

# **SMM0193 – ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS I**

**TRABALHO A QUENTE, A FRIO,  
CONFORMAÇÃO E  
RECRISTALIZAÇÃO.  
METALOGRAFIA QUANTITATIVA**

## **REFERÊNCIAS:**

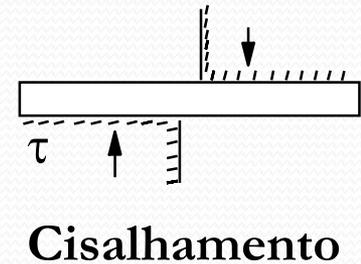
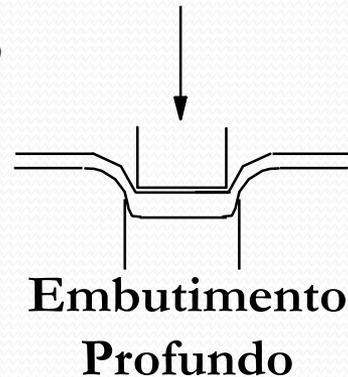
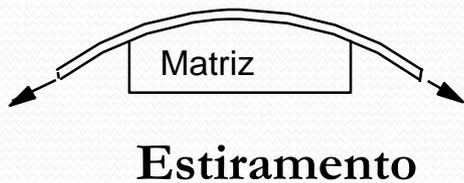
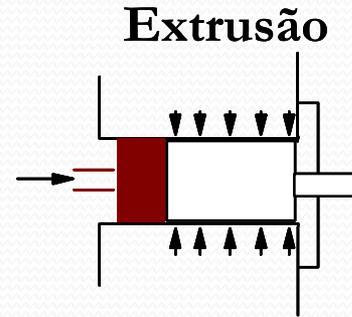
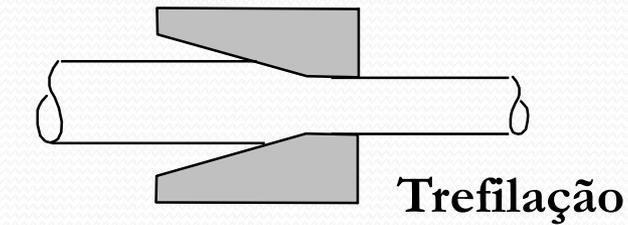
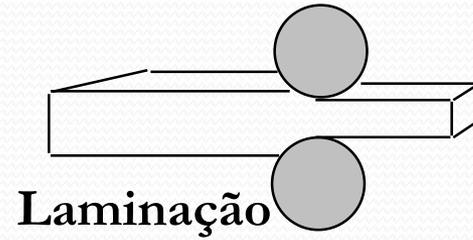
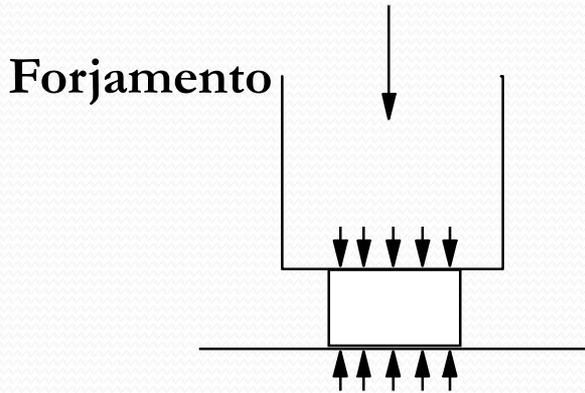
- **Aços e Ligas Especiais**, André Luiz Vasconcelos da Costa e Silva e Paulo Roberto Mei, Edgard Blücher-Villares Metals, segunda edição, 2006.
- **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais**, William D. Callister Jr., LTC, segunda edição, 2006.
- **Princípios de Metalurgia Física**, Robert E. Reed-Hill, segunda edição, Guanabara Dois, 1982.
- **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**, Hubertus Colpaert, 4ª. Edição revisada e atualizada por André Luiz Vasconcelos da Costa e Silva, Editora Blücher – Villares Metals, 2008.
- **Aços, Microestrutura e Propriedades**, R.W.K Honeycombe, Fundação Calouste Gulbenkian, 1982.

## TRABALHO (DEFORMAÇÃO) A QUENTE E A FRIO

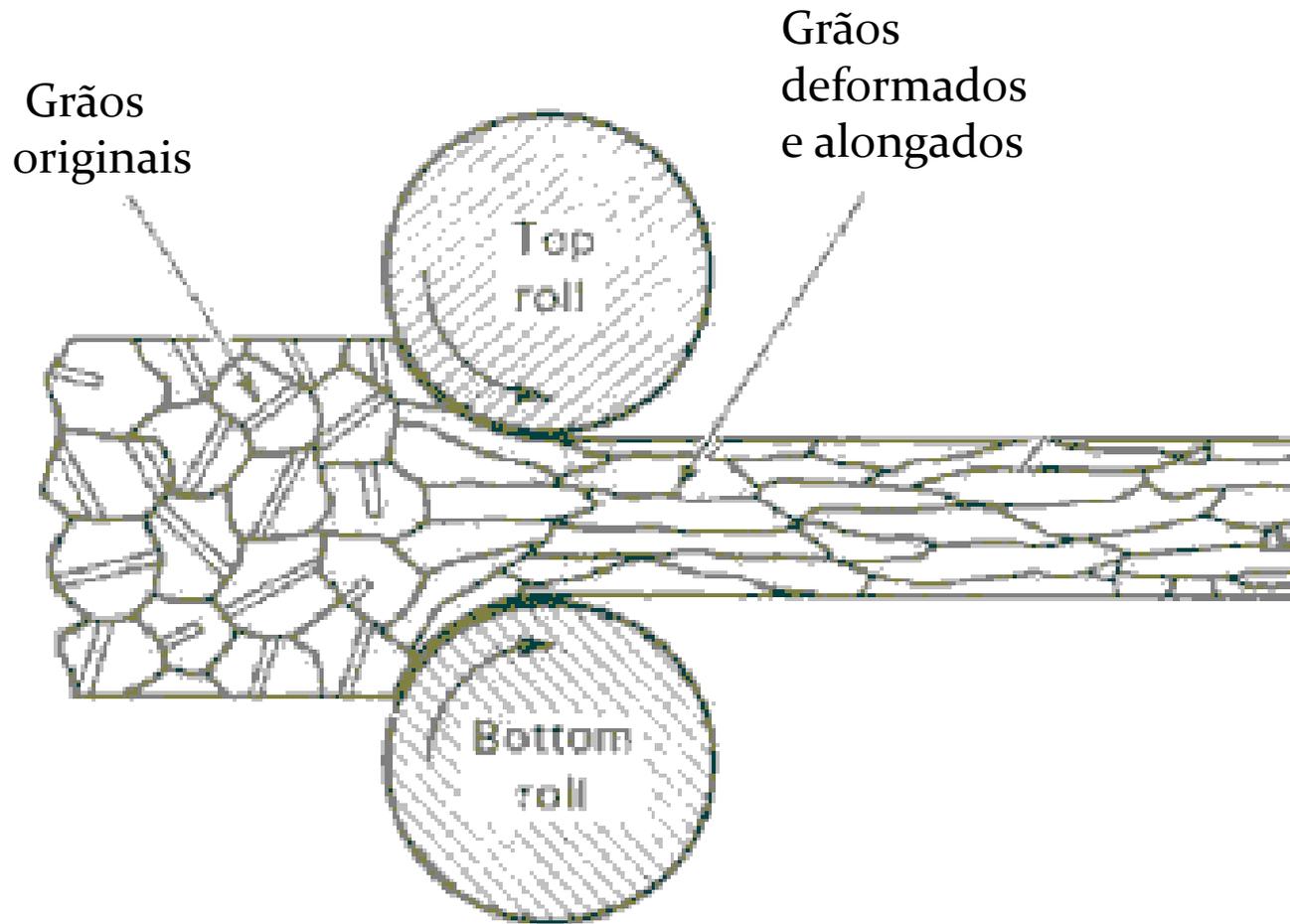
- **2% A 10%** da energia nos processos de **conformação (deformação)** é armazenada no material, em forma de **defeitos cristalinos (energia de deformação)**. A maior parte é dissipada em forma de calor;
- **Trabalho (deformação) a frio:** realizado em **temperatura** na qual **não** ocorrem processos 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  $0,5T_f$ .**

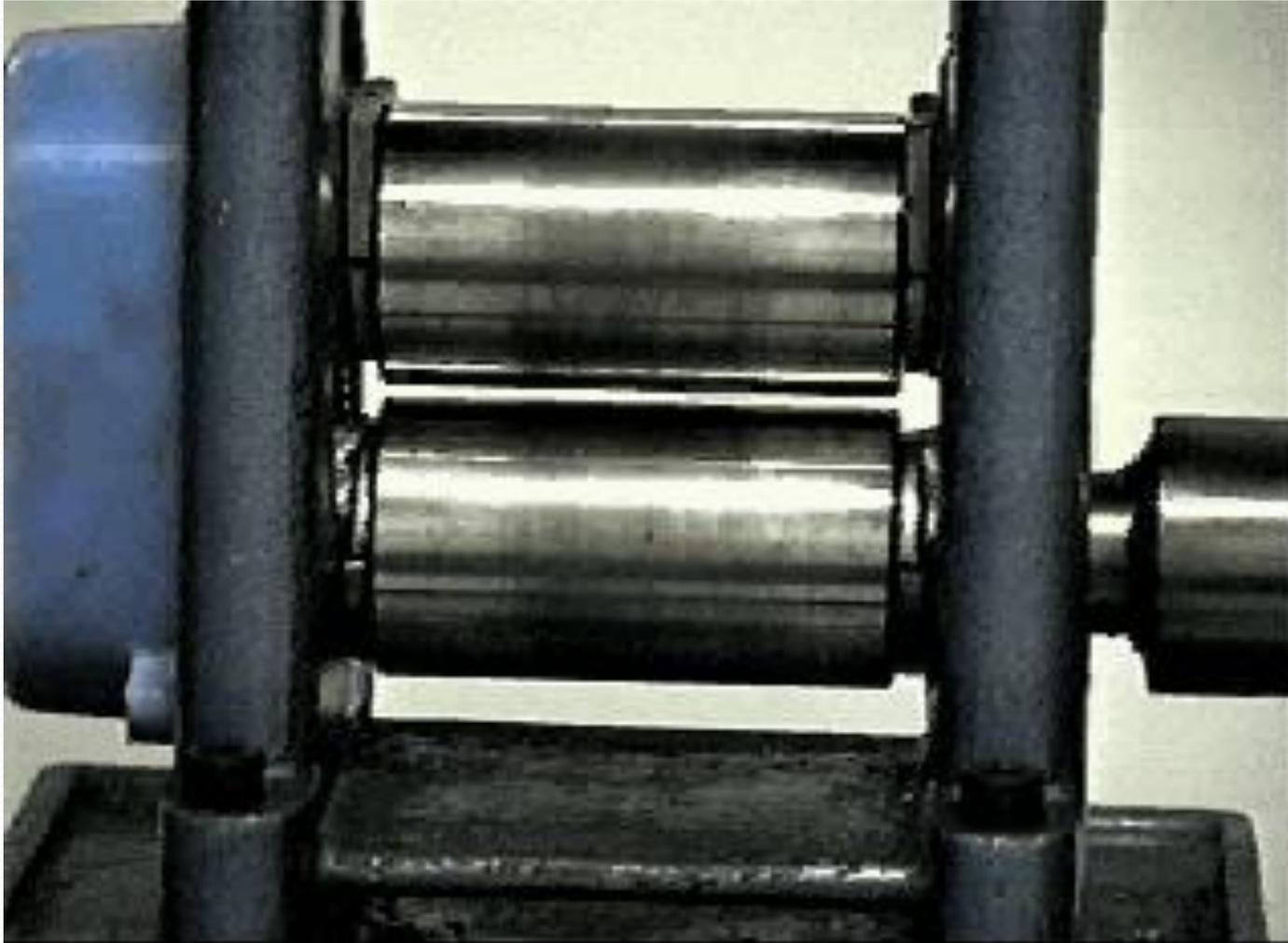
# PRINCIPAIS TIPOS DE CONFORMAÇÃO



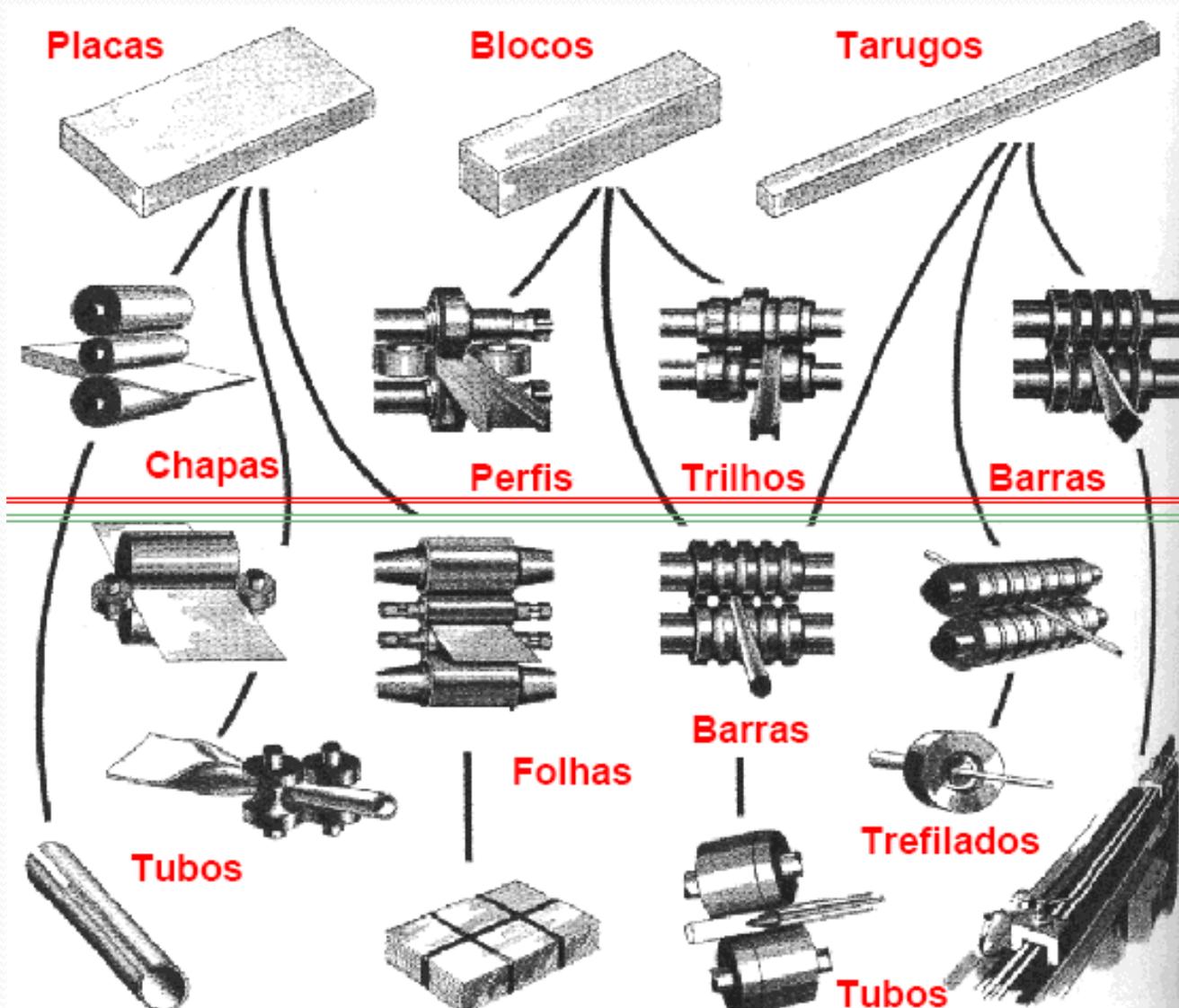
# LAMINAÇÃO A FRIO



# LAMINAÇÃO A FRIO

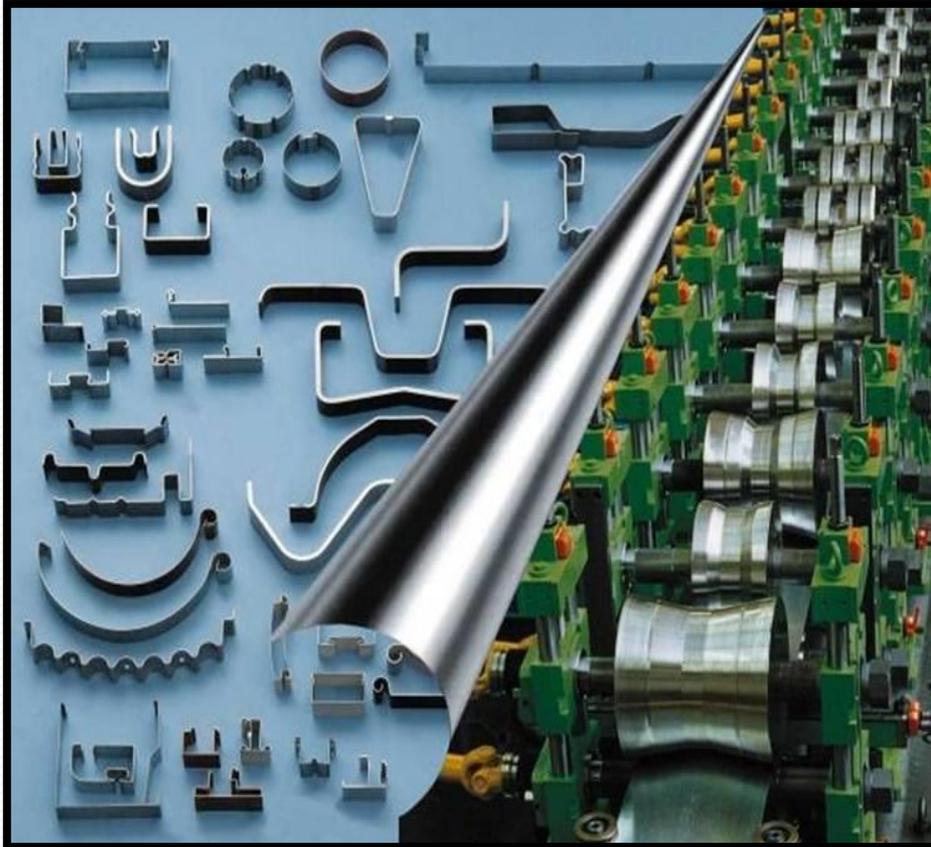


# LAMINAÇÃO - PRODUTOS

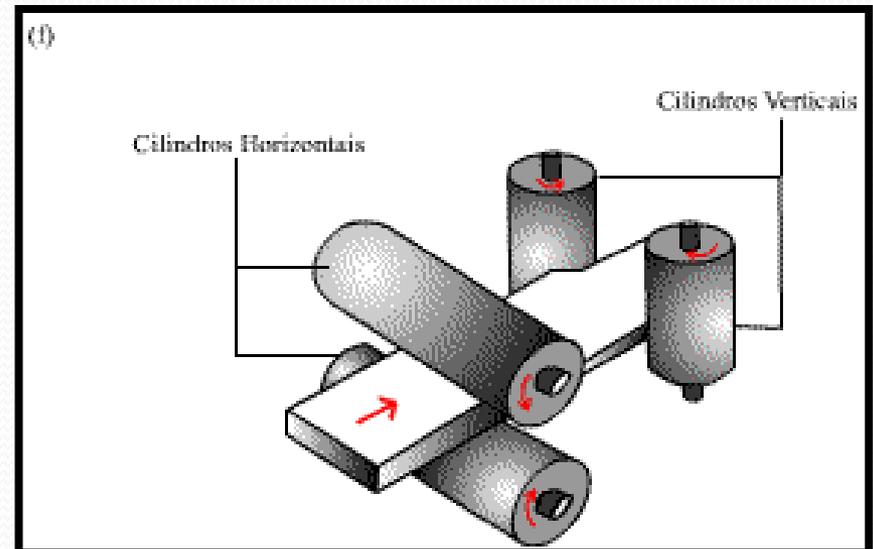
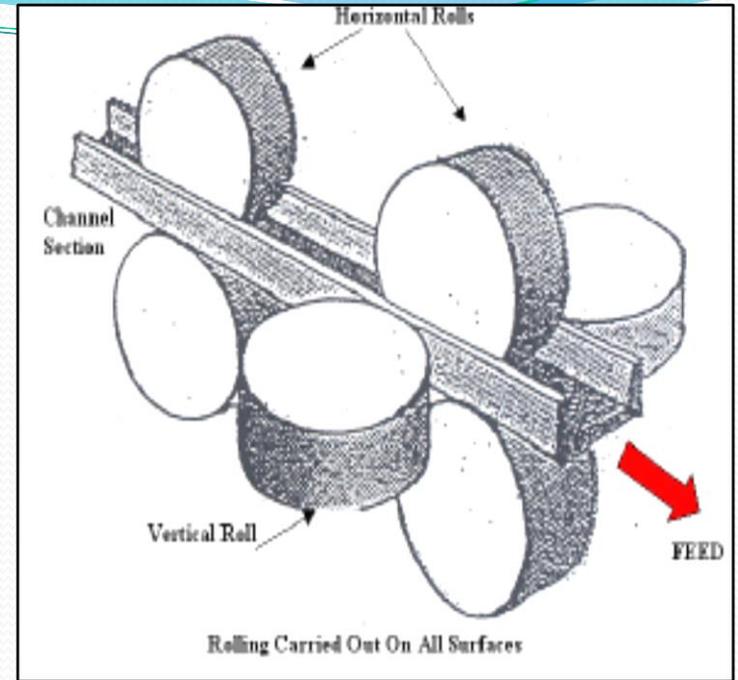


# ARRANJOS TÍPICOS DE CILINDROS PARA LAMINADORES

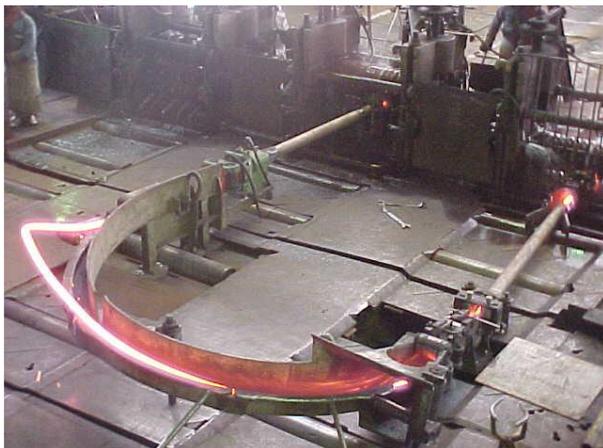
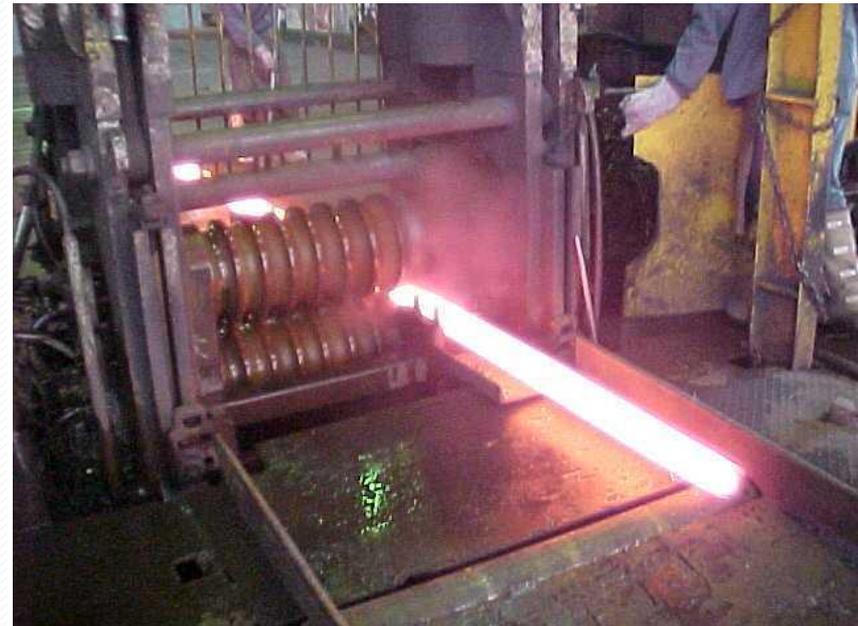
## LAMINADOR SEQÜENCIAL DE PERFIS



## LAMINADOR UNIVERSAL

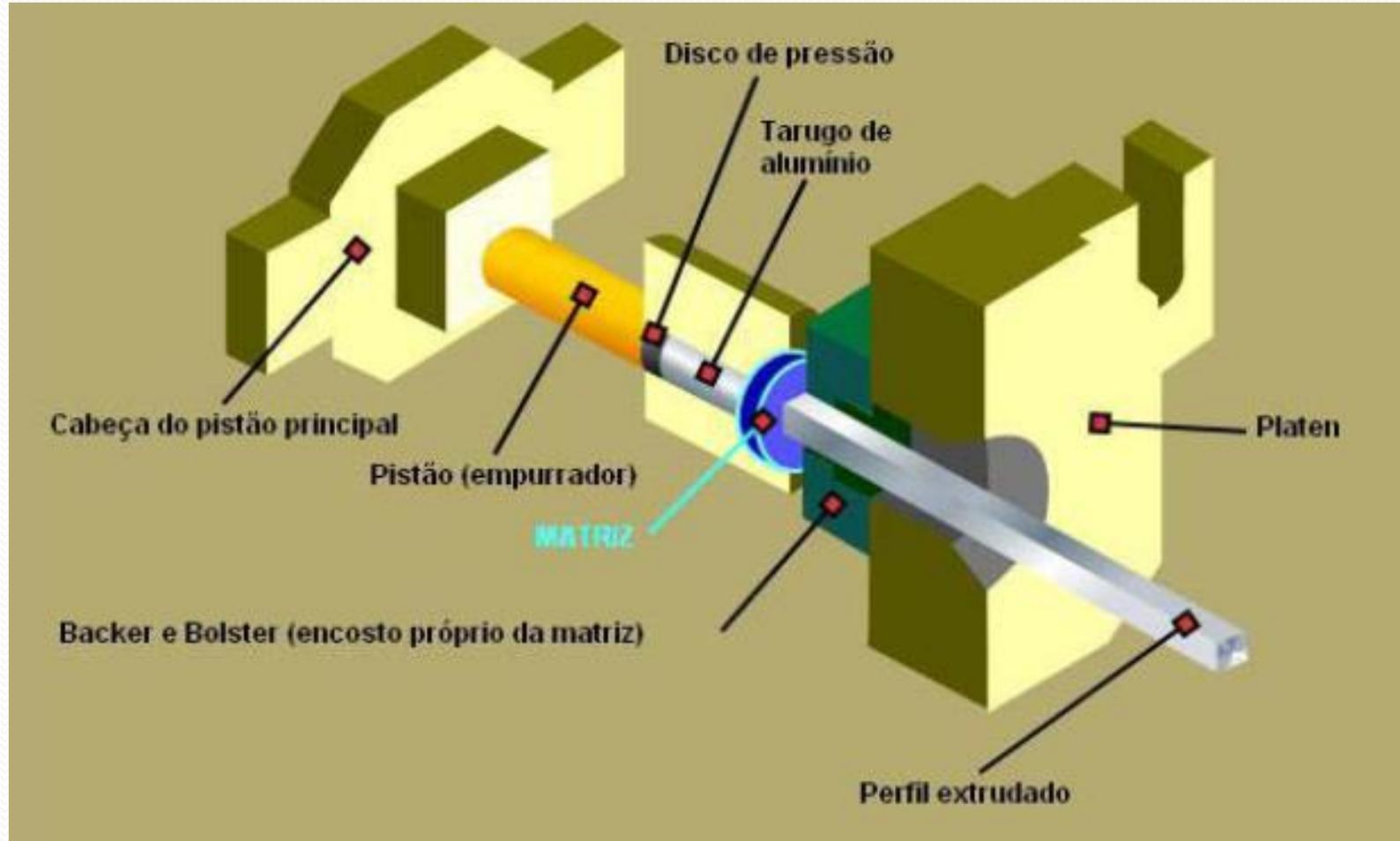
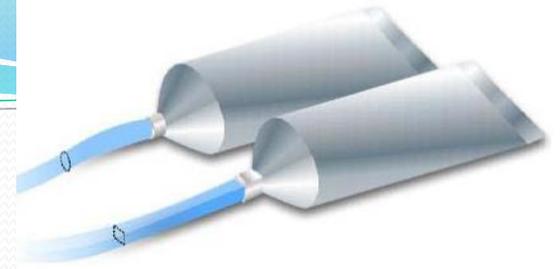


# LAMINAÇÃO A QUENTE

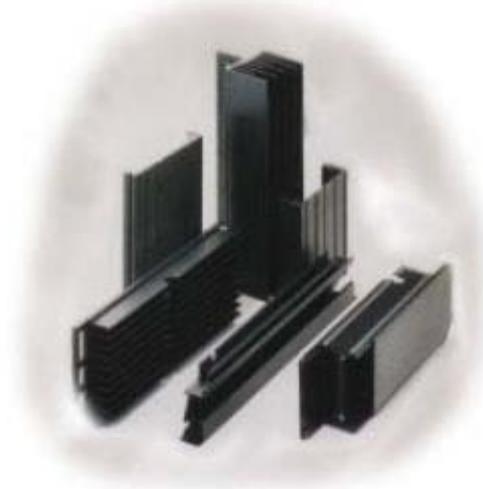
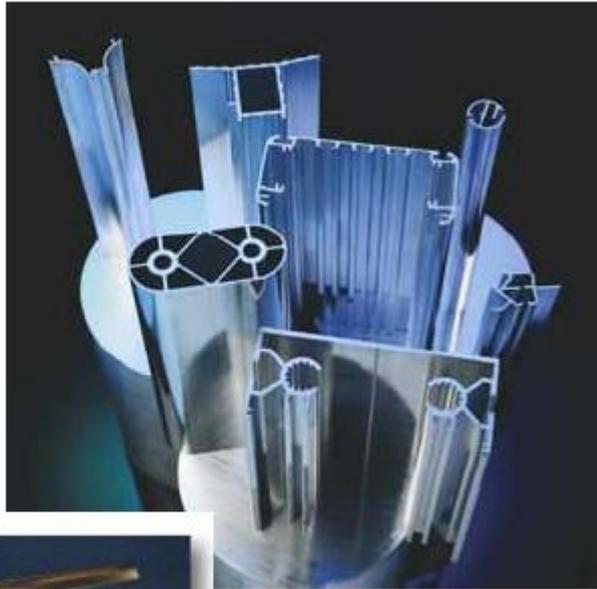




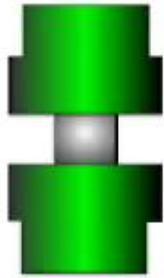
# EXTRUSÃO



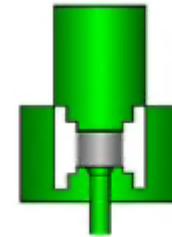
# PRODUTOS EXTRUDADOS



# FORJAMENTO (Quente ou Frio)



MATRIZ ABERTA



MATRIZ FECHADA S/  
REBARBAS

# FORJAMENTO EM MATRIZ ABERTA



**FORJAMENTO EM MATRIZ FECHADA COM REBARBA.**

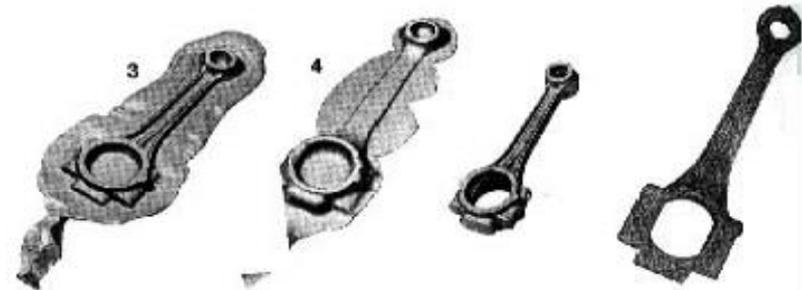
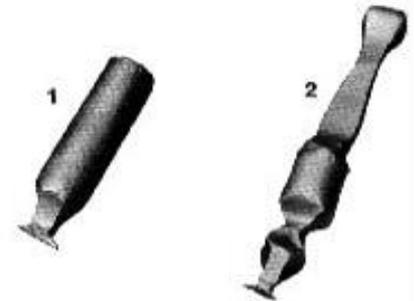
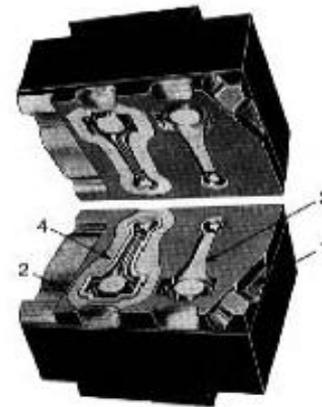
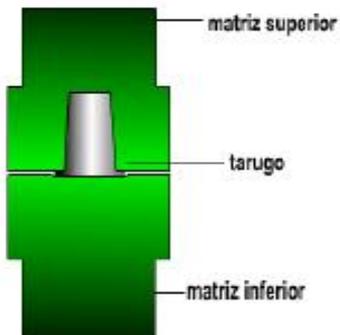
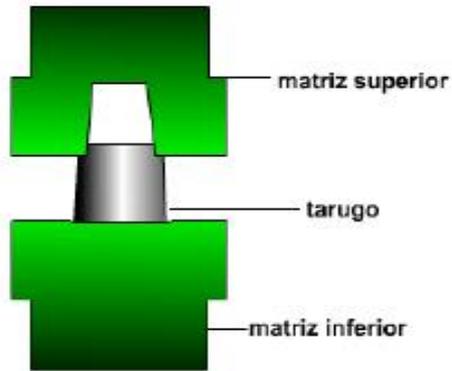


## FIBRAMENTO DE FLANGE FORJADO

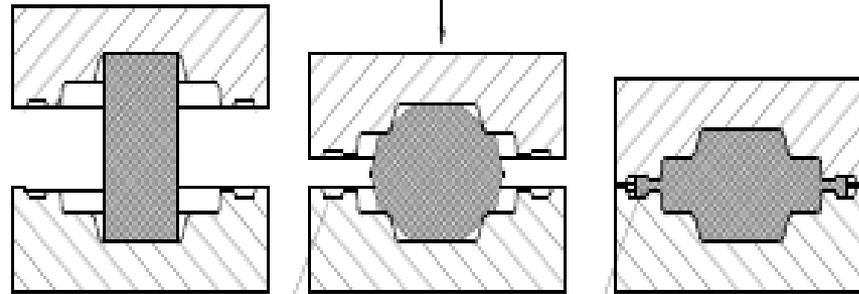


**FIBRAMENTO/FIBRAGEM: PARTÍCULAS (INCLUSÕES, GRAÇOS PERLÍTICOS) ALINHADOS COM O FLUXO DE MATERIAL.**

# MATRIZ FECHADA

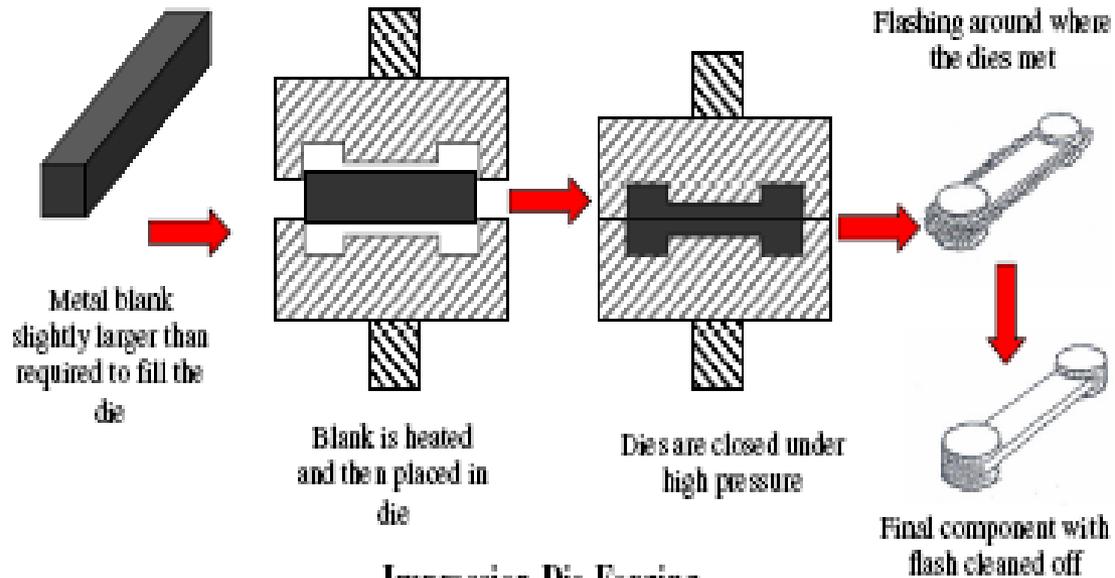


# MATRIZ FECHADA



Flash gutter

Flash

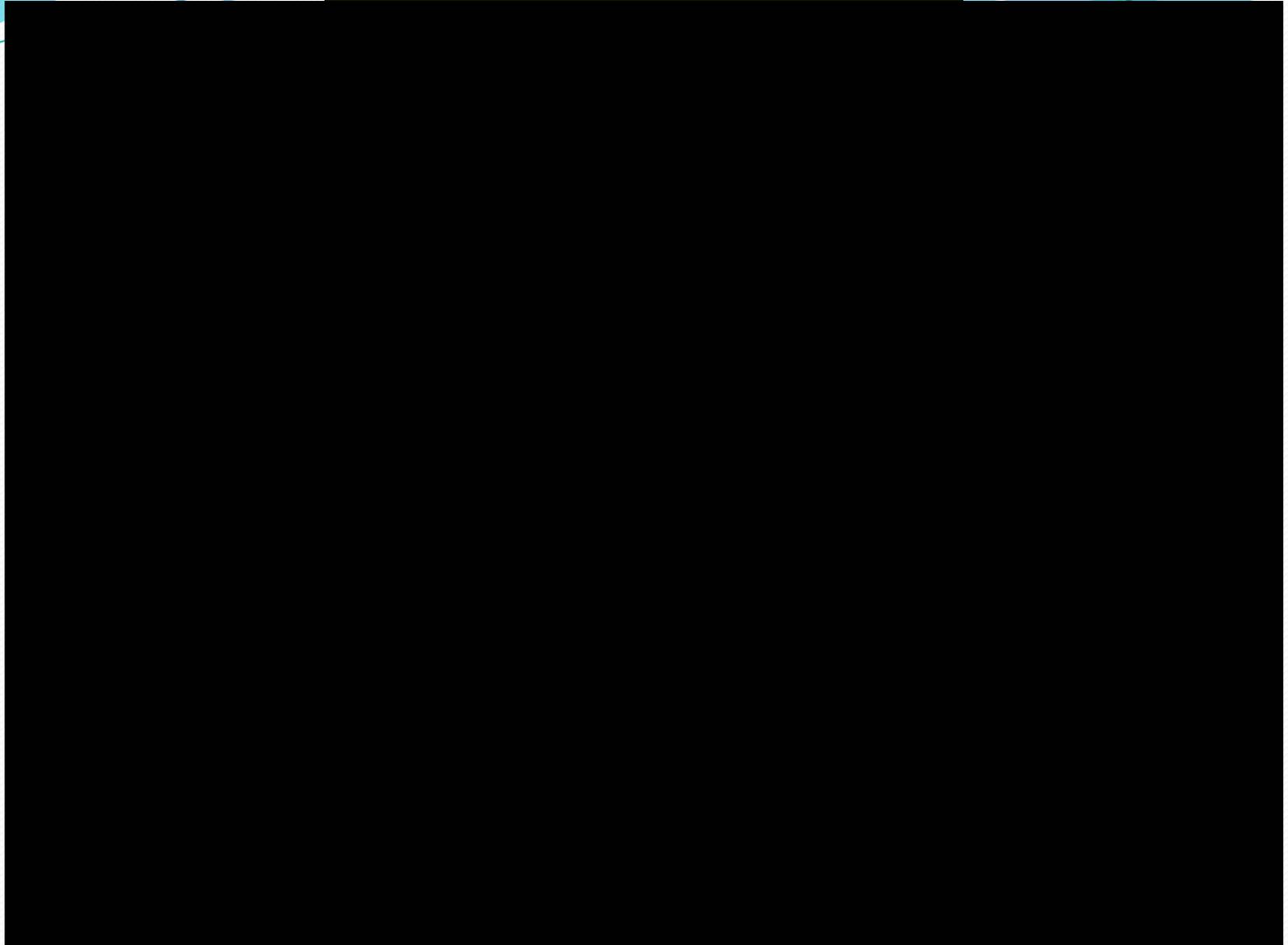


Impression Die Forging

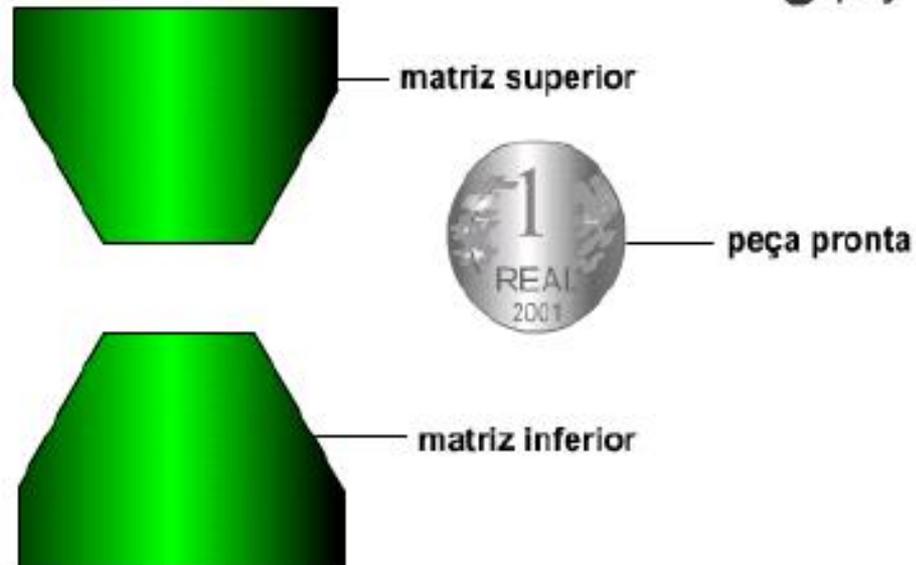
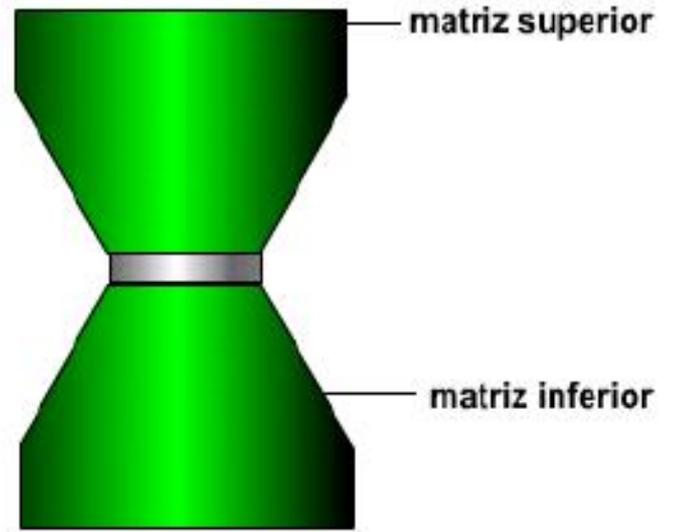
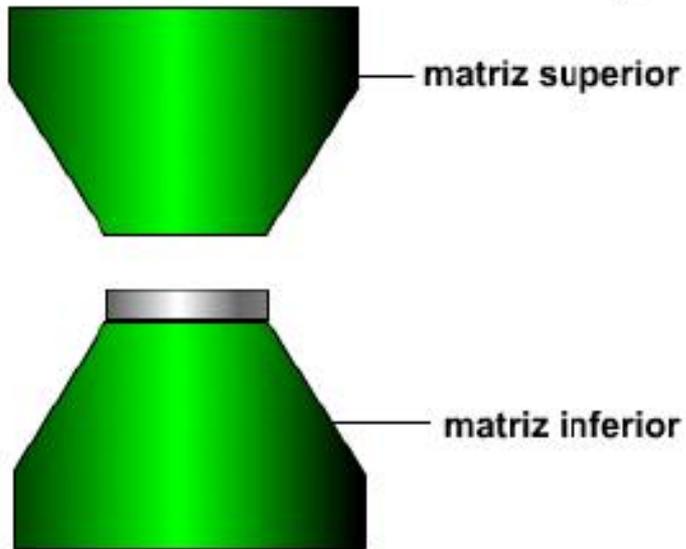
# PRODUTOS FORJADOS



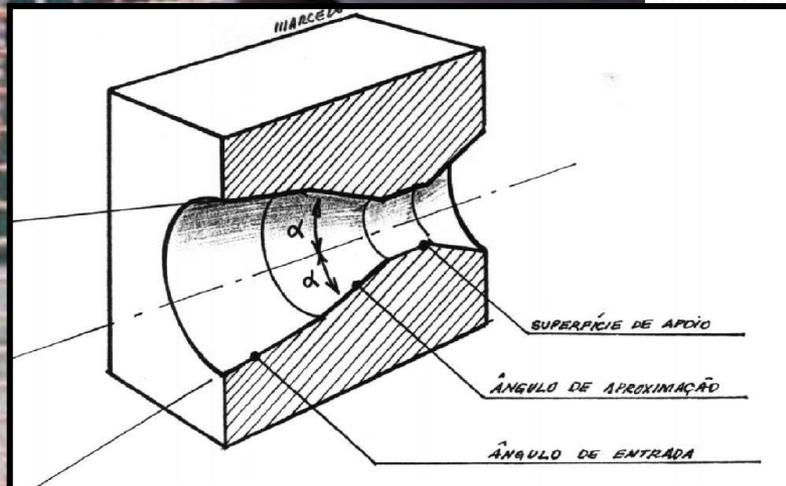
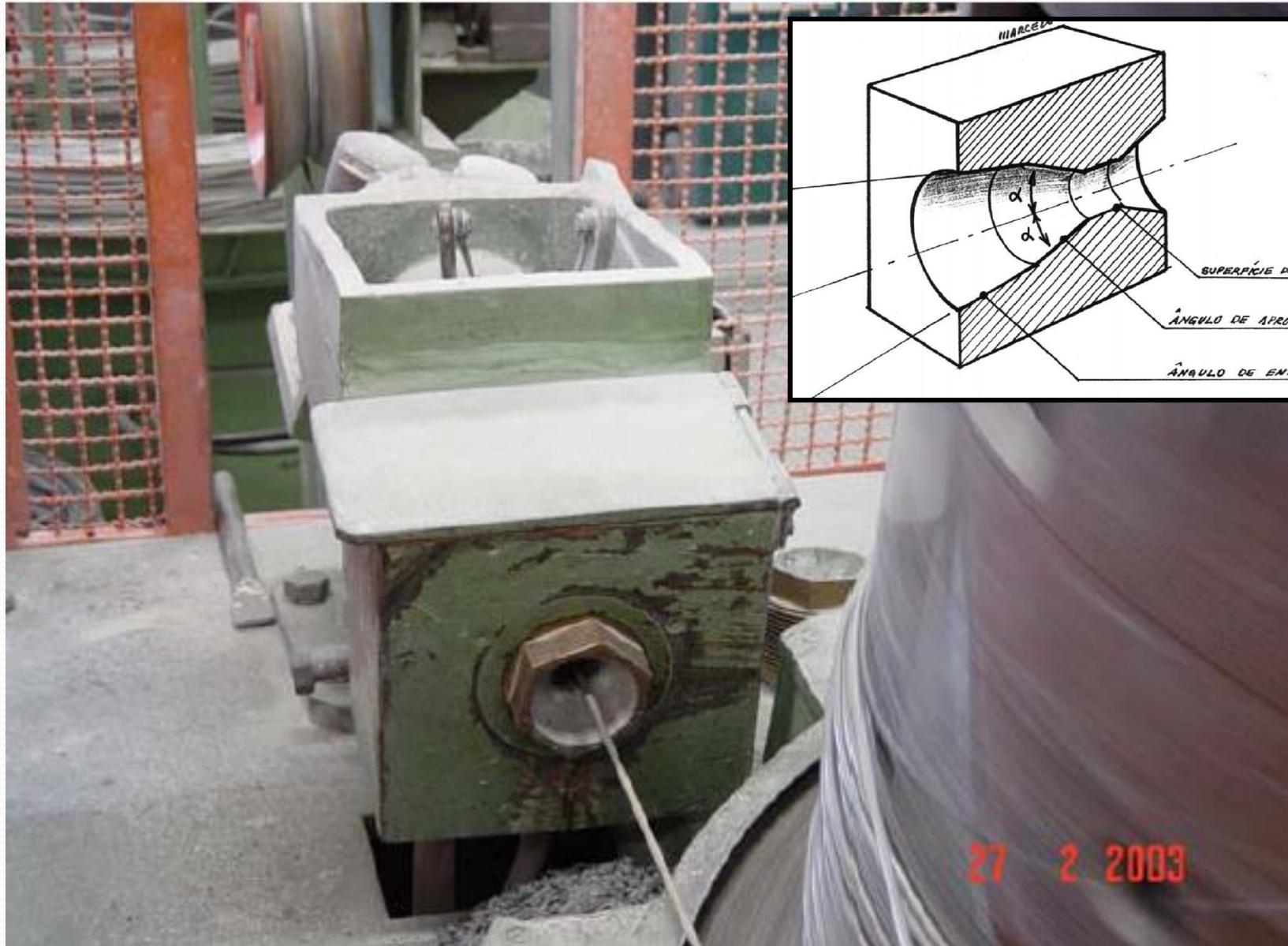
# Open Die Forging



# Cunhagem

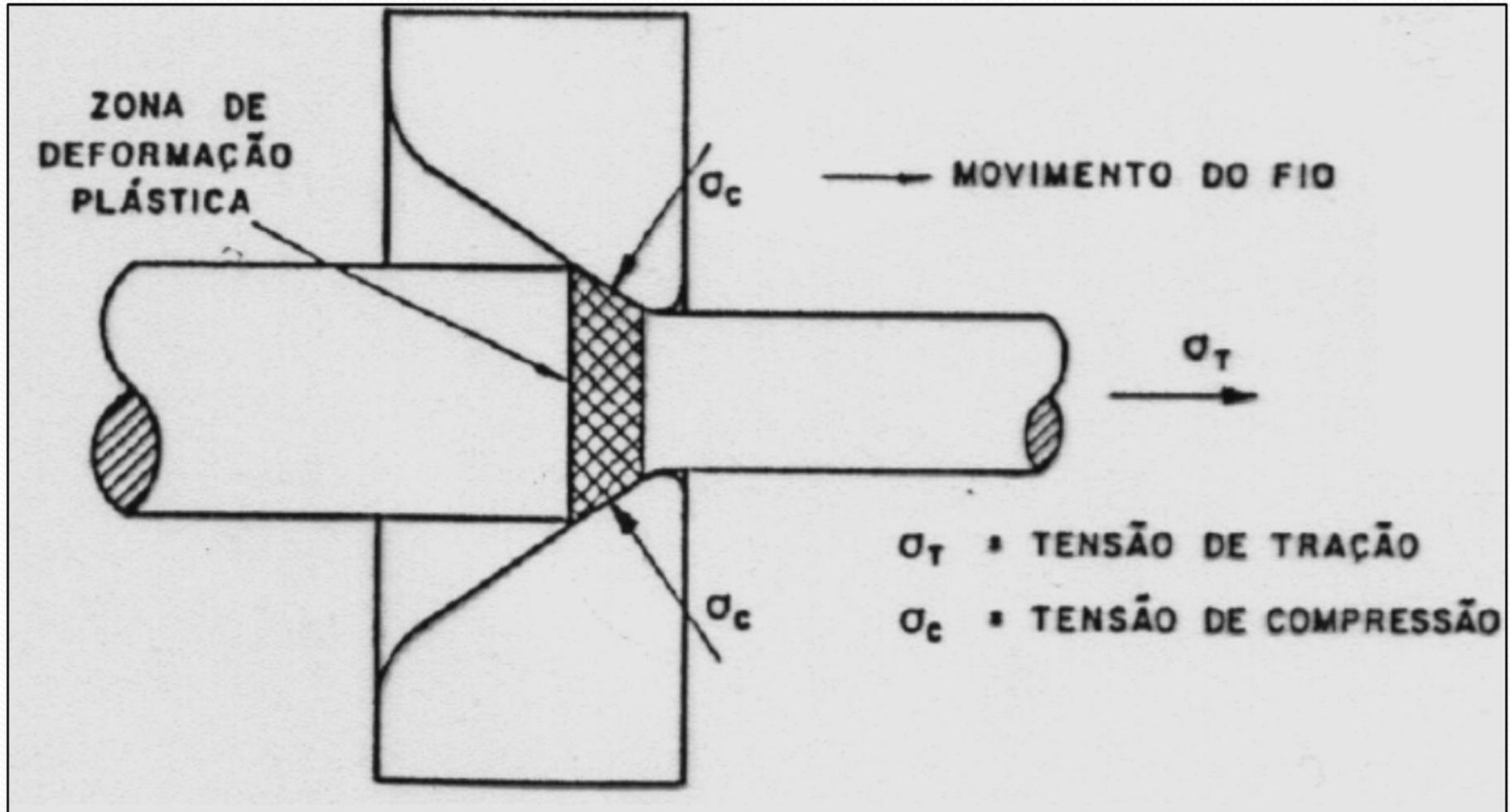


# TREFILAÇÃO

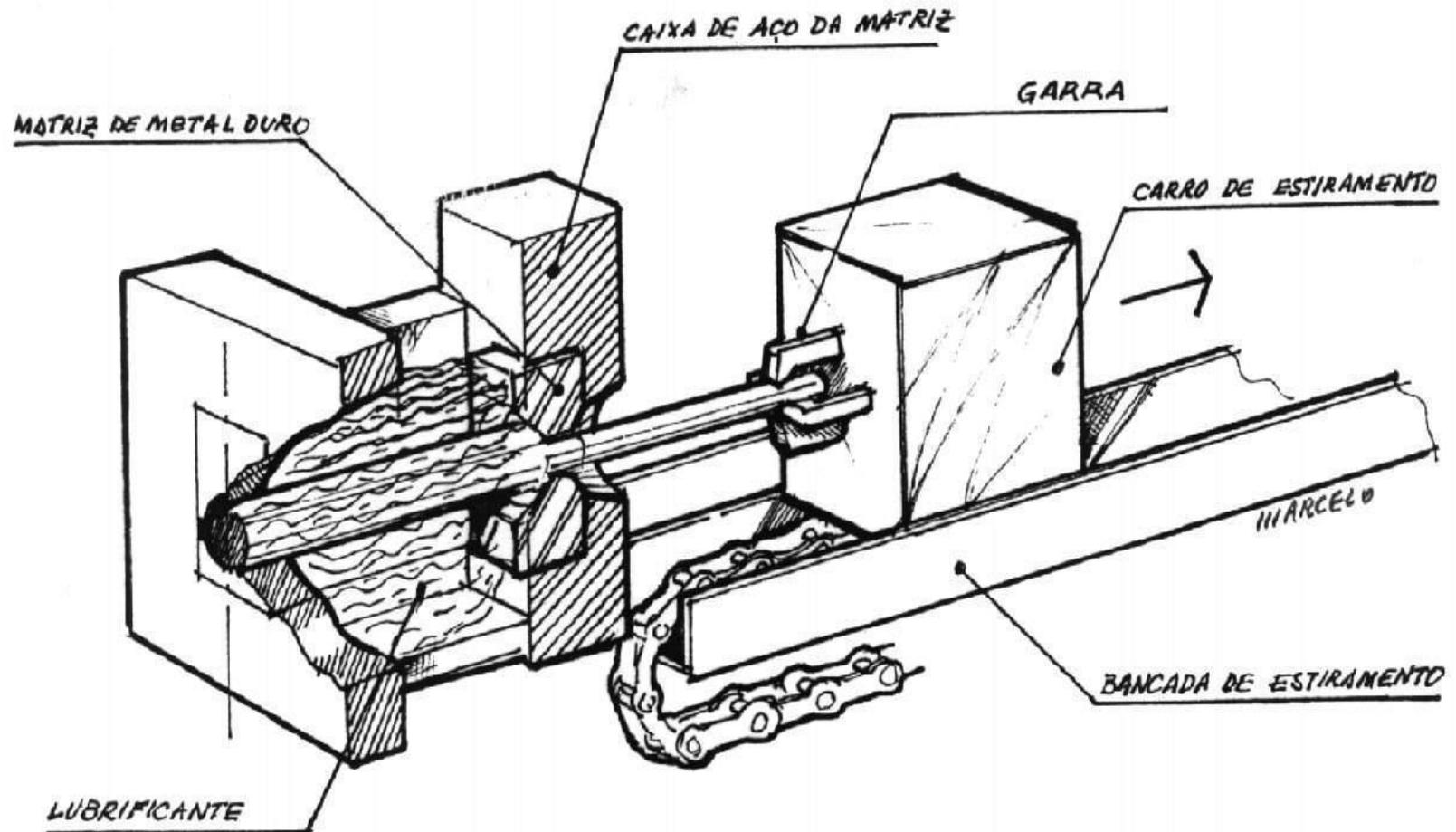


27 2 2003

# MECÂNICA DA TREFILAÇÃO-SEMPRE A FRIO EXCEÇÃO: Mg



# Banco de Trefila





# TREFILAÇÃO - PRODUTOS

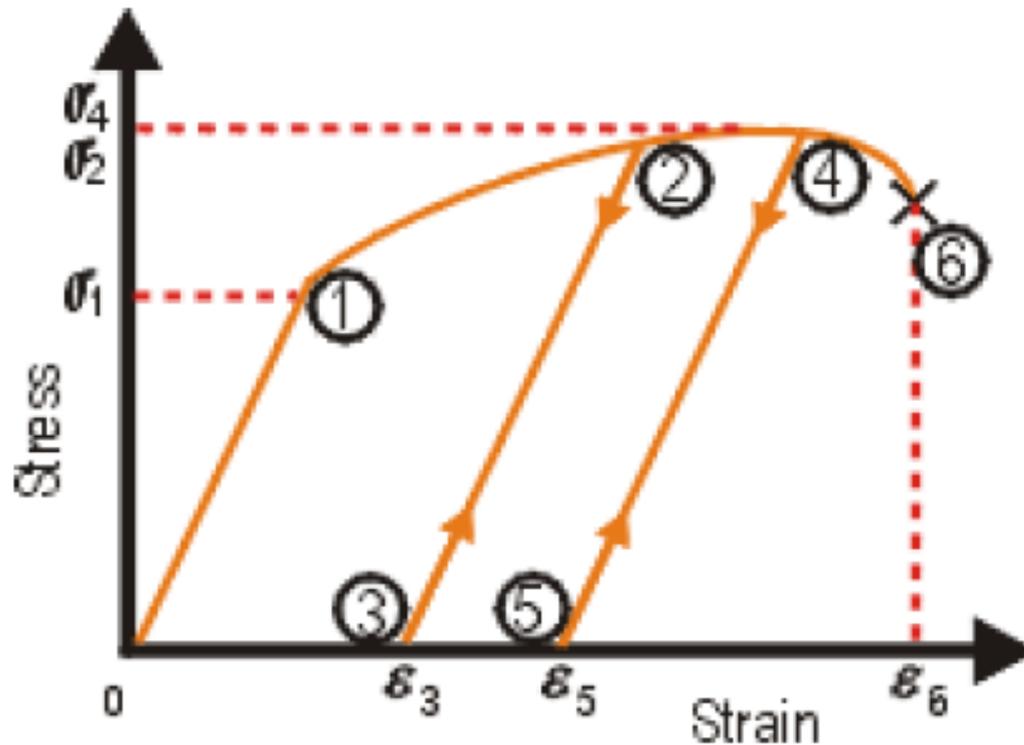


Perfis trefilados



# DEFORMAÇÃO A FRIO E ENCRUAMENTO

## Encruamento



Test sequence

0 ▶ load ▶ 1 ▶ unload

0 ▶ load ▶ 2 ▶ unload

3 ▶ load ▶ 4 ▶ unload

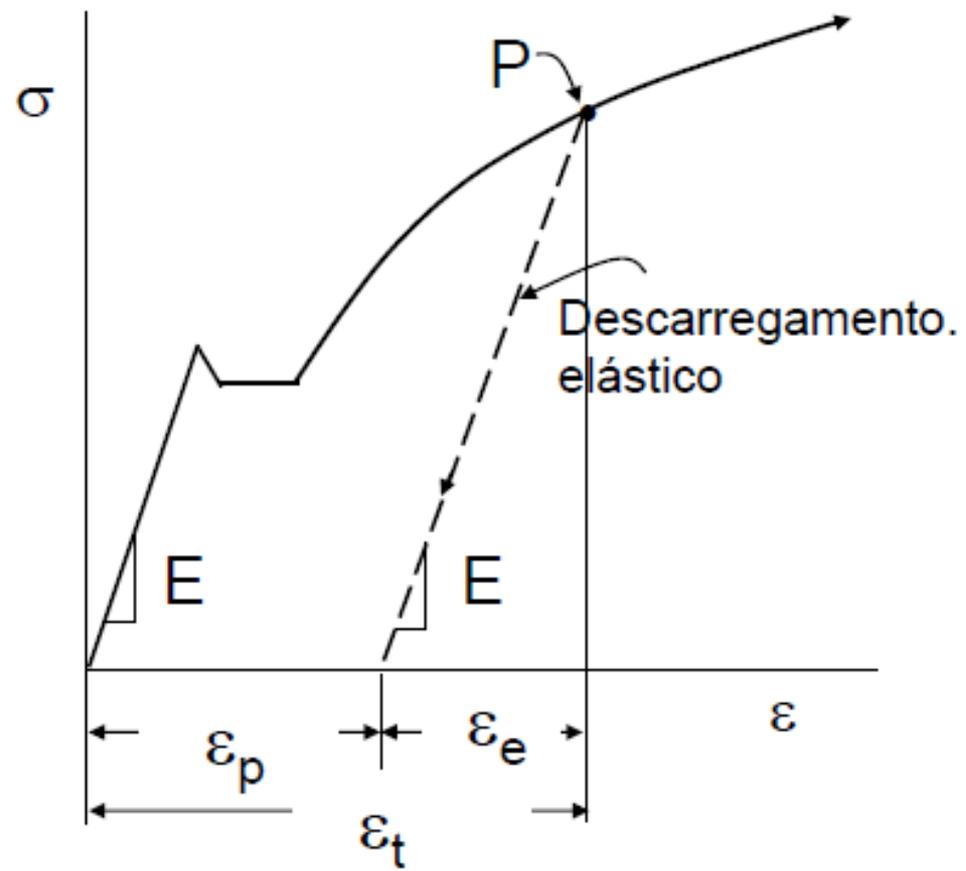
5 ▶ load ▶ 6 ▶ fail

$$\varepsilon = \ln(1 + e)$$

$$\sigma = S \frac{A_0}{A} = S(1 + e)$$

# RECORDANDO TENSÃO VERDADEIRA X DEFORMAÇÃO VERDADEIRA

## Relação Monotônica entre Tensão-Def. Verdadeiras



Def. total  $\epsilon_t$

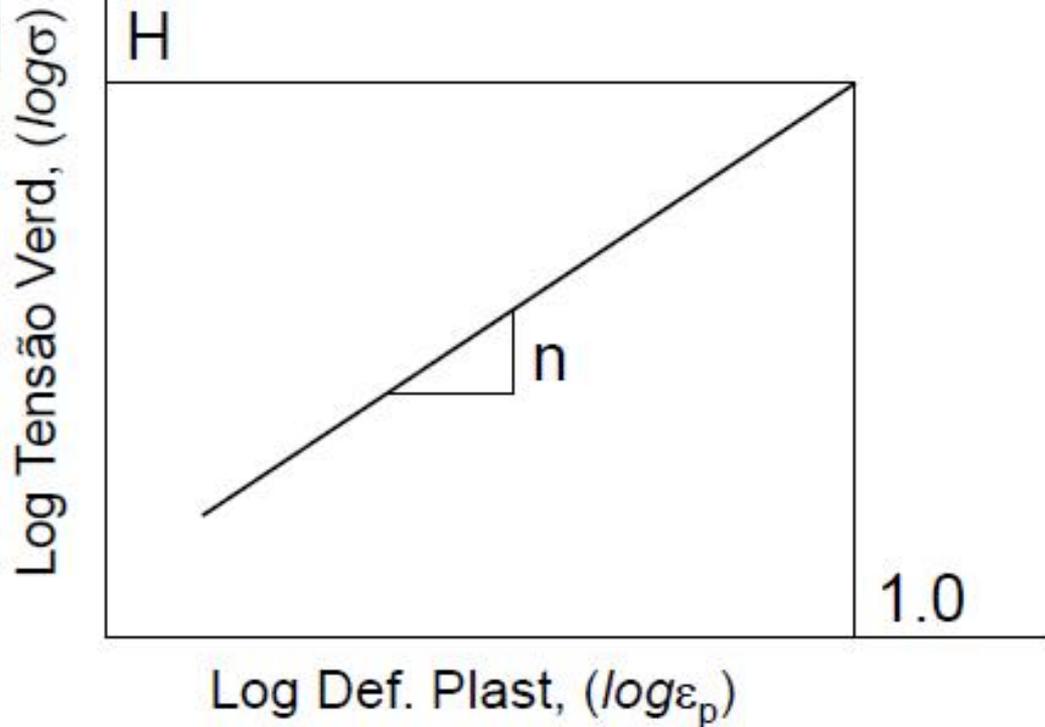
Def. Elast.  $\epsilon_e$

Def. Plast.  $\epsilon_p$

$$\epsilon_t = \epsilon_e + \epsilon_p$$

$$\epsilon_e = \sigma / E$$

# Deformação Plástica



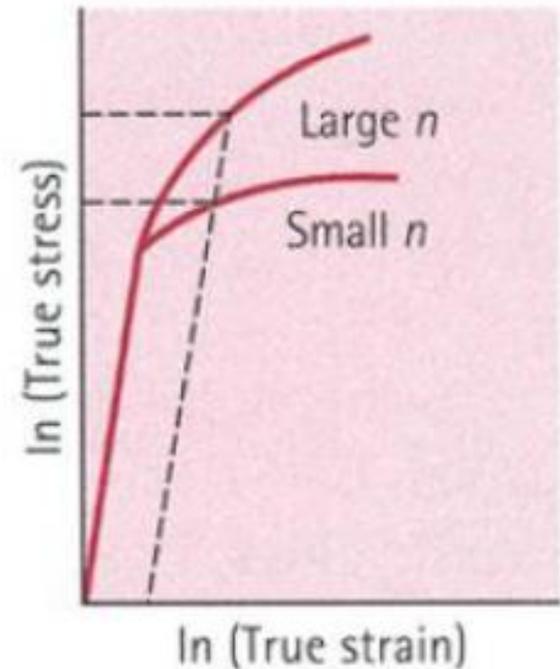
$H$  – Coeficiente de resistência  
 $n$  - Expoente de encruamento

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma}{E} + \left( \frac{\sigma}{K} \right)^{\frac{1}{n}}$$

$$\sigma = K(\varepsilon_p)^n$$

$$\text{or } \varepsilon_p = \left( \frac{\sigma}{K} \right)^{\frac{1}{n}}$$

$$\log \sigma = \log K + n \log \varepsilon_p$$



Metal	Crystal structure	$n$	$K$ (MN.m <sup>-2</sup> )
Titanium	HCP	0.05	1200
Annealed alloy steel	BCC	0.15	640
Quenched and tempered medium-carbon steel	BCC	0.10	1570
Molybdenum	BCC	0.13	725
Copper	FCC	0.54	320
Cu-30% Zn	FCC	0.50	900
Austenitic stainless steel	FCC	0.52	1520

---

*Adapted from G. Dieter, Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill, 1961, and other sources.*

# TRABALHO A FRIO

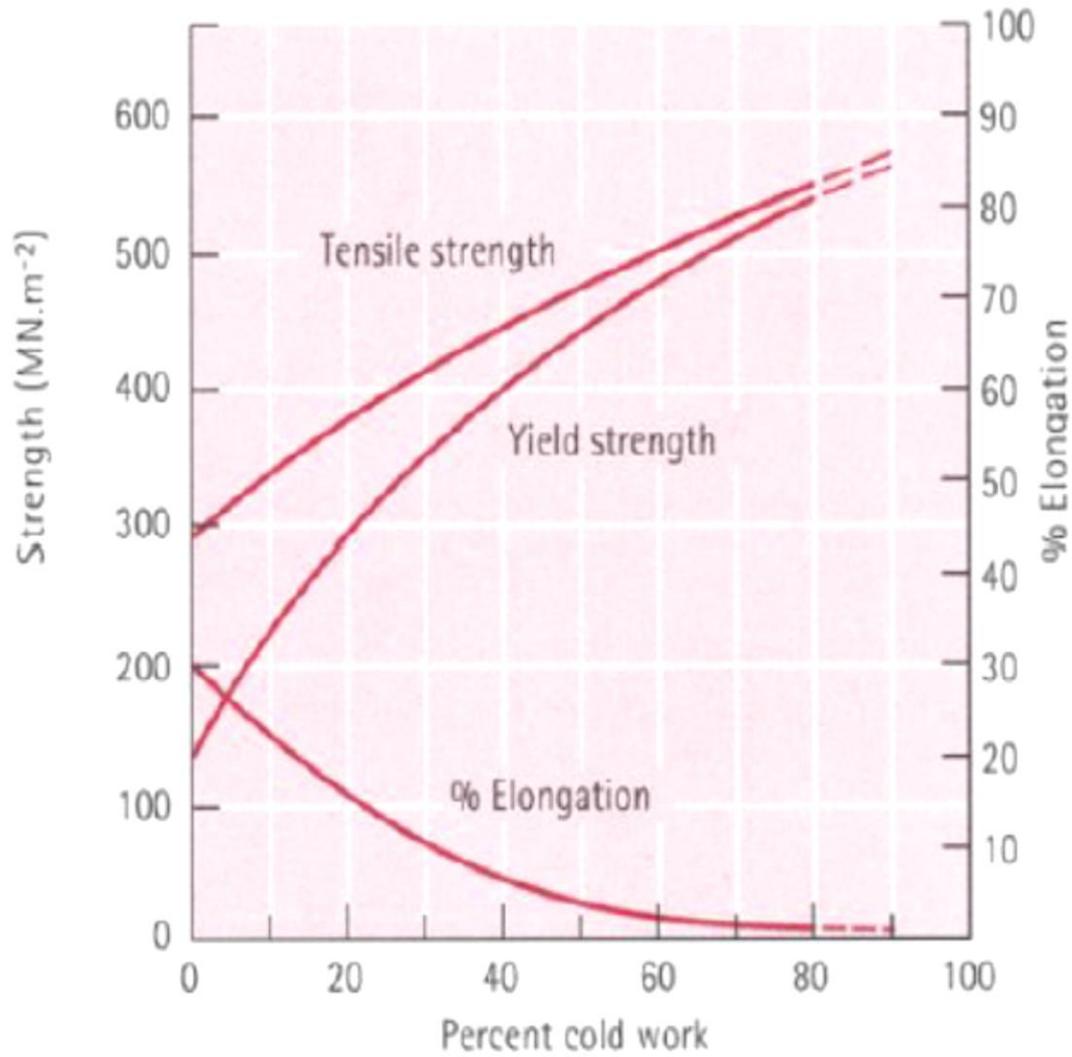


Figure 7.6  
The effect of cold work on the mechanical properties of copper.

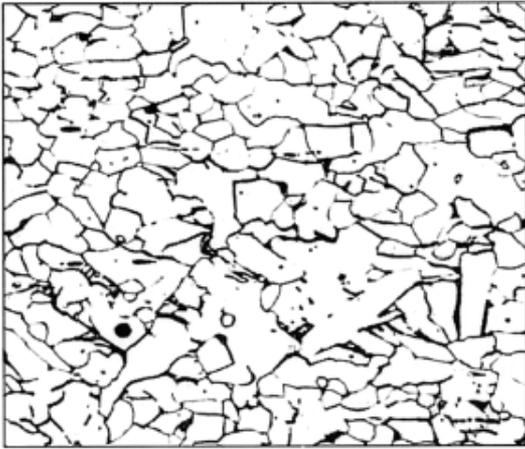
## TRABALHO A FRIO

- 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

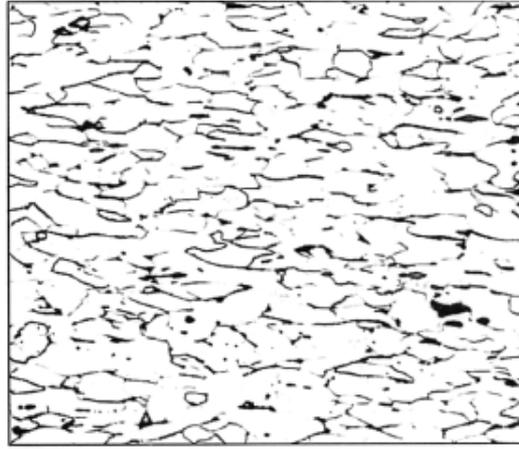
# ENCRUAMENTO OU ENDURECIMENTO PELA DEFORMAÇÃO À FRIO

- 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 discordâncias e imperfeições promovidas pela deformação, que impedem o escorregamento dos planos atômicos;
- A medida que se aumenta o encruamento maior é a força necessária para produzir uma maior deformação;
- O encruamento pode ser removido por tratamento térmico (recristalização) o qual reduz a densidade discordâncias.

# ENCRUAMENTO



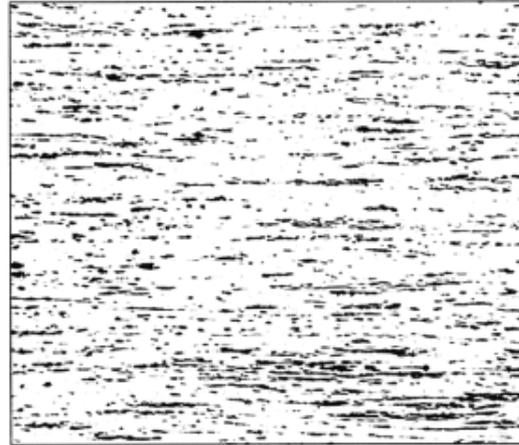
(a)



(b)



(c)



(d)

**Estrutura do grão deformado por trabalho a frio de um aço baixo carbono:**

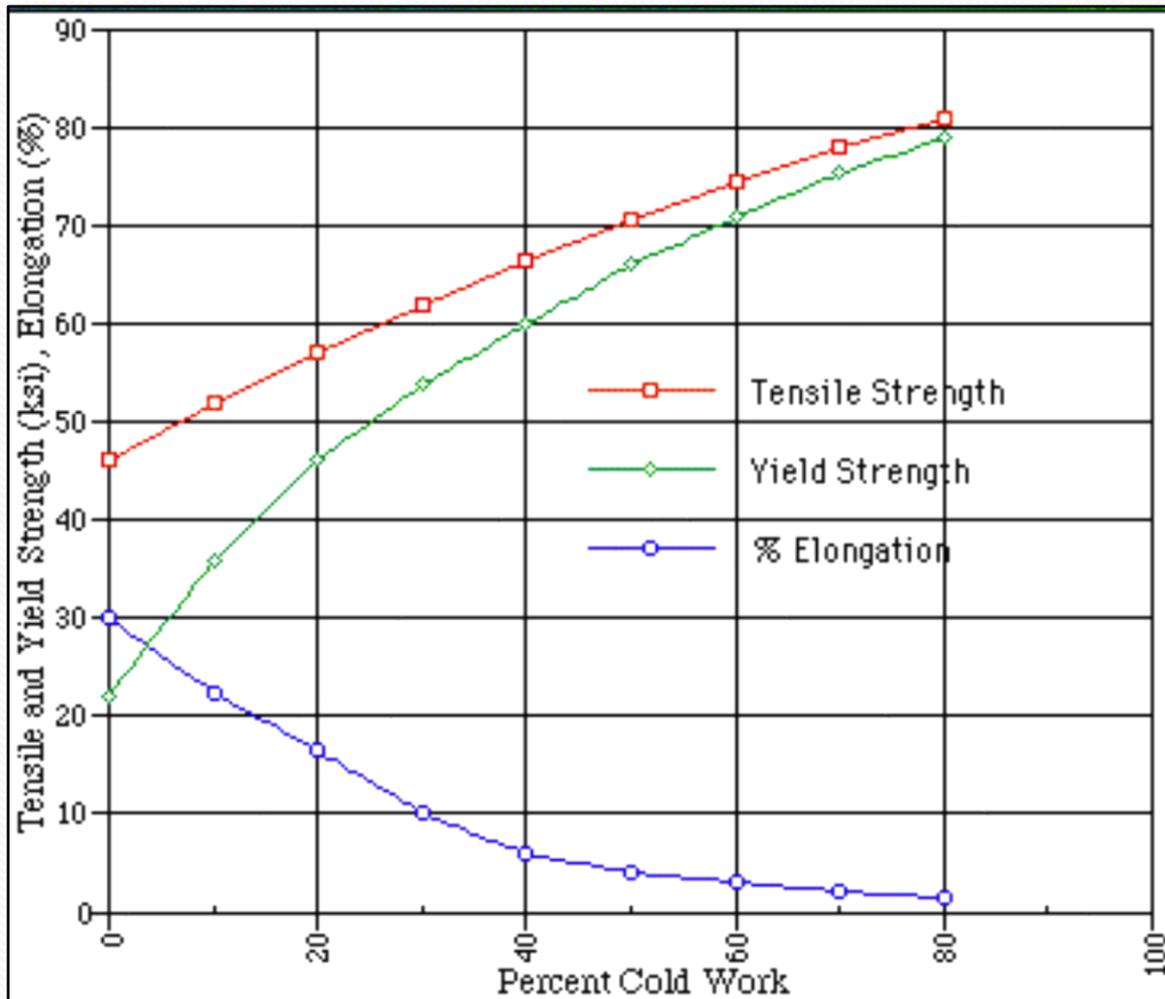
**(a) 10% deformação**

**(b) 30% deformação**

**(c) 60% deformação**

**(d) 90% deformação**

# VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS EM FUNÇÃO DO ENCRUAMENTO

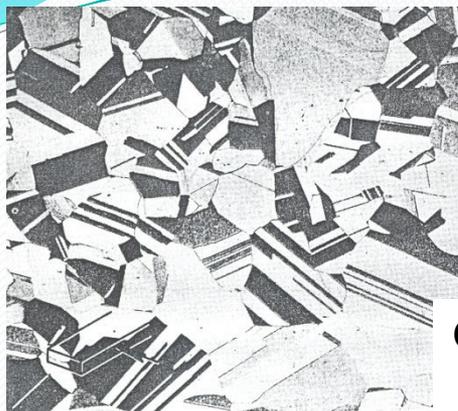


❑ O encruamento aumenta a resistência mecânica a tração;

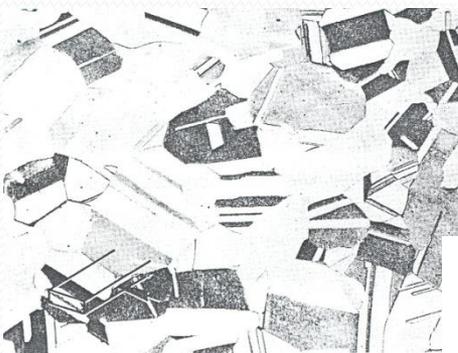
❑ O encruamento aumenta o limite de escoamento;

❑ O encruamento diminui a ductilidade

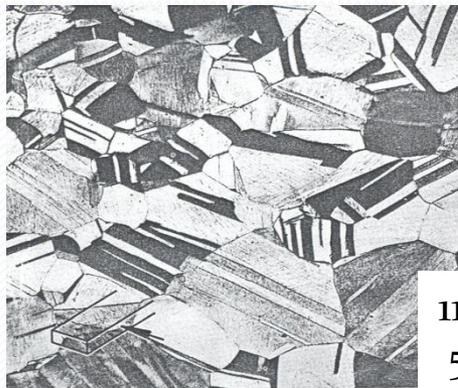
# Efeito do encruamento (%redução a frio) sobre a Resistência à Tração



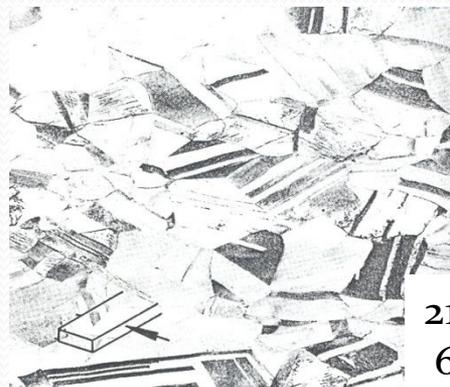
Original  
43 kpsi



6% red.  
49 kpsi



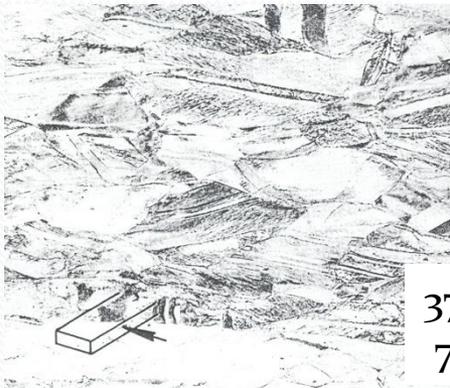
11% red.  
54 kpsi



21% red.  
62 kpsi



29% red.  
69 kpsi



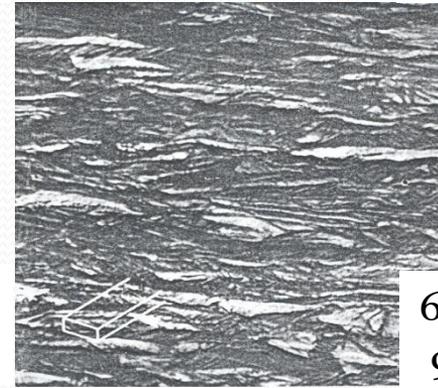
37% red.  
76 kpsi



50% red.  
86 kpsi

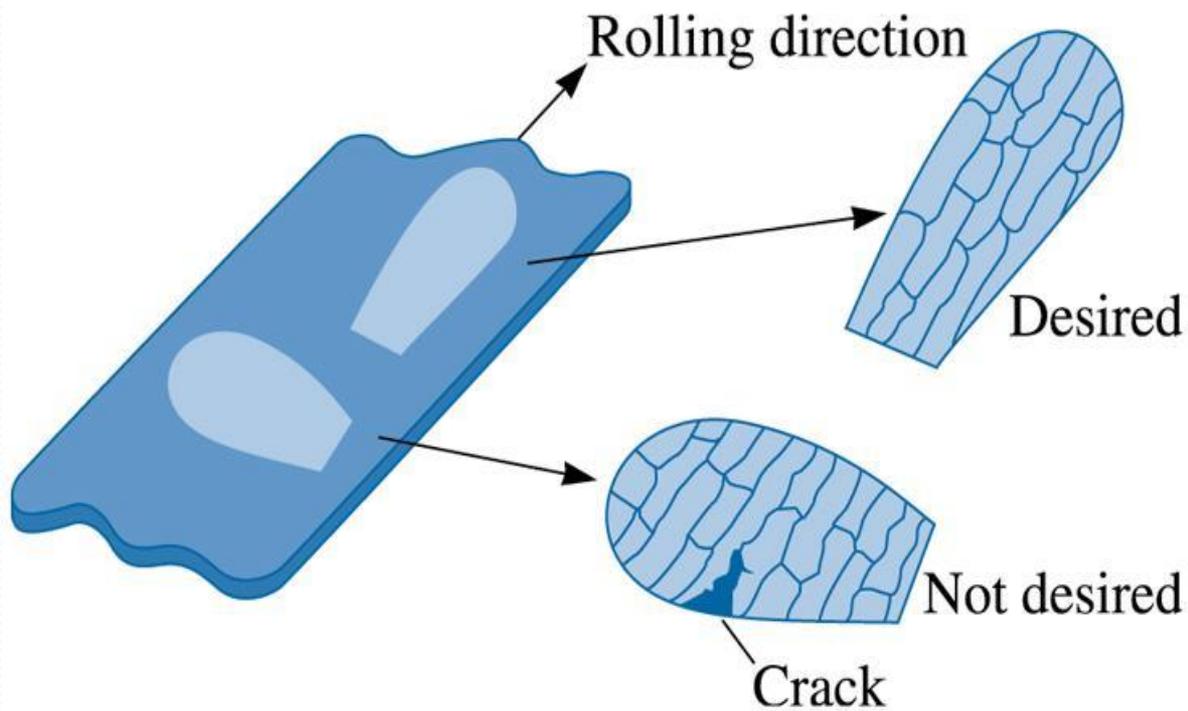


60% red.  
94 kpsi



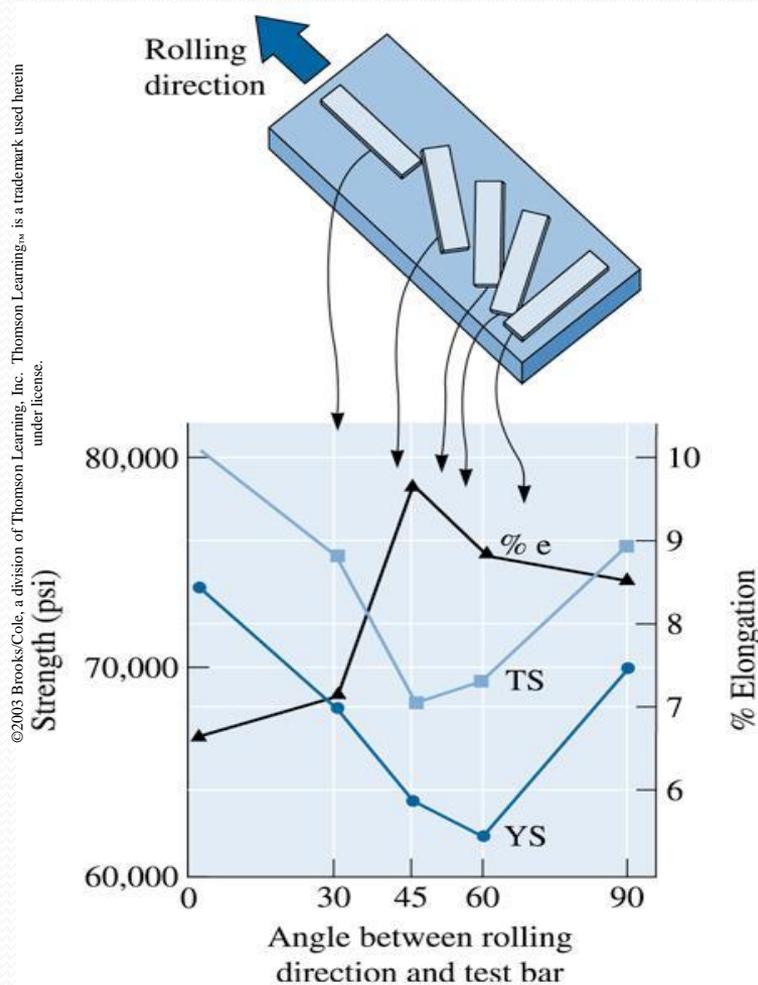
69% red.  
99 kpsi

# ANISOTROPIA



**O alinhamento dos grãos e o alongamento das inclusões causam um direcionamento destas.**

# ANISOTROPIA



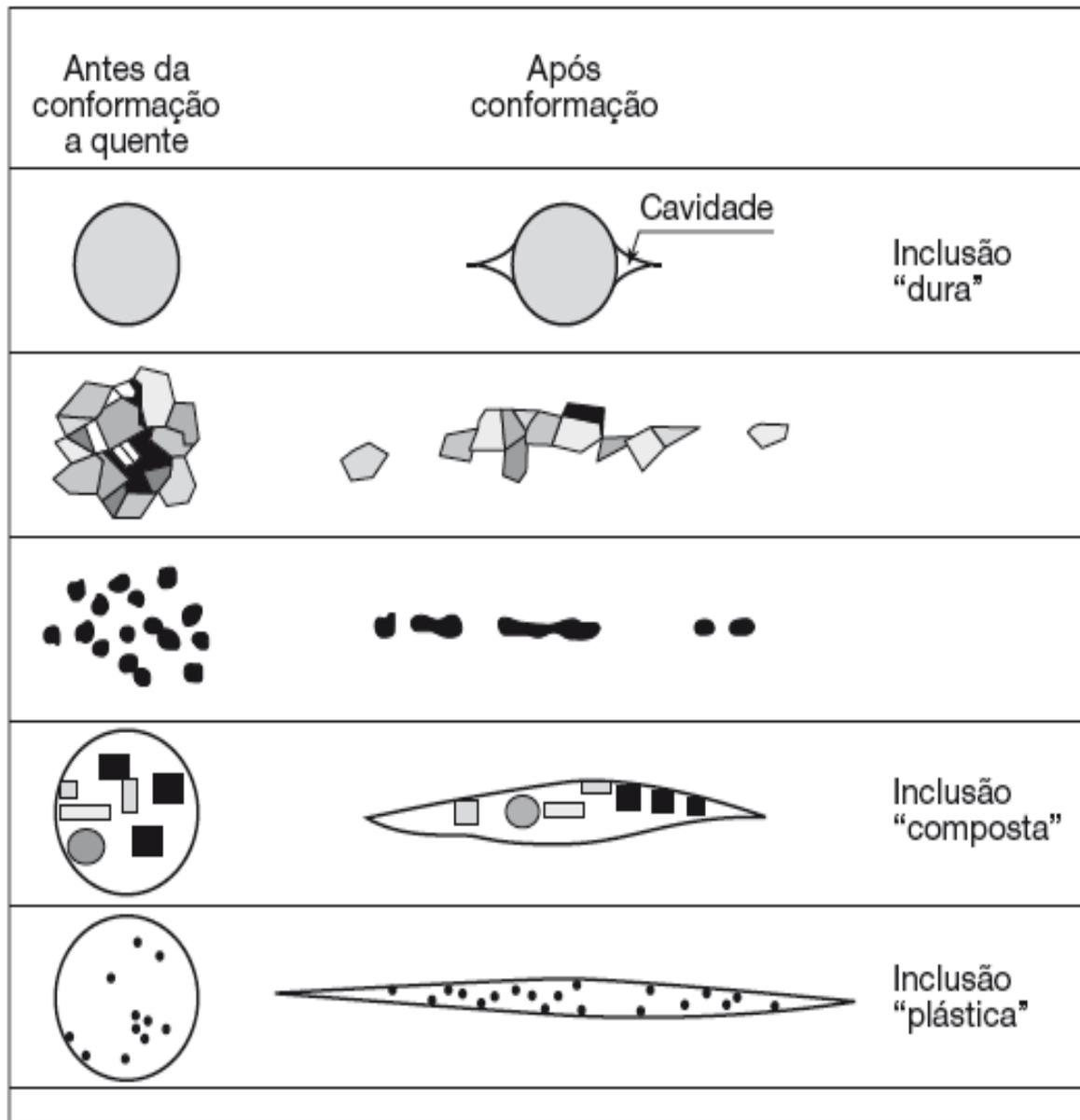
**Comportamento anisotrópico de uma chapa de Al-Li usado em aplicações aeroespaciais.**

**Observe as variações em resistência em função das orientações dos grãos.**

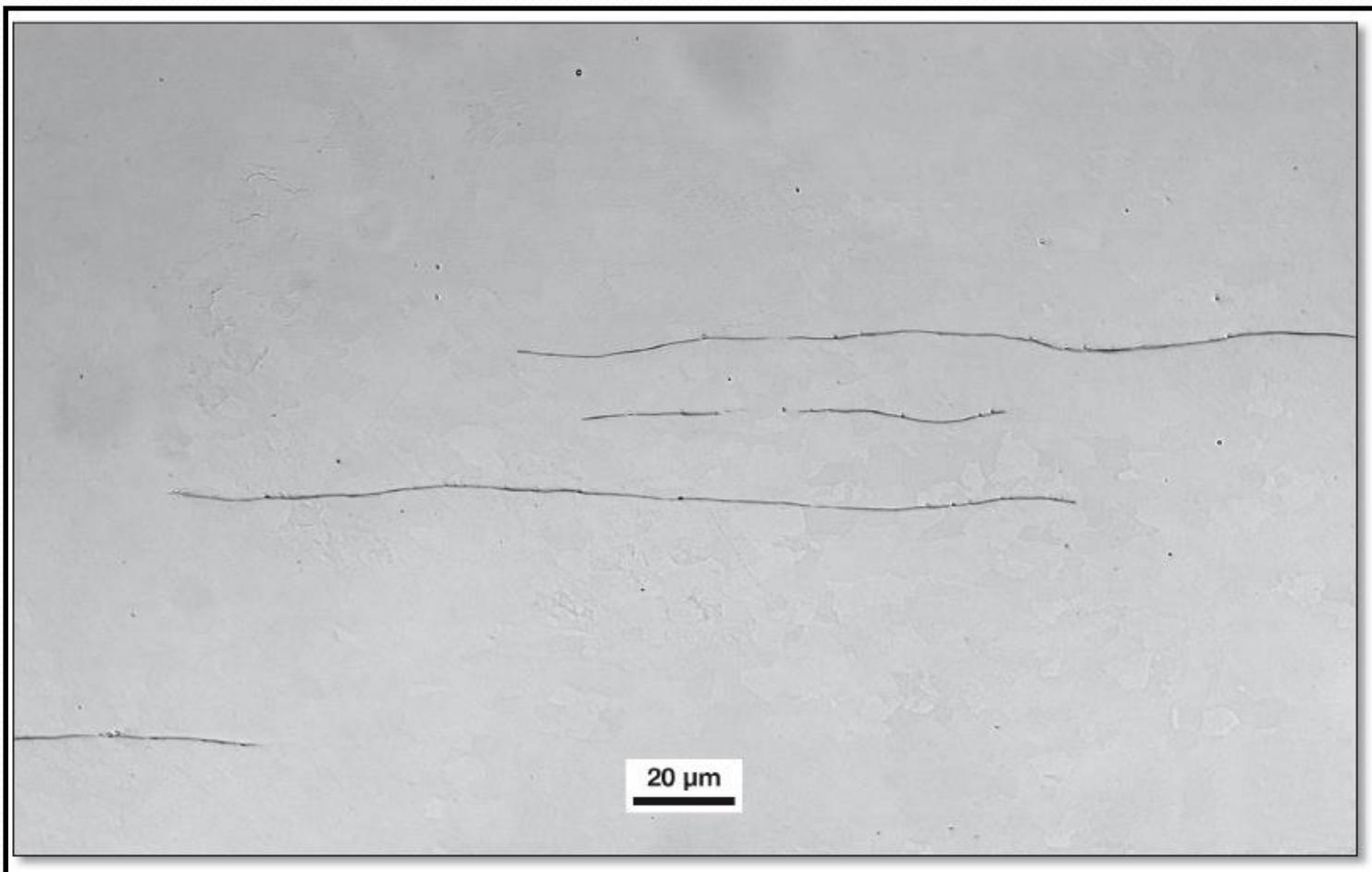
# CONFORMAÇÃO

**Figura 11.20**

Efeito da plasticidade relativa da inclusão sobre sua deformação em relação ao aço. Inclusões plásticas se alongarão de acordo com o trabalho a quente. Inclusões duras podem permanecer inalteradas ou quebrarem, com redistribuição no produto. [2].



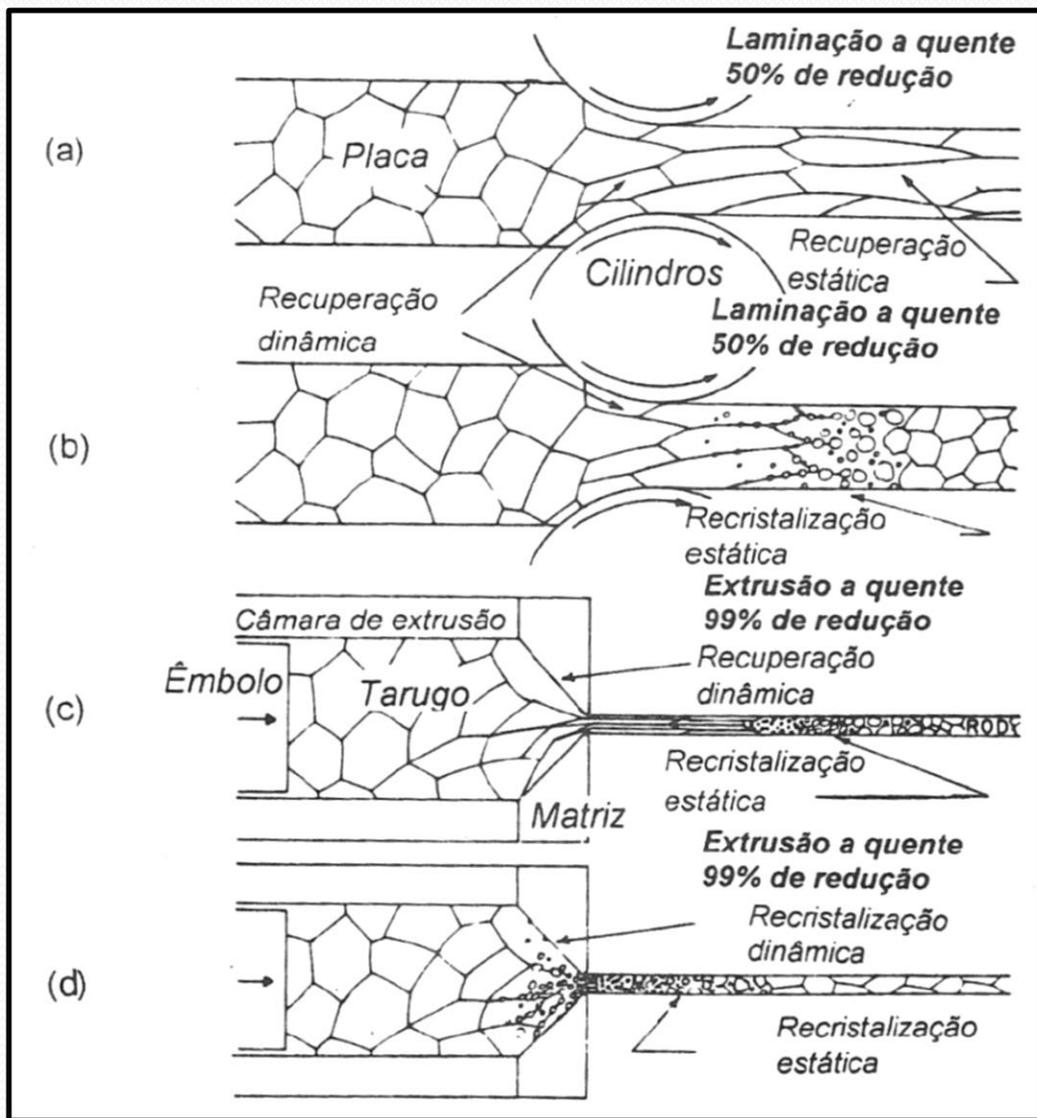
**EFEITO DA CONFORMAÇÃO NAS INCLUSÕES NÃO DESAPARECE COM TRATAMENTOS TÉRMICOS.**



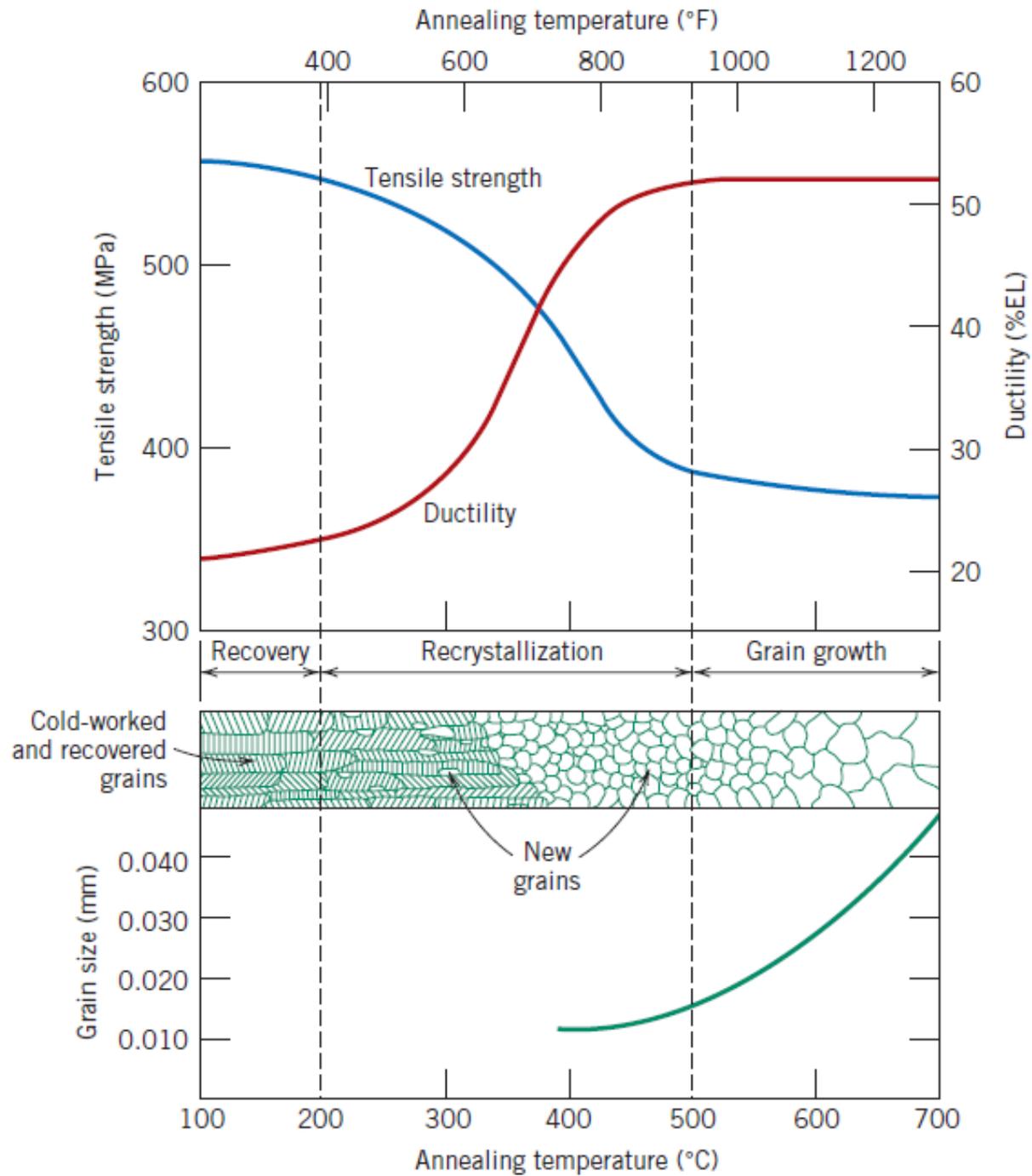
**Figura 11.23**

Inclusões de sulfeto de manganês alongadas no sentido longitudinal da deformação a quente em chapa de aço estrutural. Sem ataque. Cortesia do NIST – National Institute of Standards and Technology, NIST, Gaithersburg, EUA. [14].

# MECÂNICA DA LAMINAÇÃO E EXTRUSÃO A QUENTE



## RECRISTALIZAÇÃO ESTÁTICA, DINÂMICA E METADINÂMICA



# RECUPERAÇÃO

- Há um alívio das tensões internas armazenadas durante a deformação devido ao movimento das discordâncias resultante da difusão atômica
- Nesta etapa há uma redução do número de discordâncias e um rearranjo das mesmas
- Propriedades físicas como condutividade térmica e elétrica voltam ao seu estado original (correspondente ao material não-deformado)

# RECRISTALIZAÇÃO

- Depois da recuperação, os grãos ainda estão tensionados
- Na recristalização os grãos se tornam novamente equiaxiais (dimensões iguais em todas as direções)
- O número de discordâncias reduz mais ainda
- As propriedades mecânicas voltam ao seu estado original

**Forma-se um novo conjunto de grãos que são equiaxiais**

# RECRISTALIZAÇÃO

**Forma-se um novo conjunto de grãos que são equiaxiais**



**Pode-se refinar o grão de uma liga monofásica mediante deformação plástica e recristalização**

# CRESCIMENTO DE GRÃO

- Depois da recristalização se o material permanecer por mais tempo em temperaturas elevadas o grão continuará à crescer
- Em geral, quanto maior o tamanho de grão mais mole é o material e menor é sua resistência

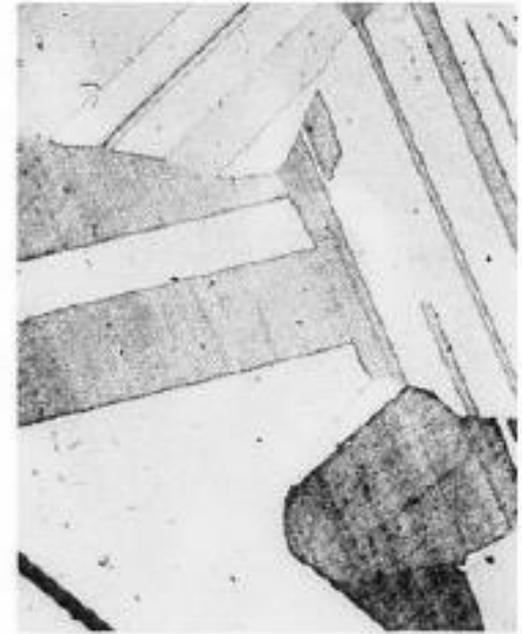
# CRESCIMENTO DE GRÃO



(a)



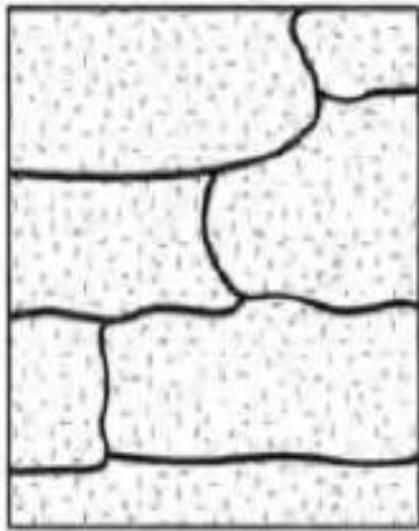
(b)



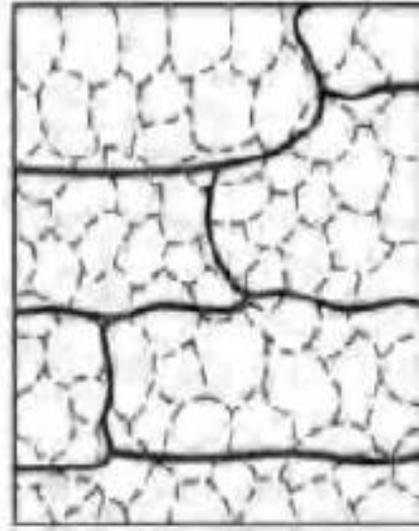
(c)

**Quanto maior a temperatura, mais energia para o grão crescer.**

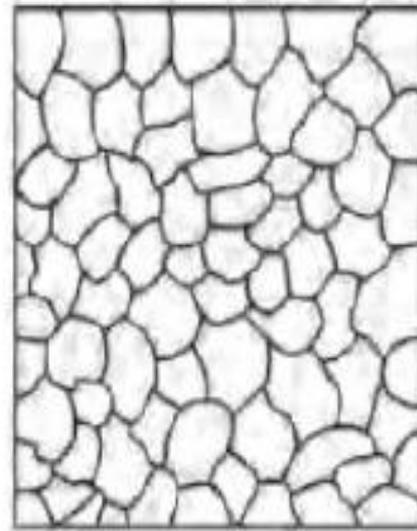
**(a) Recozido a 400oC, (b) recozido a 650oC, e (c) recozido a 800oC .**



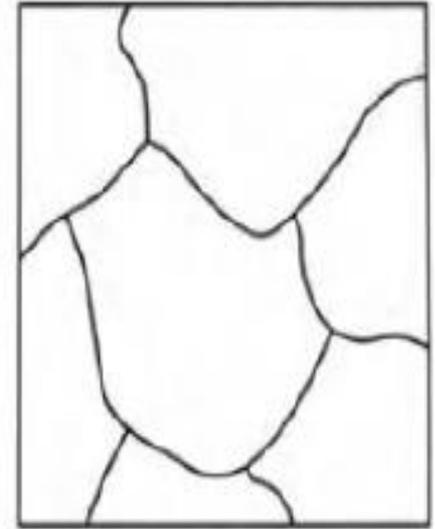
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figure 7.16**

The effect of annealing temperature on the microstructure of cold-worked metals: (a) cold worked, (b) after recovery, (c) after recrystallisation, and (d) after grain growth.

# TEMPERATURAS DE RECRISTALIZAÇÃO

- A temperatura de recristalização depende do grau de deformação
- A temperatura de recristalização está entre  $1/3$  e  $1/2$  da temperatura de fusão

**Table 7.2** Recrystallization and Melting Temperatures for Various Metals and Alloys

<i>Metal</i>	<i>Recrystallization Temperature</i>		<i>Melting Temperature</i>	
	<i>°C</i>	<i>°F</i>	<i>°C</i>	<i>°F</i>
Lead	-4	25	327	620
Tin	-4	25	232	450
Zinc	10	50	420	788
Aluminum (99.999 wt%)	80	176	660	1220
Copper (99.999 wt%)	120	250	1085	1985
Brass (60 Cu-40 Zn)	475	887	900	1652
Nickel (99.99 wt%)	370	700	1455	2651
Iron	450	840	1538	2800
Tungsten	1200	2200	3410	6170

# DEFORMAÇÃO À QUENTE

## VANTAGENS

- Permite o emprego de menor esforço mecânico para a mesma deformação (necessita-se então de máquinas de menor capacidade se comparado com o trabalho a frio).
- Promove o refinamento da estrutura do material, melhorando a tenacidade
- Elimina porosidades
- Deforma profundamente devido a recristalização

## DESVANTAGENS:

- Exige ferramental de boa resistência ao calor, o que implica em custo
- O material sofre maior oxidação, formando casca de óxidos
- Não permite a obtenção de dimensões dentro de tolerâncias estreitas

# TAMANHO DO GRÃO

- 👉 Tamanho do grão influi nas propriedades dos materiais.
- 👉 O tamanho do grão é determinado através de “cartas padrões”.

**ASTM** - **American Society for Testing and Materials**  
(ou ABNT)

Número do tamanho de grão: 1 - 10

Aumento: x100

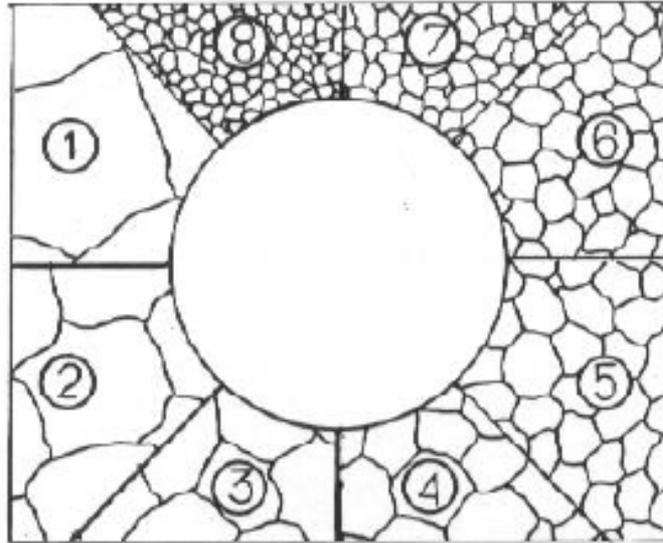
$$N = 2^{n-1}$$

N = número médio de grãos por polegada quadrada

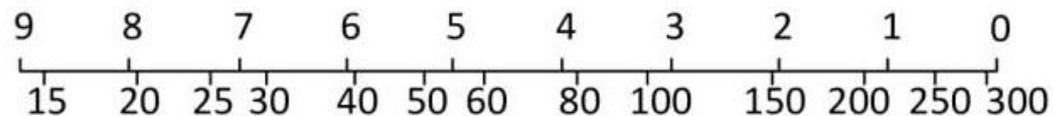
n = tamanho do grão

**Análise de TG é sempre feita na direção longitudinal à direção de deformação.**

# MÉTODOS DE ANÁLISE DE TAMANHO DE GRÃO: GRADE NA OCULAR-MEDIDA POR COMPARAÇÃO EM 100X



A rede hexagonal que se igualar na projeção, com os grãos da amostra, para um aumento de 100x, representará o número do tamanho do grão



Diâmetro médio equivalente ( $\mu\text{m}$ )

# Tamanho do grão: Método planimétrico de Jefferies

Determina-se o número de grãos situados dentro do círculo ( $n_c$ ) e o número de grãos interceptados pela circunferência ( $n_i$ )

**Número de grãos equivalente**

$$N_{eq} = \frac{N_i}{2} + N_c$$

**O número de grãos por unidade de área**

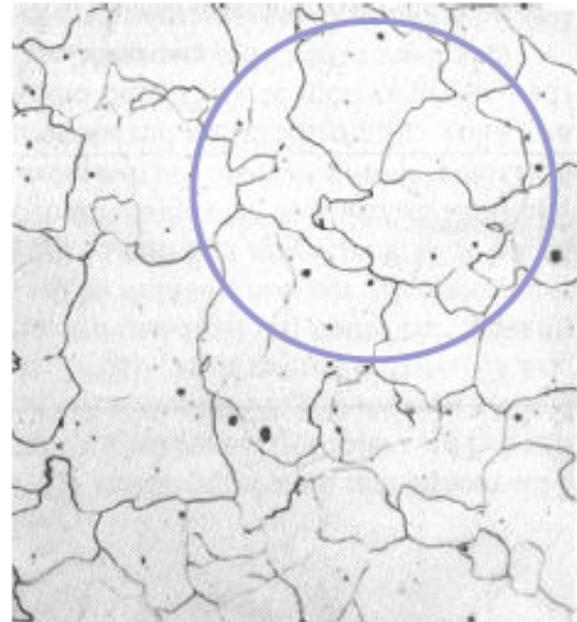
$$N_A = N_{eq} / A$$

**Número de grãos por unidade de comprimento**

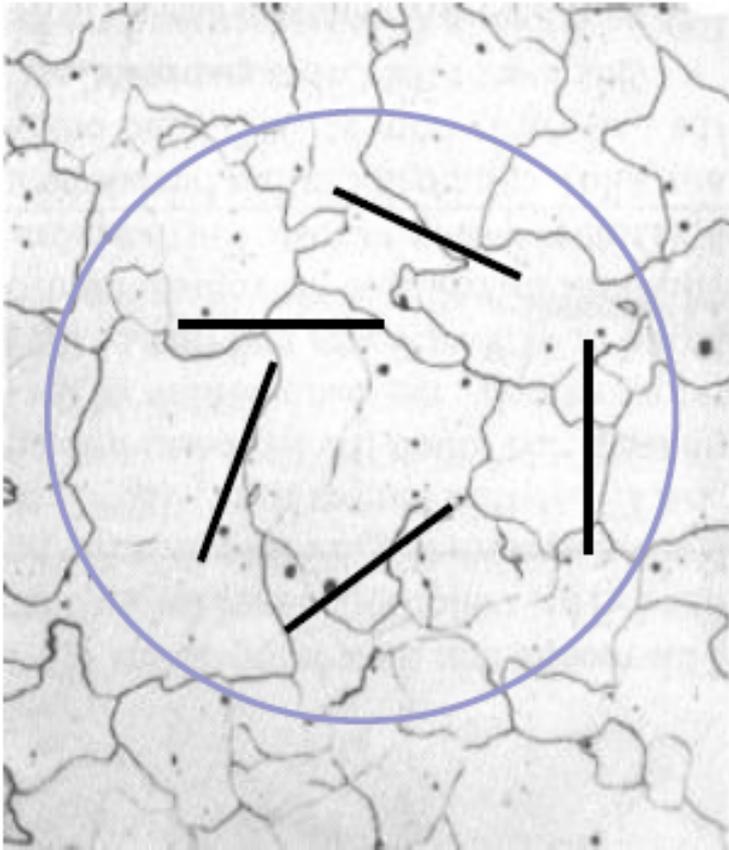
$$N_L = 0,735 \cdot N_A^2$$

**Diâmetro médio dos grãos**

$$D = \frac{1}{N_L}$$



# Tamanho do grão: Método da interceptação linear de Heyn



- Neste método efetua-se a contagem do número de contornos de grão interceptados pelas linhas-teste de comprimento conhecido.
- O diâmetro (tamanho do grão - **D**) é calculado pela seguinte relação:

$$D = 1/N_L$$

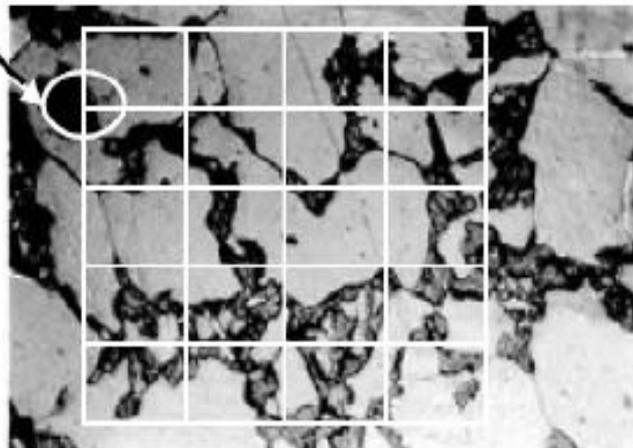
$$N_L = \frac{(\text{número de interseções}) \times (\text{aumento})}{\text{comprimento da linha teste}}$$

# MEDIDA DA PROPORÇÃO DE FASE

A metodologia convencional para determinação de percentual de fase consiste em usar um reticulado quadriculado com 25 interseções.

Em geral um papel transparente com o reticulado é sobreposto à fotografia.

Intercepto



# MEDIDA DA PROPORÇÃO DE FASE

São avaliadas três possíveis situações:

- (1) O intercepto está totalmente sobre uma fase (+1)
- (2) O intercepto não está sobre uma fase (+0)
- (3) O intercepto está parcialmente sobre a fase (+0,5)

$N_T$ : no total de pontos da malha

$N_i$ : no total de pontos da malha que estão contidos na fase  $i$

A fração em área de uma fase  $i$

$$f_i = \frac{N_i}{N_T}$$



**FIM**