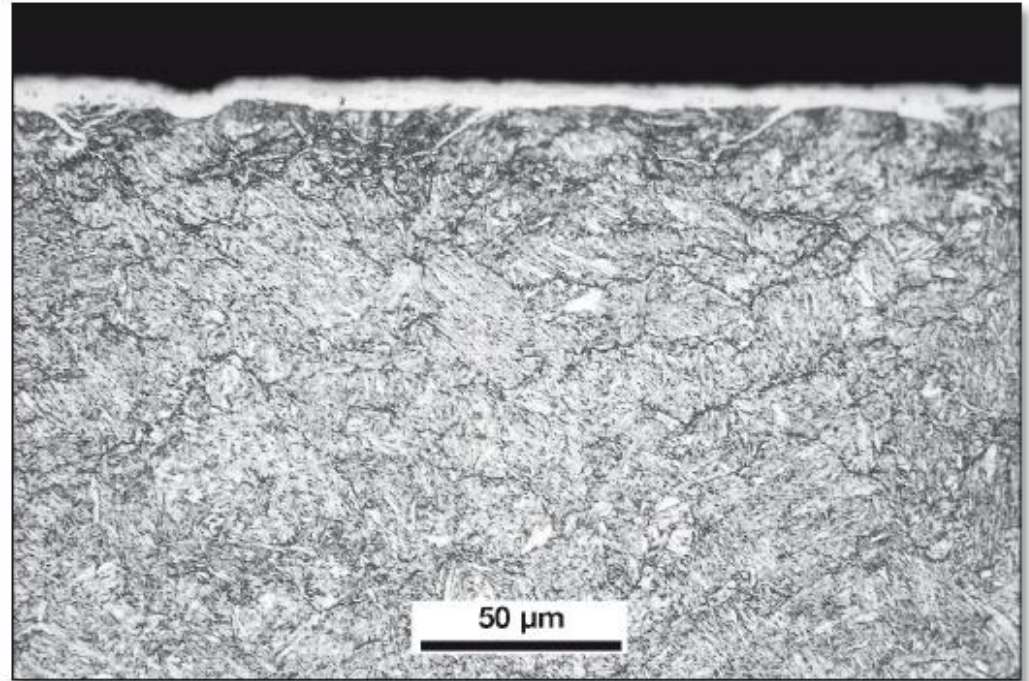
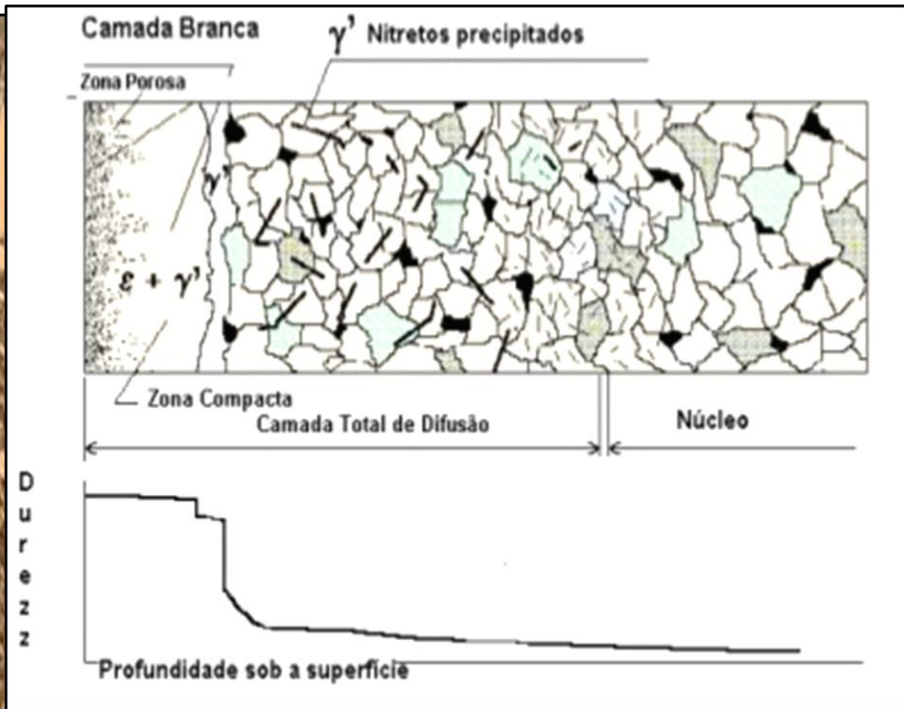
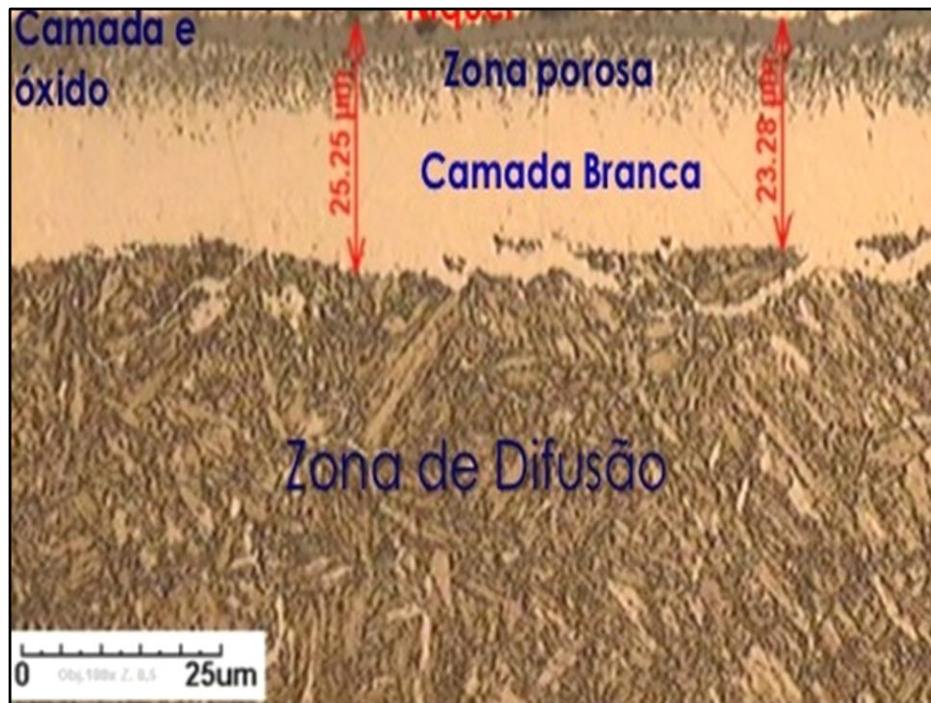


Figura 10.94

Seção transversal à superfície de uma peça de aço AISI 4340 temperado e revenido e nitretado. Observa-se a camada branca, de nitreto de alta dureza (ver [2]). Cortesia A. Zeemann, Tecmetal, RJ, Brasil.

Camada Branca e camada de difusão-Imagem de MO e desenho esquemático com perfil de dureza

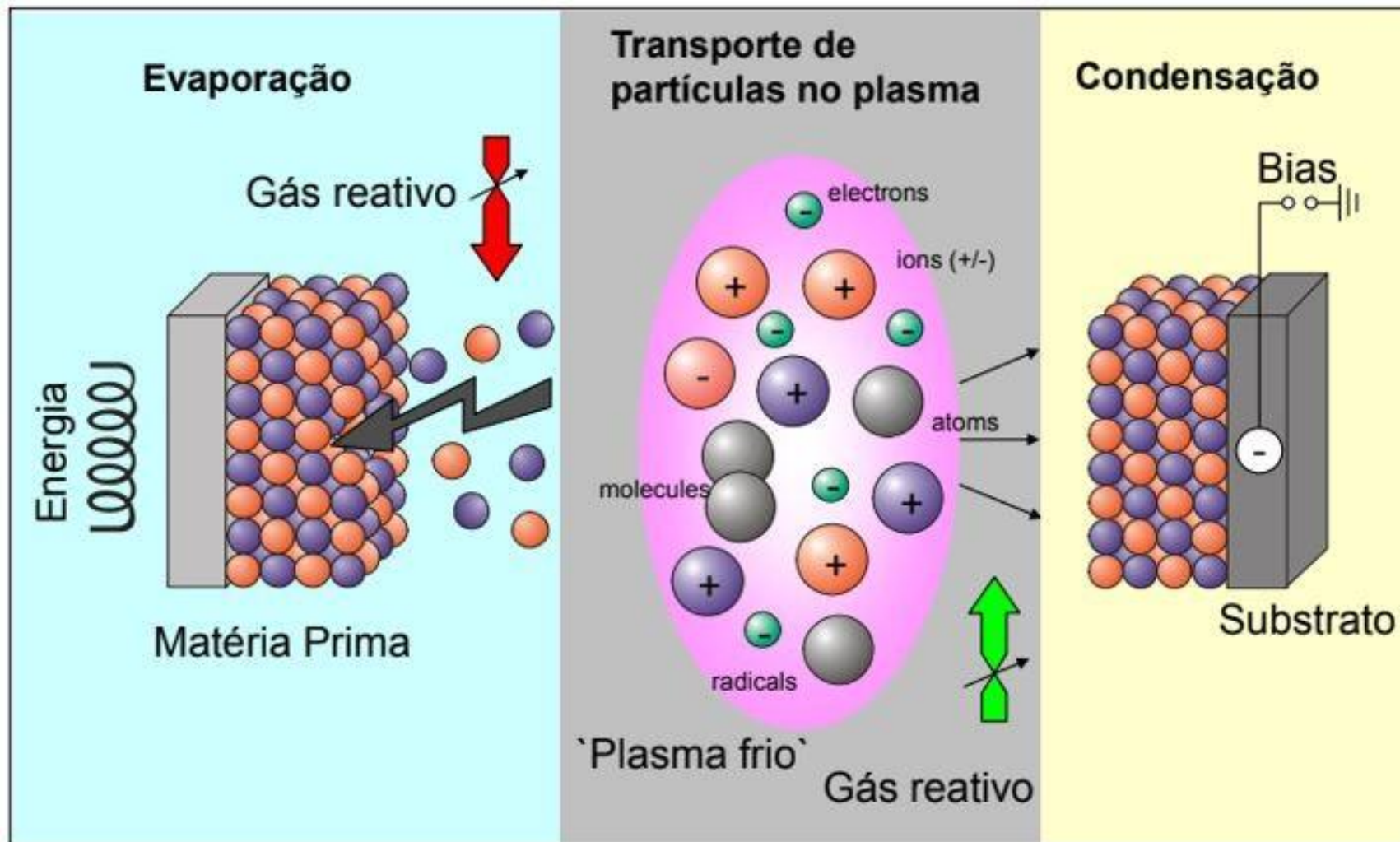


A camada branca é formada por uma combinação dos nitretos ϵ e γ' . O nitreto γ' é mais duro e frágil. A camada branca é dura e frágil e pode ser reduzida ou eliminada, conforme a aplicação. Abaixo desta camada existe a camada de difusão.

Physical Vapor Deposition (PVD) Chemical Vapor Deposition (CVD)

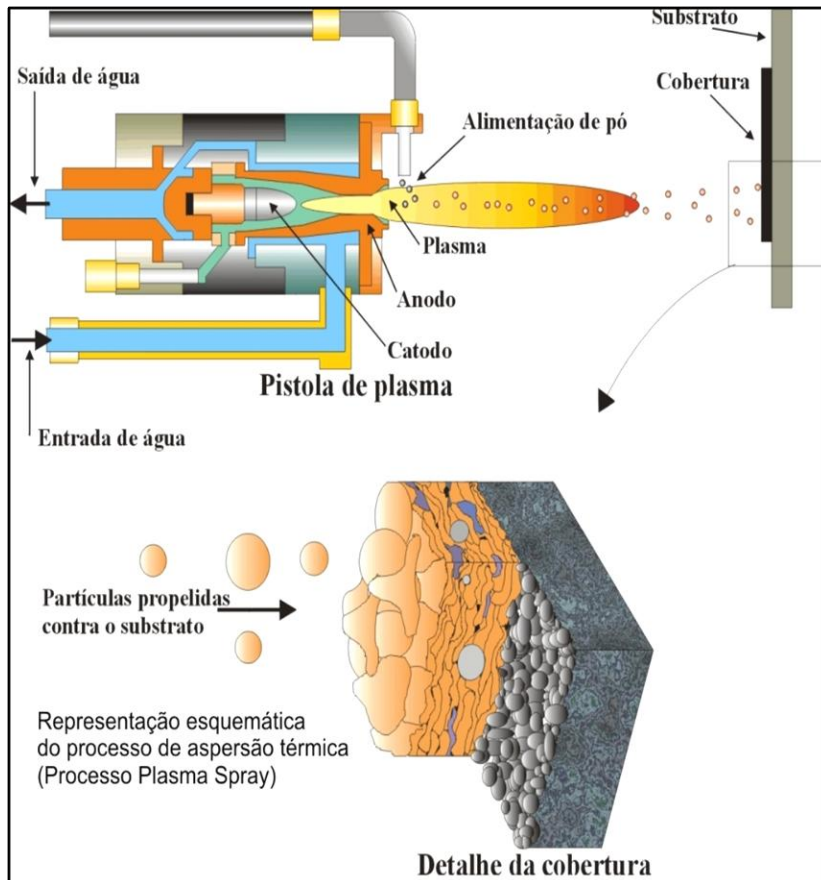
- O PVD/CVD é um tipo de deposição em vácuo;
- O material de revestimento é vaporizado em uma câmara de vácuo;
- O vapor condensa-se sobre a superfície a ser revestida;
- No caso do CVD, ocorre uma reação química dos gases envolvidos;
- Aplicações: matrizes de forjamento (grafeno), MOSFET, ferramentas de usinagem, etc.

Physical Vapor Deposition (PVD) Chemical Vapor Deposition (CVD)

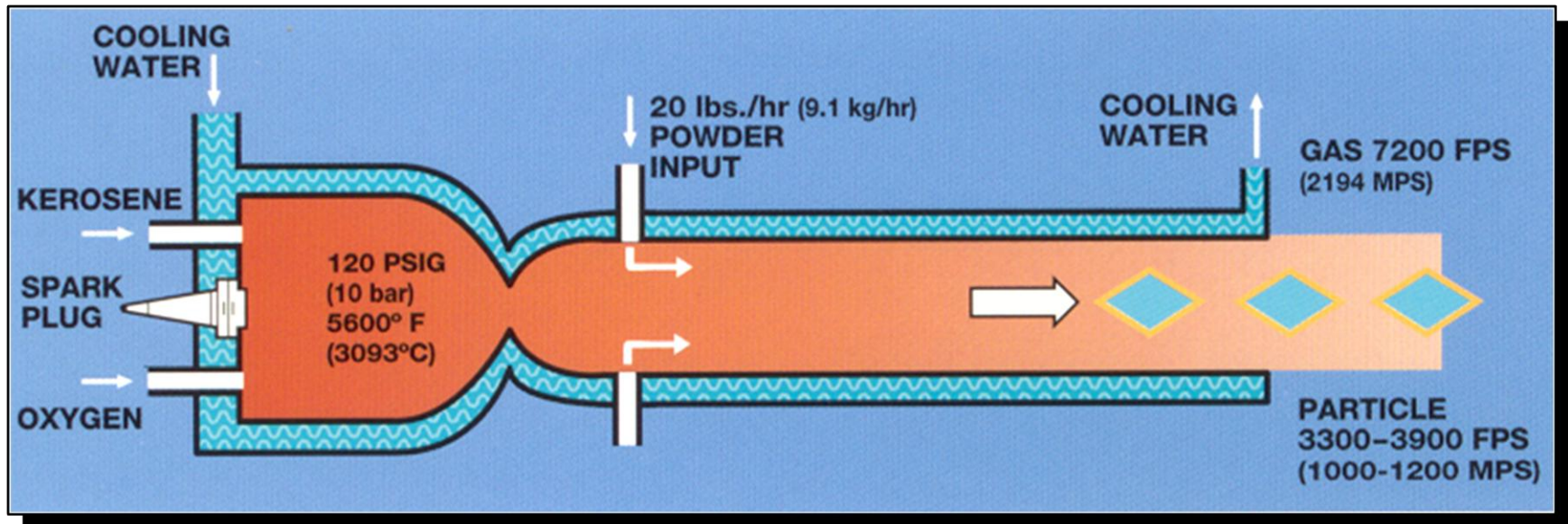


ASPERSÃO TÉRMICA (METALIZAÇÃO)

A liga é aquecida até a fusão e projetada por meio de ar comprimido.



HVOF (HIGH VELOCITY OXYGEN FUEL)





**AUMENTO DE RESISTÊNCIA
MECÂNICA POR TRATAMENTO
TÉRMICO:
TÊMPERA E REVENIMENTO**



ANÁLISE DE FALHAS DE UM AÇO NITRETADO

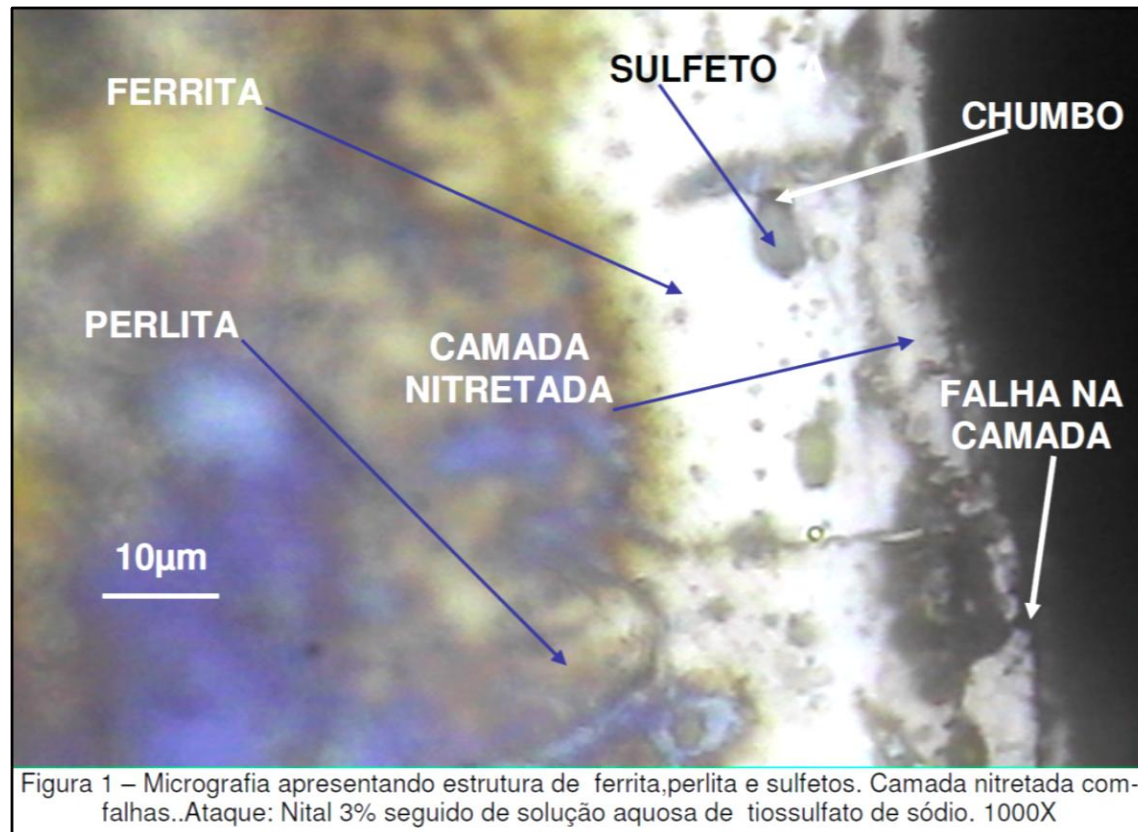
**AÇOS DE CORTE FÁCIL(CORFAC)
ANÁLISE DE INCLUSÕES: AMOSTRA
LONGITUDINAL, SEM ATAQUE AUMENTO DE 100X
(ASTM E 45)**

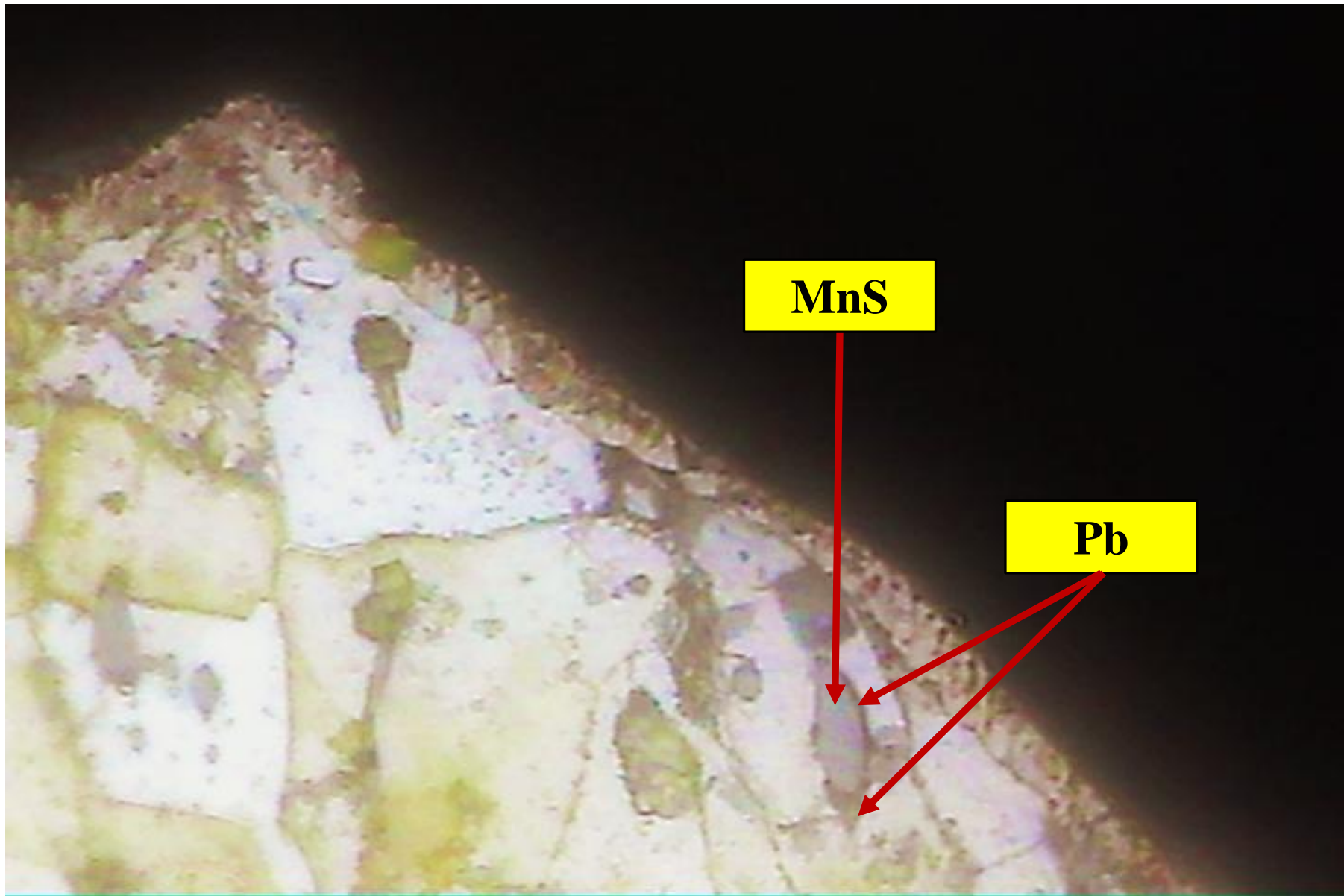


Figura 4 – Micrografia apresentando sulfetos tipo médio curto com boa distribuição.

Material ABNT 1213/ DIN 9SMn28 Rd. 22,22mm trefilado

FALHA DE UM AÇO SAE12L14 NITRETADO





MnS

Pb

FIM