

**SMM 0193 – ENGENHARIA E
CIÊNCIA DOS MATERIAIS I**

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



EESC • USP



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.**

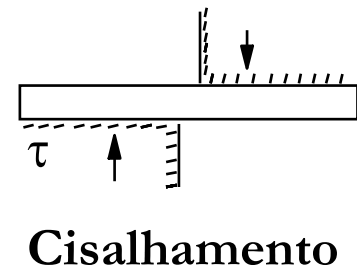
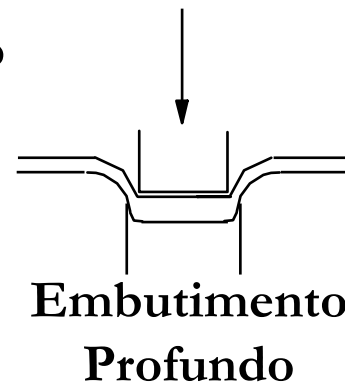
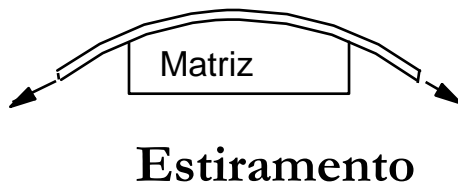
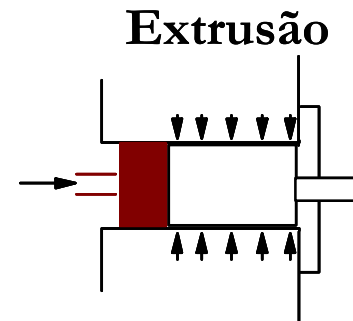
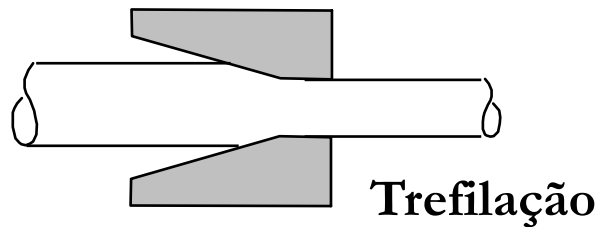
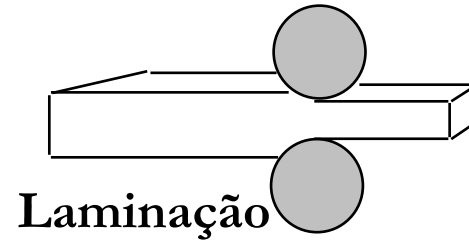
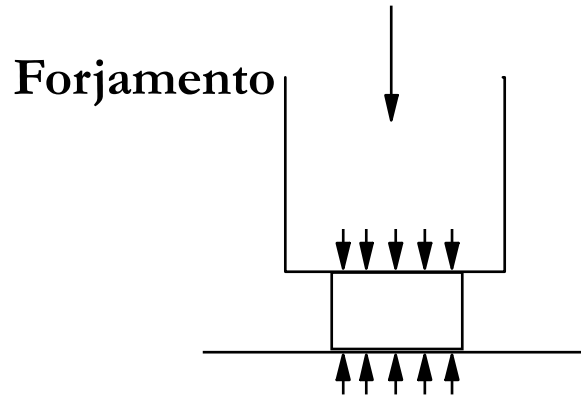
TRABALHO (DEFORMAÇÃO) A QUENTE E A FRIO

- **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.**

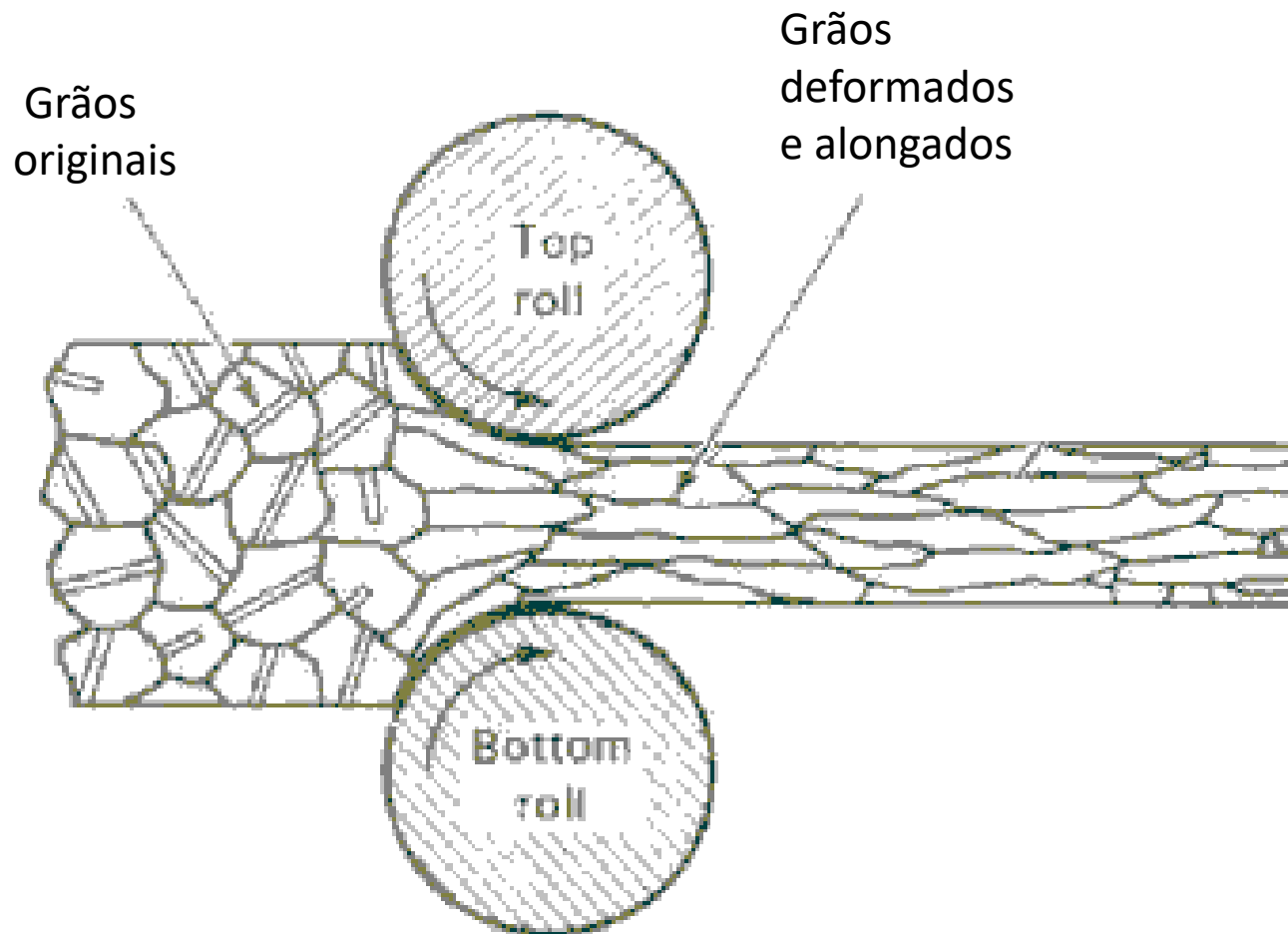


- A definição de **temperatura** de trabalho a **quente** ou a **frio** é **complexa** mas pode-se definir um **limite aceitável**, em relação à **temperatura de fusão (T_f) em K** [TOMIZ at el, 2000-ISIJ]
- **Trabalho a quente, acima de $0,5T_f$;**
- **Trabalho a frio, abaixo de $0,5T_f$.**

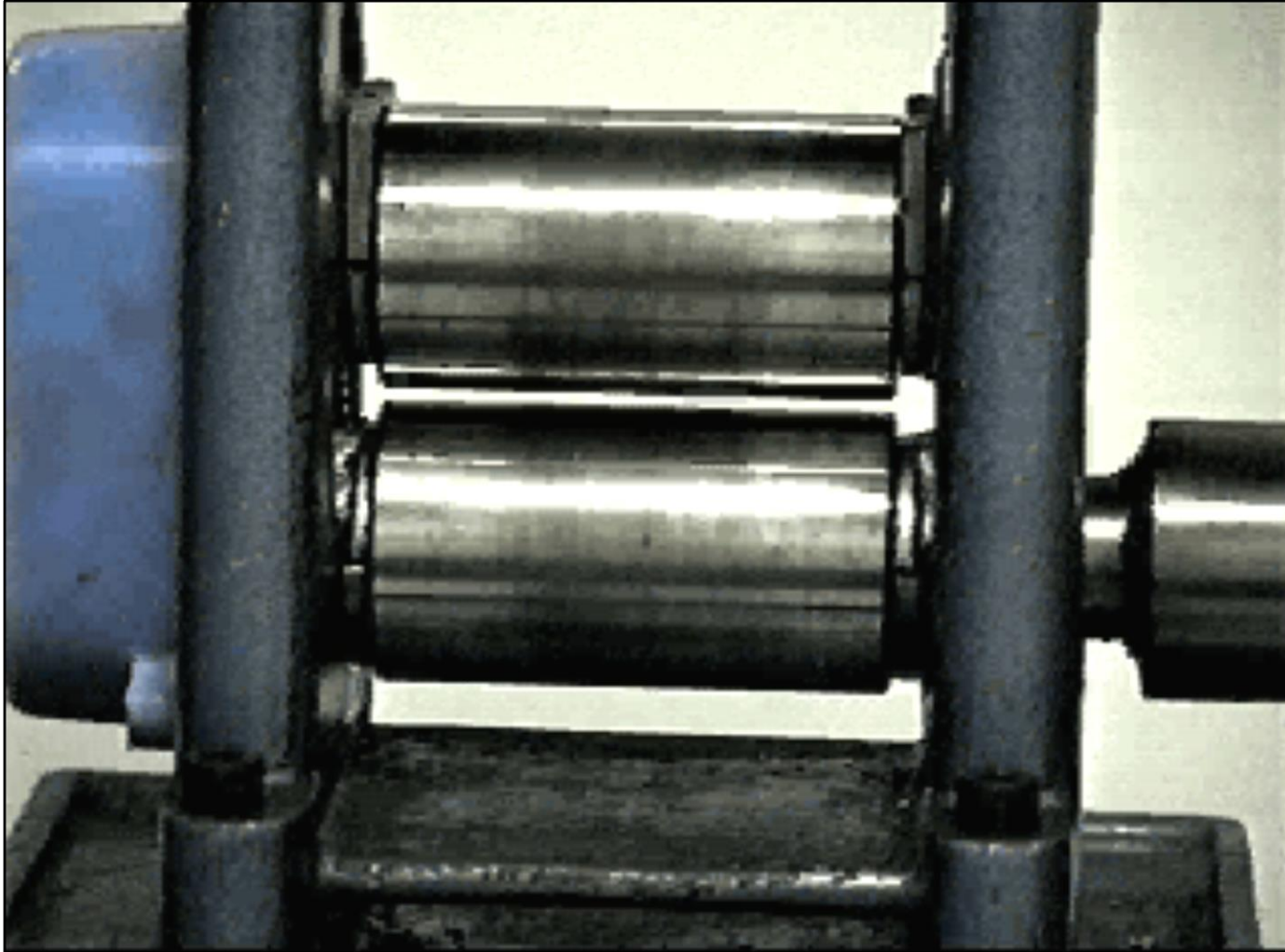
PRINCIPAIS TIPOS DE CONFORMAÇÃO



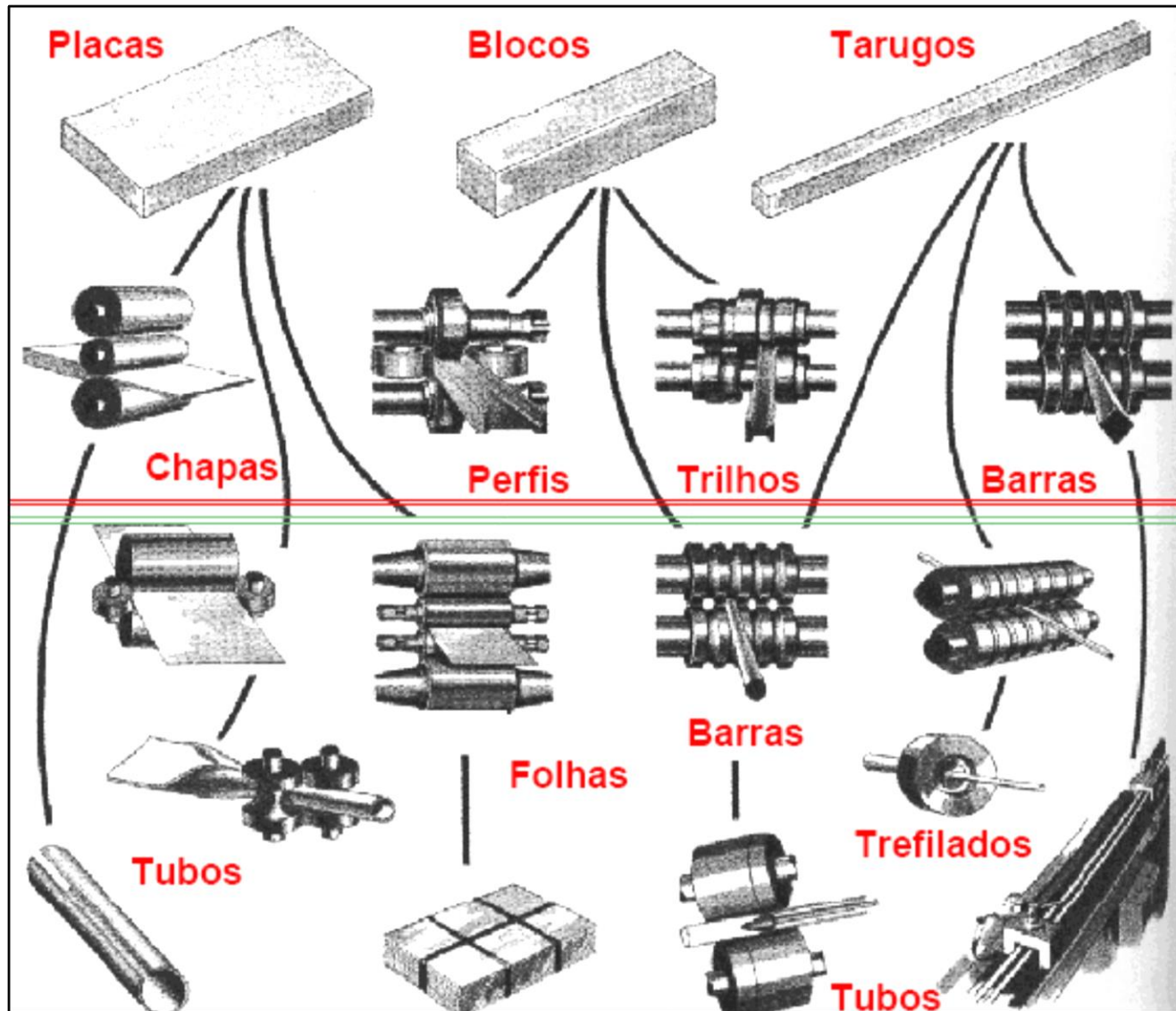
LAMINAÇÃO A FRIO



LAMINAÇÃO A FRIO

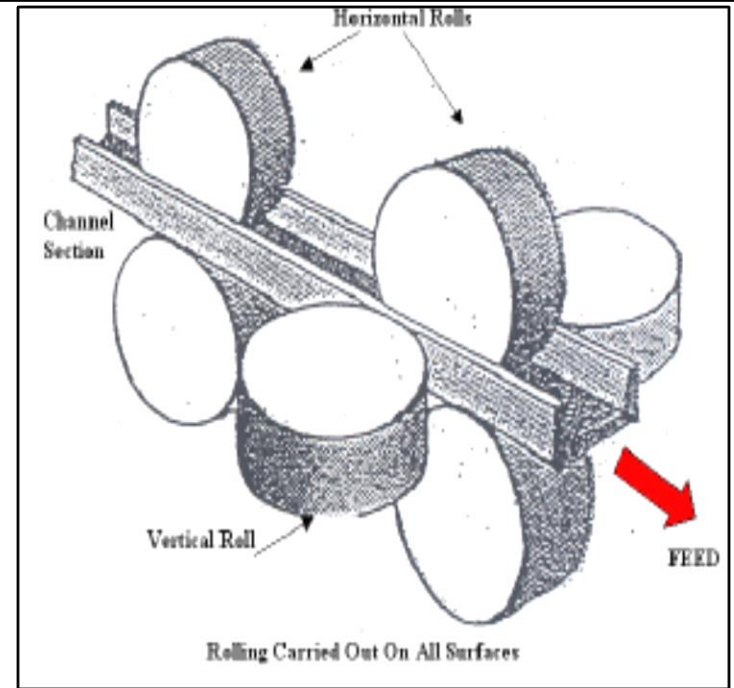
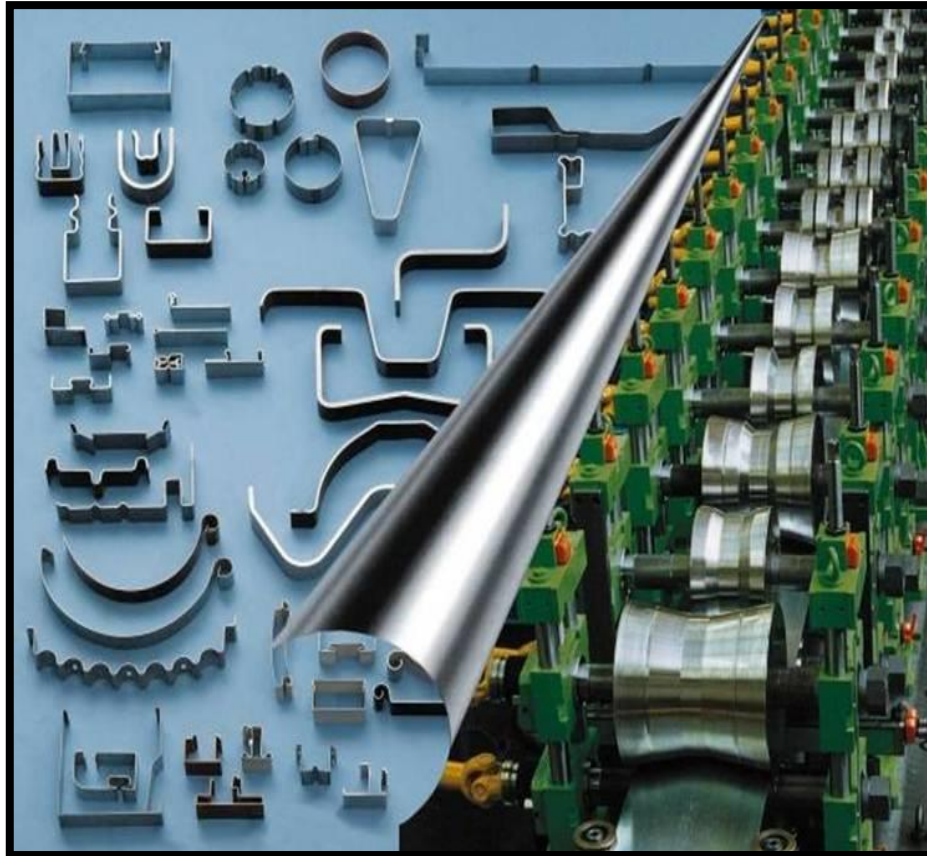


LAMINAÇÃO - PRODUTOS

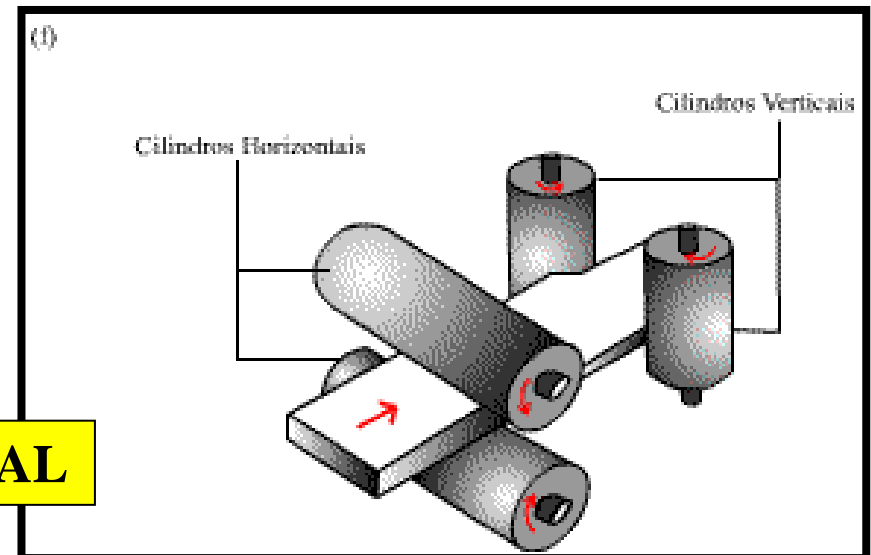


ARRANJOS TÍPICOS DE CILINDROS PARA LAMINADORES

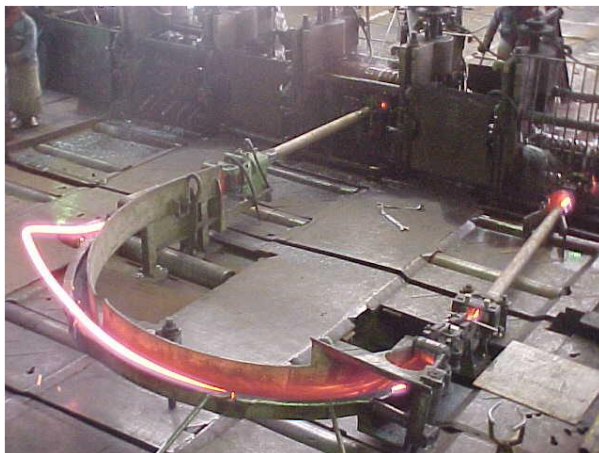
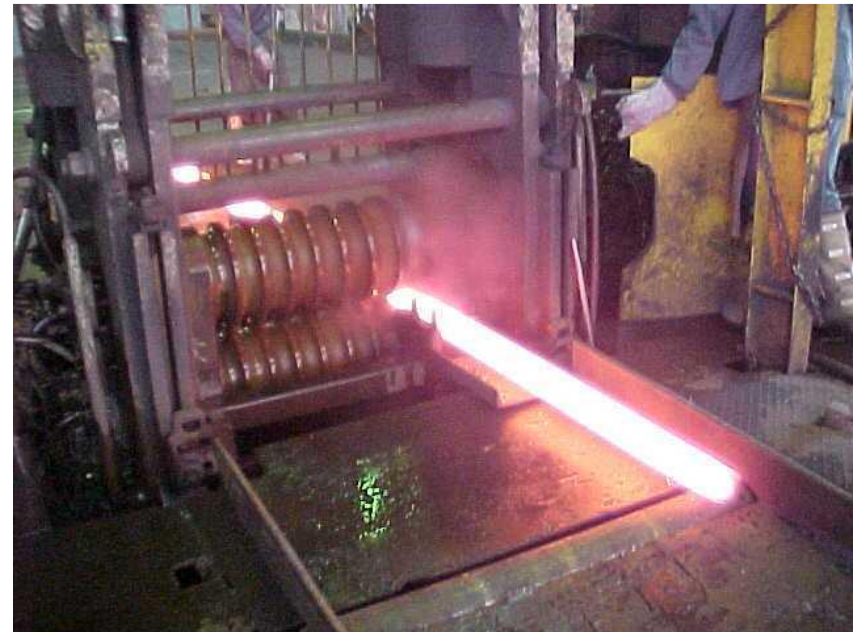
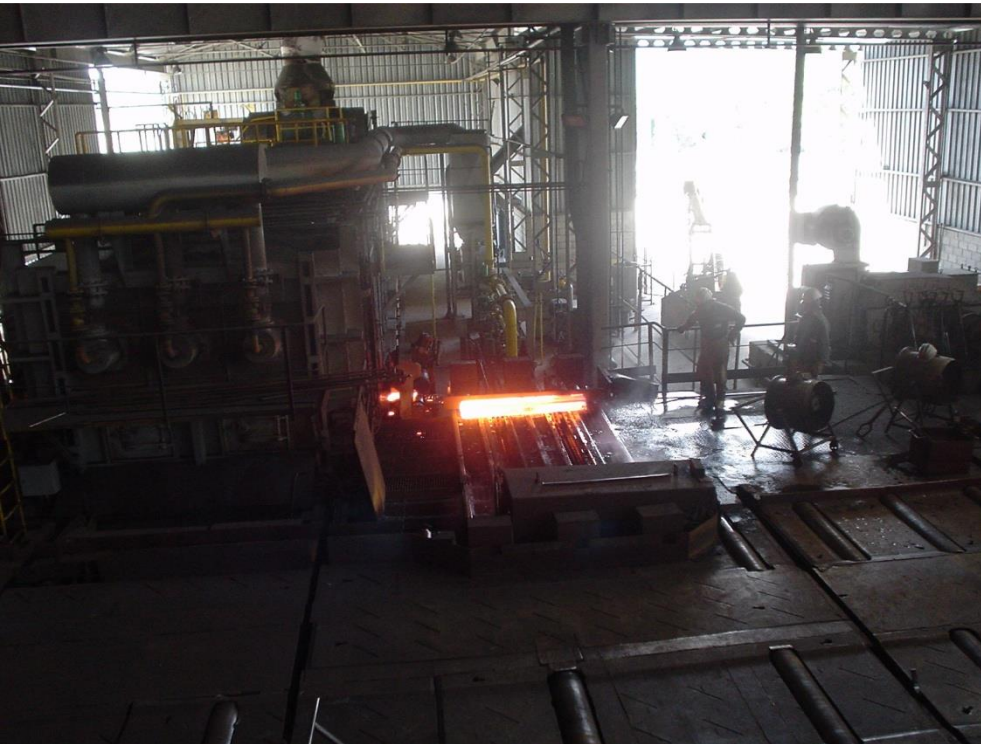
LAMINADOR SEQUENCIAL DE PERFIS



LAMINADOR UNIVERSAL

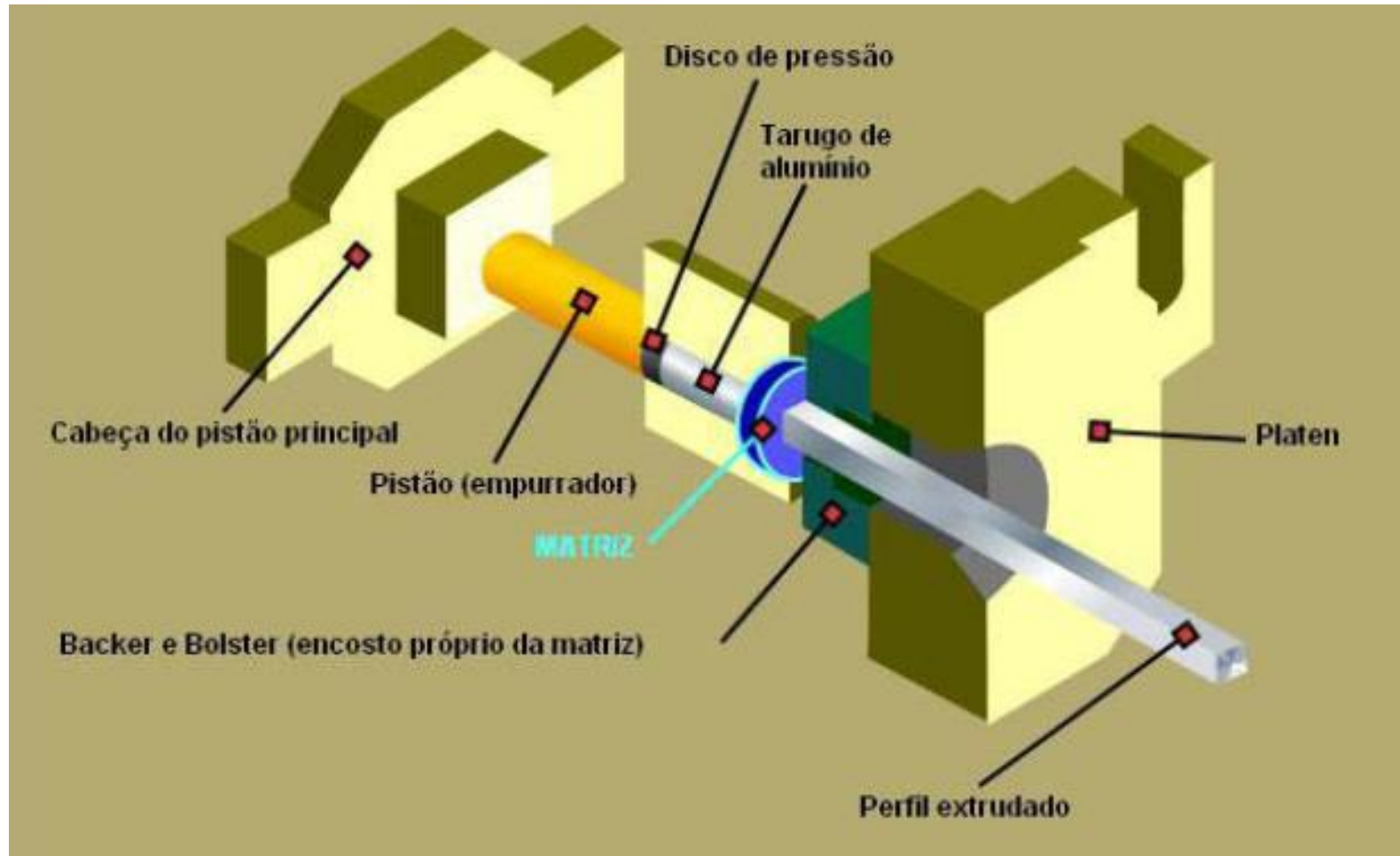
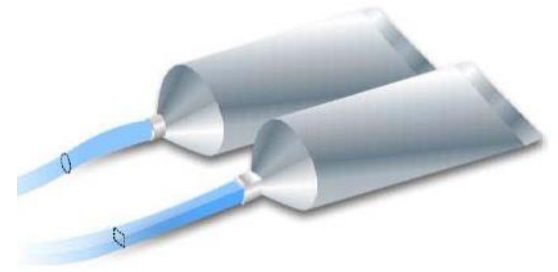


LAMINAÇÃO A QUENTE

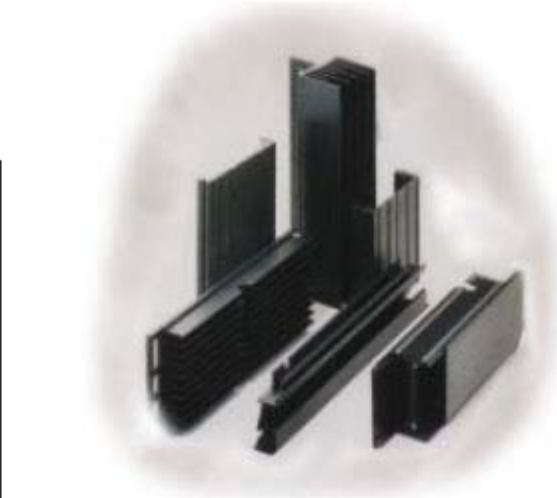
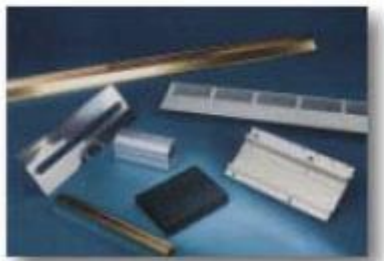




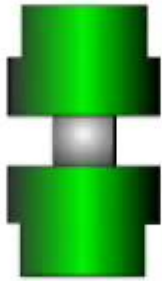
EXTRUSÃO



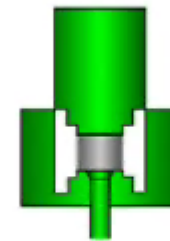
PRODUTOS EXTRUDADOS



FORJAMENTO (Quente ou Frio)

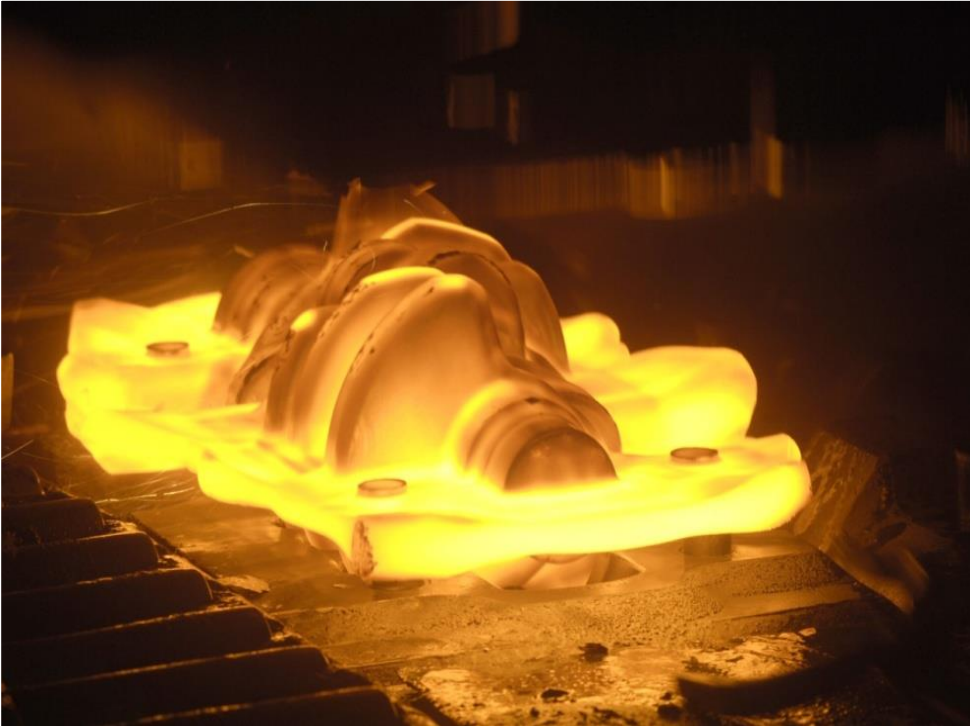


MATRIZ ABERTA



MATRIZ FECHADA S/
REBARBAS

FORJAMENTO EM MATRIZ ABERTA



**FORJAMENTO EM MATRIZ
FECHADA COM REBARBA.**

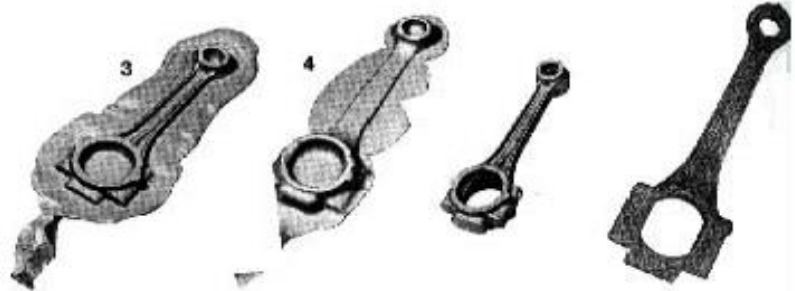
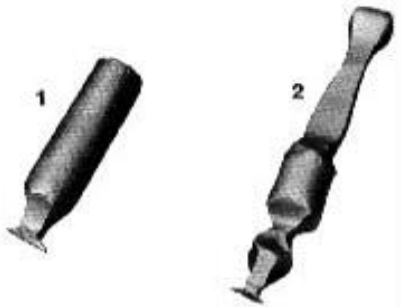
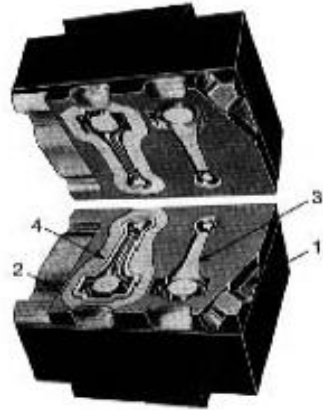
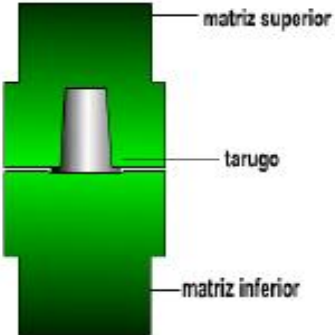
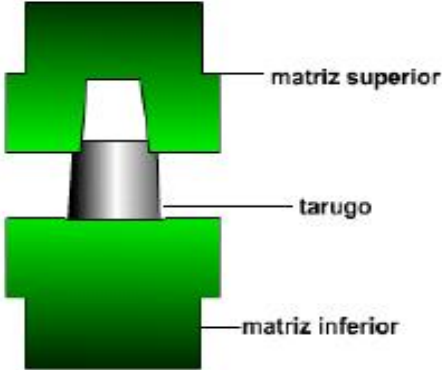


FIBRAMENTO DE FLANGE FORJADO

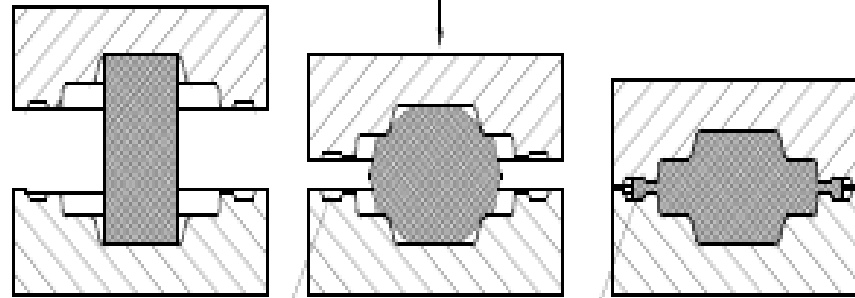


FIBRAMENTO/FIBRAGEM: PARTÍCULAS (INCLUSÕES, GRAÇOS PERLÍTICOS) ALINHADOS COM O FLUXO DE MATERIAL.

MATRIZ FECHADA

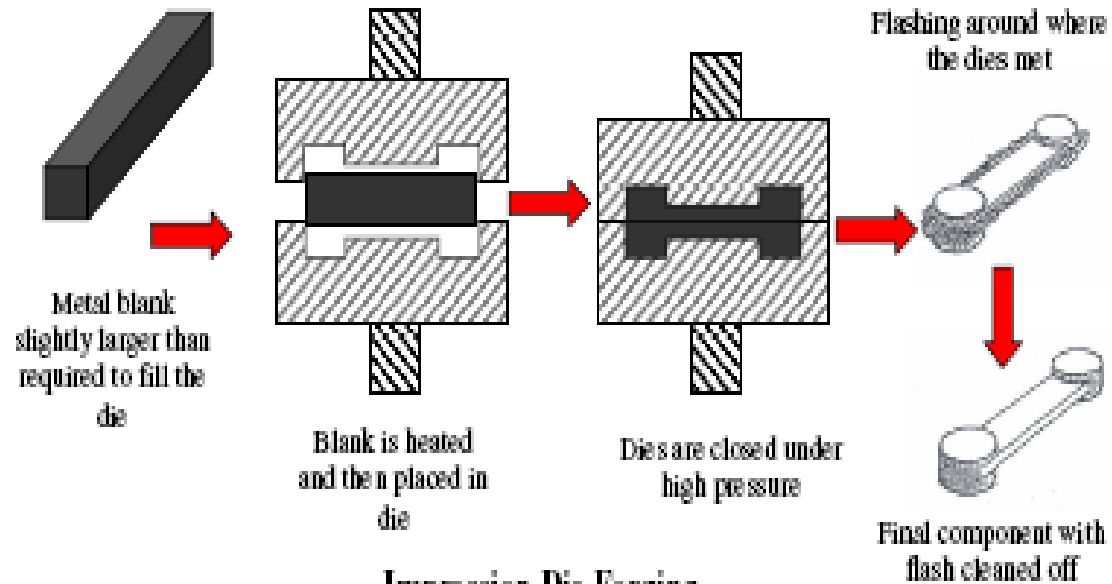


MATRIZ FECHADA



Flash gutter

Flash

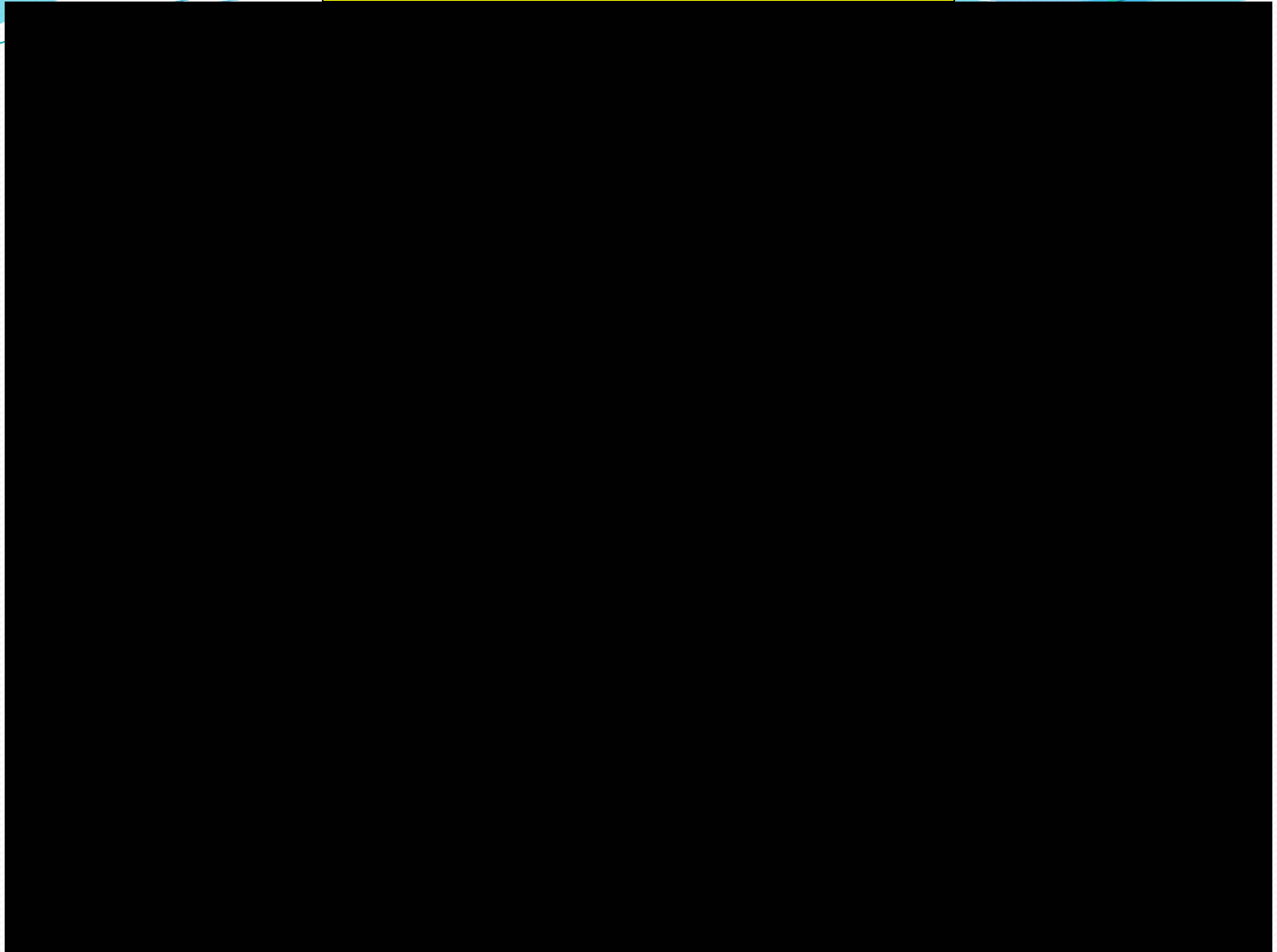


Impression Die Forging

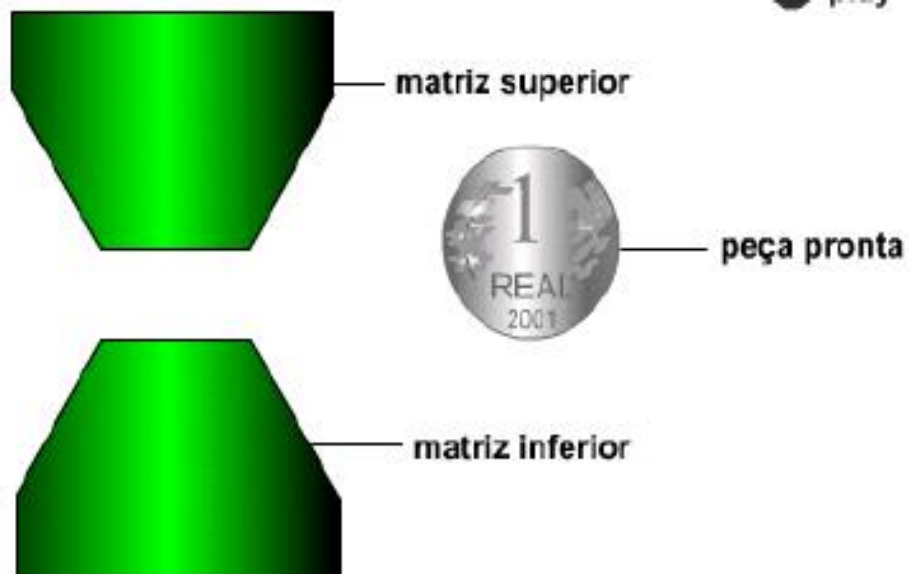
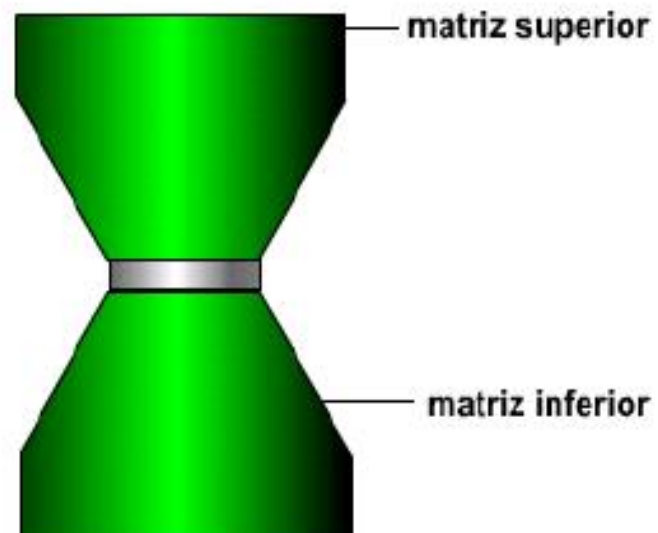
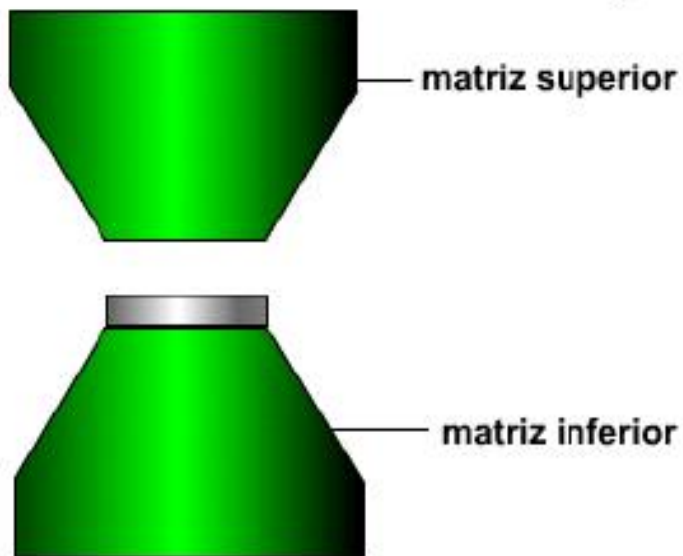
PRODUTOS FORJADOS



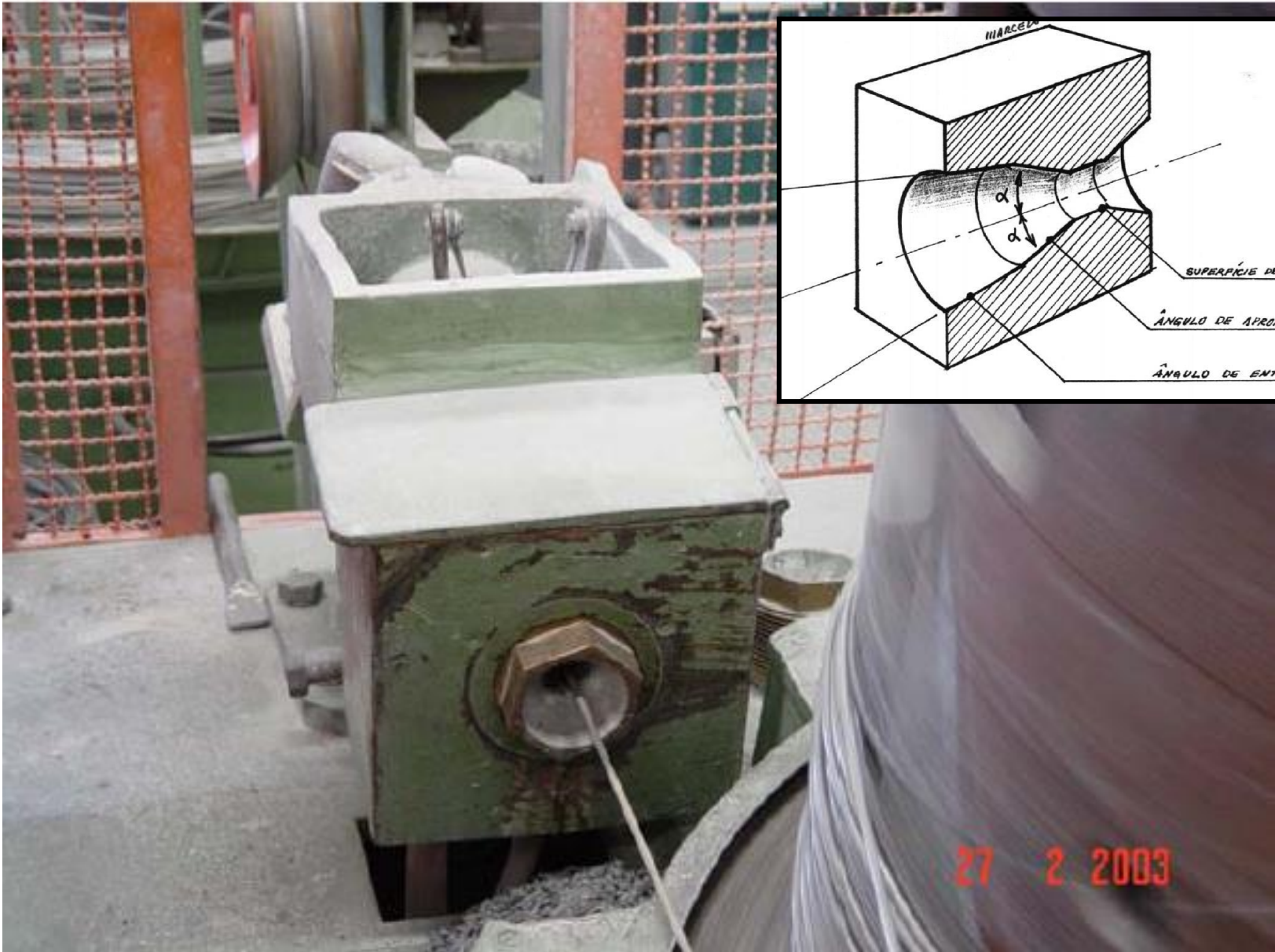
Open Die Forging



■ Cunhagem

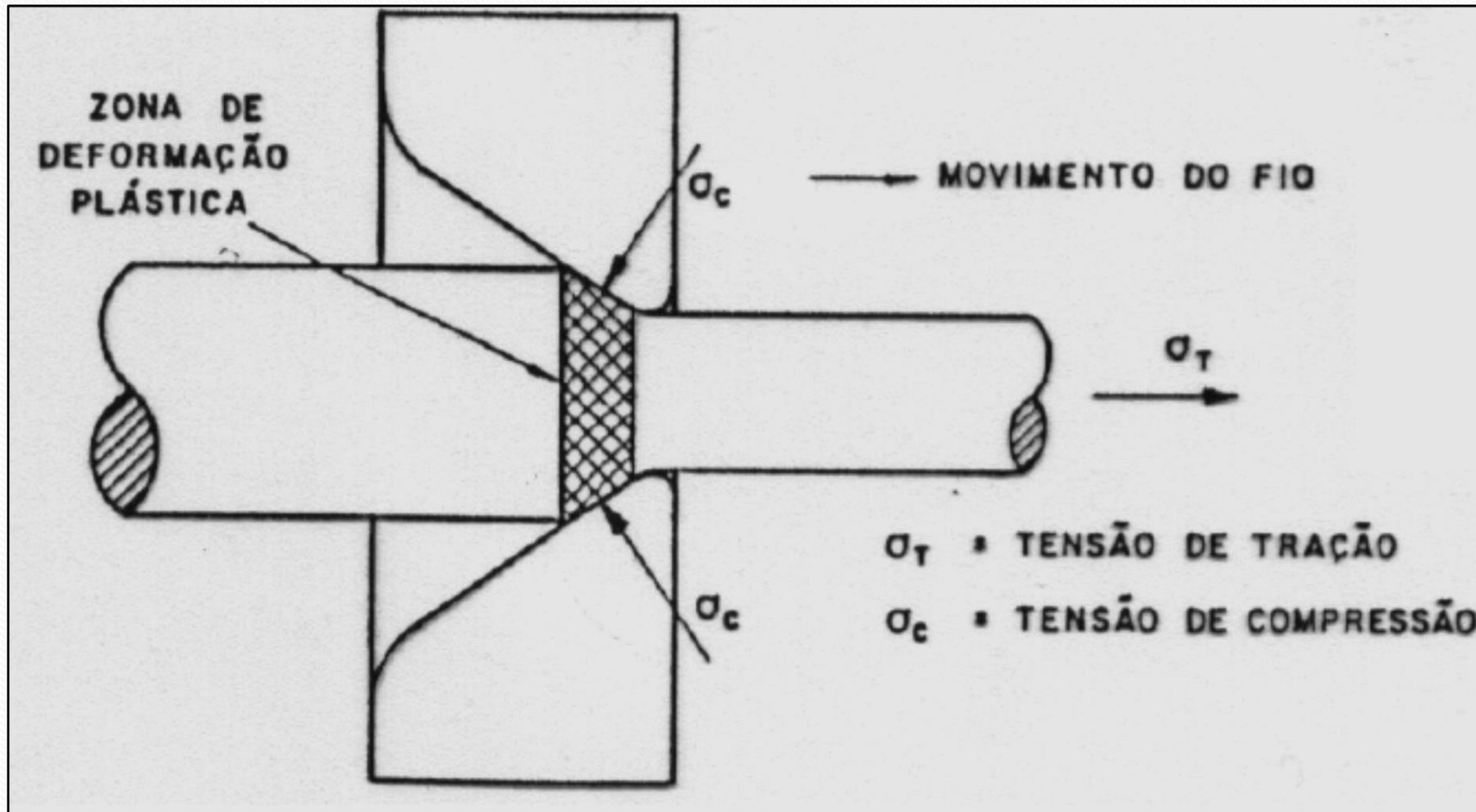


TREFILAÇÃO



MECÂNICA DA TREFILAÇÃO-SEMPRE A FRIO

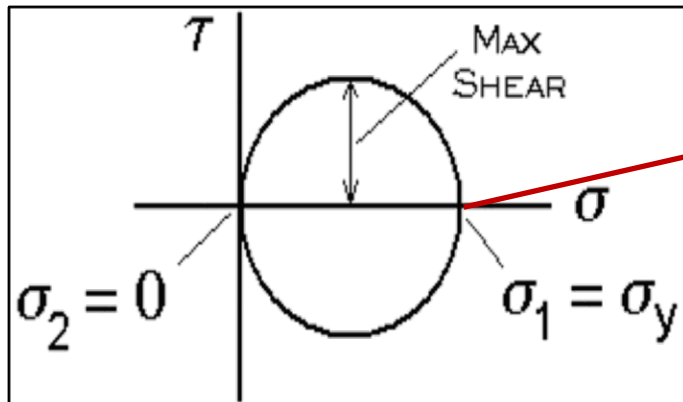
EXCEÇÃO: Mg



TENSÕES NA TREFILAÇÃO – ANÁLISE POR CÍRCULO DE MOHR

TREFILAÇÃO

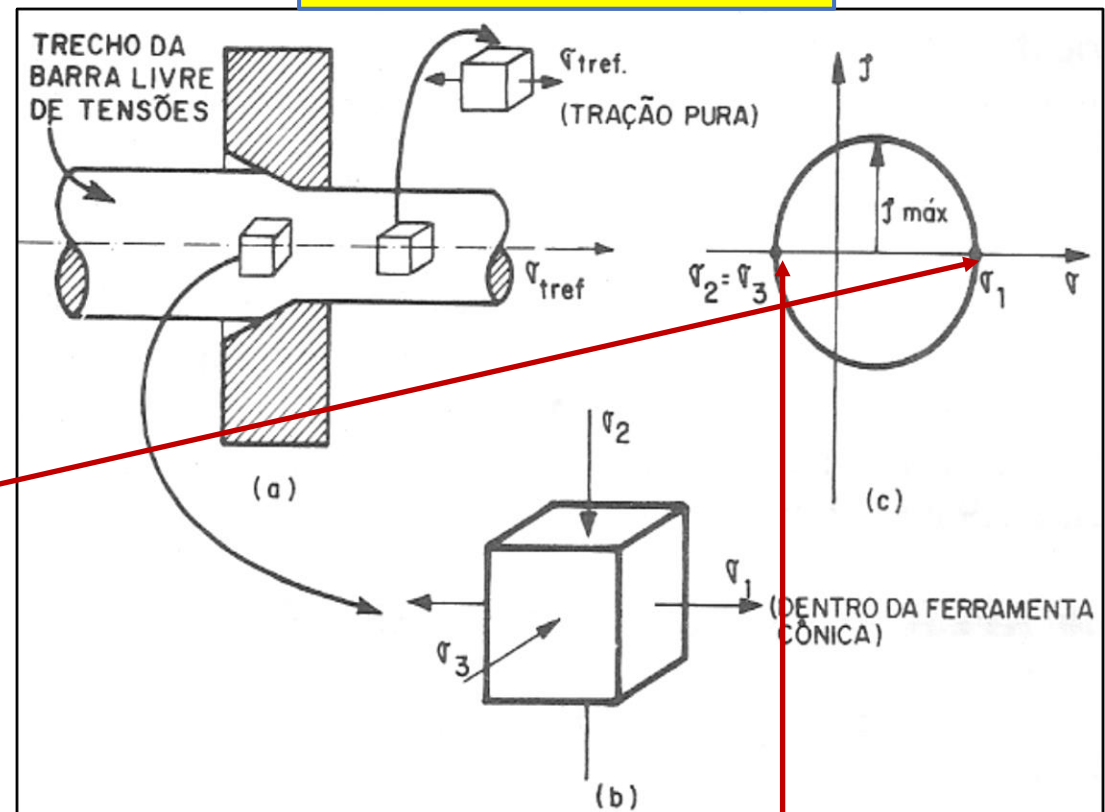
TRAÇÃO PURA



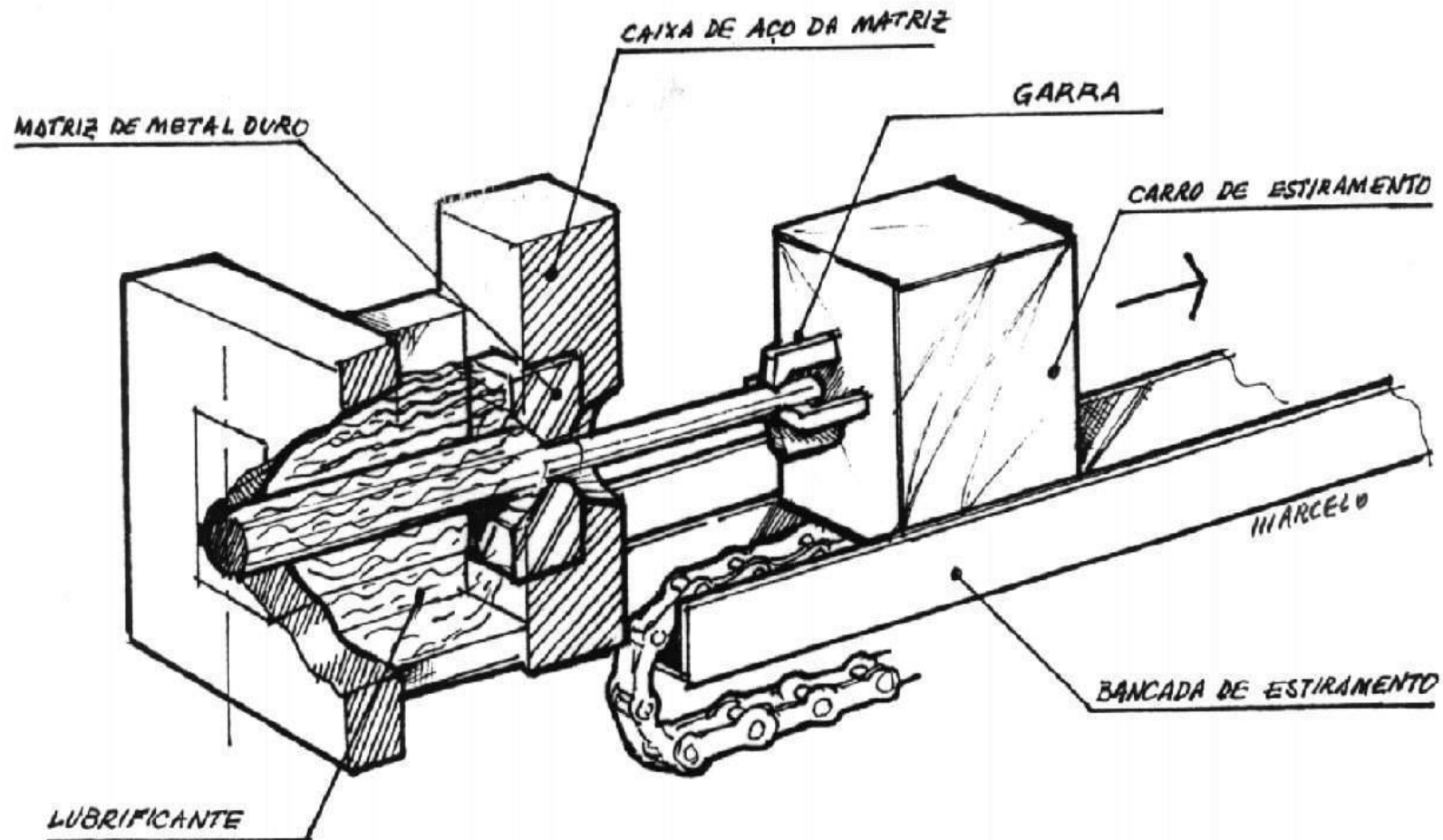
TENSÃO SOMENTE DE TRAÇÃO

$$\sigma_1 \text{ trefilação} < \sigma_1 \text{ tração}$$

TENSÕES COMPRESSIVAS DA FIEIRA

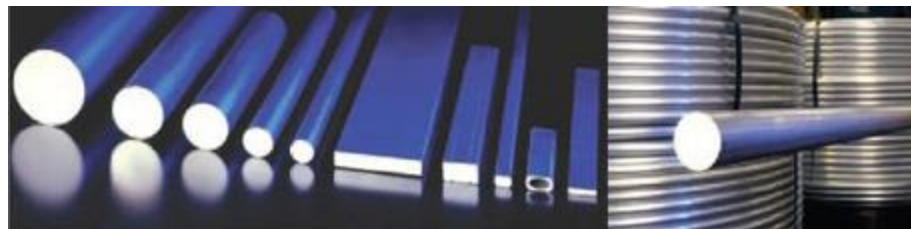


Banco de Trefila





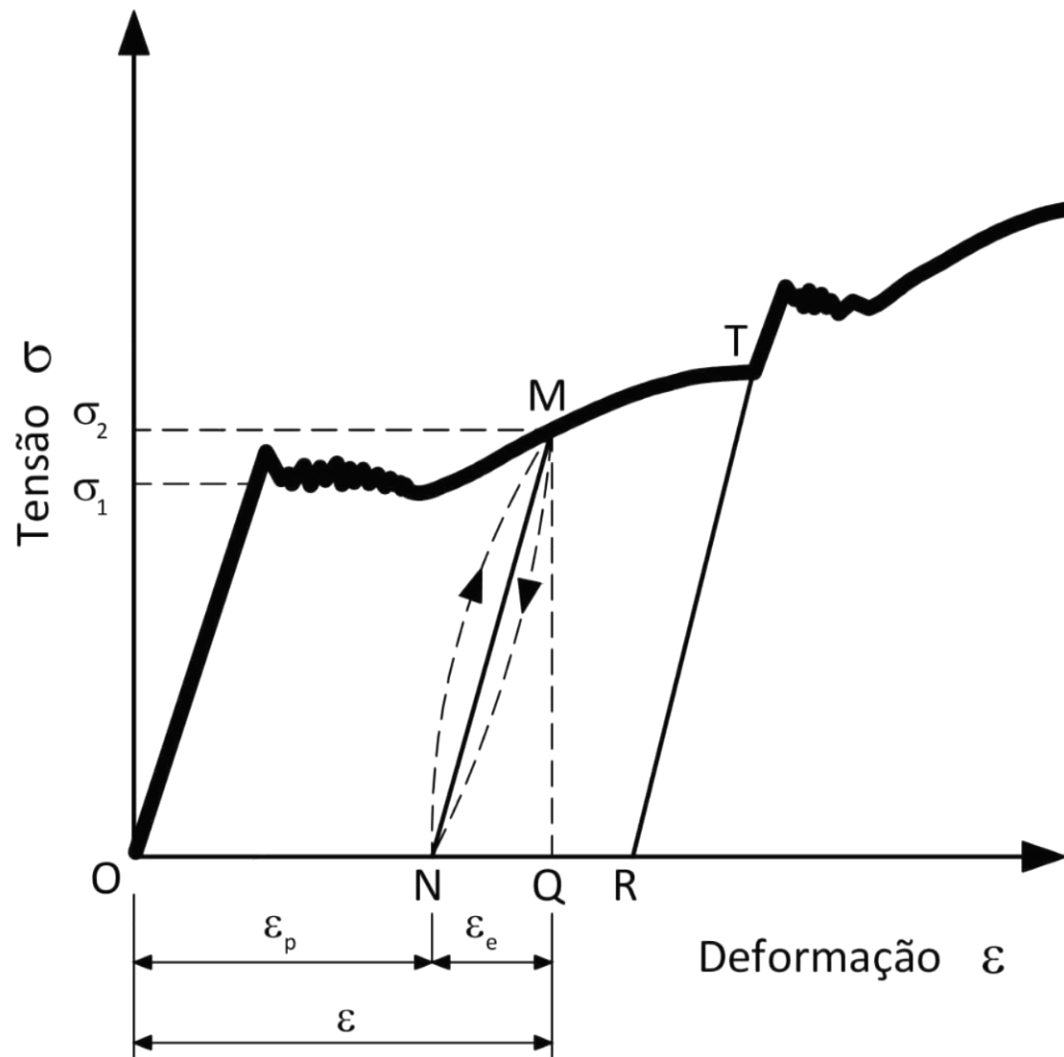
TREFILAÇÃO - PRODUTOS



Perfis trefilados



DEFORMAÇÃO A FRIO E ENCRUAMENTO



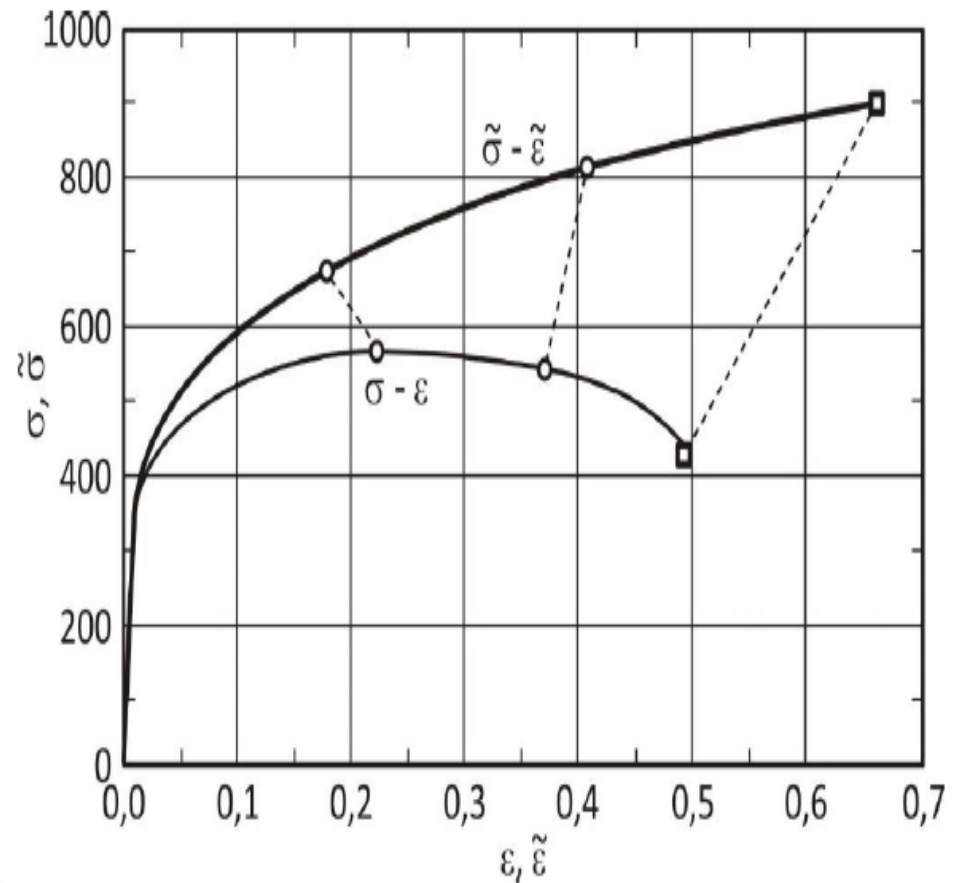
Recordando Tensão Verdadeira e Deformação Verdadeira

A Tensão Verdadeira é definida como sendo a carga P dividido sobre a área instantânea, ou seja, área do pescoço após o limite de resistência à tração

$$\sigma_V = \frac{P}{A_i}$$

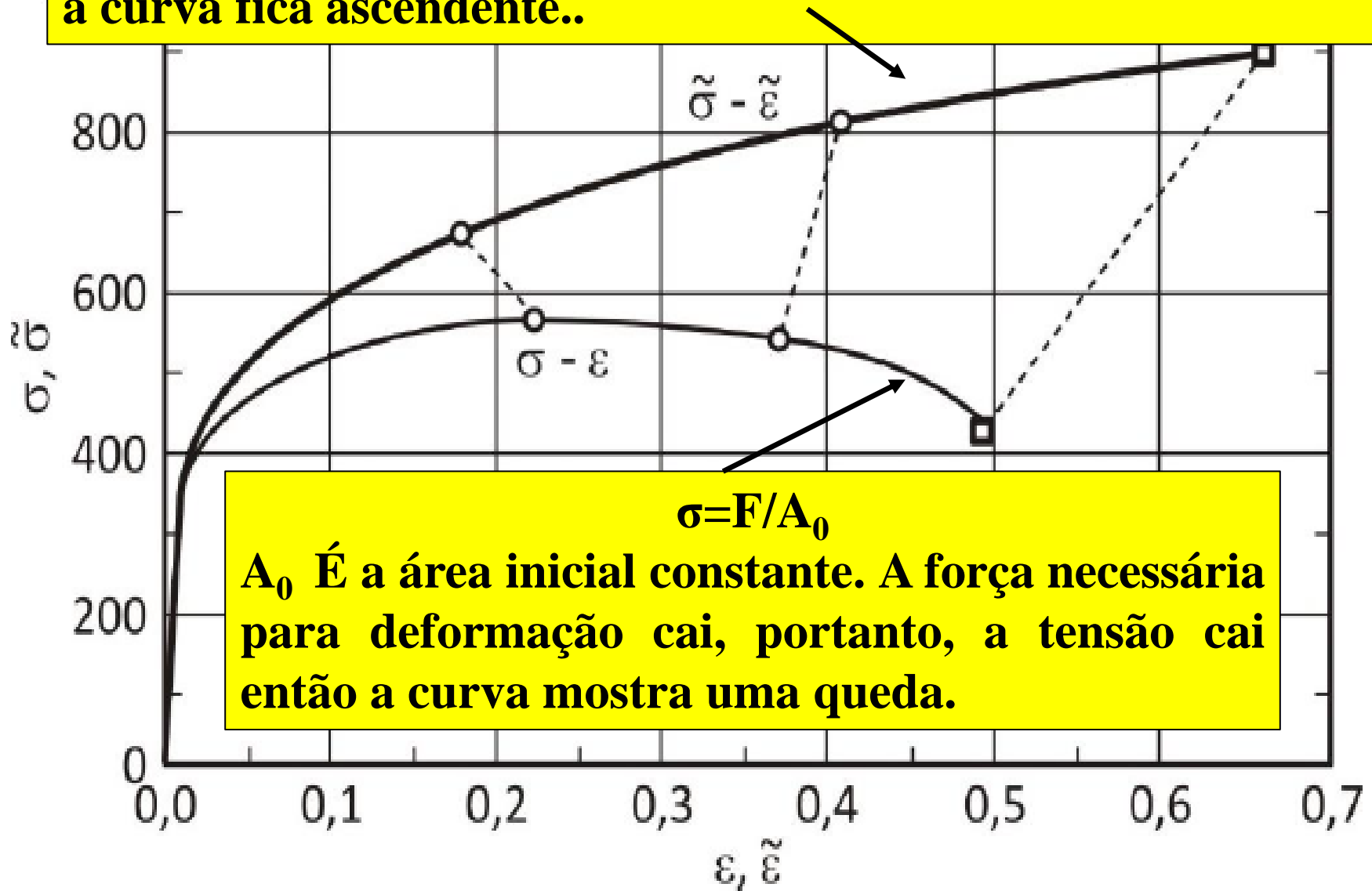
A Deformação Verdadeira é definida pela expressão

$$d\varepsilon_r = \frac{dl}{l} \quad \varepsilon_r = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0}$$



$$\sigma = F/A_i$$

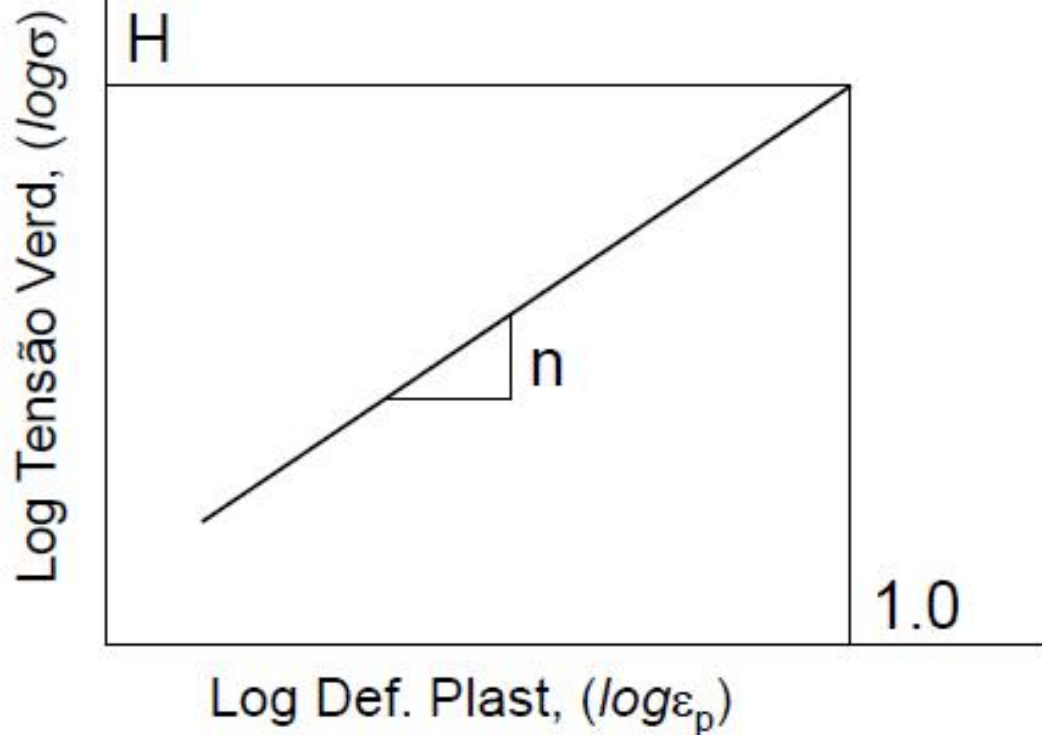
A_i É a área instantânea e cai mais rápido que a força. Assim, a curva fica ascendente..



$$\sigma = F/A_0$$

A_0 É a área inicial constante. A força necessária para deformação cai, portanto, a tensão cai então a curva mostra uma queda.

Deformação Plástica



H – Coeficiente de resistência
n - Expoente de encruamento

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

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

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

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

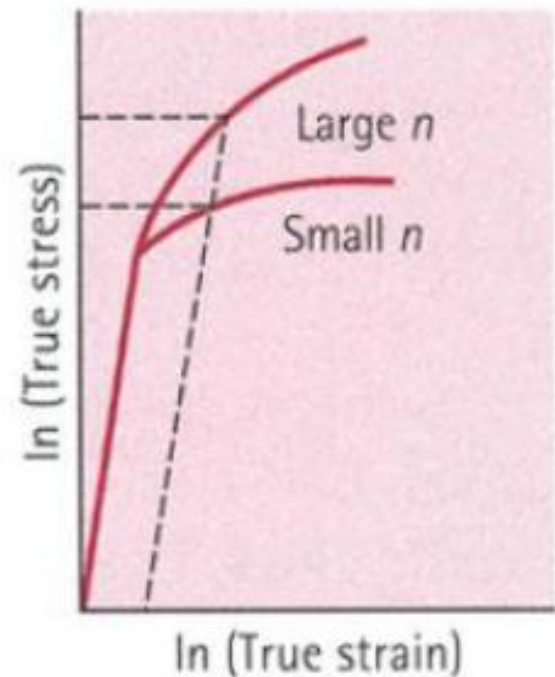


Table 7.4 Tabulation of n and K Values (Equation 7.19) for Several Alloys

<i>Material</i>	<i>n</i>	<i>K</i>	
		<i>MPa</i>	<i>psi</i>
Low-carbon steel (annealed)	0.21	600	87,000
4340 steel alloy (tempered at 315°C)	0.12	2650	385,000
304 stainless steel (annealed)	0.44	1400	205,000
Copper (annealed)	0.44	530	76,500
Naval brass (annealed)	0.21	585	85,000
2024 aluminum alloy (heat treated—T3)	0.17	780	113,000
AZ-31B magnesium alloy (annealed)	0.16	450	66,000

TRABALHO A FRIO

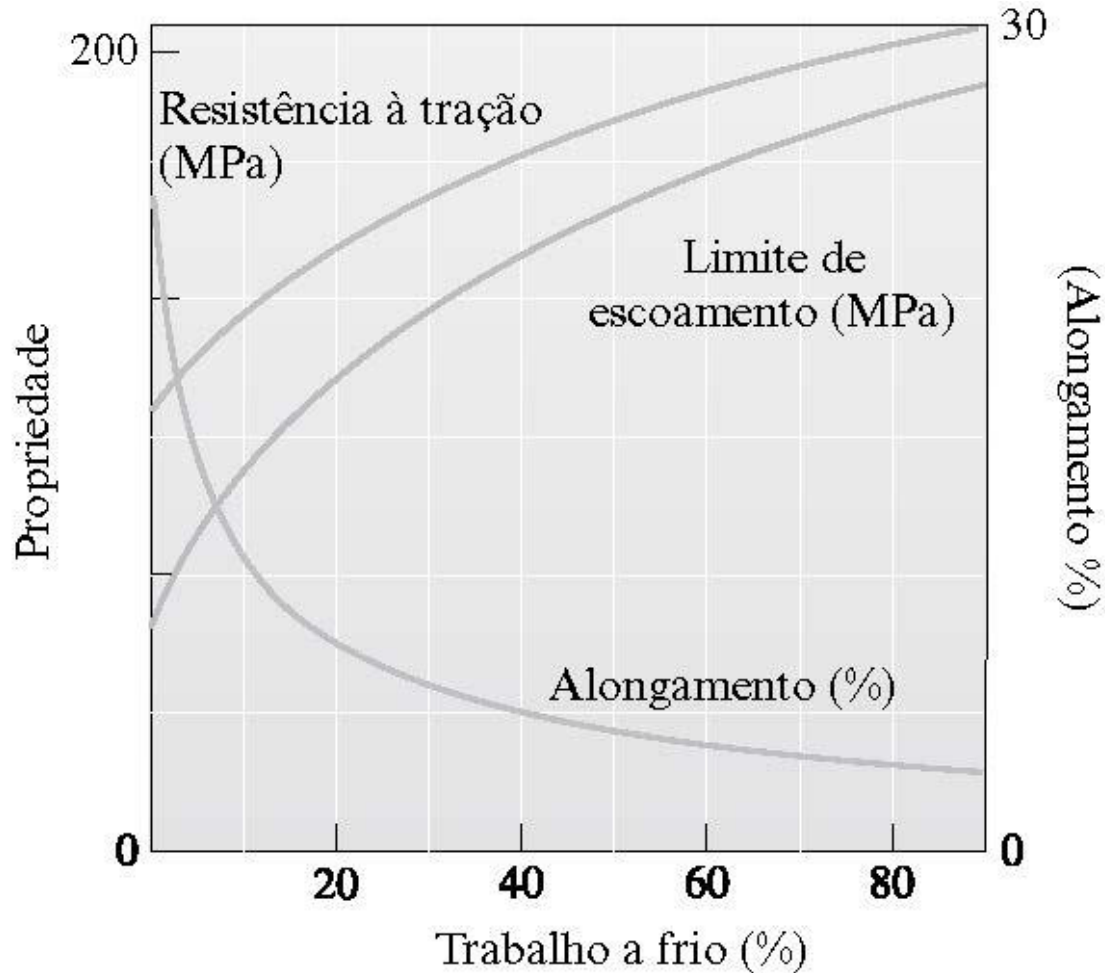


Figura 8-24 O efeito do percentual de trabalho a frio nas propriedades de uma liga de alumínio 3105 (para os Problemas 8-12, 8-14, 8-16 e 8-20). Crédito: © Cengage Learning 2014.

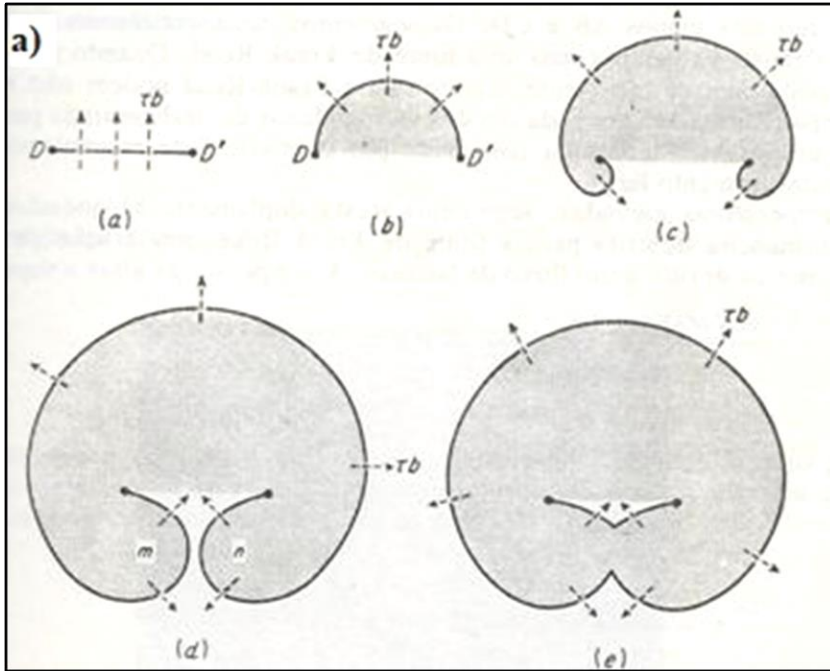


- Aumenta a dureza e a resistência dos materiais, mas a ductilidade diminui
- Permite a obtenção de dimensões dentro de tolerâncias estreitas
- Produz melhor acabamento superficial

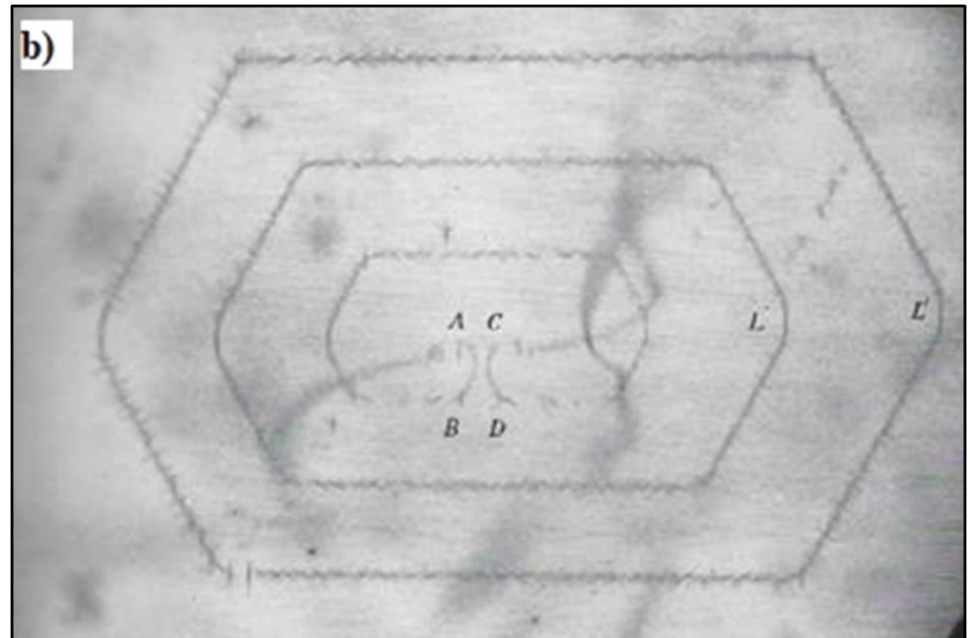
ENCRUAMENTO OU ENDURECIMENTO PELA DEFORMAÇÃO À FRIO

- 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**.

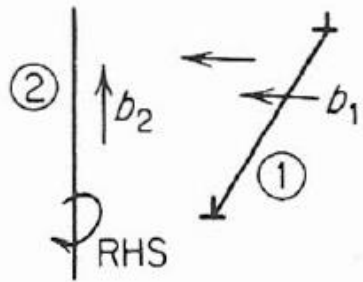
FONTES DE FRANK-REED



Geração de linhas de discordância

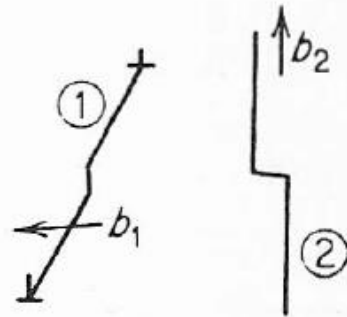


INTERAÇÃO ENTRE LINHAS DE DISCORDÂNCIAS

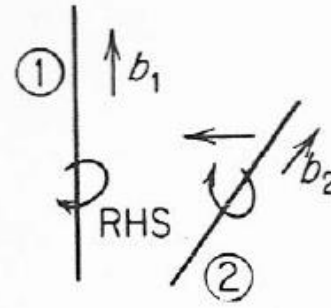


Antes

(a)

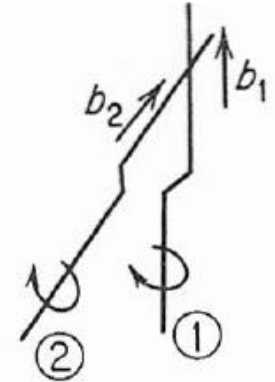


Após



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);

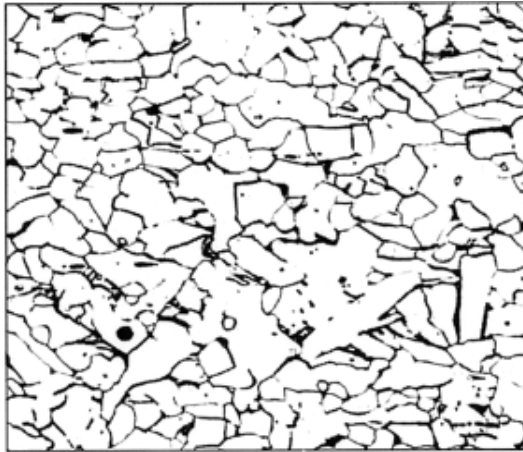
O processo de recozimento envolve normalmente três etapas: **recuperação, recristalização e crescimento de grão.**

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

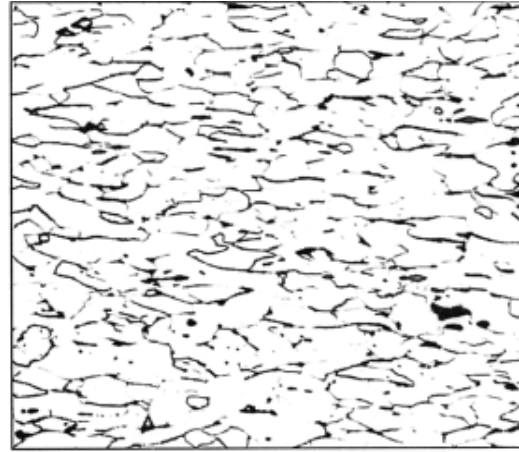


EESC • USP

ENCRUAMENTO



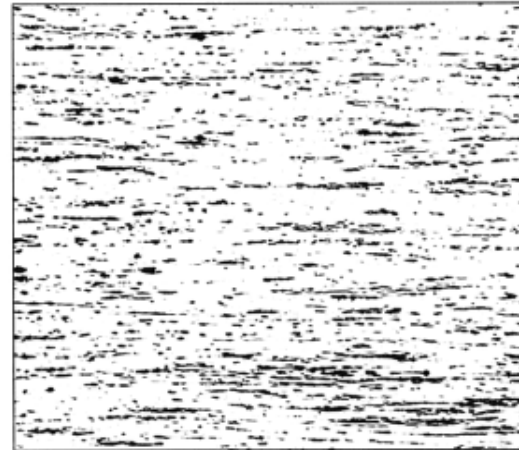
(a)



(b)



(c)



(d)

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

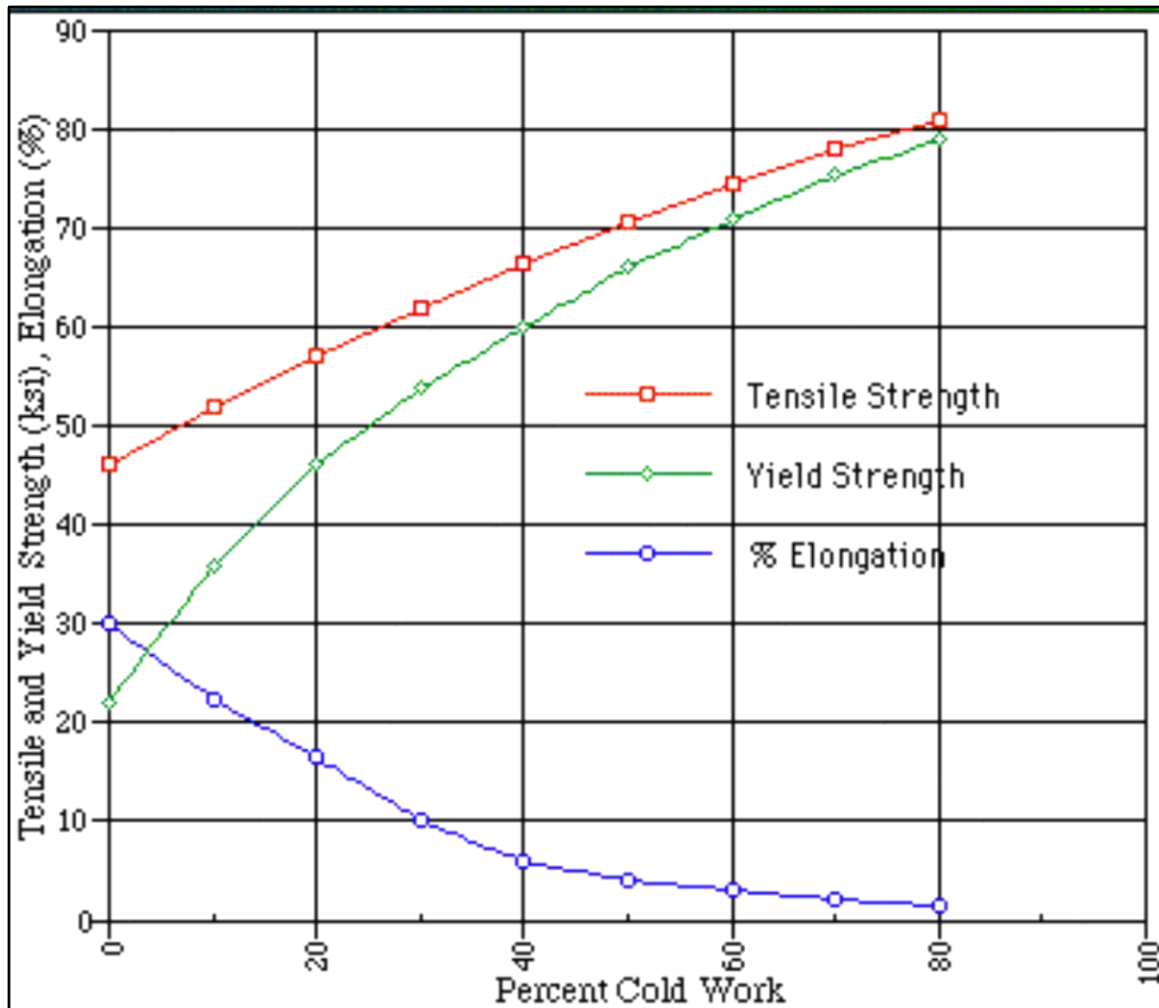
(a) 10% deformação

(b) 30% deformação

(c) 60% deformação

(d) 90% deformação

VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS EM FUNÇÃO DO ENCRUAMENTO

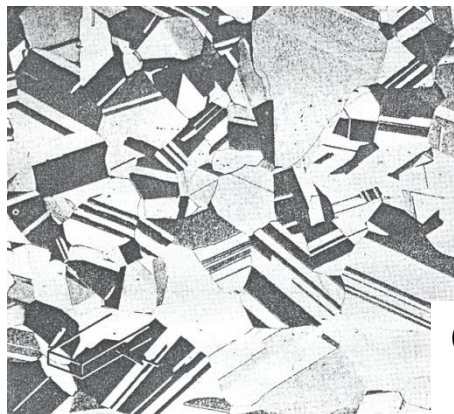


- O encruamento **aumenta o limite de resistência à tração;**

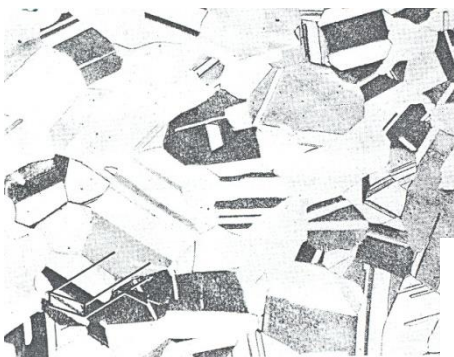
- O encruamento **aumenta o limite de escoamento;**

- O encruamento **diminui a ductilidade: alongamento e red. Área.**

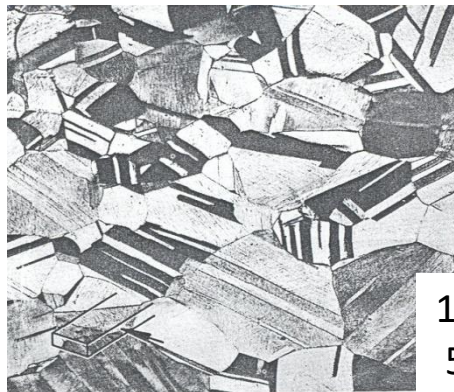
Efeito do encruamento (%redução a frio) sobre a Resistência à Tração



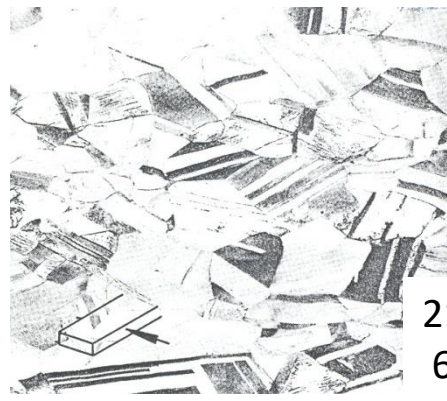
Original
43 kpsi



6% red.
49 kpsi



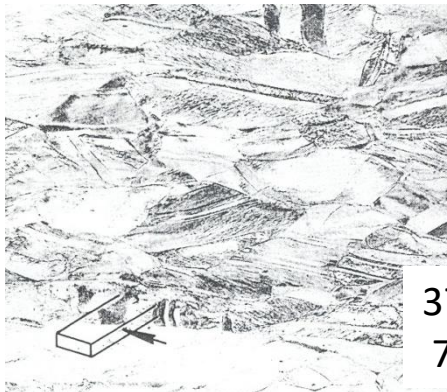
11% red.
54 kpsi



21% red.
62 kpsi



29% red.
69 kpsi



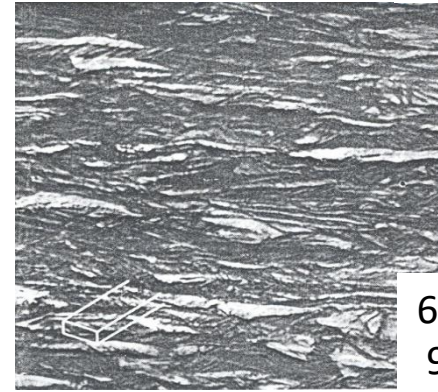
37% red.
76 kpsi



50% red.
86 kpsi

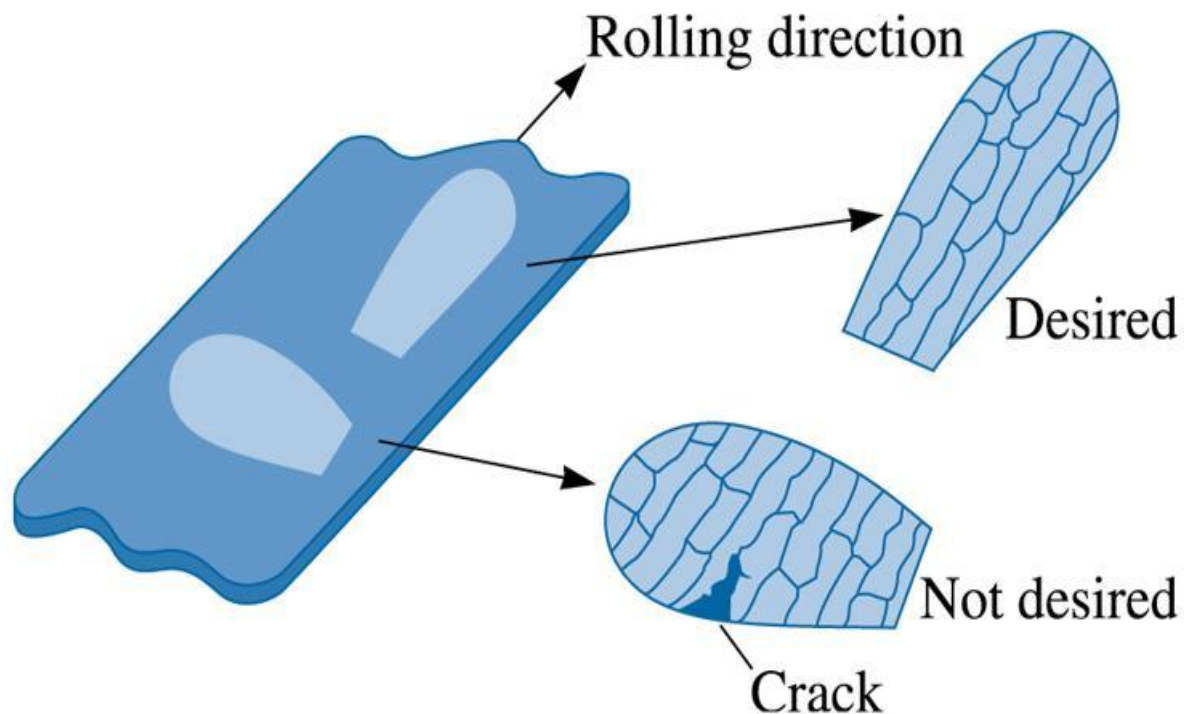


60% red.
94 kpsi



69% red.
99 kpsi

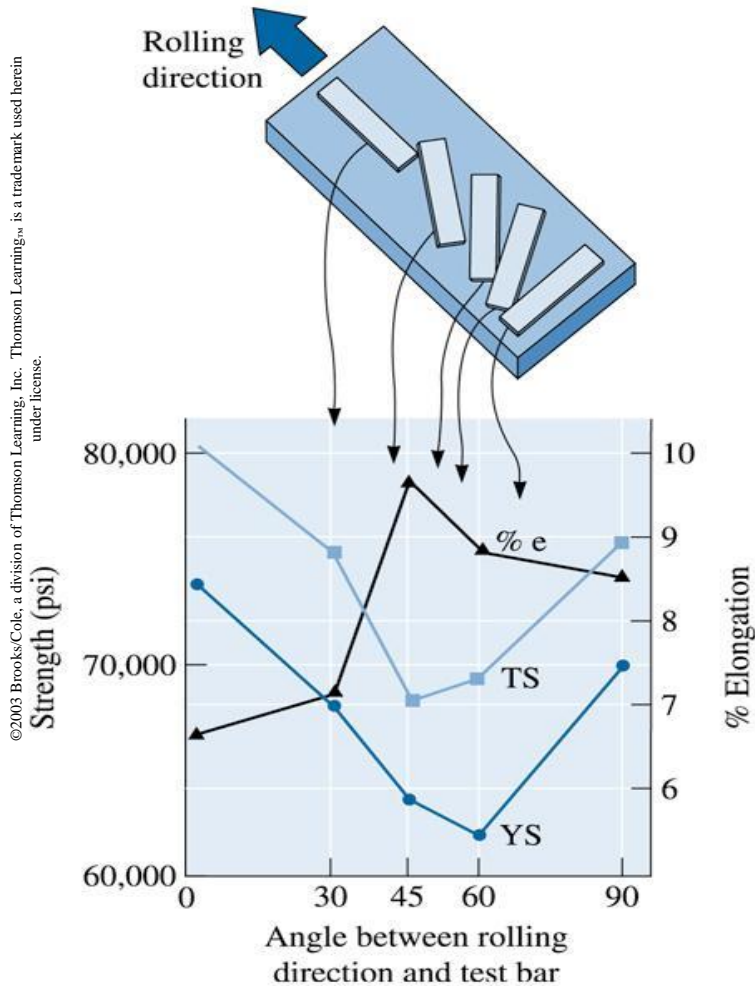
ANISOTROPIA



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

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

ANISOTROPIA



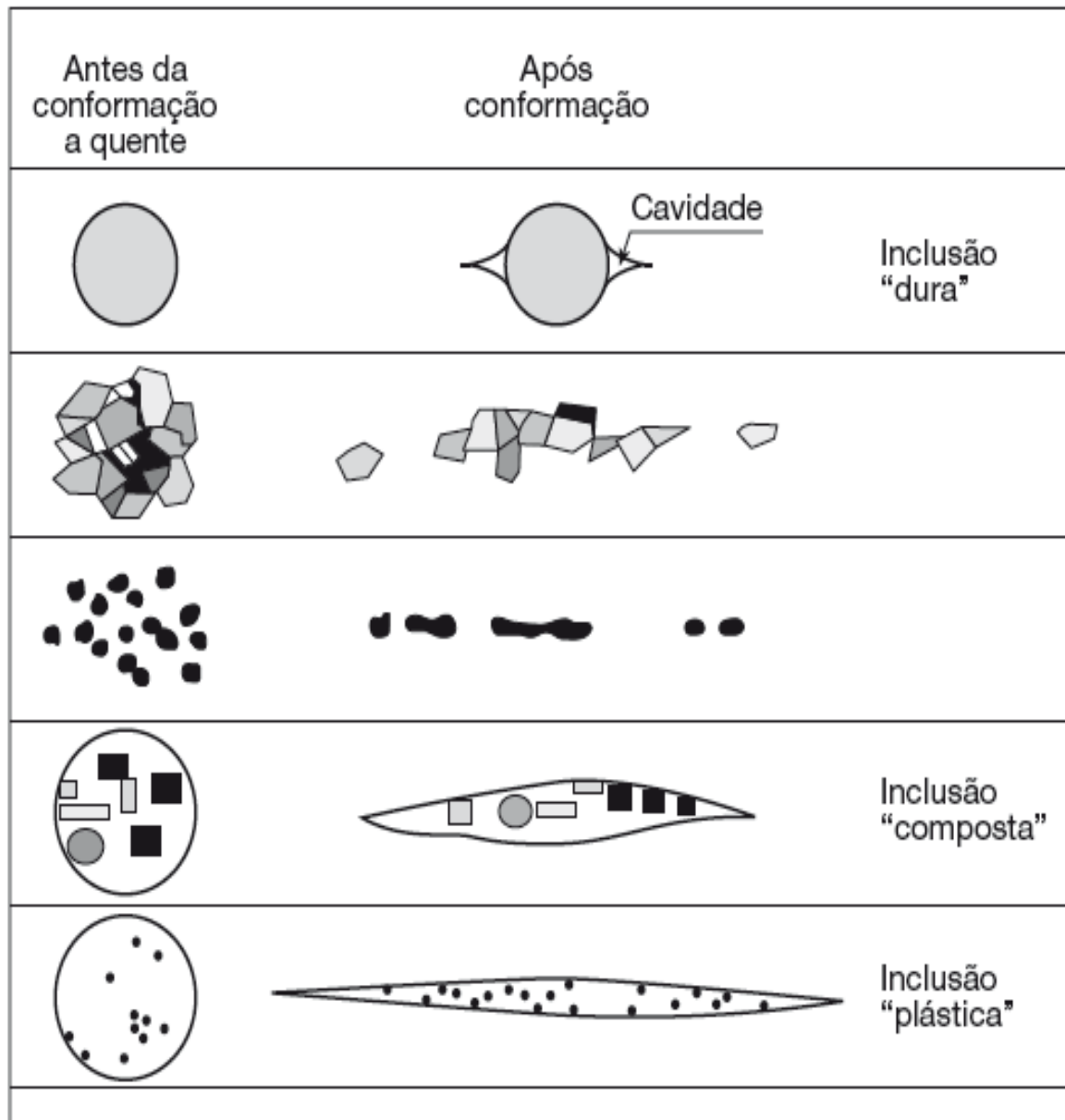
Comportamento anisotrópico de uma chapa de Al-Li usado em aplicações aeroespaciais.

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

EFEITOS DA CONFORMAÇÃO NAS INCLUSÕES NÃO METÁLICAS

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.

EFEITOS DA CONFORMAÇÃO NAS INCLUSÕES NÃO METÁLICAS

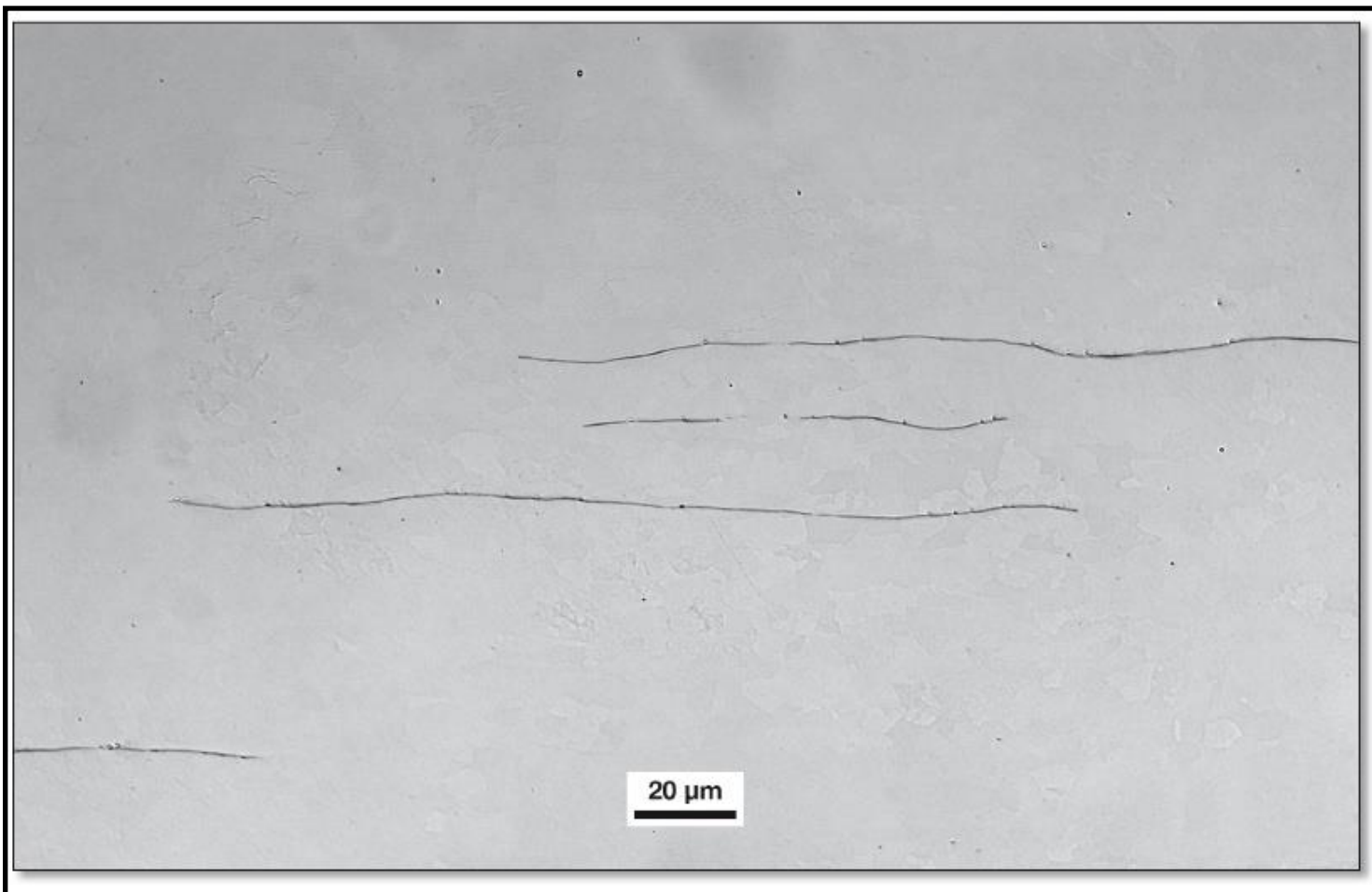


Figura 11.23

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].

RECRISTALIZAÇÃO

- Ocorre a formação de **novos grãos, com baixa densidade de defeitos**, a partir de grãos deformados: **equiaxiais e menores**;
- É um processo que pode ser utilizado para **refino da estrutura** de ligas, inclusive monofásicas: **deformação plástica e recozimento para recristalização**;
- **Após** a recristalização, se o material **permanecer** em alta temperatura pode ocorrer o **crescimento de grão** e o **efeito de refino é perdido** (quanto **maior o grão**, menor a **dureza** do material);
- Quanto **maior** o grau de **deformação**, **menor** a **temperatura** de recristalização, que normalmente está por volta de **$0,3T_f$ a $0,6 T_f$** ;
- **Leis da recristalização (Burke e Turnbull, 1952)**;
- **Modelos matemáticos: JMAK (Johnson – Mehl – Avrami – Kolmogorov): $X_V = 1 - \exp(-At^n)$ (equação tipo Arrhenius).**

RECRISTALIZAÇÃO ESTÁTICA

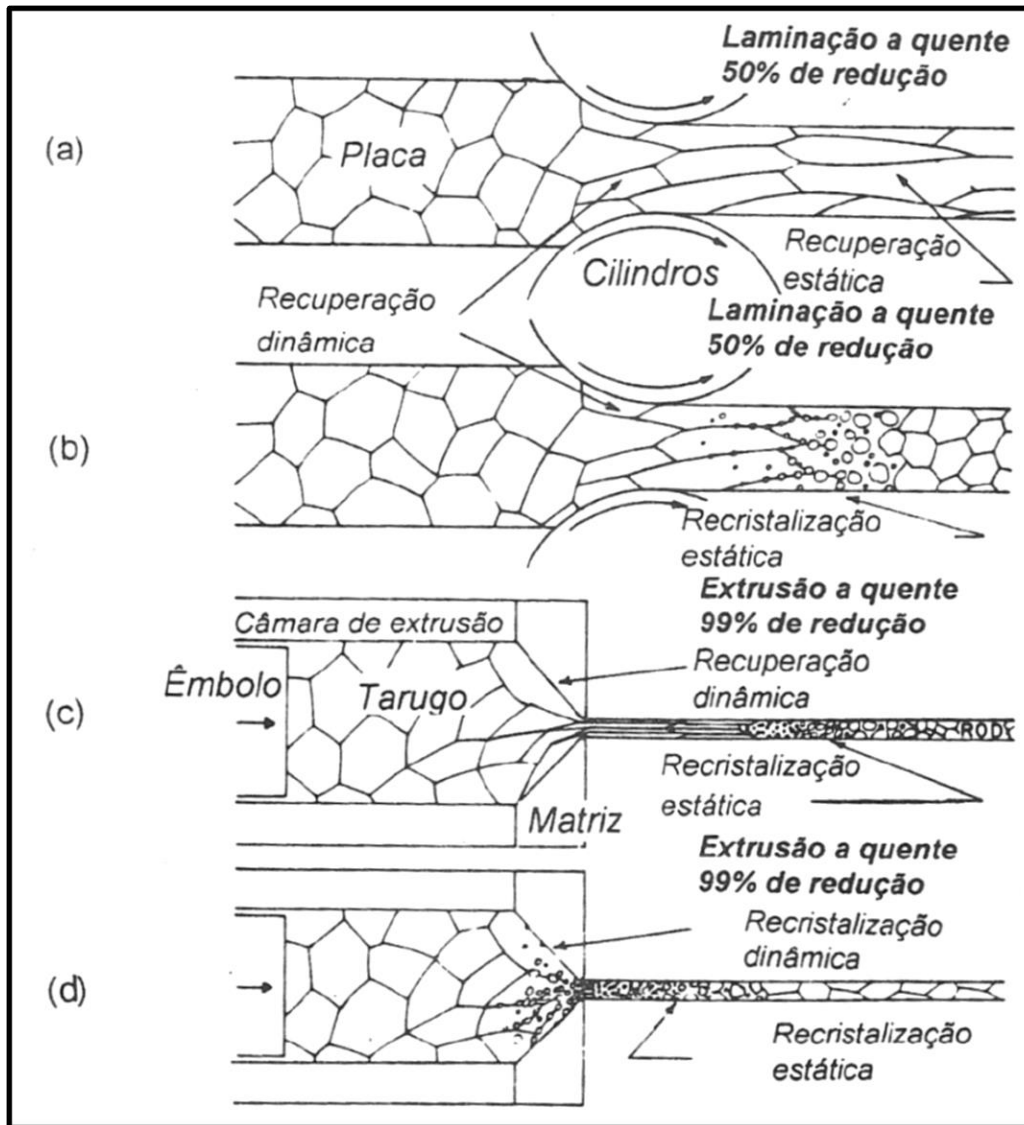
Deformação a frio, acúmulo de energia de deformação (**geração e interação de linhas de discordâncias**). **Recozimento para recristalização**: formação de **novos grãos** a partir de grãos deformados, por **migração de contornos de grão**. A **força motriz** é o **gradiente de defeitos** entre o novo grão e o grão deformado.

RECRISTALIZAÇÃO DINÂMICA

O fenômeno ocorre durante a deformação a quente. Na Laminação seria quando o material está **embaixo do cilindro**. A energia de deformação armazenada, mesmo longe do cilindro, faz com que também ocorra a **recristalização estática** durante a laminação pois a temperatura do material ainda é alta.

A RECUPERAÇÃO É UM FENÔMENO QUE PODE OCORRER ANTES DA RECRISTALIZAÇÃO E EM TEMPERATURAS MAIS BAIXAS: ESTÁTICA E DINÂMICA.

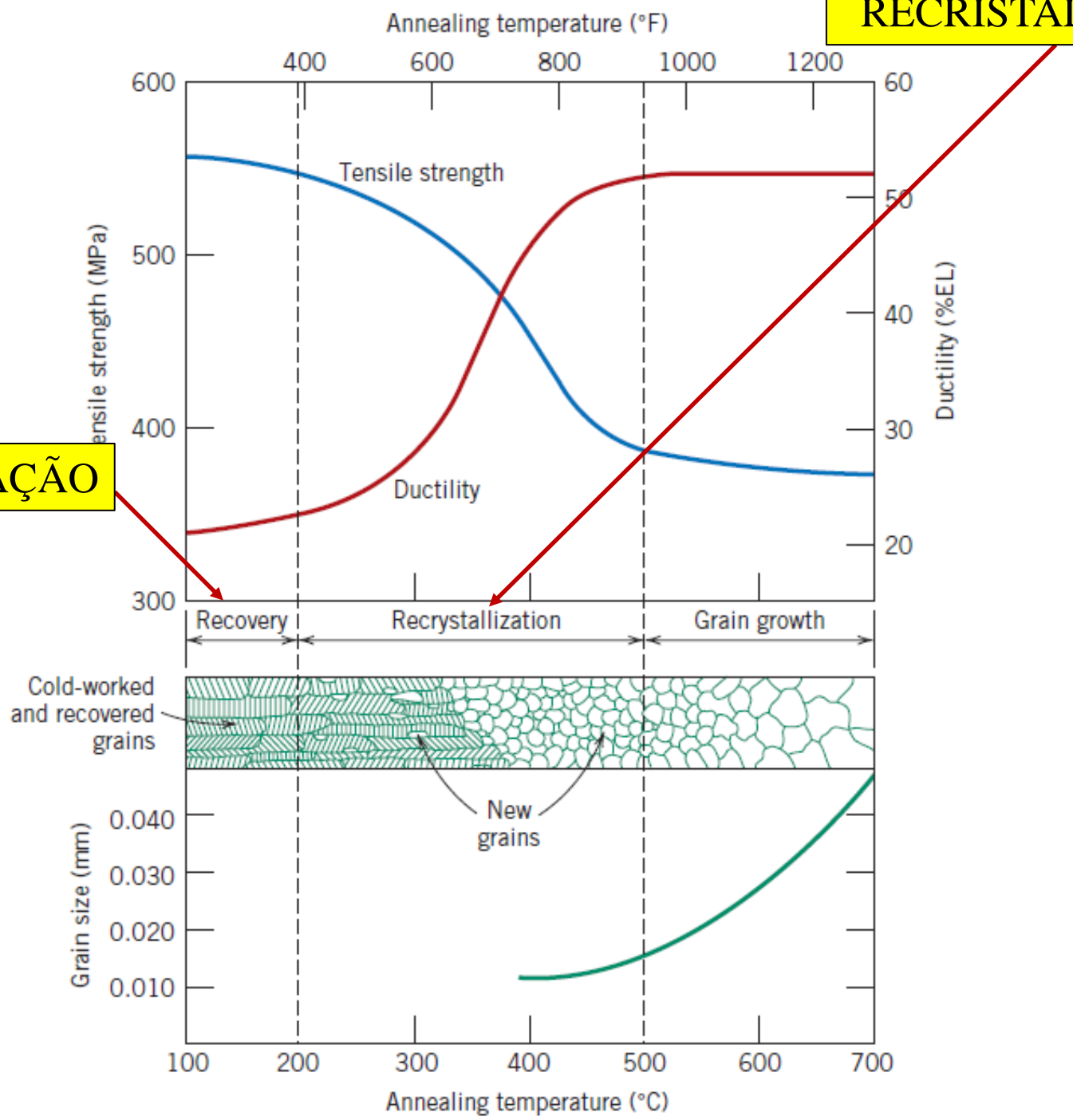
FENÔMENOS DA LAMINAÇÃO E EXTRUSÃO A QUENTE

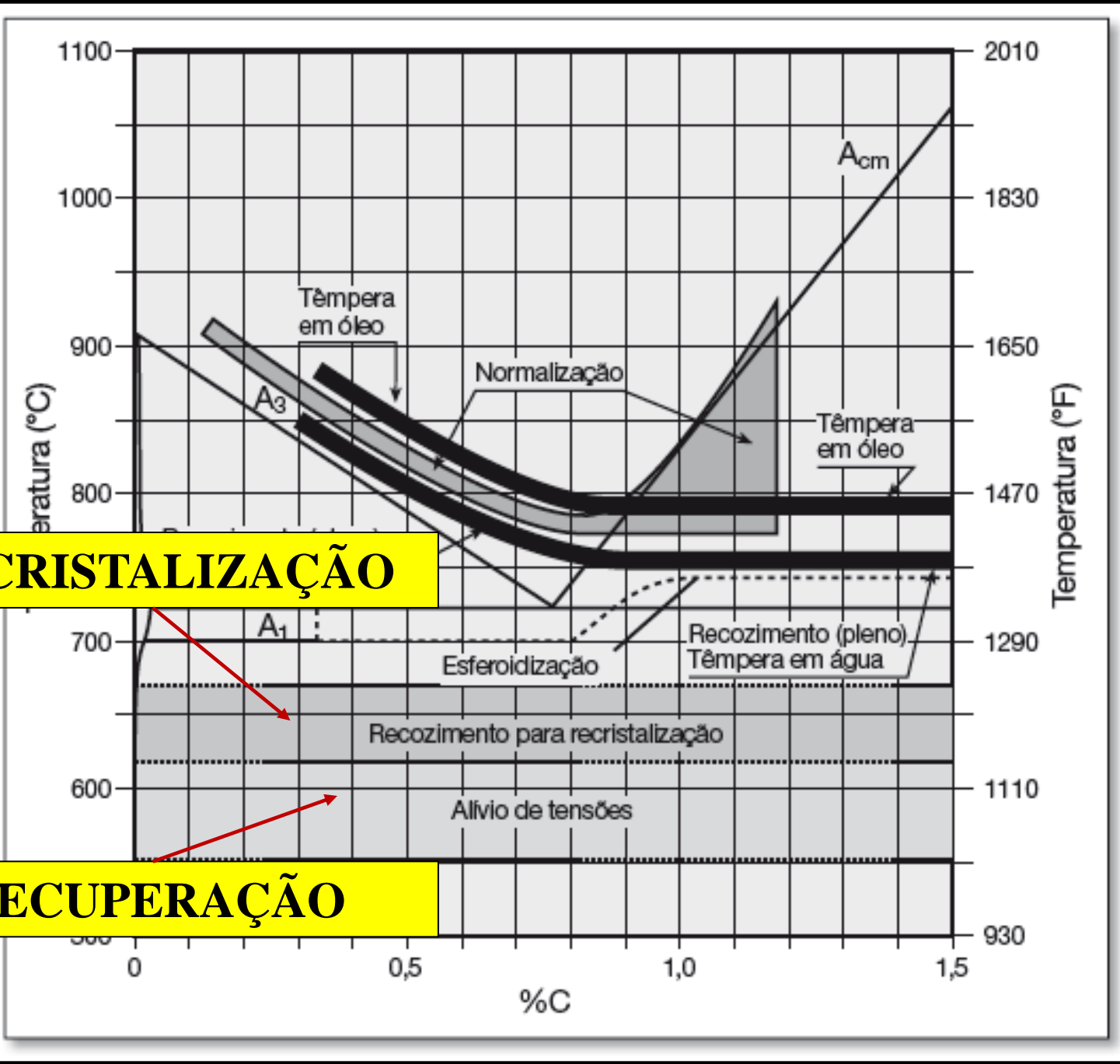


RECRISTALIZAÇÃO ESTÁTICA, DINÂMICA E METADINÂMICA

RECRISTALIZAÇÃO

RECUPERAÇÃO





RECRISTALIZAÇÃO

RECUPERAÇÃO

RECUPERAÇÃO ESTÁTICA

Metais encruados, com alto nível de linha de discordâncias passam por tratamento de **alívio de tensões**. Mecanismo básico é **aniquilação de linhas de discordância**. Ocorre redução da dureza, aumento de ductilidade, resistividade e elétrica voltam aos níveis de antes do encruamento.

O fenômeno de recuperação, normalmente ocorre a **partir de $0,2T_f$** .

RECUPERAÇÃO DINÂMICA

O fenômeno ocorre durante a deformação a quente.

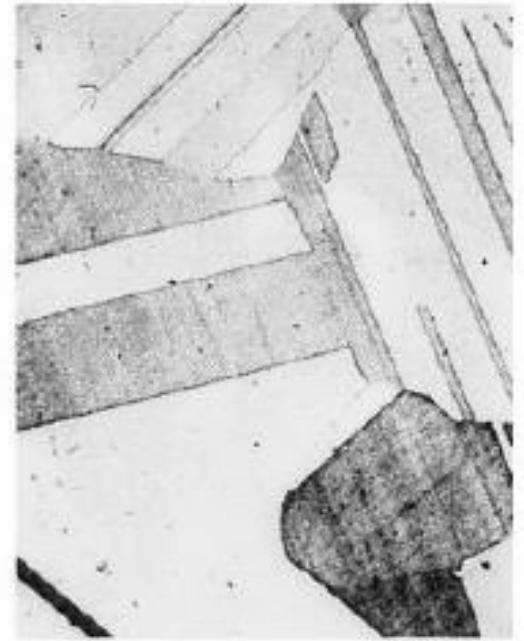
CRESCIMENTO DE GRÃO



(a)



(b)



(c)

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

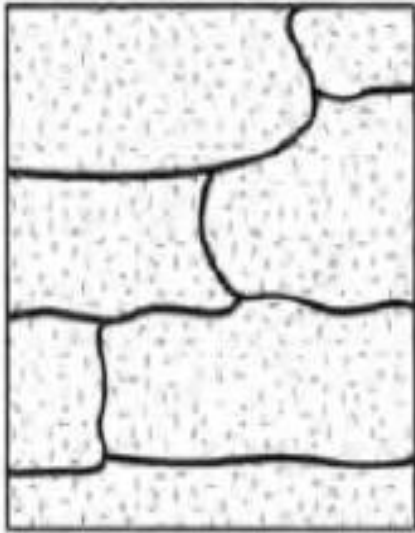
(a) Recozido a 400oC, (b) recozido a 650oC, e (c) recozido a 800oC .

Encruado

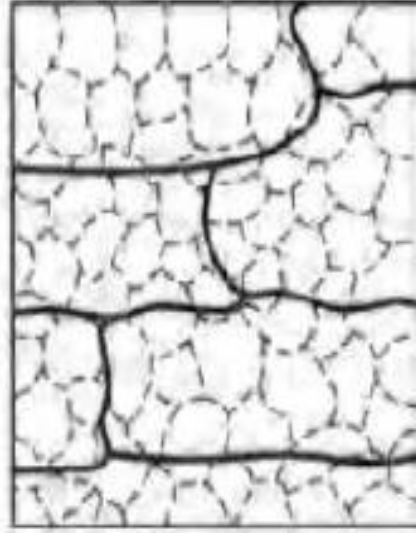
**Recuperação:
aniquilação de
discordâncias**

**Recristalização:
geração de novos
grãos**

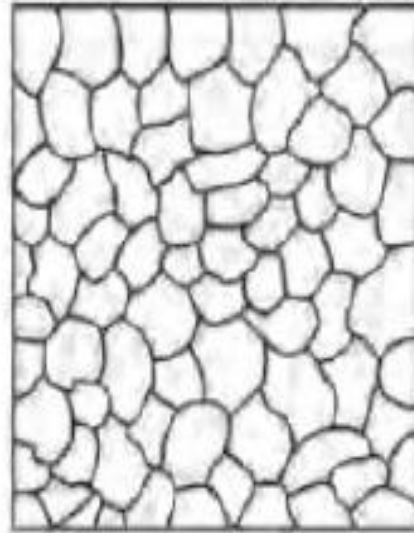
**Crescimento de
grão**



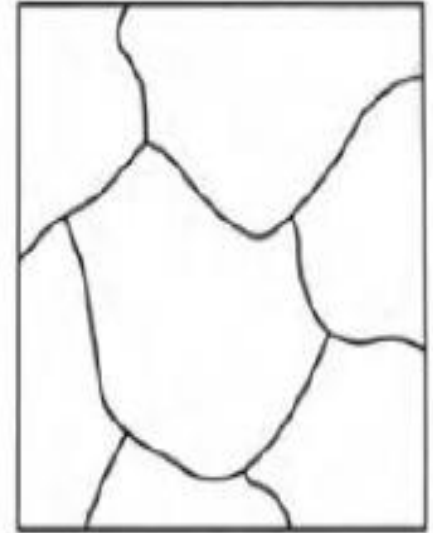
(a)



(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.

**Alumínio com 10%
de deformação**

Recovery After Deformation

Após recuperaçãp

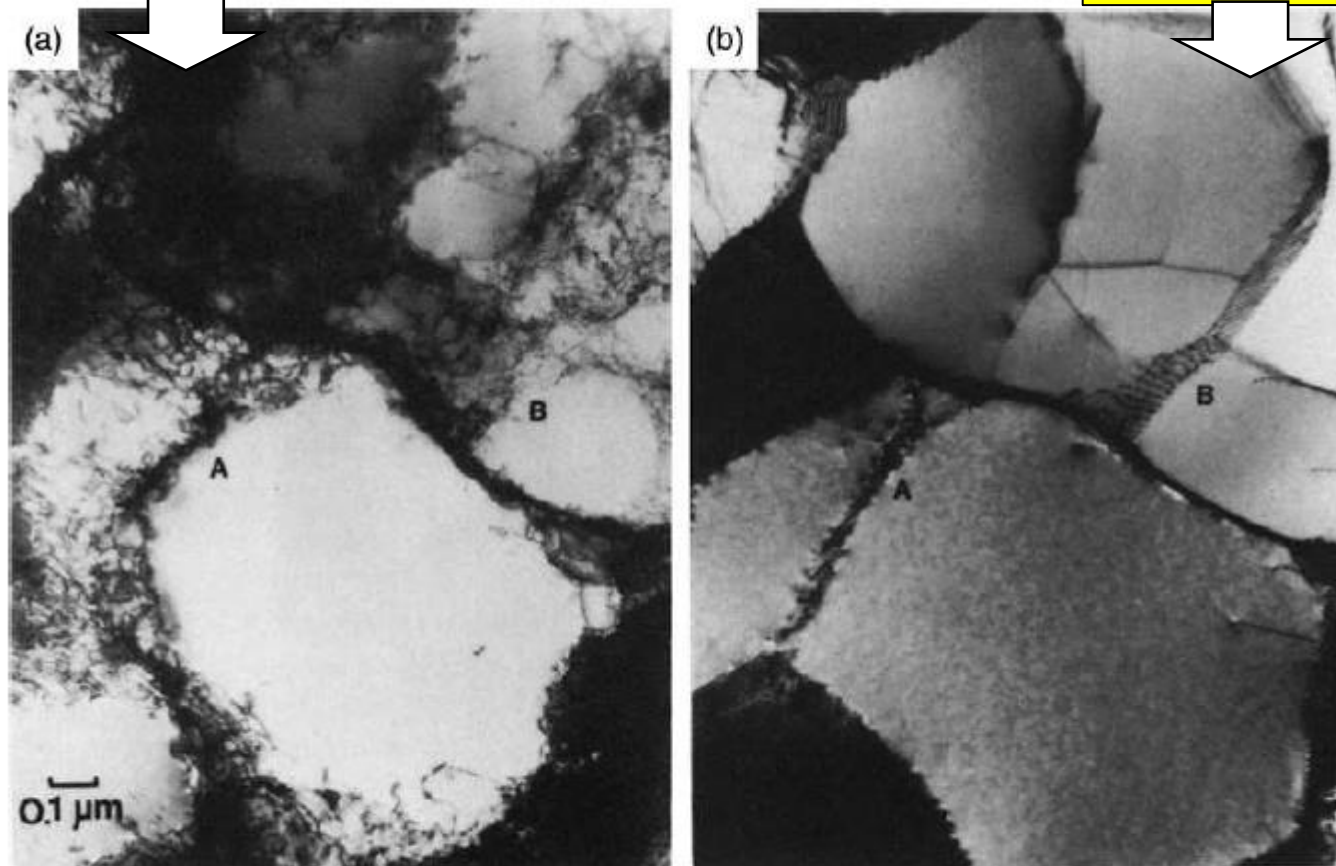


Fig. 6.13. Transmission high voltage electron micrographs (HVEM) of aluminium deformed 10% and annealed in-situ. (a) Deformed structure, (b) Same area after 2 min anneal at 250°C.

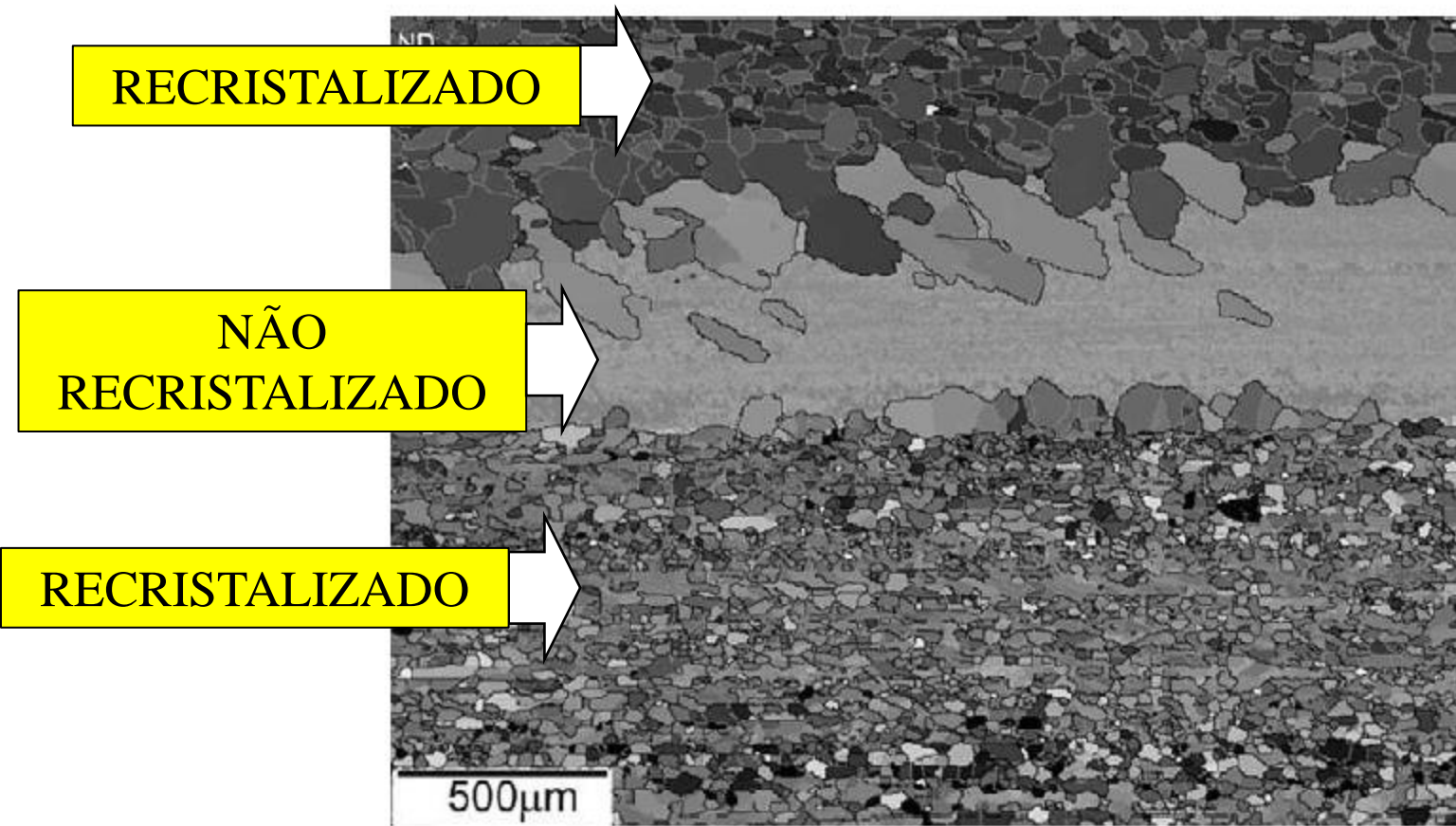


Fig. 7.15. EBSD map of a cold rolled single-phase, coarse-grained Al-0.05 wt%Mn alloy which has been partially recrystallized. The area originally contained three deformed grains. The upper and lower grains have recrystallized to different grain sizes, whilst no recrystallization has occurred in the central (Goss-oriented) grain. The colours represent the orientations within the sample, (Sommerday and Humphreys 2003b).
(See colour plate section.)

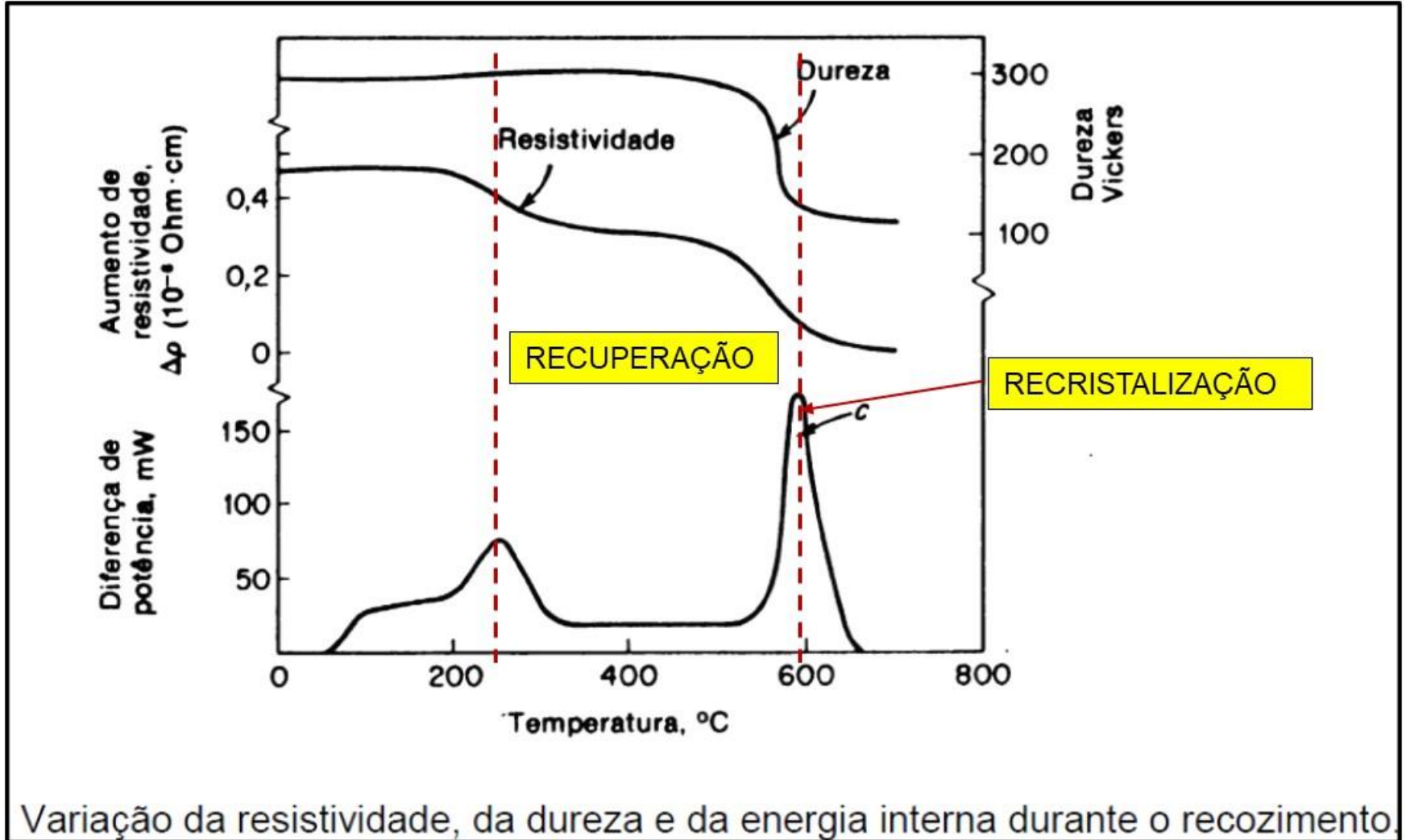


Table 7.2 Recrystallization and Melting Temperatures for Various Metals and Alloys

<i>Metal</i>	<i>Recrystallization Temperature</i>		<i>Melting Temperature</i>	
	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{F}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{F}$
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 A 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

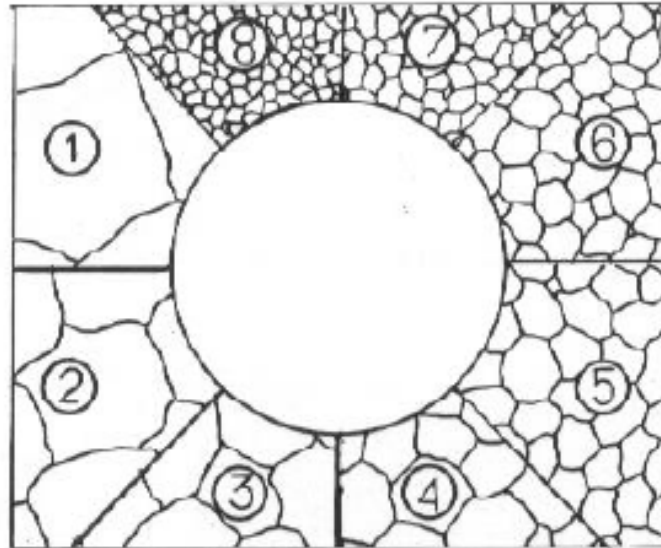
Aumento: x100

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

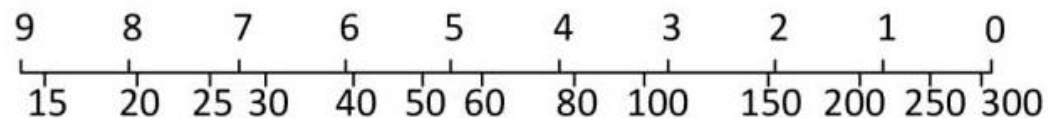
N = número médio de grãos por polegada quadrada

Análise de TG é sempre feita na direção longitudinal, paralela 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 (μm)

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

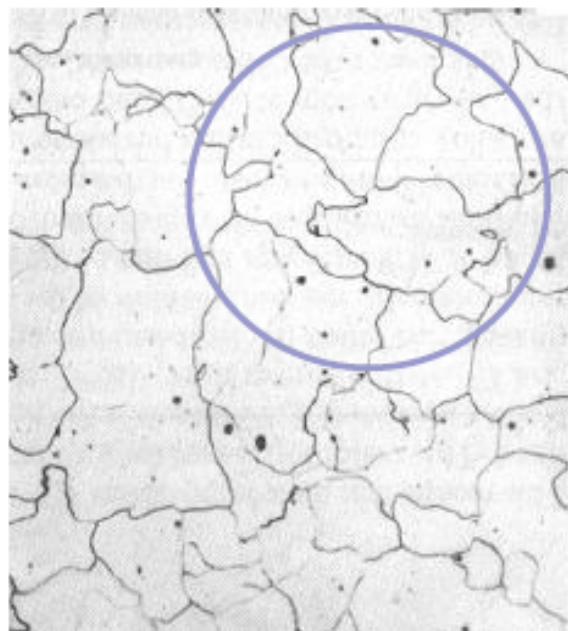
$$N_A = N_{eq} / A$$

Número de grãos por unidade de comprimento

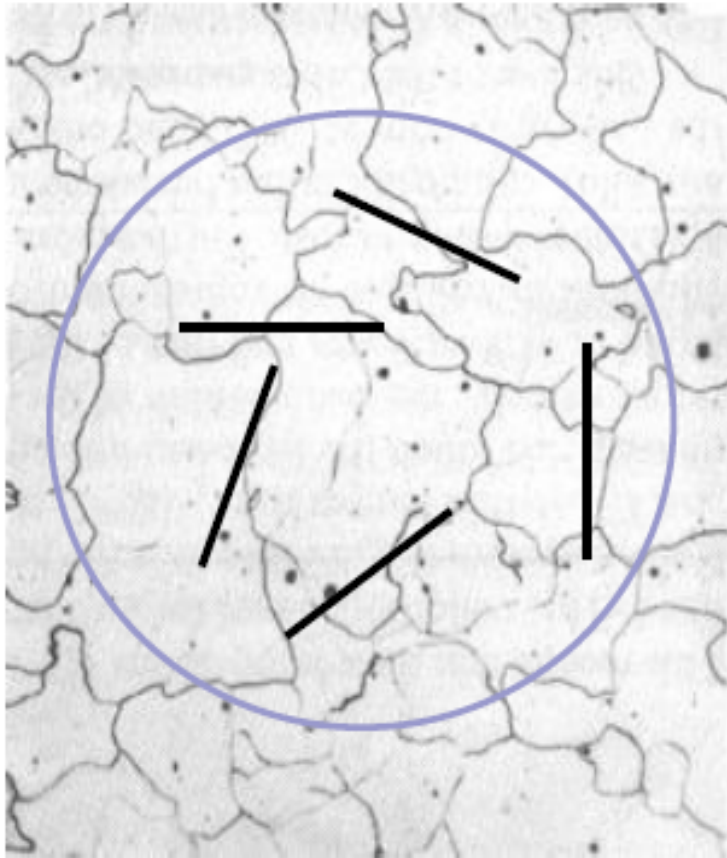
$$N_L = 0,735 \cdot N_A^2$$

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:

$$D = 1/N_L$$

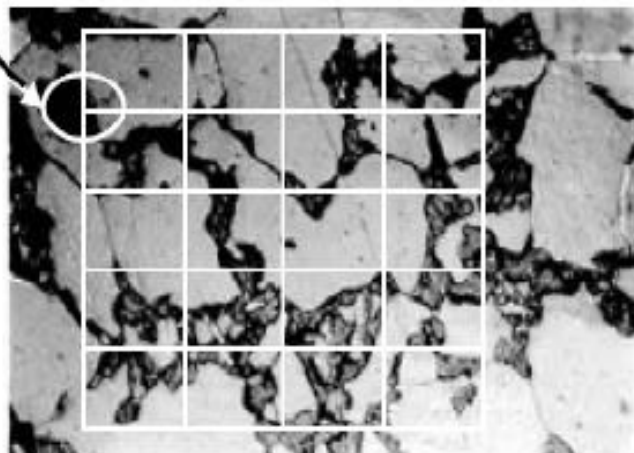
$$N_L = \frac{(\text{número de interseções}) \times (\text{aumento})}{\text{comprimento da linha teste}}$$

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