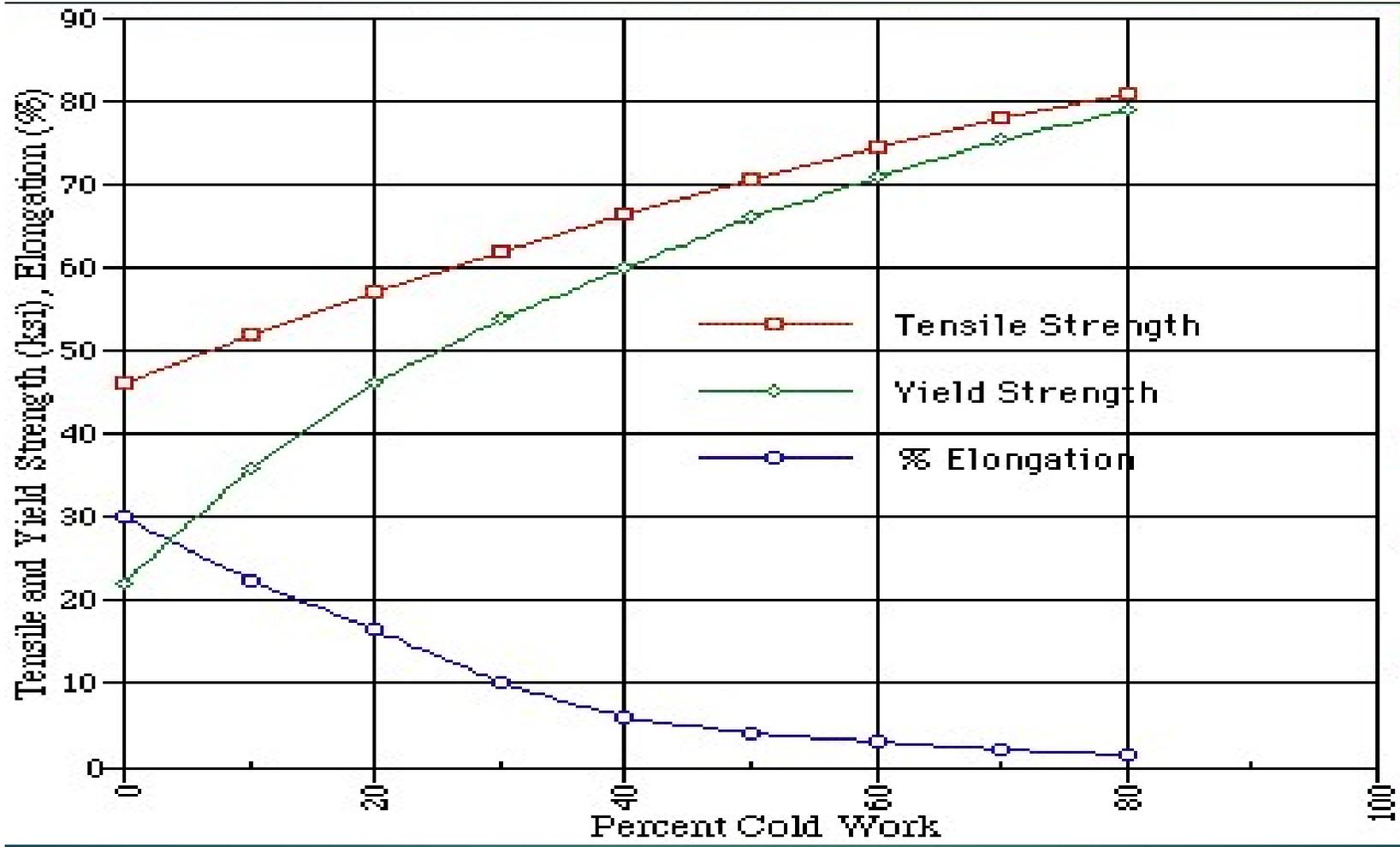


DEFORMAÇÃO PLÁSTICA

ECM 1

PROFA. DRA.
LAURALICE CANALE



Trabalho a frio

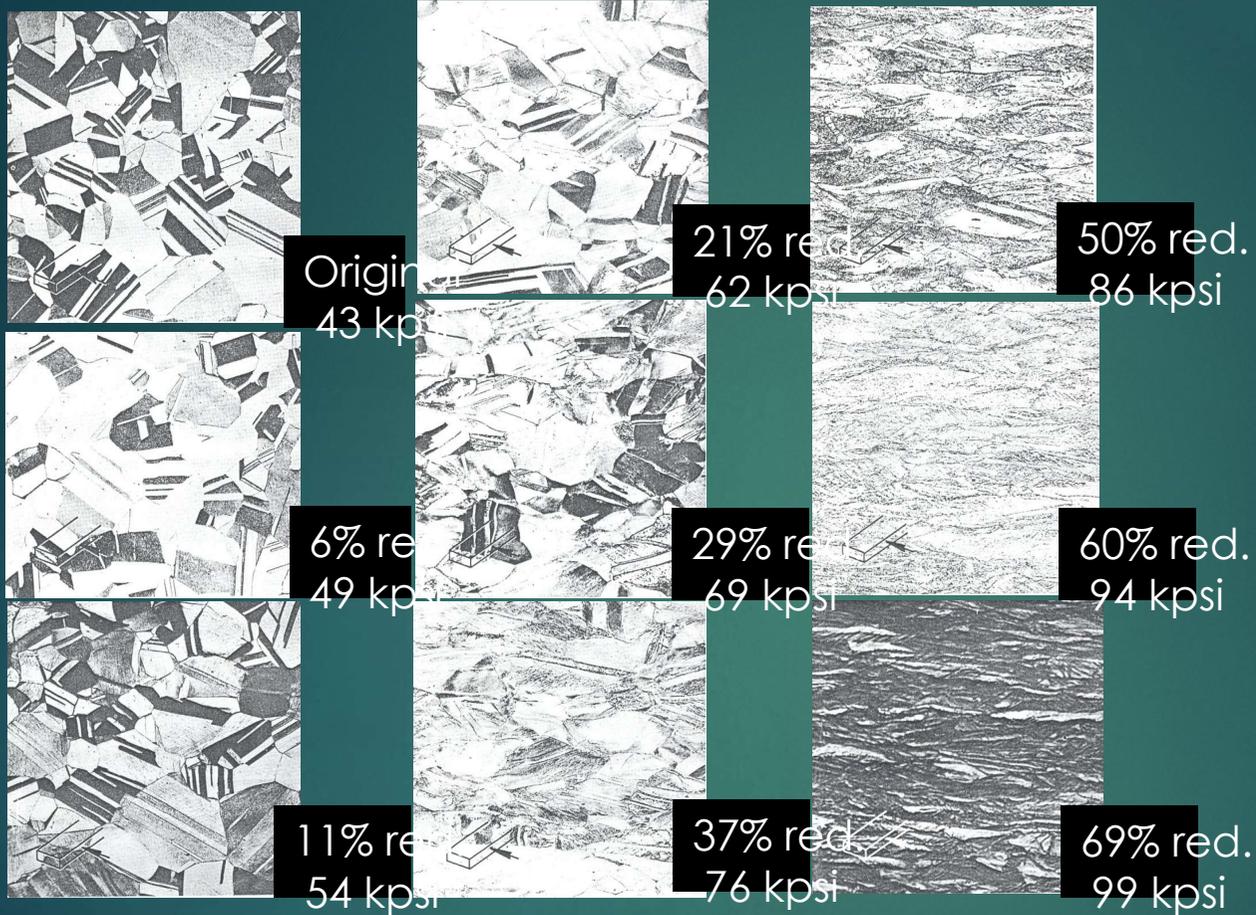
$$\%TF = [(A_o - A_f) / A_o] \times 100$$

A_o = Seção transversal original do metal

A_f = Seção transversal após a deformação

IMPORTANTE: A definição de trabalho a frio é a variação percentual entre as áreas original e final, não fazendo diferença de quantos estágios intermediários estejam envolvidos.

Efeito do encruamento sobre a Resistência à Tração



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

ENCRUAMENTO OU ENDURECIMENTO PELA DEFORMAÇÃO À FRIO

- 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)**

DEFORMAÇÃO À FRIO



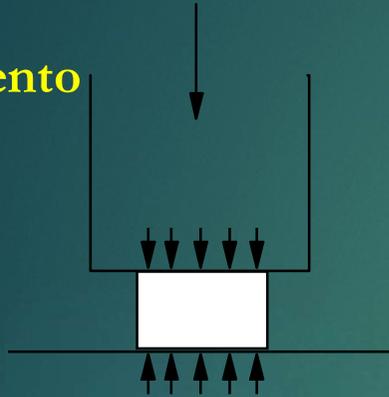
- Aumenta a dureza e a resistência dos materiais, mas a ductilidade diminui

Permite a obtenção de dimensões dentro de tolerâncias estreitas

- Produz melhor acabamento superficial

TIPOS DE CONFORMAÇÃO

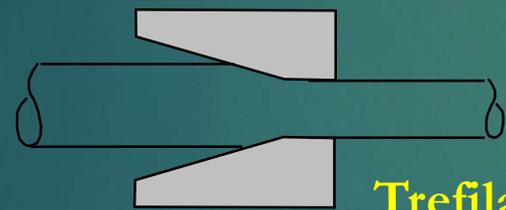
Forjamento



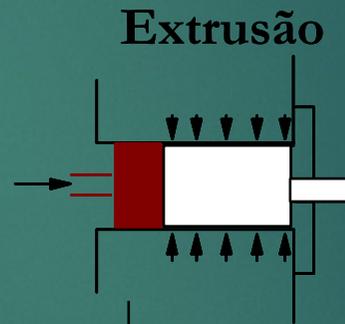
Laminação



Cisalhamento



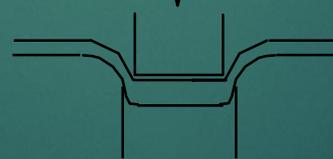
Trefilação



Extrusão

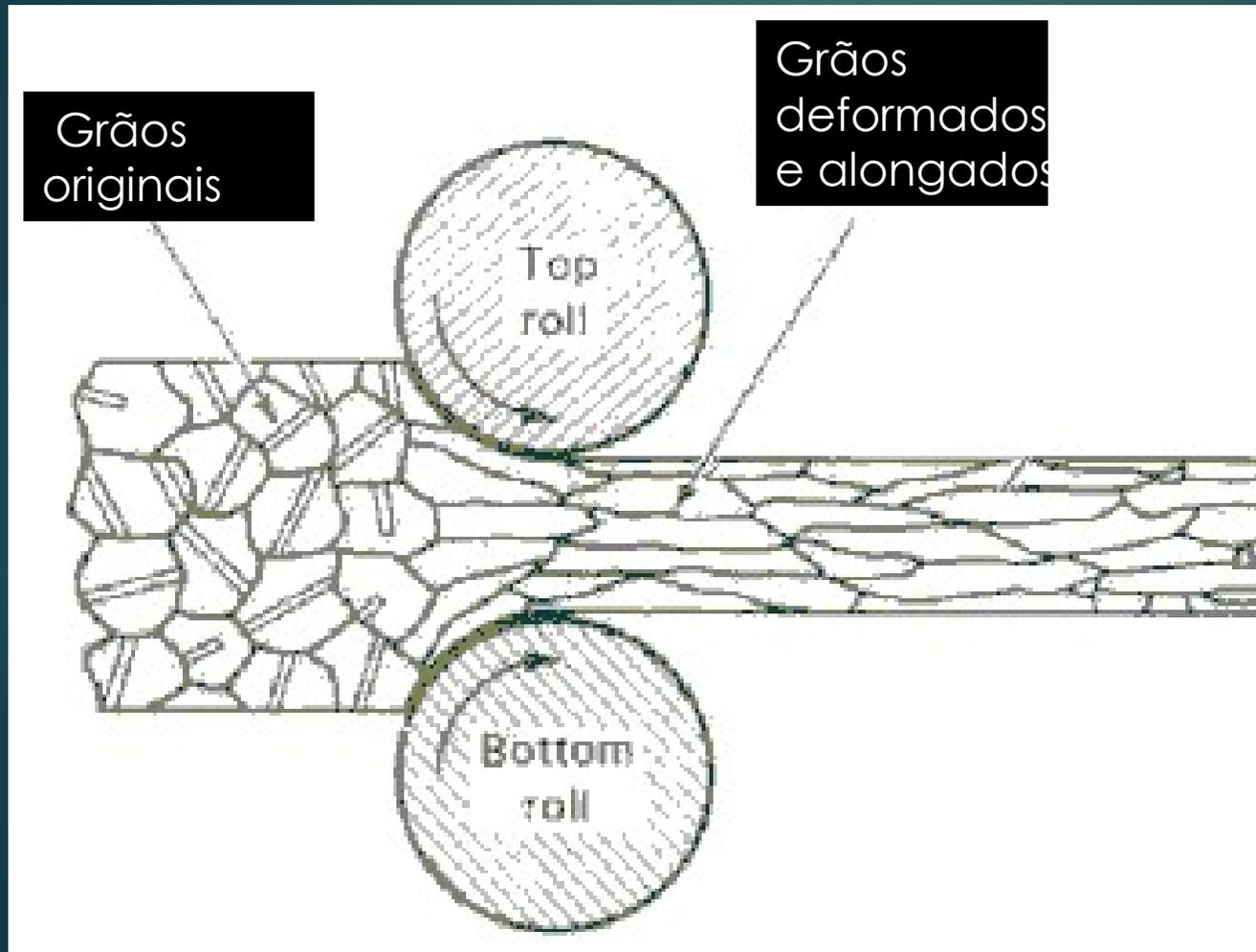


Estiramento



Embutimento
Profundo

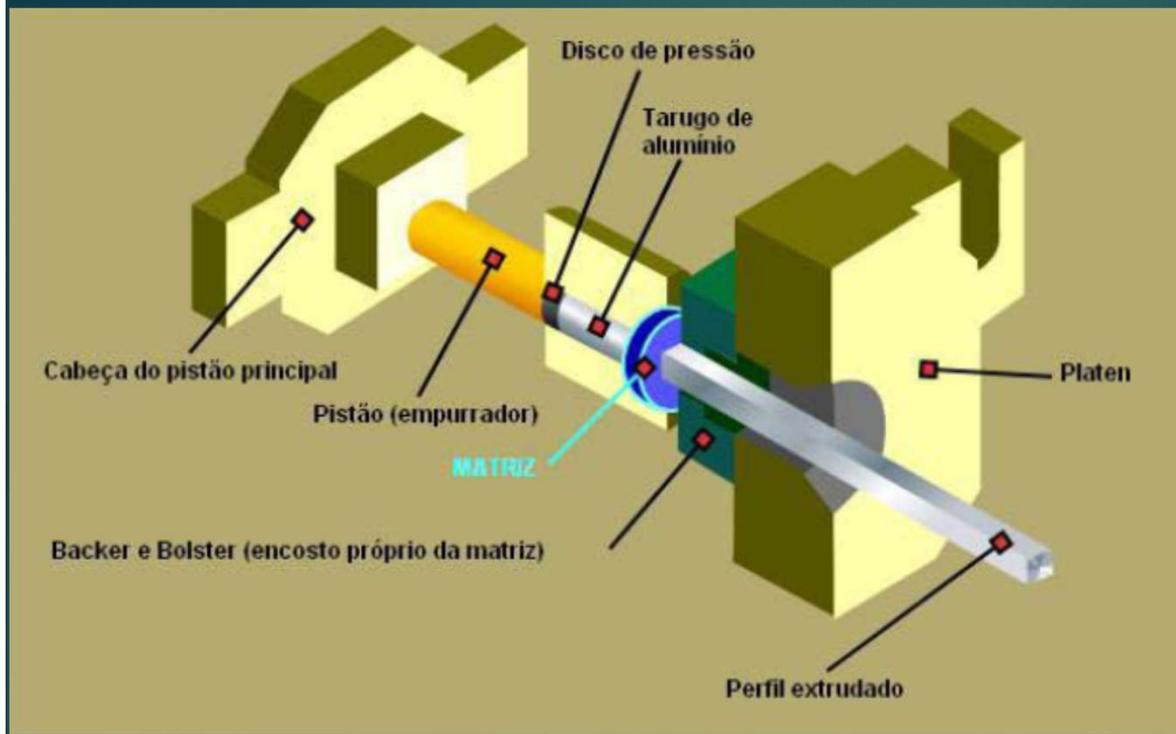
MECÂNICA DA LAMINAÇÃO



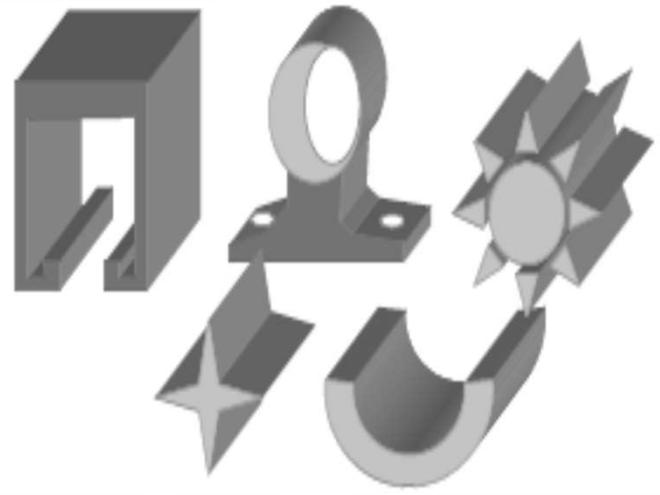
LAMINAÇÃO A FRIO



EXTRUSORA

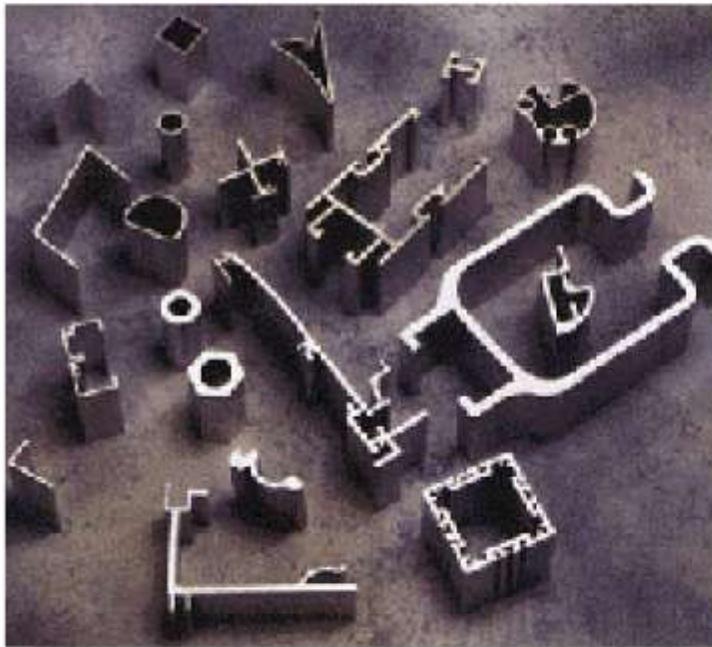


Common Extruded Shapes:

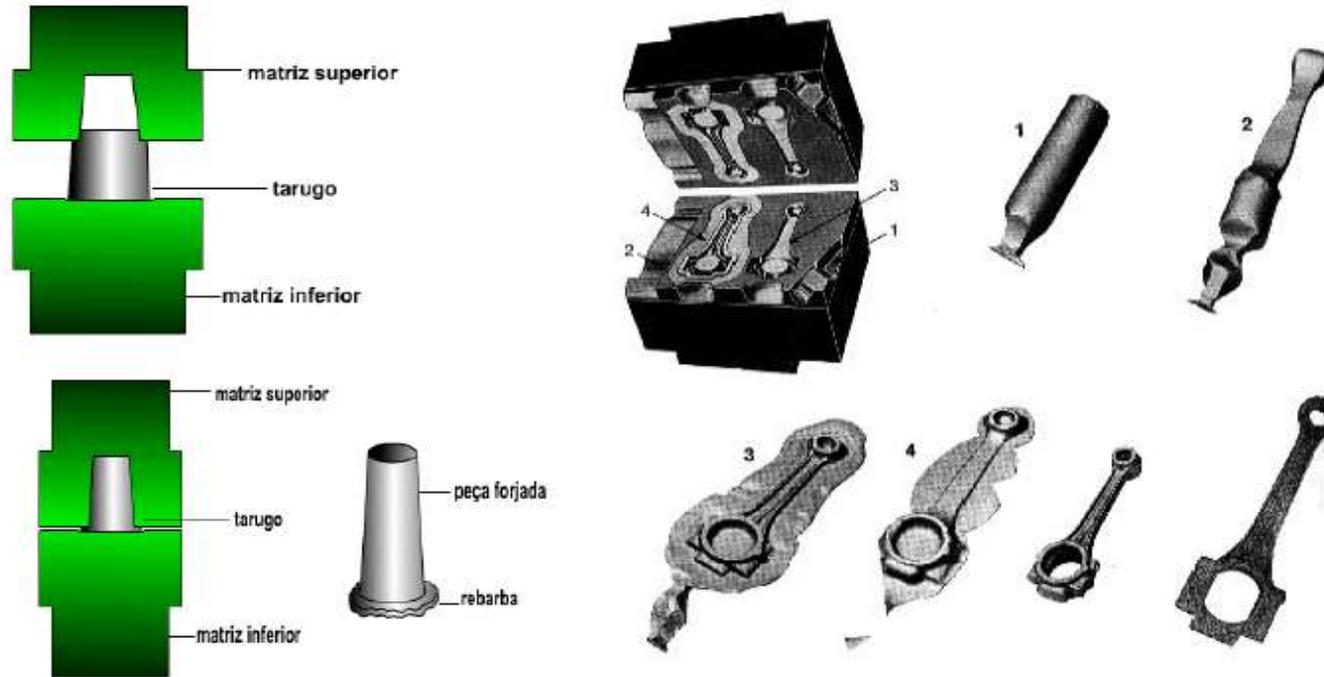


Process parameters:

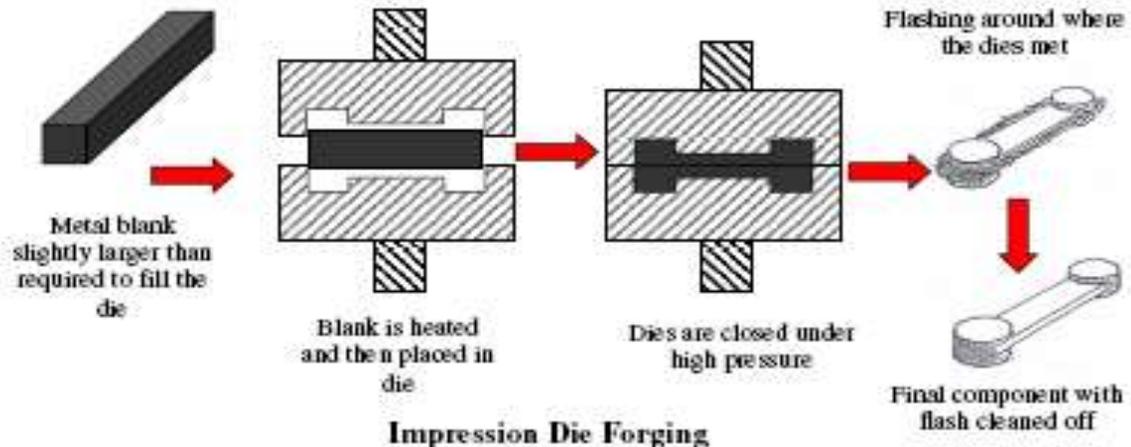
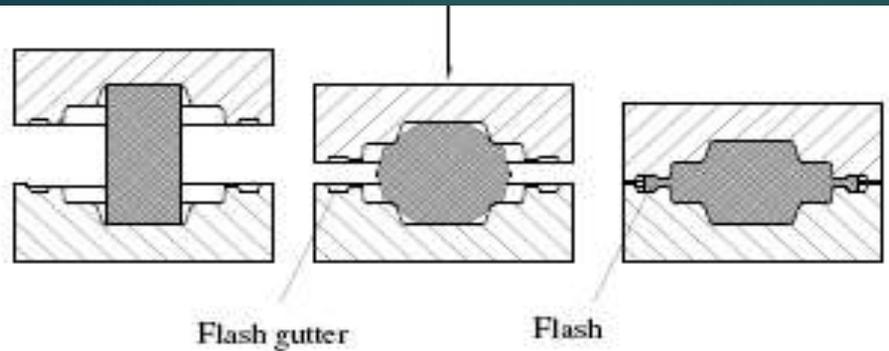
EXTRUSÃO – PRODUTOS E PERFIS



FORJAMENTO

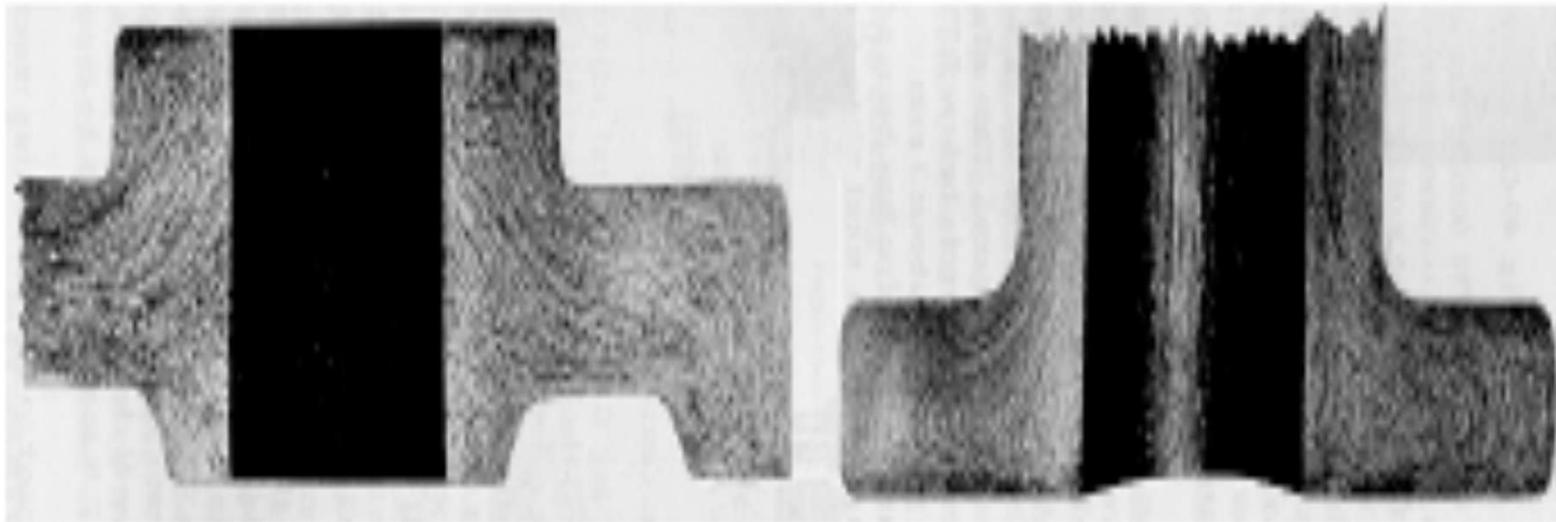


MATRIZ FECHADA C/ REBARBA



Impression Die Forging



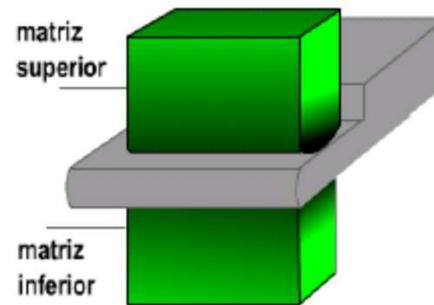
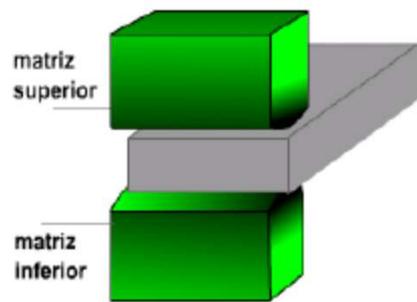


Aligned fibre structure of forgings

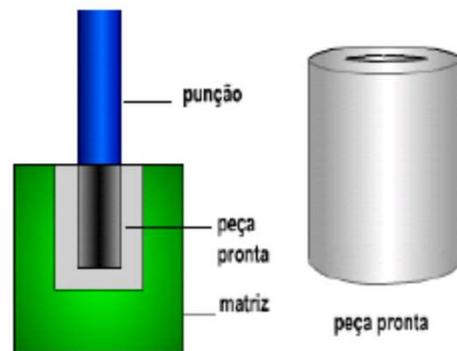
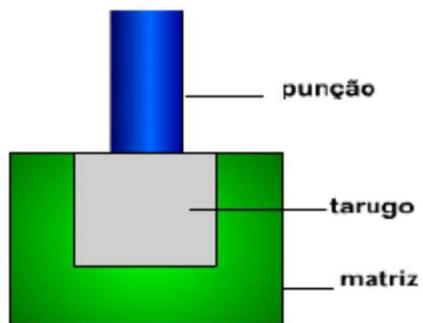
FORJAMENTO - PRODUTOS



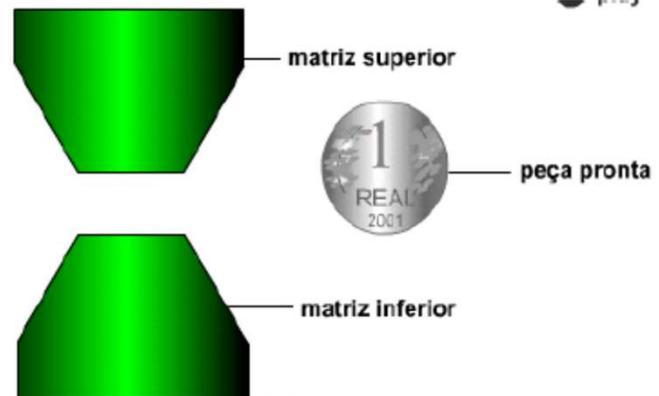
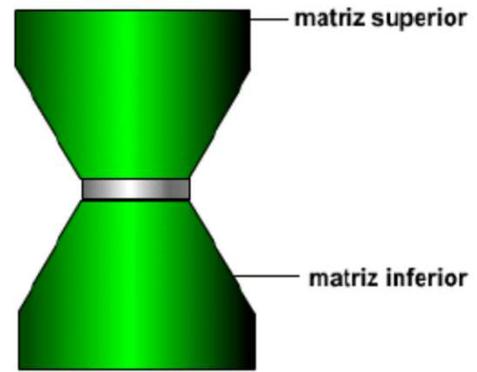
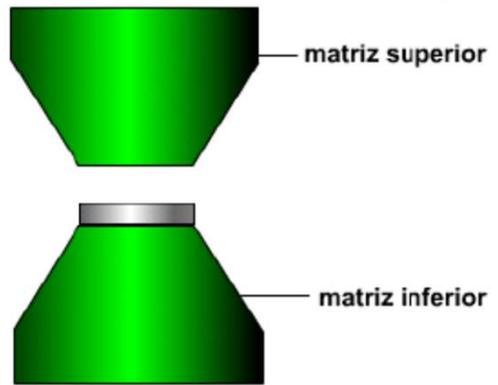
■ Alargamento



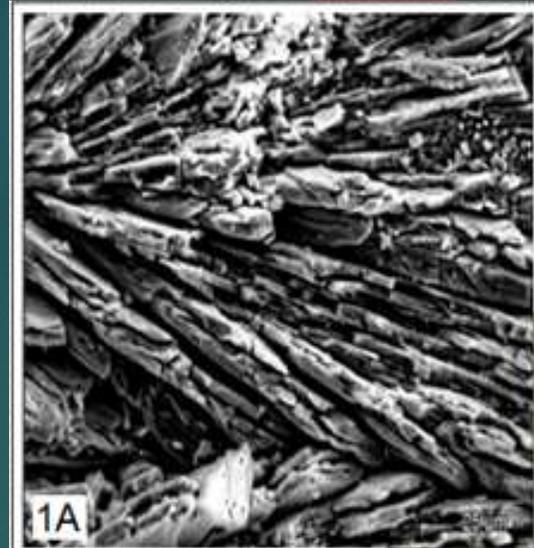
■ Furação



■ Cunhagem



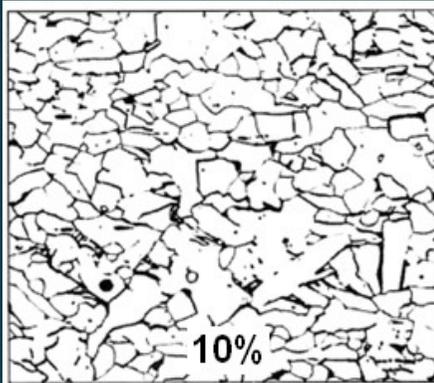
TREFILAÇÃO



*Phosphate Crystals
on the Surface.*

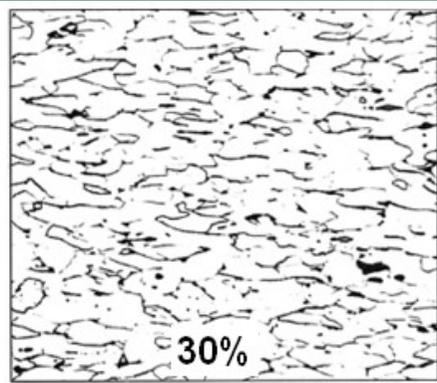
TREFILAÇÃO - PRODUTOS





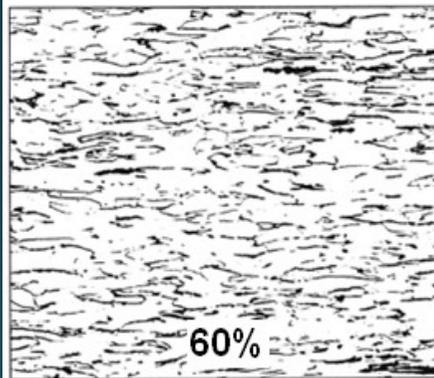
10%

(a)



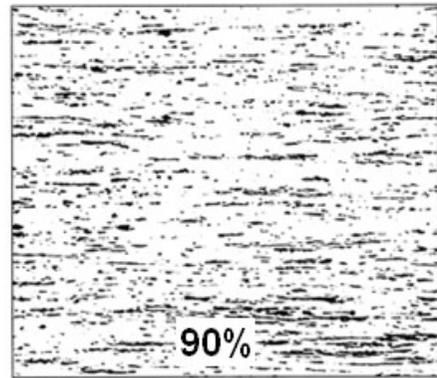
30%

(b)



60%

(c)



90%

(d)

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

Forma-se uma textura.

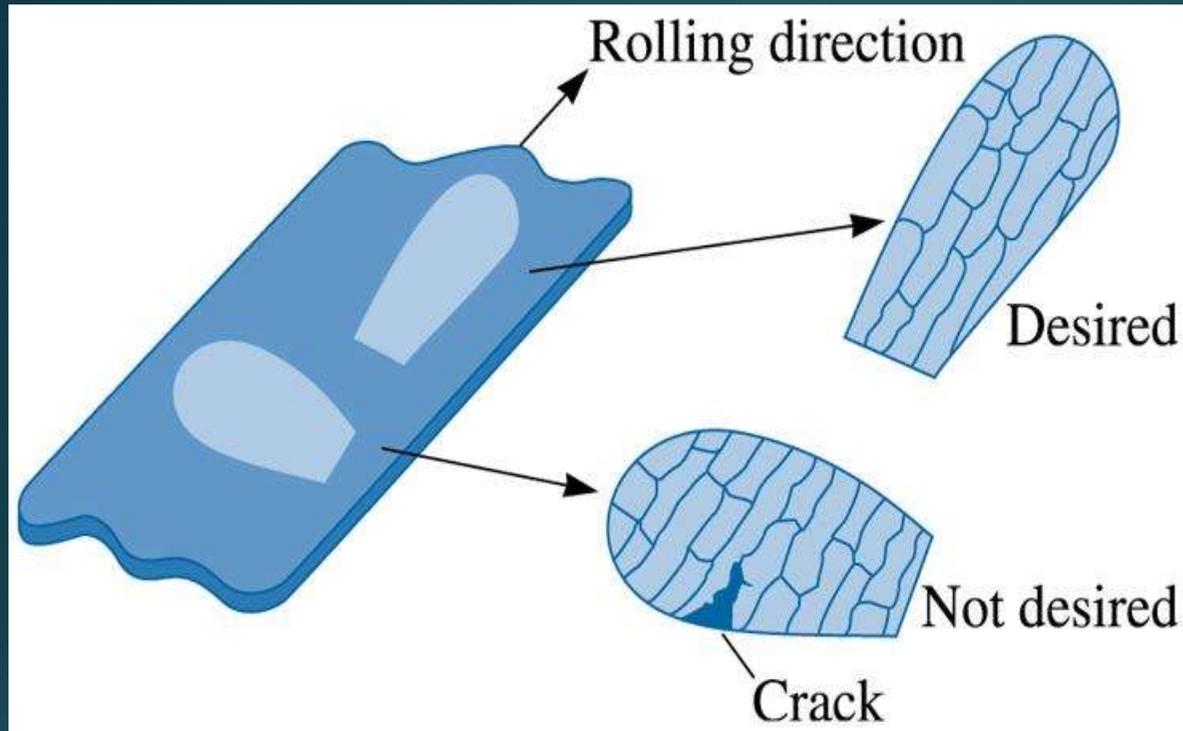
Problema:

Um método de fabricar pás ou lâminas de ventiladores para resfriar motores é a estampagem a partir de lâminas de aço laminadas a frio.

As chapas são presas numa posição fixa e então estampadas. Muitas peças são fabricadas simultaneamente e algumas falharam devido à propagação de uma trinca transversal ao eixo principal da pá.

As demais lâminas tiveram desempenho satisfatório.

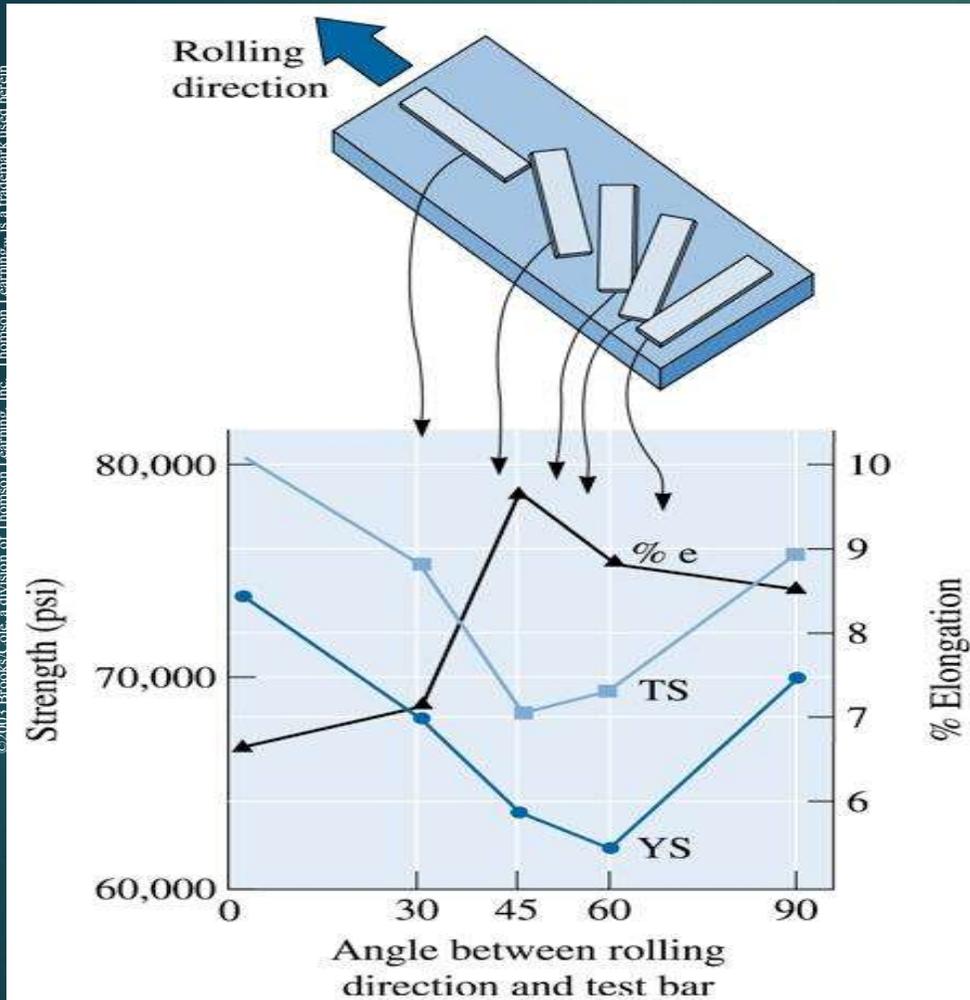
Possíveis causas e soluções



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

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.

RECRISTALIZAÇÃO

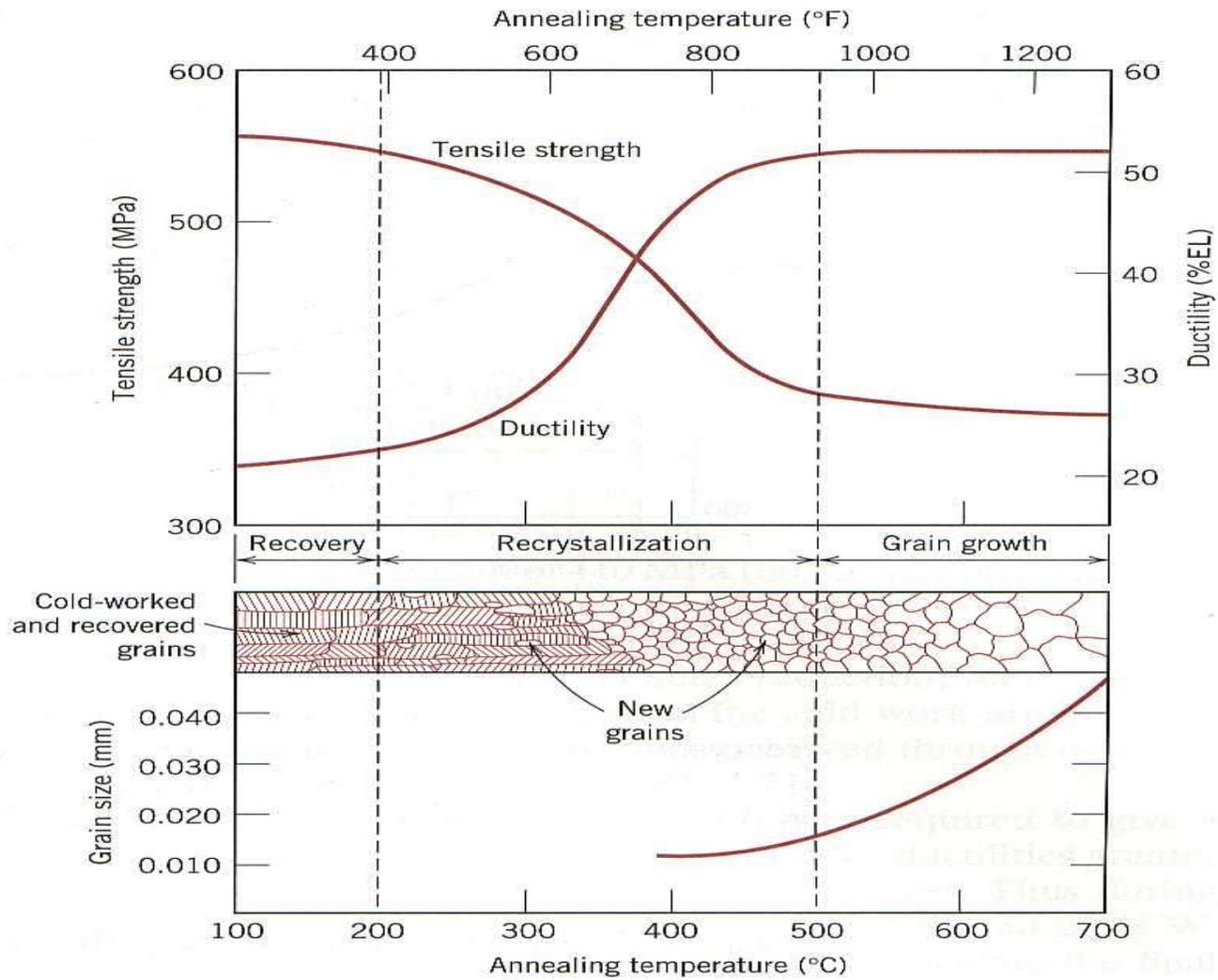
(Processo de Recozimento para Recristalização)

- Se os metais deformados plasticamente forem submetidos a um aquecimento controlado, este aquecimento fará com que haja um rearranjo dos cristais deformados plasticamente, diminuindo a dureza dos mesmos

MECANISMOS QUE OCORREM NO AQUECIMENTO DE UM MATERIAL ENCRUADO

ESTÁGIOS:

- **Recuperação**
- **Recristalização**
- **Crescimento de grão**



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 delas

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**

RECRISTALIZAÇÃO

Forma-se um novo conjunto de grãos que são equiaxiais



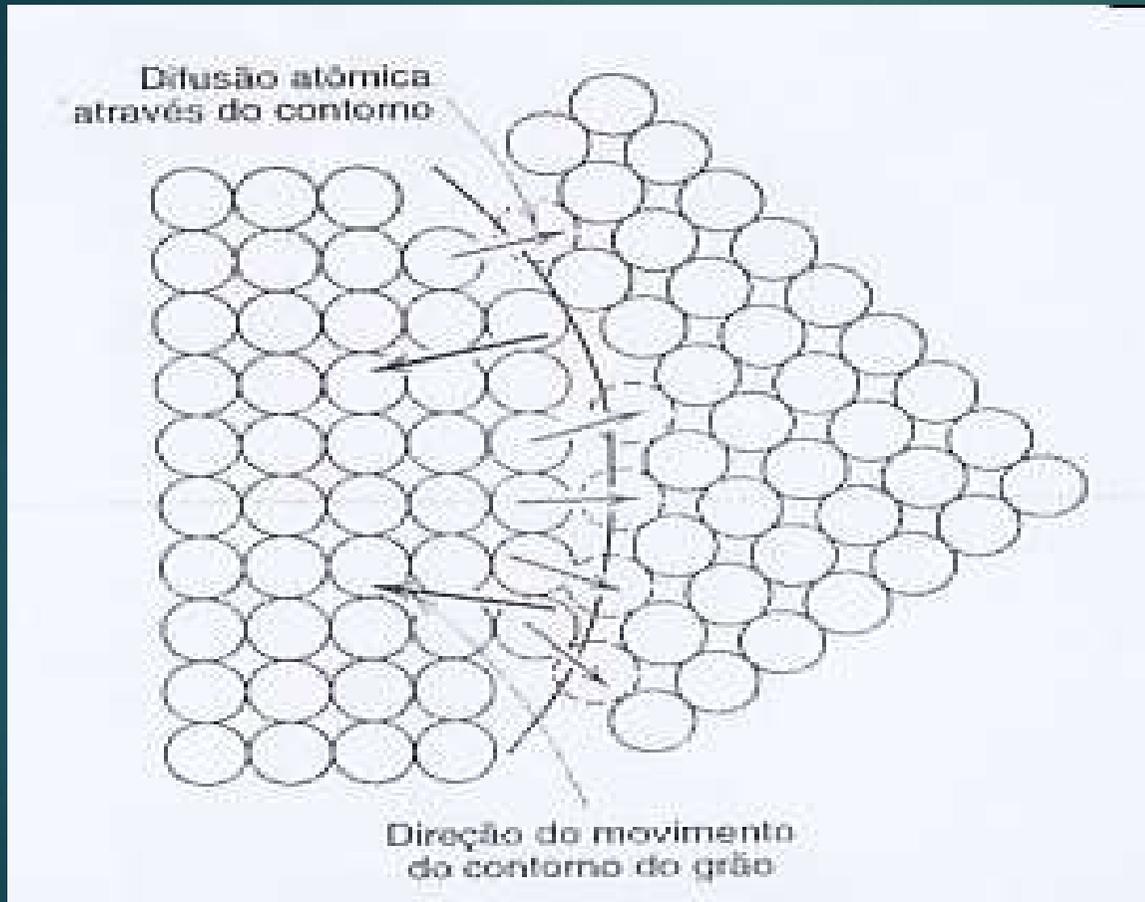
Pode-se refinar o grão de uma liga monofásica mediante deformação plástica e recristalização

CRESCIMENTO DE GRÃO

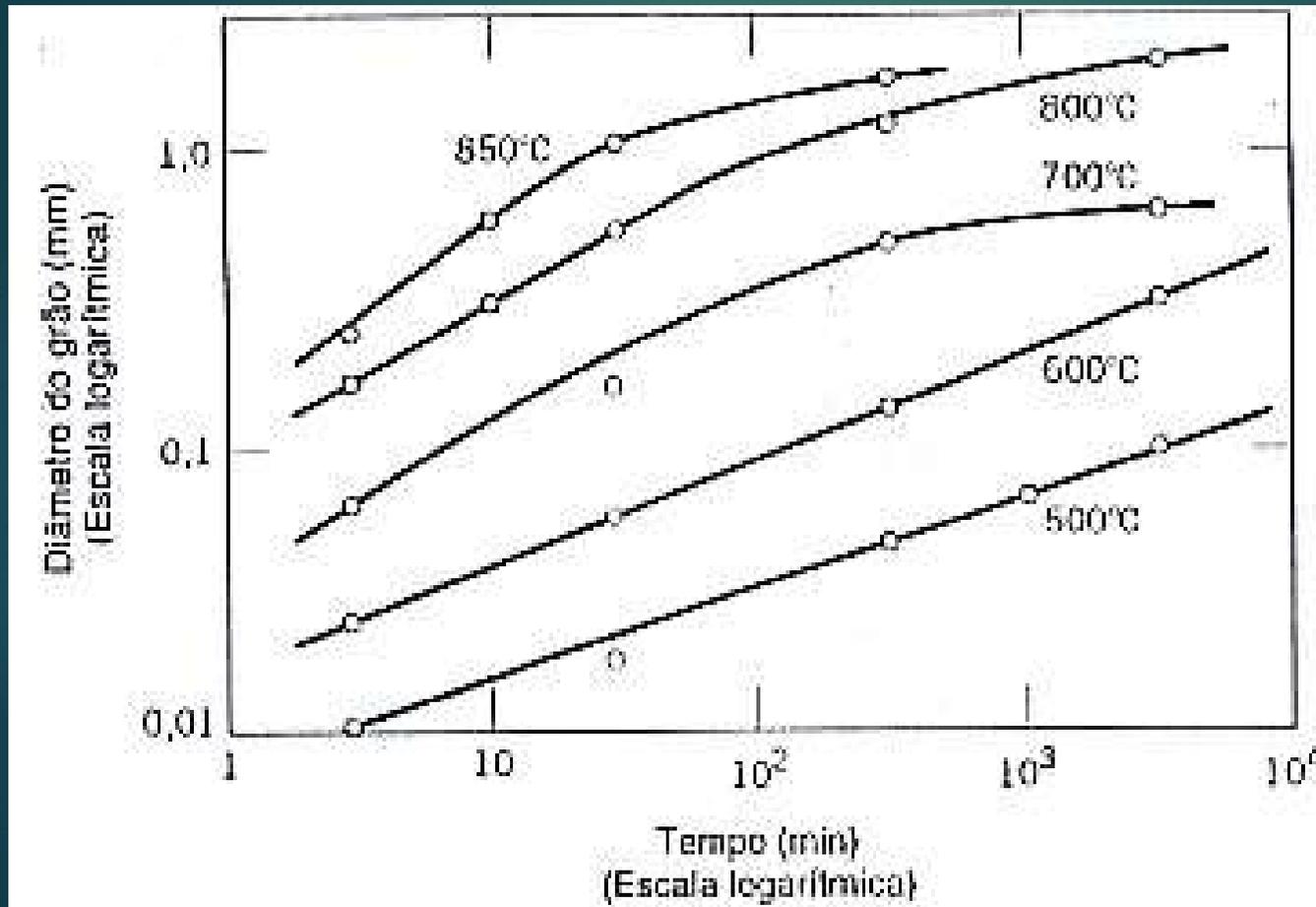
- Depois da recristalização se o material permanecer por mais tempo em temperaturas elevadas o grão continuará à crescer

Em geral, quanto maior o tamanho de grão mais mole é o material e menor é sua resistência

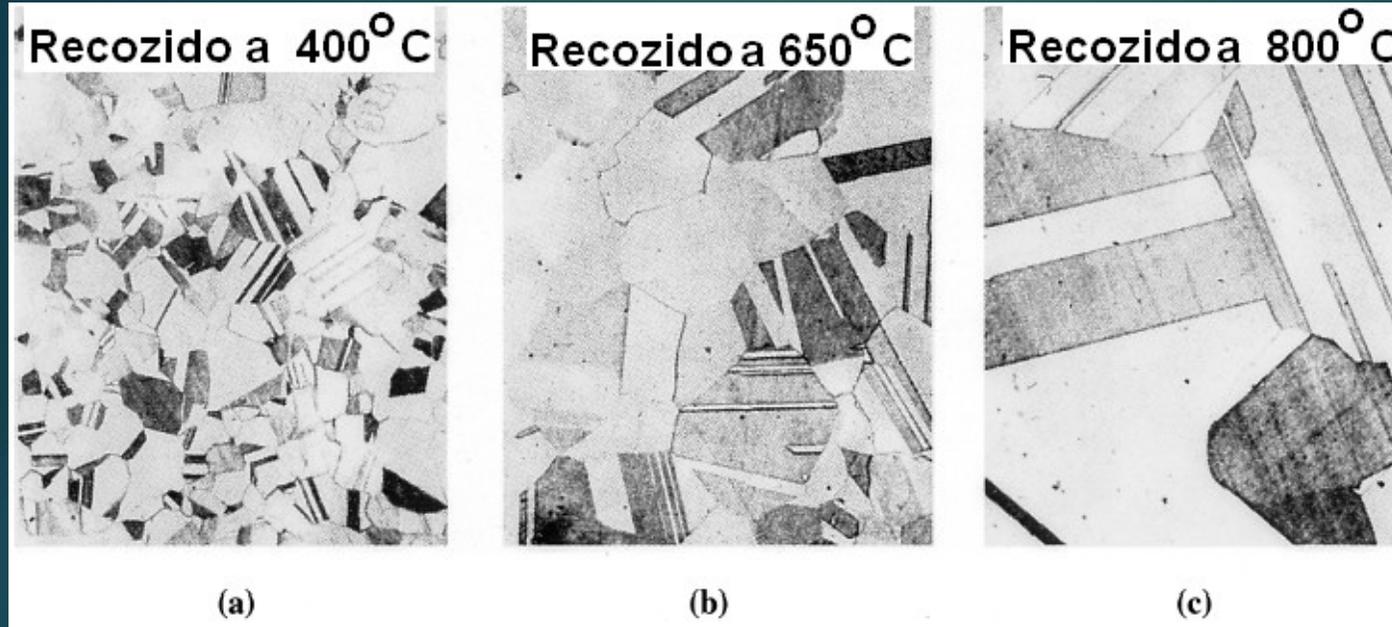
CRESCIMENTO DE GRÃO POR DIFUSÃO



DEPENDÊNCIA DO TAMANHO DE GRÃO COM O TEMPO DE AQUECIMENTO



CRESCIMENTO DE GRÃO



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

TEMPERATURAS DE RECRISTALIZAÇÃO

- A temperatura de recristalização é dependente do grau de deformação

A temperatura de recristalização está entre $1/3$ e $1/2$ da temperatura de fusão

Deformação crítica: 10%

Se o aço for submetido ao recozimento de recristalização e estiver com deformação abaixo da crítica ele vai somente crescer o grão, não havendo formação de novo grão.

TEMPERATURA DE RECRISTALIZAÇÃO

- TIPO DE MATERIAL
- GRAU DE DEFORMAÇÃO

TABLE 7-4 ■ *Typical recrystallization temperatures for selected metals*

Metal	Melting Temperature (°C)	Recrystallization Temperature (°C)
Sn	232	-4
Pb	327	-4
Zn	420	10
Al	660	150
Mg	650	200
Ag	962	200
Cu	1085	200
Fe	1538	450
Ni	1453	600
Mo	2610	900
W	3410	1200

(Source: Adapted from Structure and Properties of Engineering Materials, by R. Brick, A. Pense, and R. Gordon, 1977. Copyright © 1977 The McGraw-Hill Companies. Adapted by permission.)

DEFORMAÇÃO À QUENTE E DEFORMAÇÃO À FRIO



- **Deformação à quente:** quando a deformação ou trabalho mecânico é realizado acima da temperatura de recristalização do material

Deformação à frio: quando a deformação ou trabalho mecânico é realizado abaixo da temperatura de recristalização do material

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

DEFORMAÇÃO À QUENTE

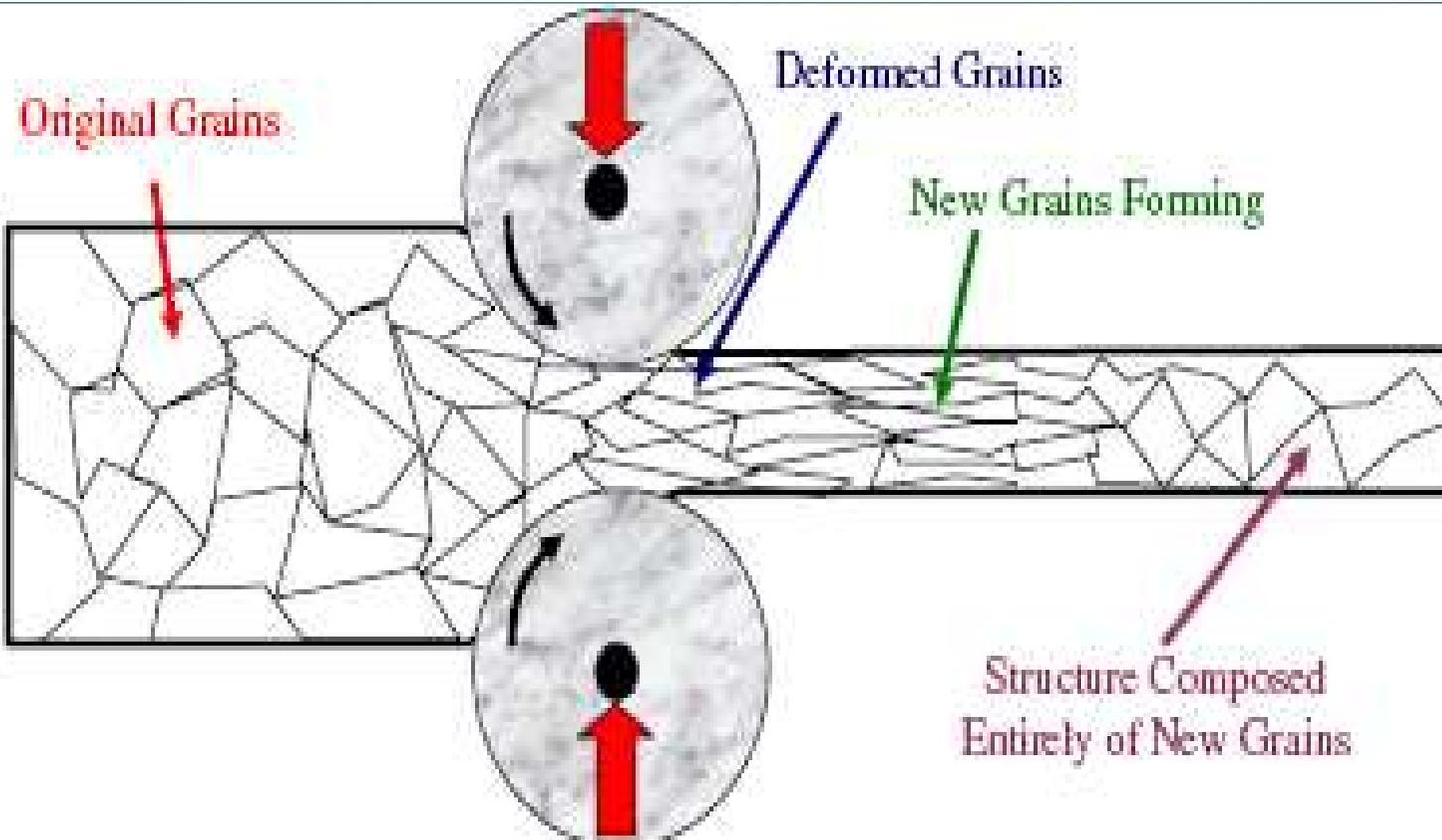


DESVANTAGENS:

- 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





Metalografia Quantitativa

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)

TAMANHO DO GRÃO

Número do tamanho de grão: 1 - 10

Aumento: x100

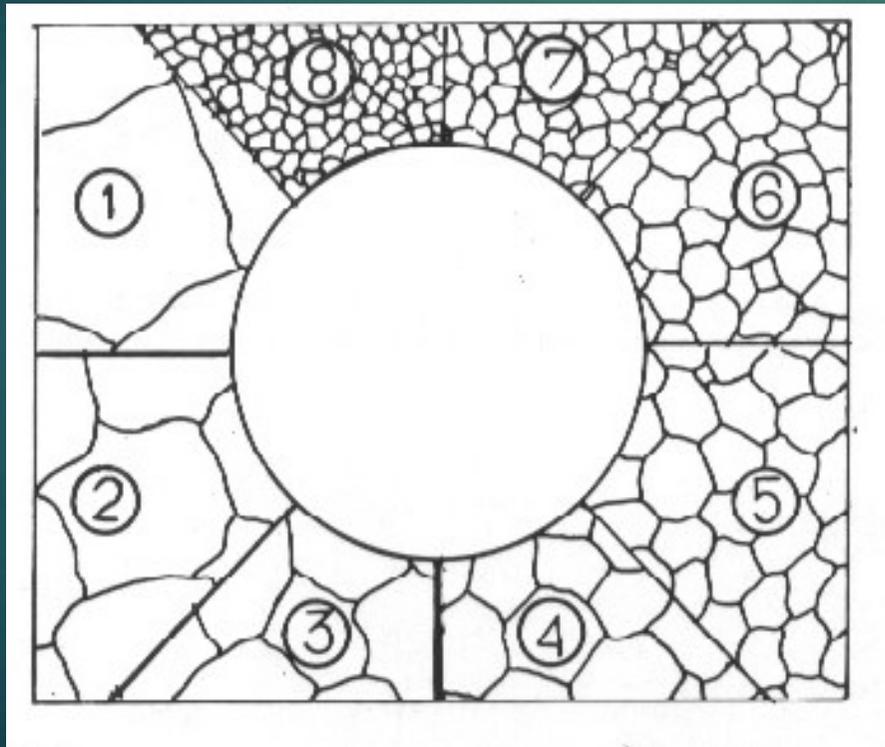
$$N = 2^{n-1}$$

N = número médio de grãos por
polegada quadrada

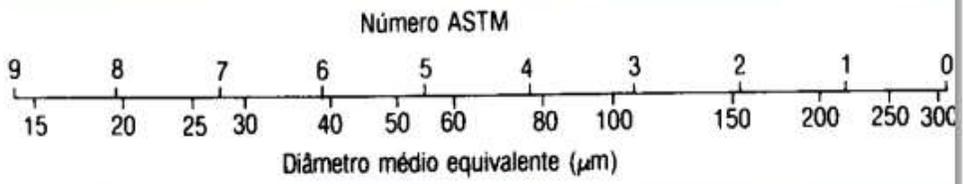
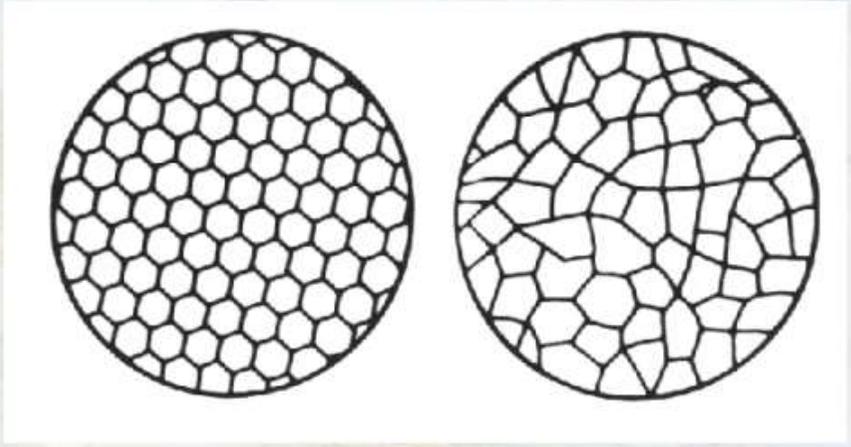
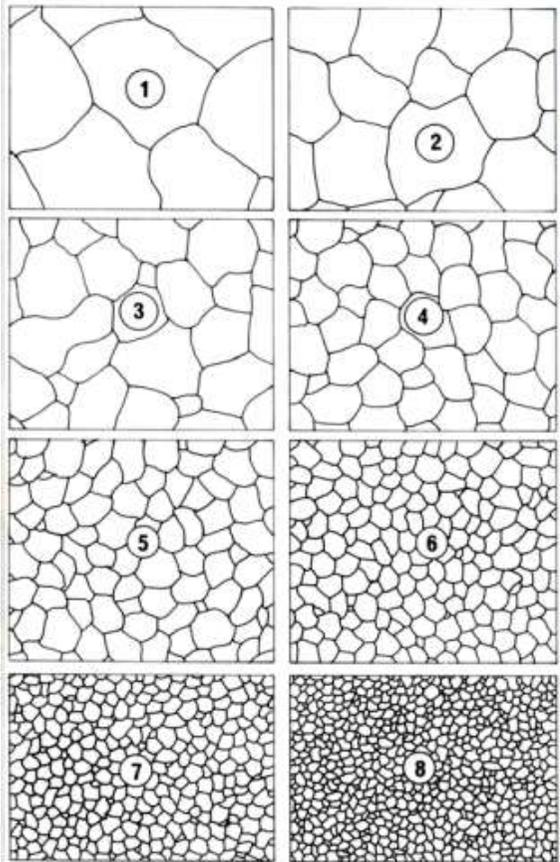
n = tamanho do grão

TG: Ocular para medida direta

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

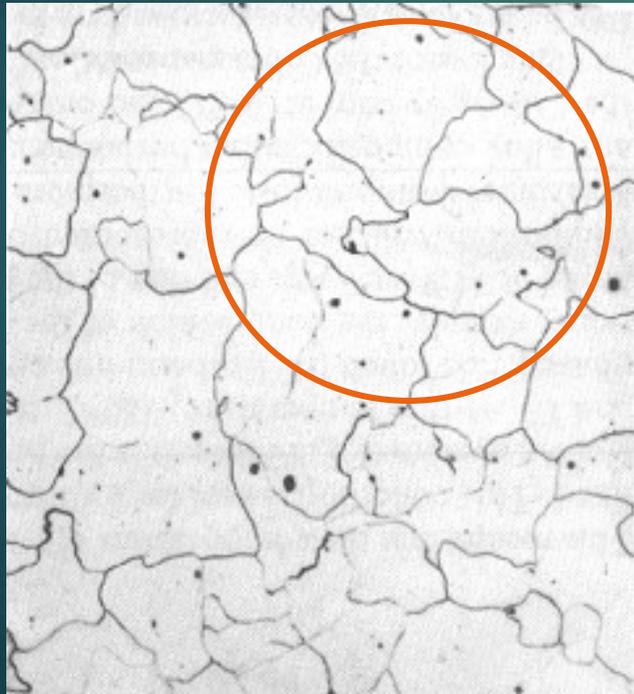


n, TAMANHO DE GRÃO	N, GRÃOS/POL²
1	1
2	2
3	4
4	8
5	16
6	32
7	64
8	128
9	256
10	512



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)



Tamanho do grão: Método planimétrico de Jefferies

Número de grãos equivalente

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

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

O número de grãos por unidade de área

Número de grãos por unidade de comprimento

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

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

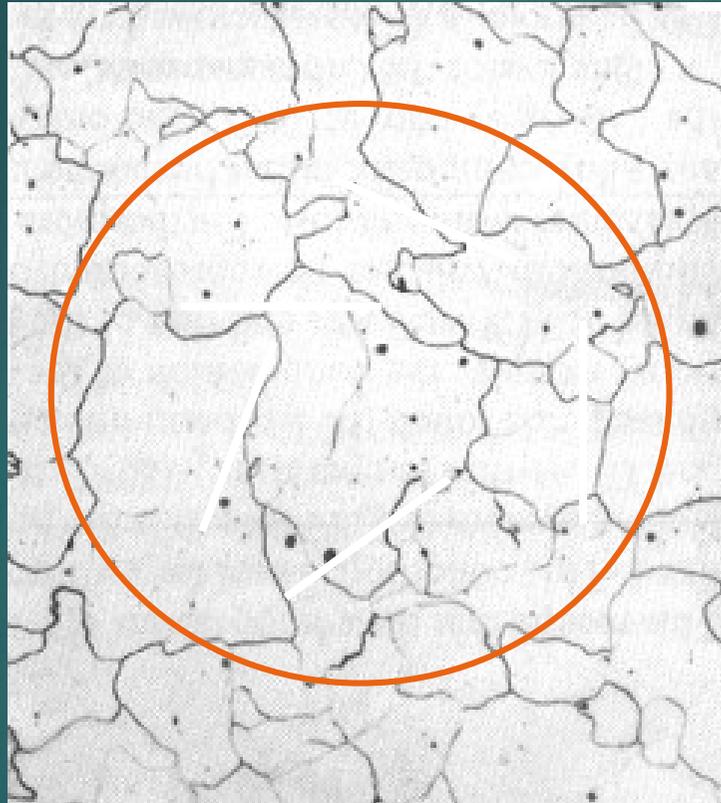
Diâmetro médio dos grãos

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:

$$D = 1/N_L$$

Tamanho do grão: Método da interceptação linear de Heyn



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

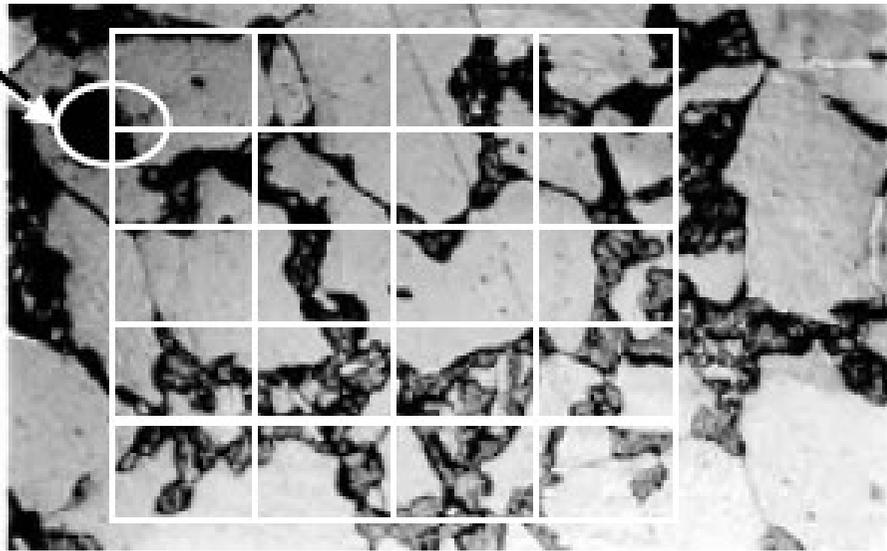
MEDIDA DA PROPORÇÃO DE FASE

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.

MEDIDA DA PROPORÇÃO DE FASE

Intercepto



MEDIDA DA PROPORÇÃO DE FASE

São avaliadas três possíveis situações:

O intercepto está totalmente sobre uma fase
(+1)

O intercepto não está sobre uma fase (+0)

O intercepto está parcialmente sobre a fase
(+0,5)

MEDIDA DA PROPORÇÃO DE FASE

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

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



[https://www.youtube.com/watch?v=s0
HRzfk7d8M](https://www.youtube.com/watch?v=s0HRzfk7d8M)