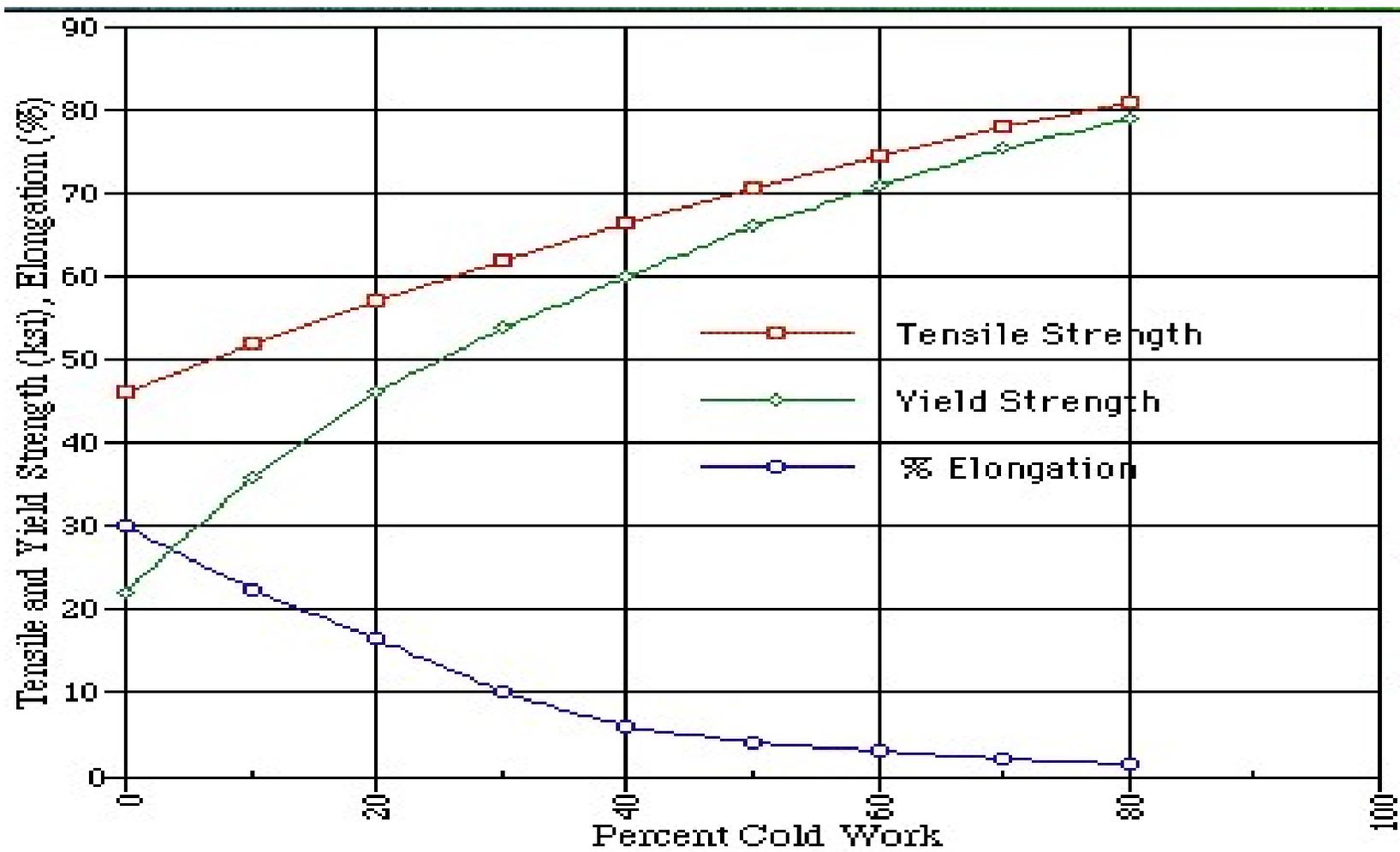




# DEFORMAÇÃO PLÁSTICA

Materiais Metálicos

Profa. Dra. Lauralice Canale





## Trabalho a frio

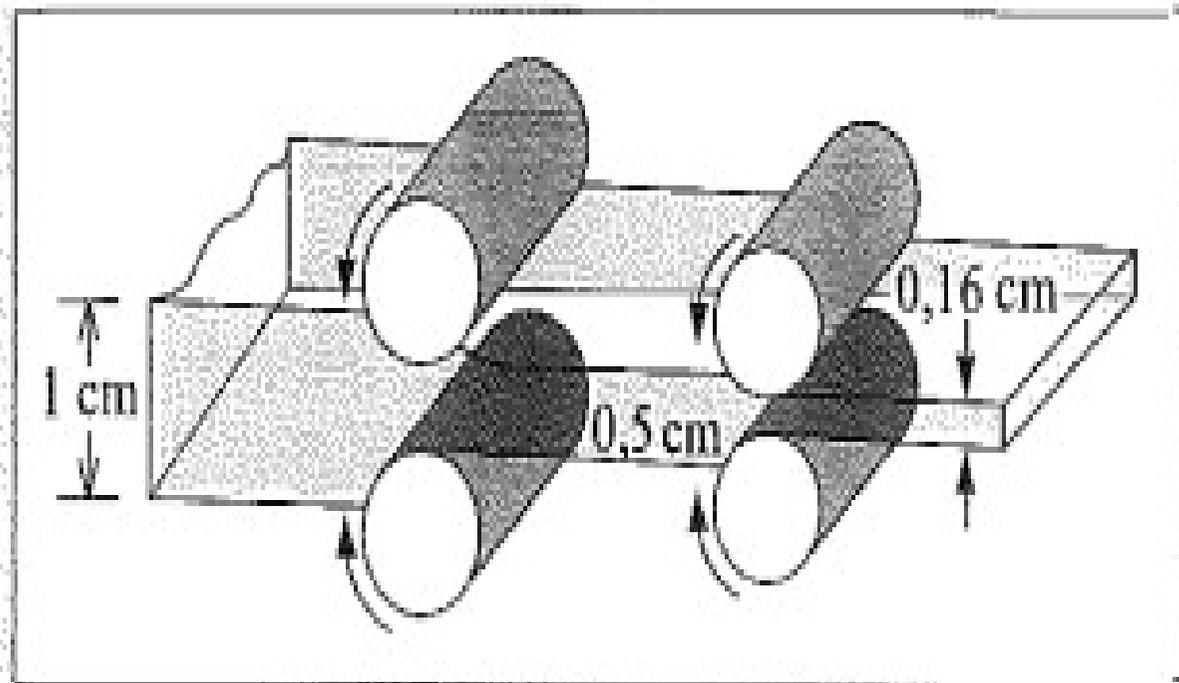
$$\%TF = [(A_o - A_f) / A_o] \times 100$$

$A_o$  = Seção transversal original do metal

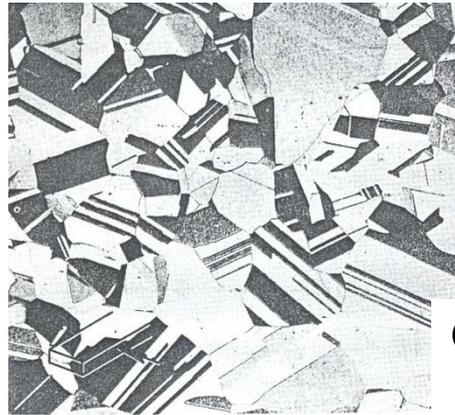
$A_f$  = Seção transversal após a deformação

**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.

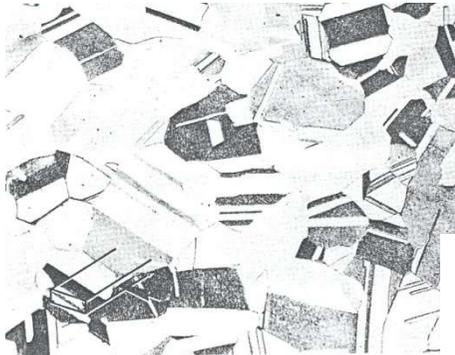
Uma placa de cobre de 1 cm de espessura é diminuída para 0,50 cm por trabalho a frio e posteriormente diminuída para 0,16 cm. Determine o trabalho a frio percentual total e a resistência à tração da placa de 0,16 cm



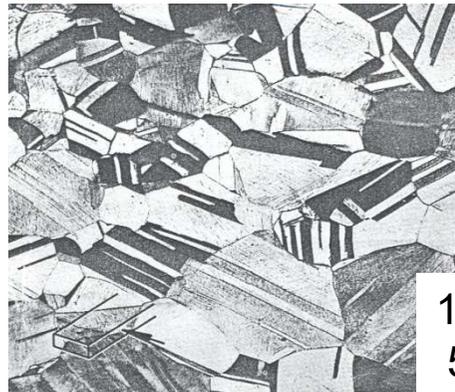
# Efeito do encruamento sobre a Resistência à Tração



Original  
43 kpsi



6% red.  
49 kpsi



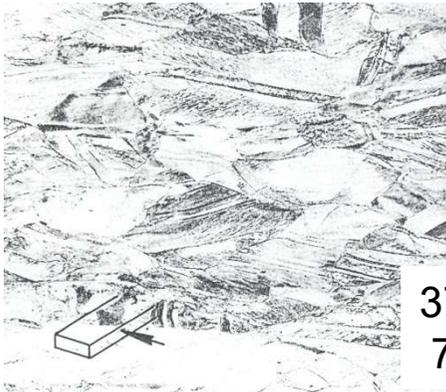
11% red.  
54 kpsi



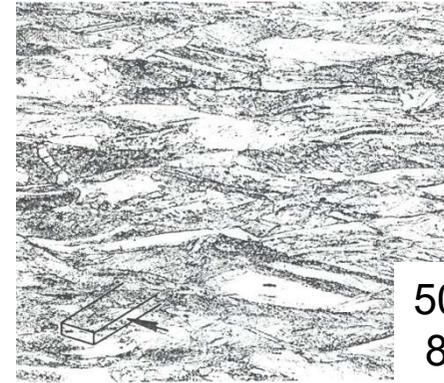
21% red.  
62 kpsi



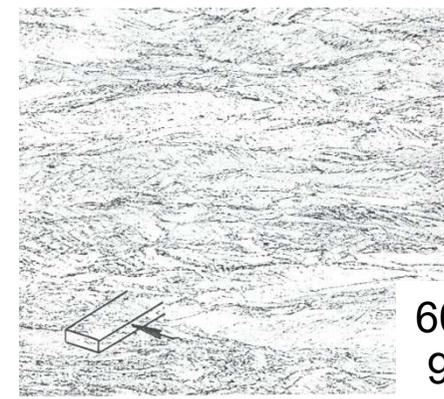
29% red.  
69 kpsi



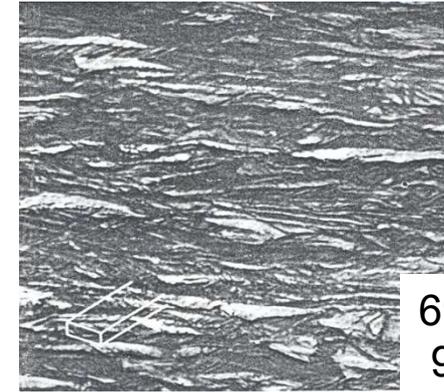
37% red.  
76 kpsi



50% red.  
86 kpsi



60% red.  
94 kpsi



69% red.  
99 kpsi



## **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)

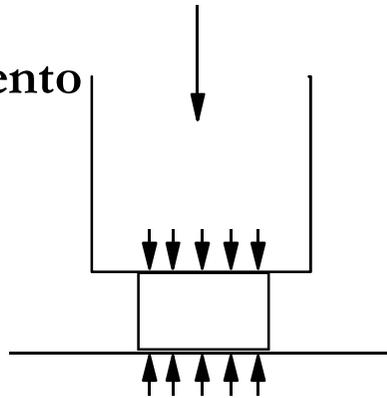


# DEFORMAÇÃO À FRIO

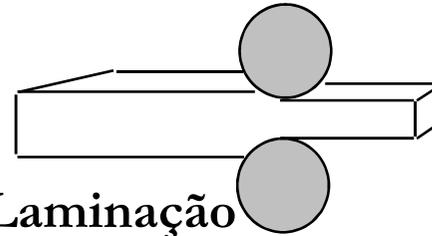
- Aumenta a dureza e a resistência dos materiais, mas a ductilidade diminui
- Permite a obtenção de dimensões dentro de tolerâncias estreitas
- Produz melhor acabamento superficial

# TIPOS DE CONFORMAÇÃO

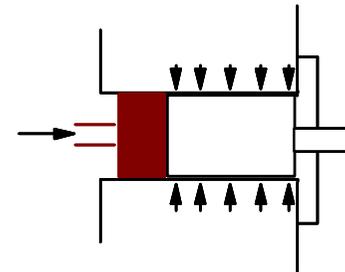
Forjamento



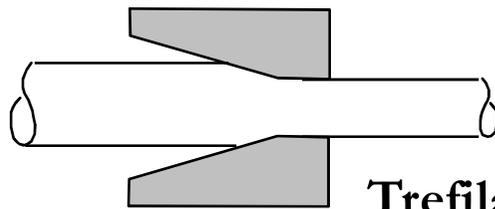
Laminação



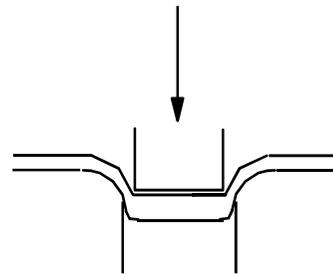
Extrusão



Trefilação



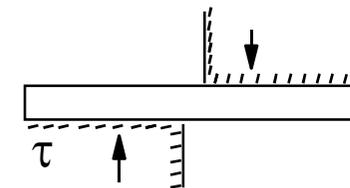
Embutimento Profundo



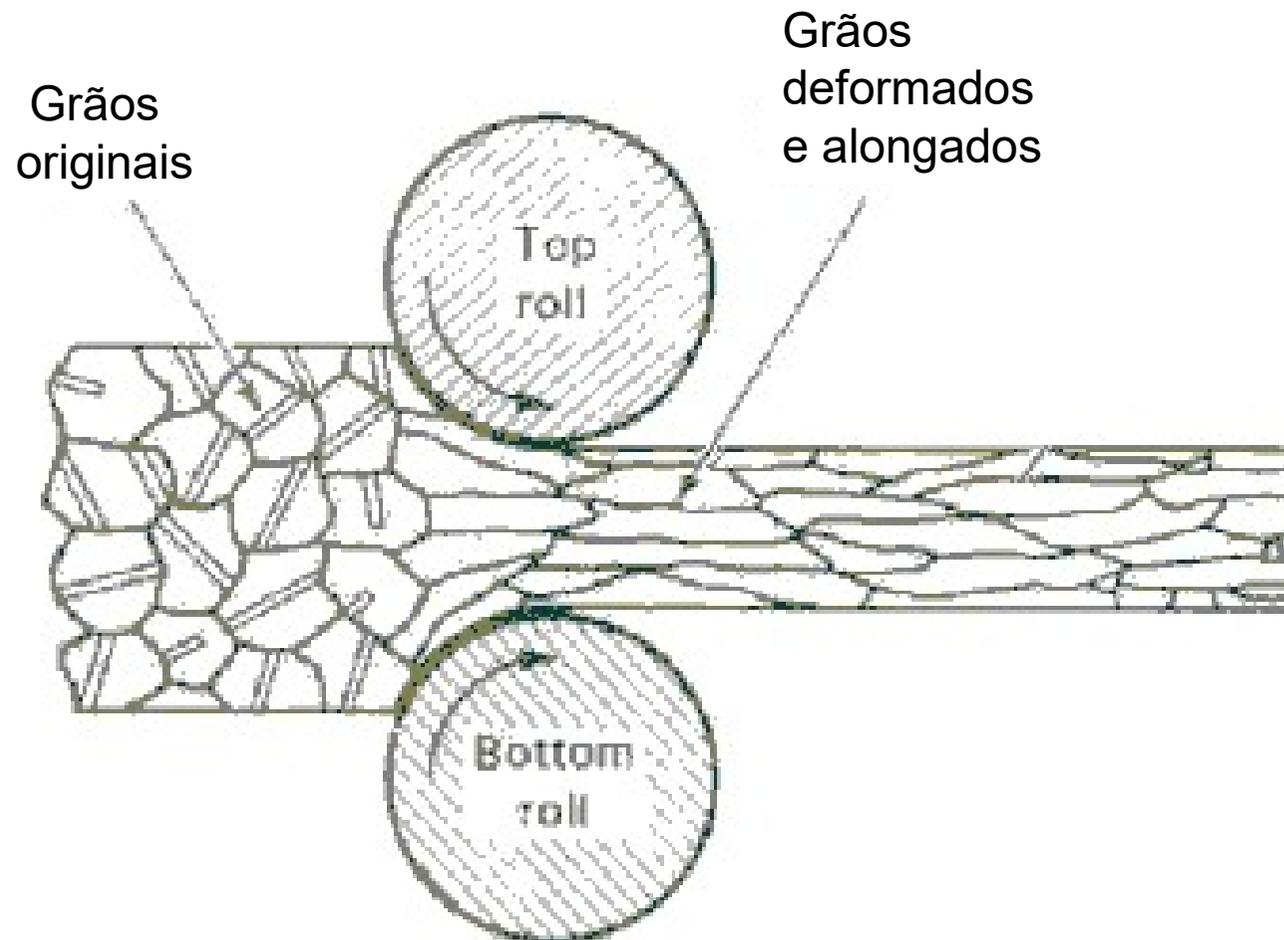
Estiramento



Cisalhamento



# MECÂNICA DA LAMINAÇÃO

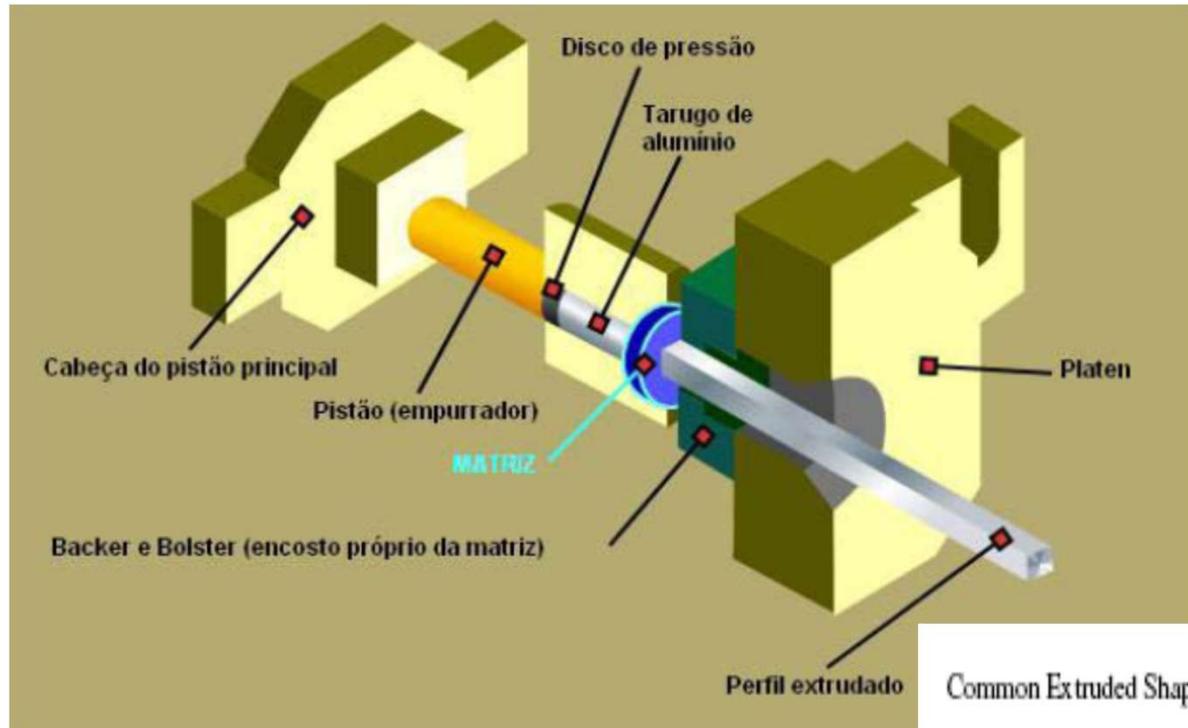


# LAMINAÇÃO A FRIO

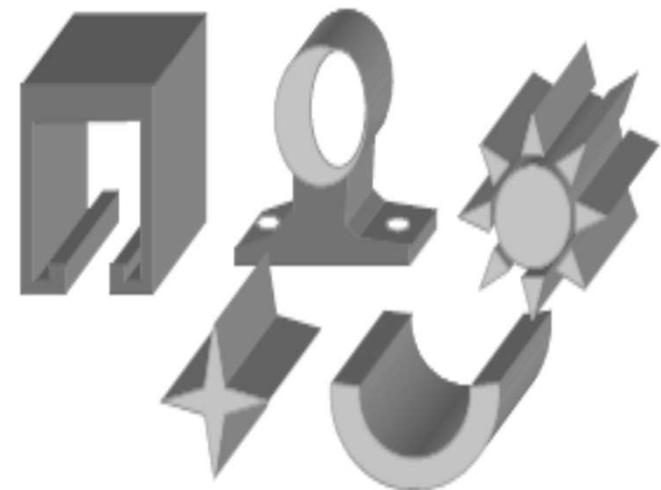


Laminador Tiras à Frio - USIMINAS

# EXTRUSORA

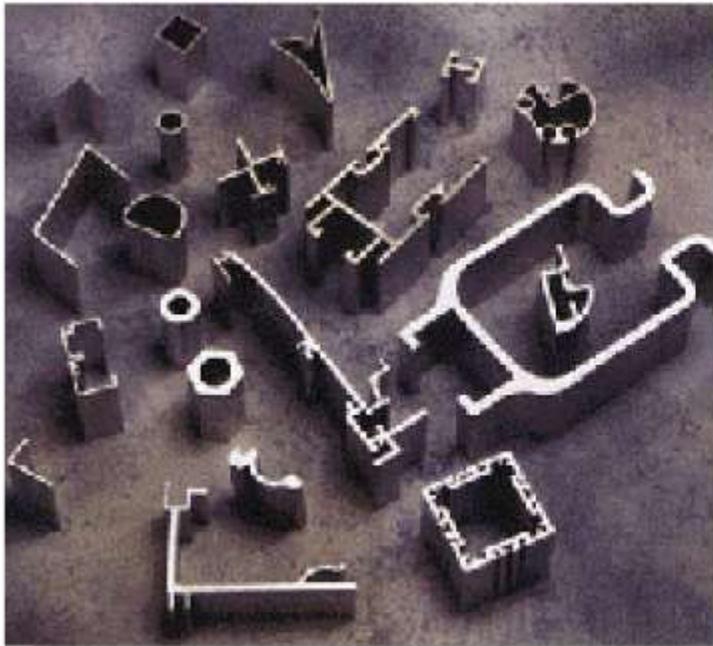


Common Extruded Shapes:

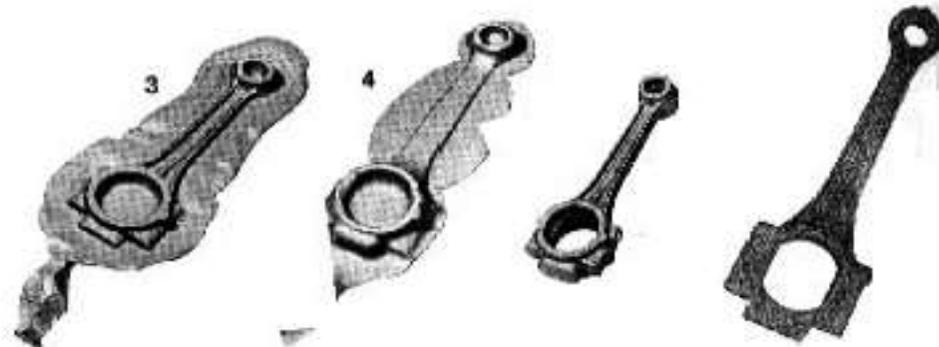
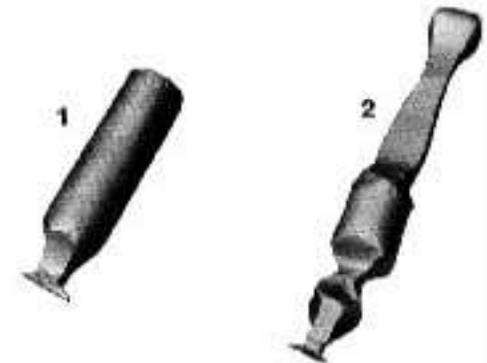
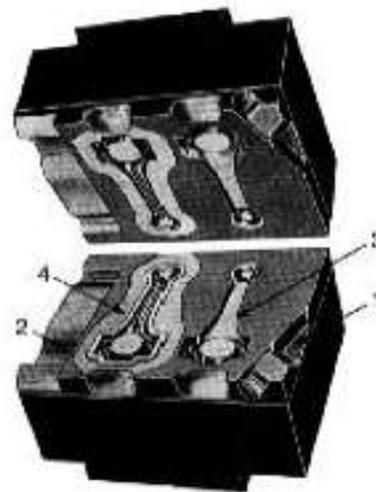
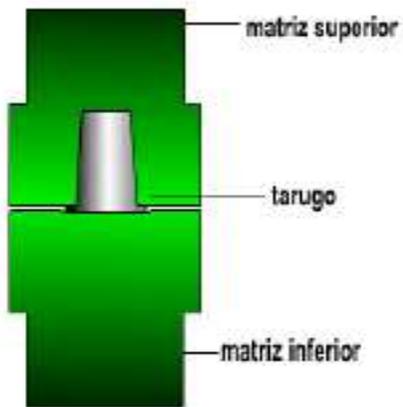
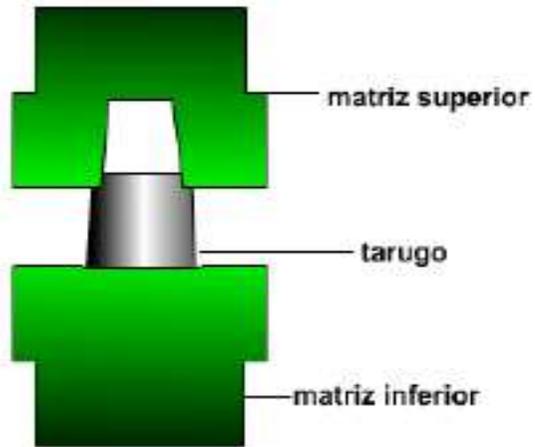


Process parameters:

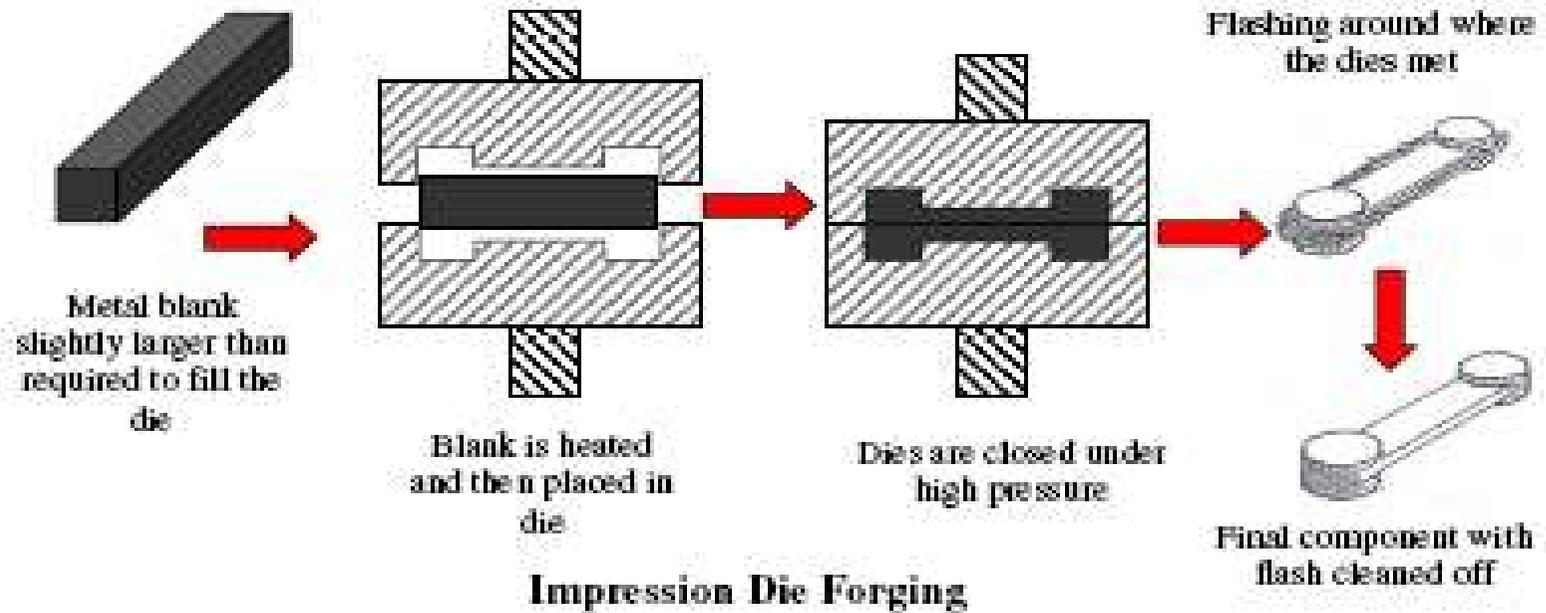
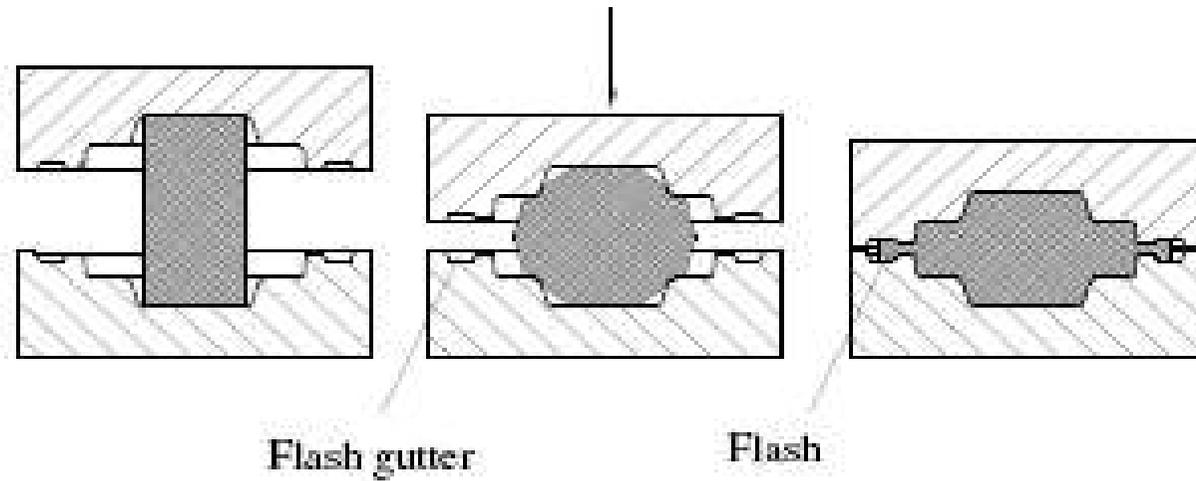
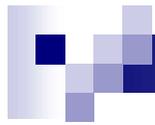
# EXTRUSÃO – PRODUTOS E PERFIS

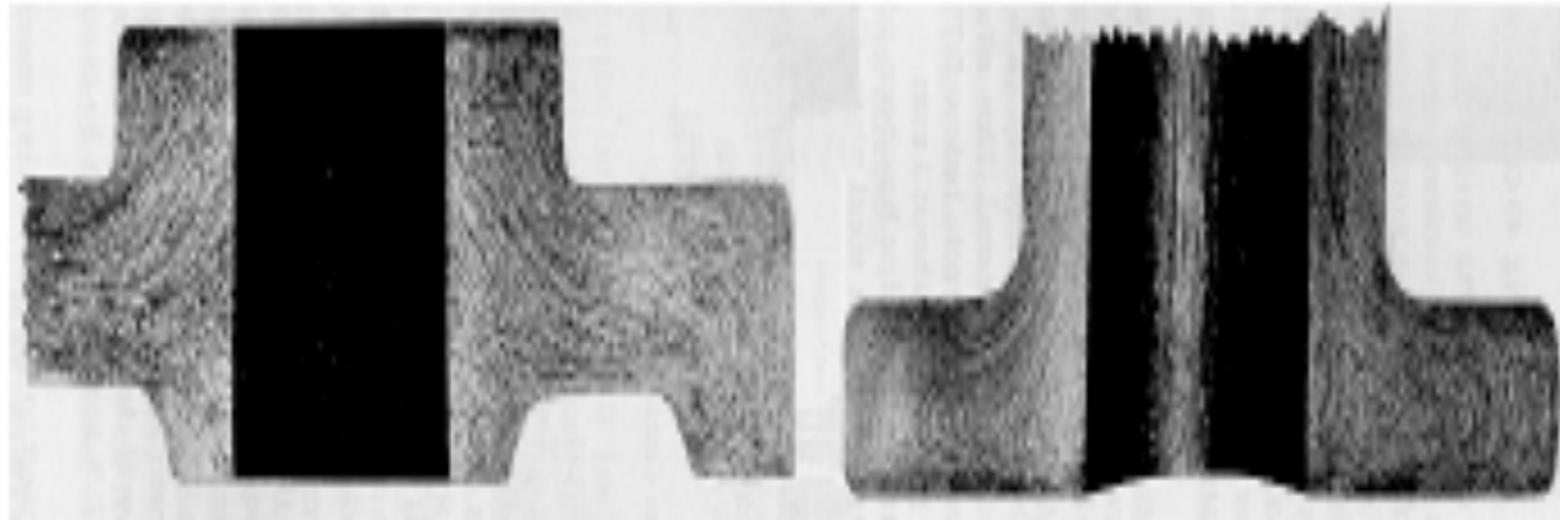


# FORJAMENTO



MATRIZ FECHADA C/ REBARBA



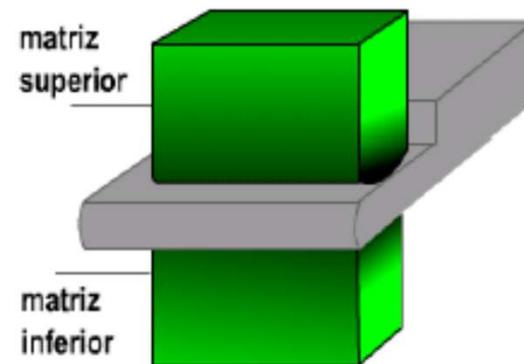
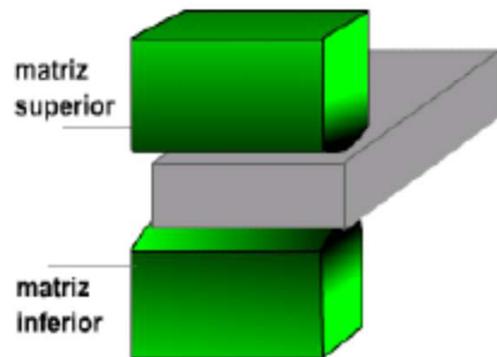


Aligned fibre structure of forgings

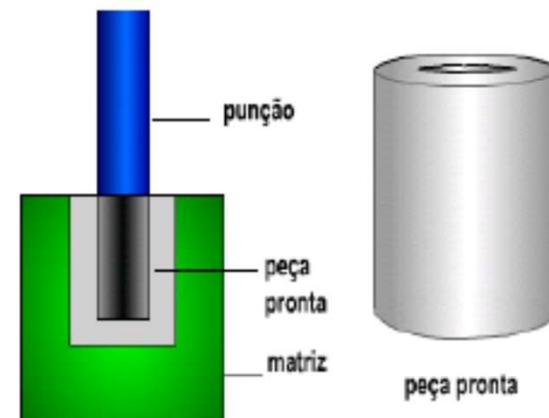
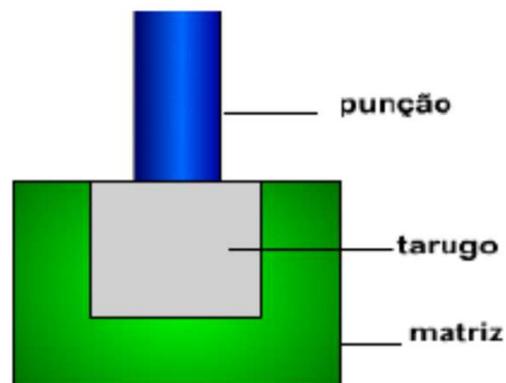
# FORJAMENTO - PRODUTOS



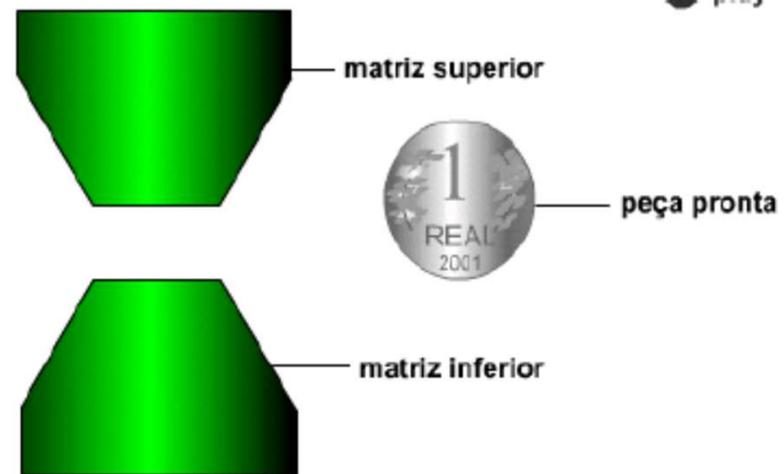
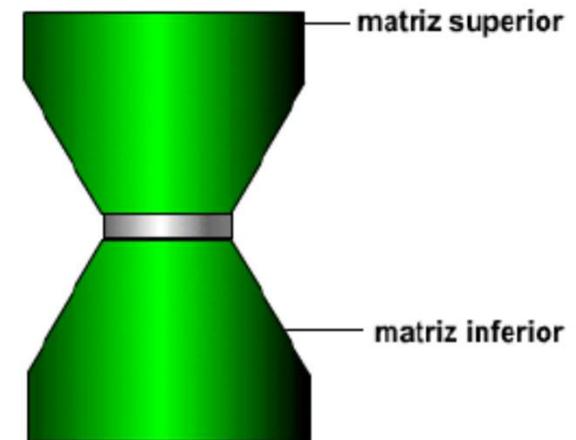
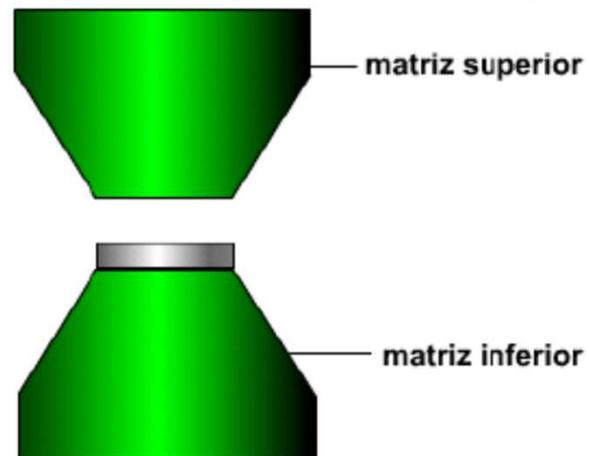
## ■ Alargamento



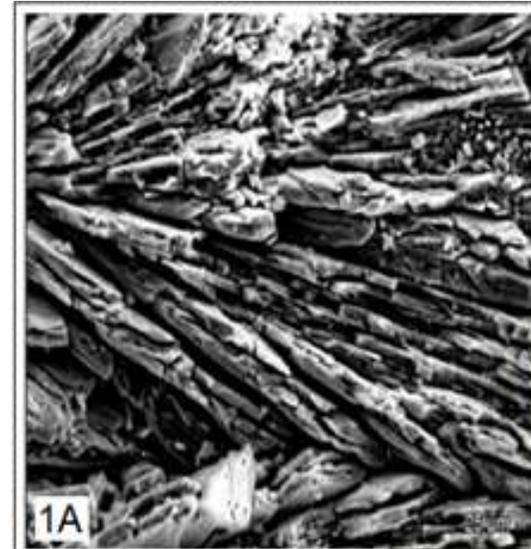
## ■ Furação



## ■ Cunhagem



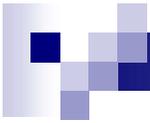
# TREFILAÇÃO



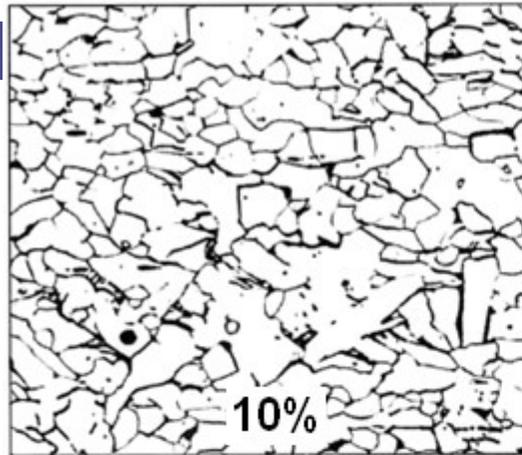
*Phosphate Crystals  
on the Surface.*

# TREFILAÇÃO - PRODUTOS

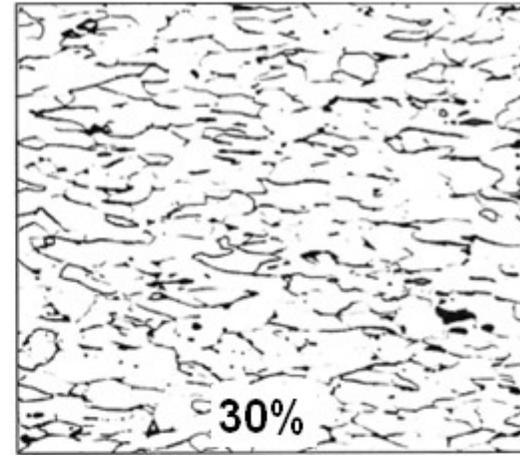




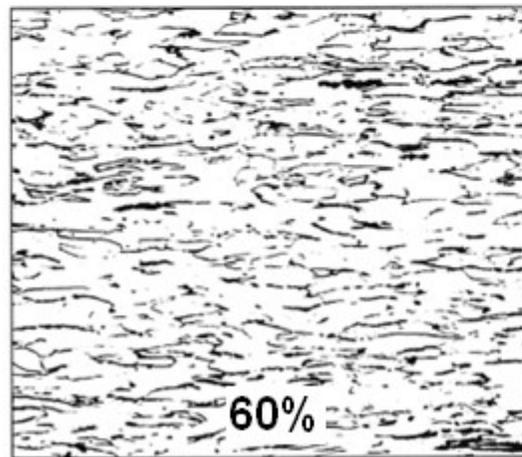
Conformação  
Matriz Para Corte e Perfuração  
Progressivos



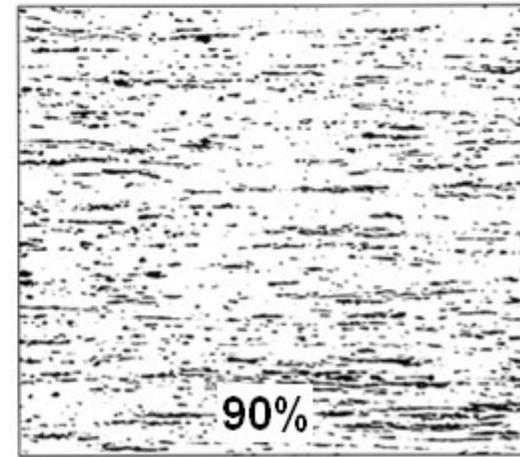
(a)



(b)



(c)



(d)

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

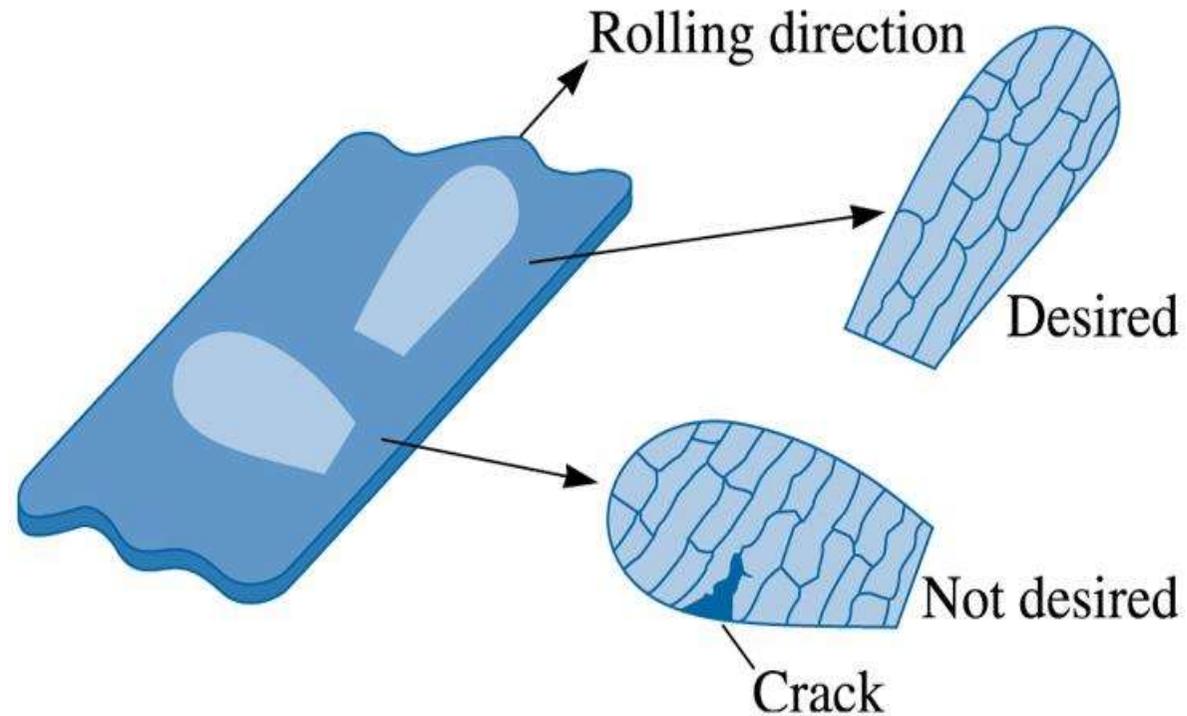
**Forma-se uma textura.**



# 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



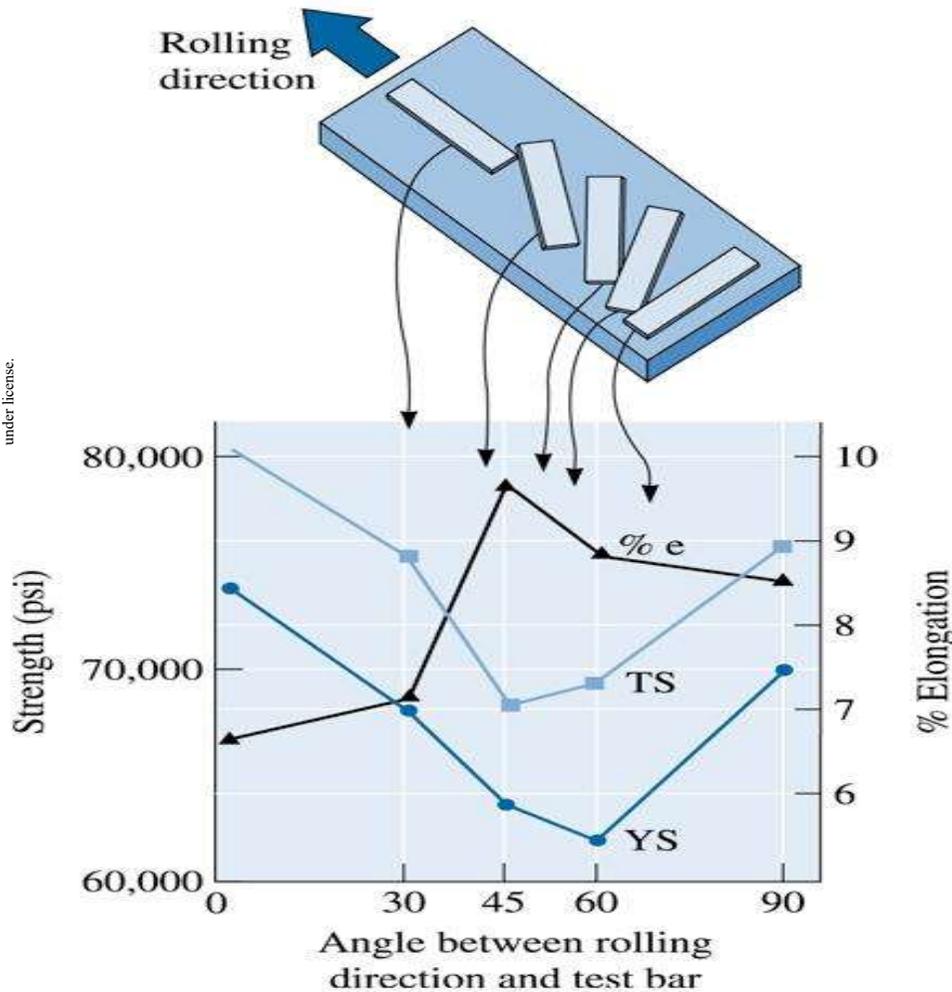
©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning, is a trademark used herein under license.

**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)

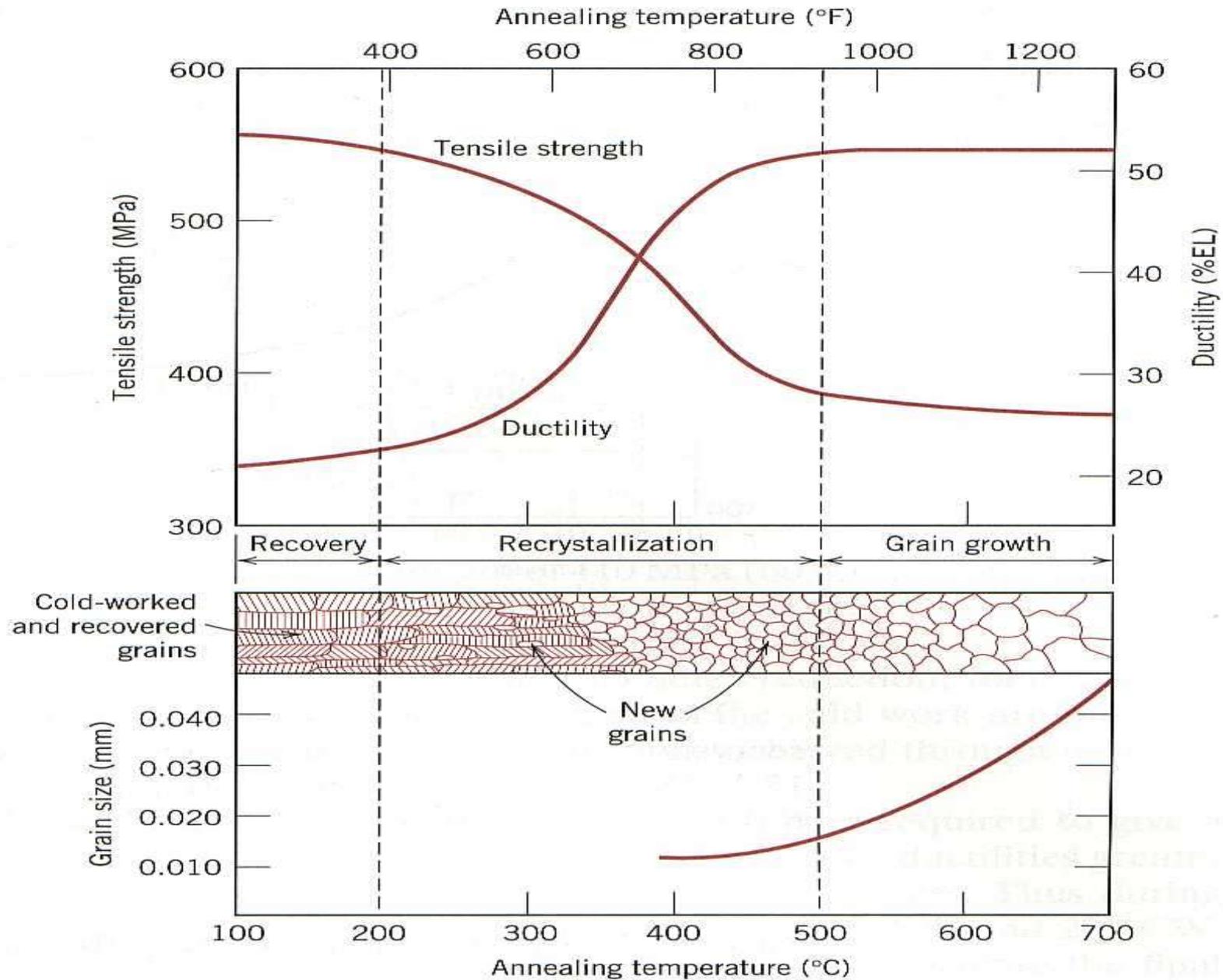
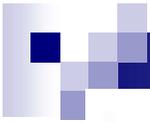
- Se os metais deformados plasticamente forem submetidos a um aquecimento controlado, este aquecimento fará com que haja um rearranjo dos cristais deformados plasticamente, diminuindo a dureza dos mesmos



# 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 das mesmas
- Propriedades físicas como condutividade térmica e elétrica voltam ao seu estado original (correspondente ao material não-deformado)



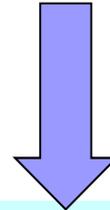
# RECRISTALIZAÇÃO

- Depois da recuperação, os grãos ainda estão tensionados
- Na recristalização os grão 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**



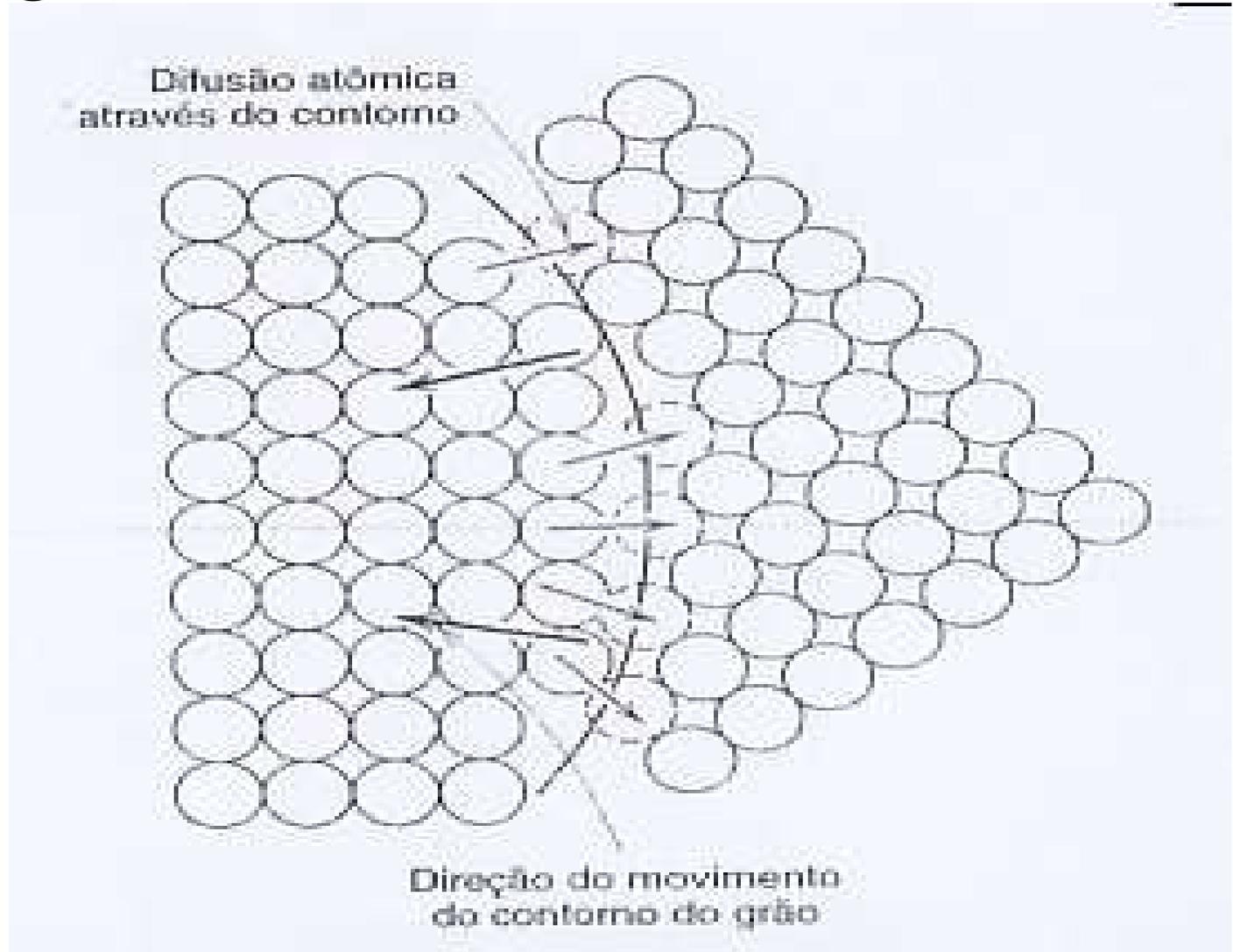
**Pode-se refinar o grão de uma liga monofásica mediante deformação plástica e recristalização**



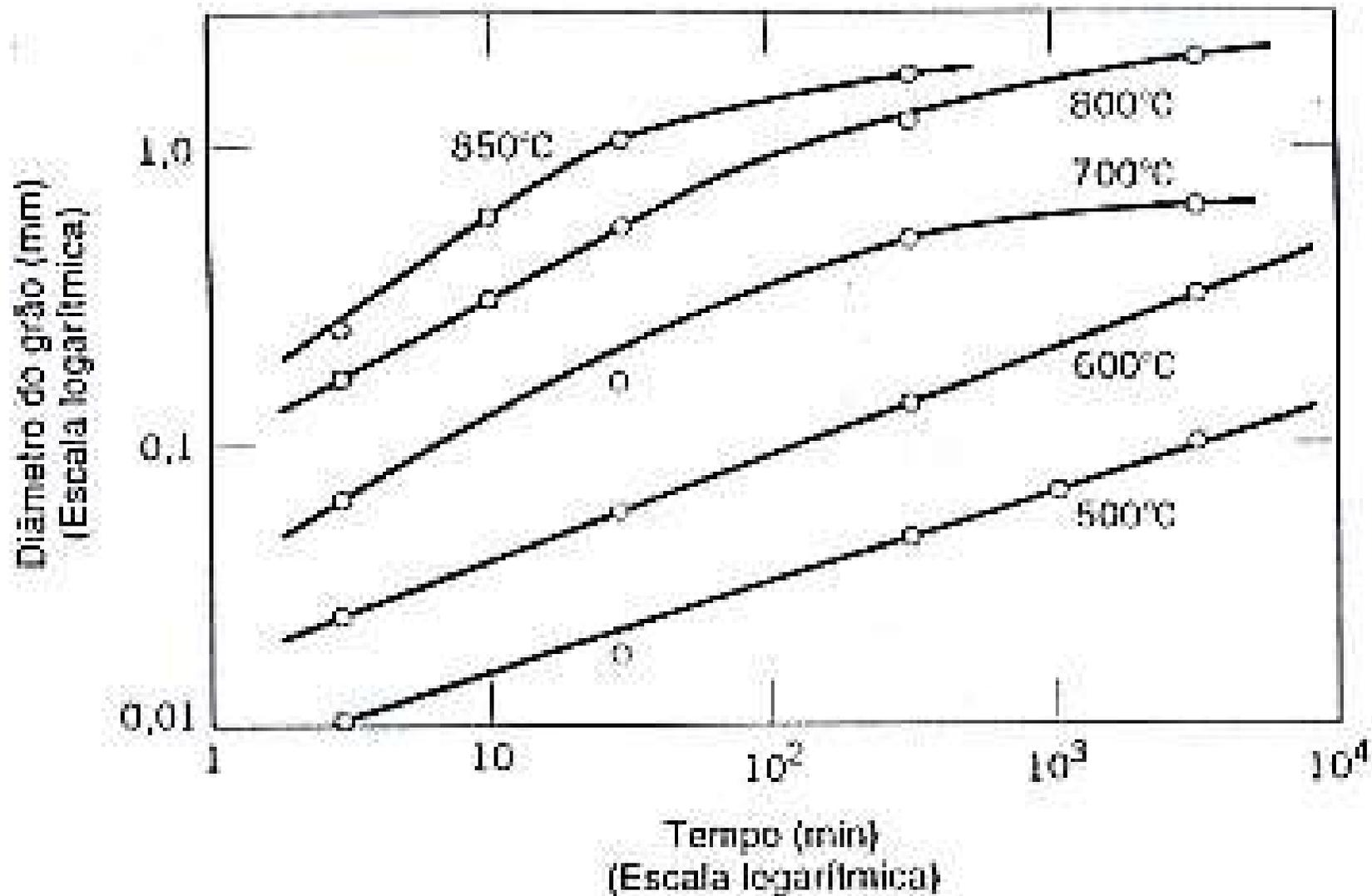
# CRESCIMENTO DE GRÃO

- 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



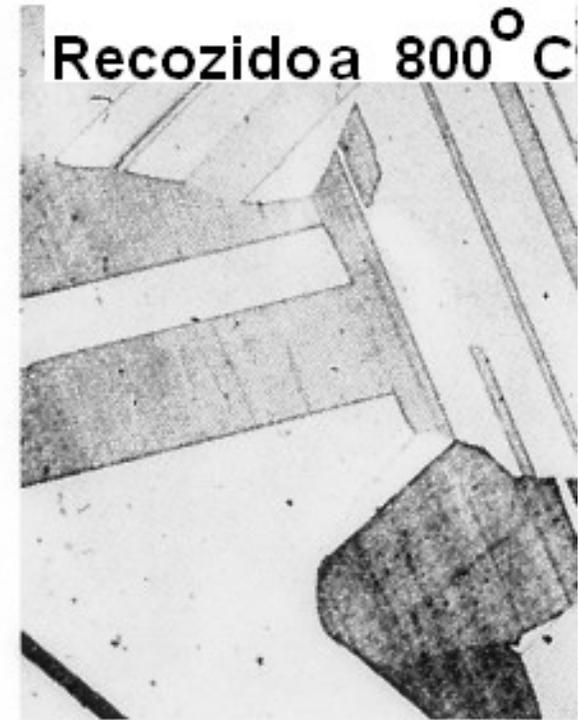
# CRESCIMENTO DE GRÃO



(a)



(b)



(c)

**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



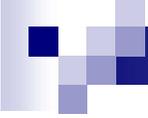
## Deformação crítica: 10%

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.

**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

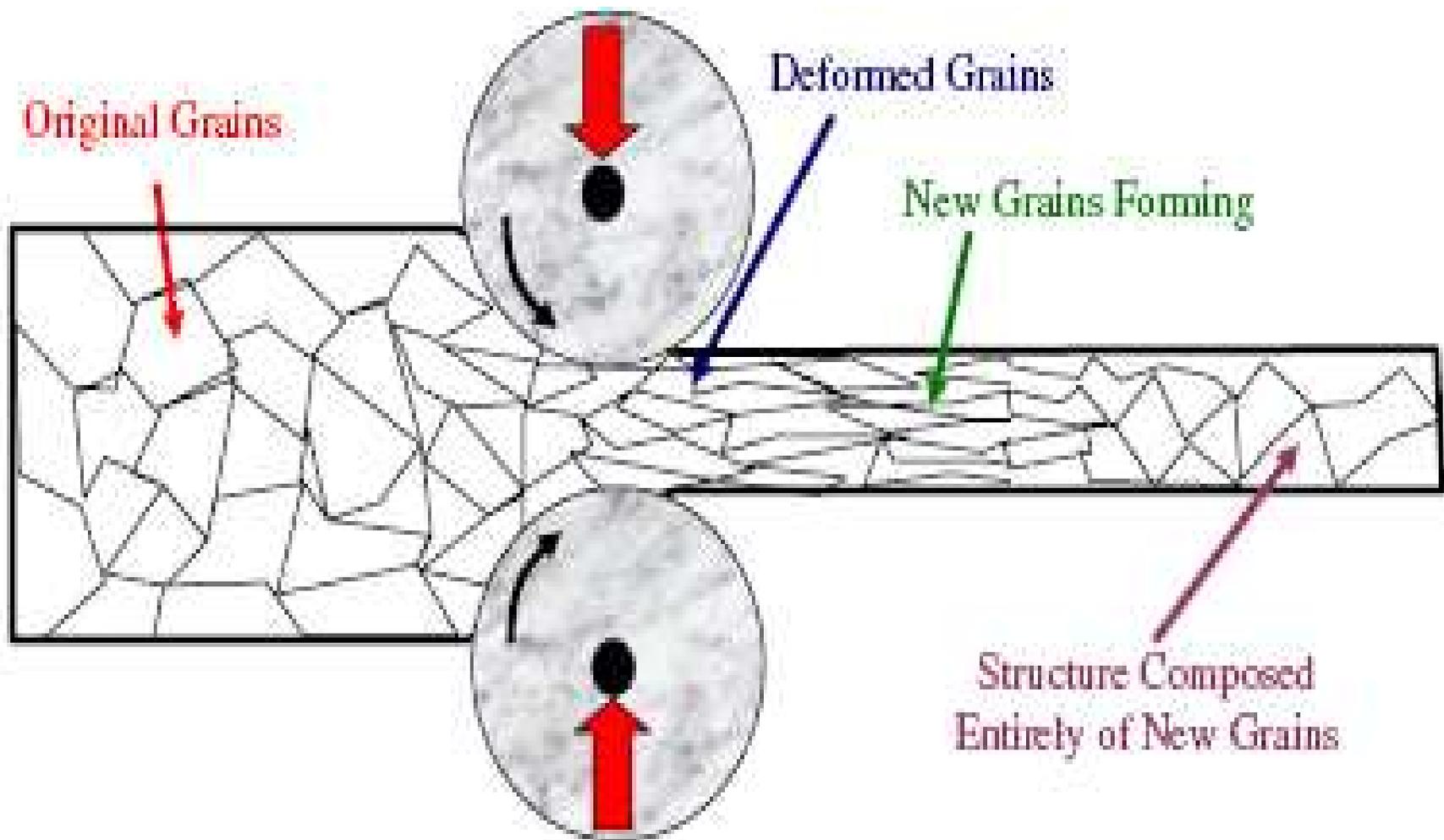
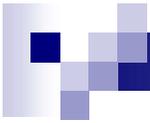
- Permite o emprego de menor esforço mecânico para a mesma deformação (necessita-se então de máquinas de menor capacidade se comparado com o trabalho a frio).
- Promove o refinamento da estrutura do material, melhorando a tenacidade
- Elimina porosidades
- Deforma profundamente devido a recristalização



# 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

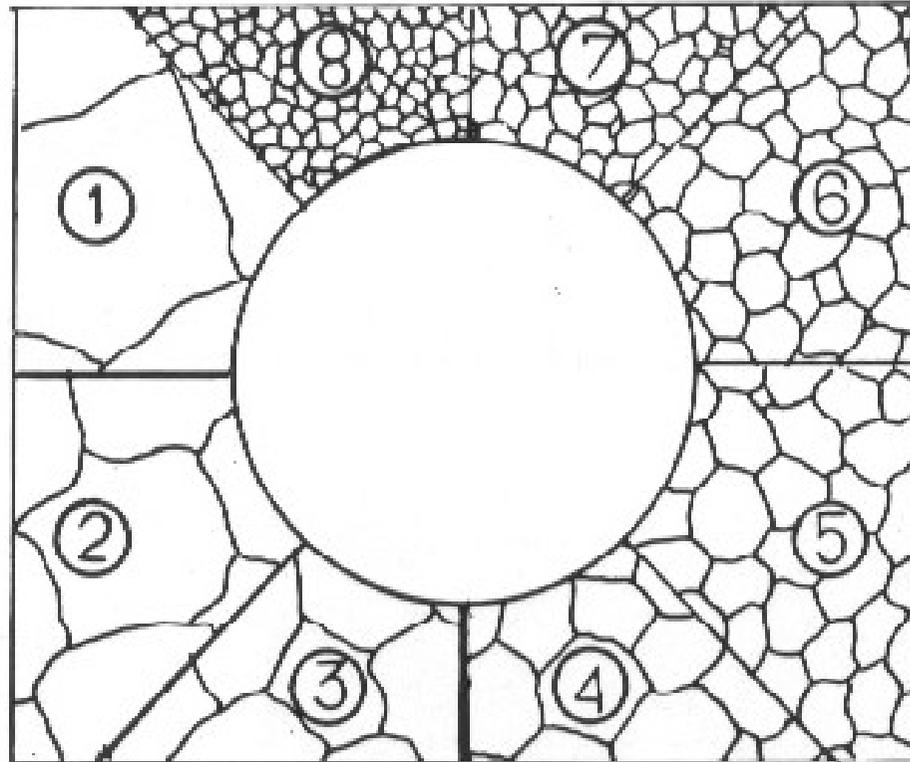
Aumento: x100

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

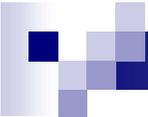
N = número médio de grãos por polegada quadrada

n = tamanho do grão

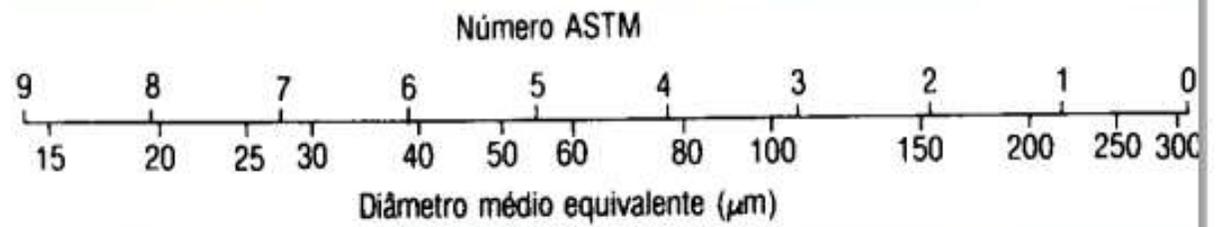
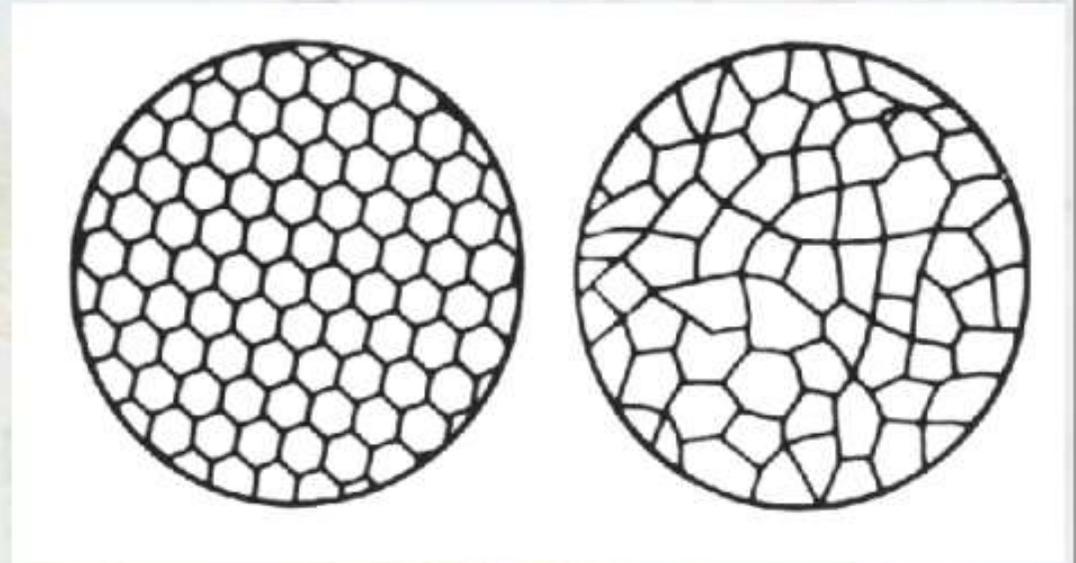
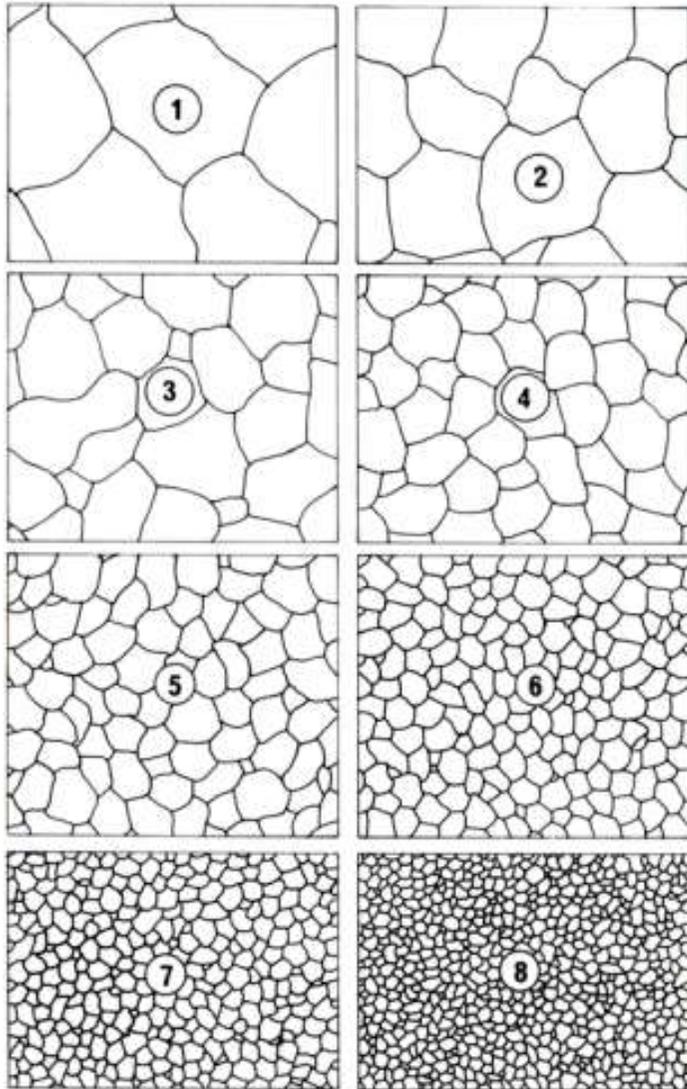
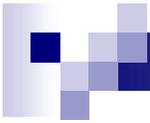
## TG: Ocular para medida direta



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

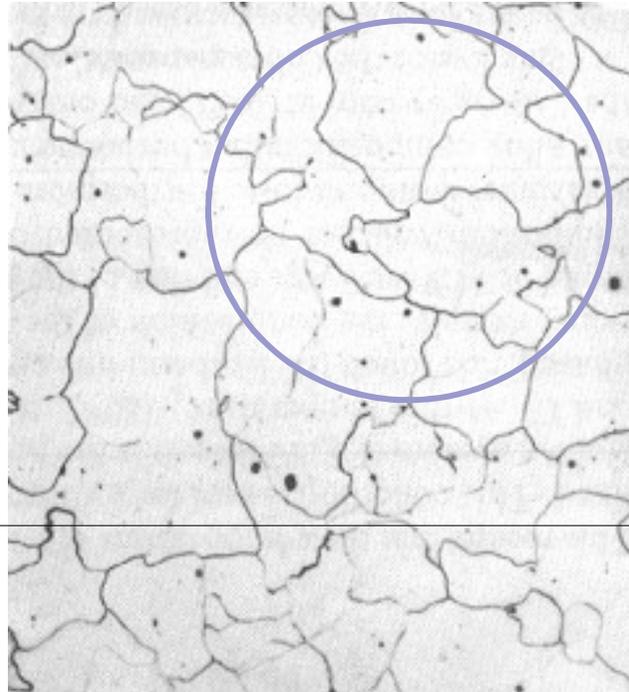


<b>n, TAMANHO DE GRÃO</b>	<b>N, GRÃOS/POL<sup>2</sup></b>
<b>1</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>16</b>
<b>6</b>	<b>32</b>
<b>7</b>	<b>64</b>
<b>8</b>	<b>128</b>
<b>9</b>	<b>256</b>
<b>10</b>	<b>512</b>



# 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  
equivalente

de grãos

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

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

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

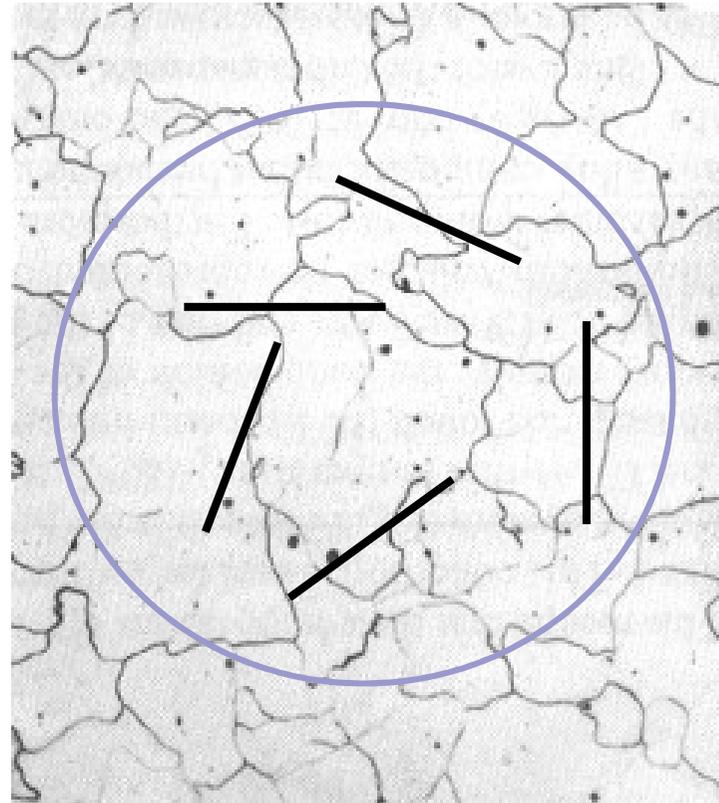


## Tamanho do grão: Método da interceptação linear de Heyn

- 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



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



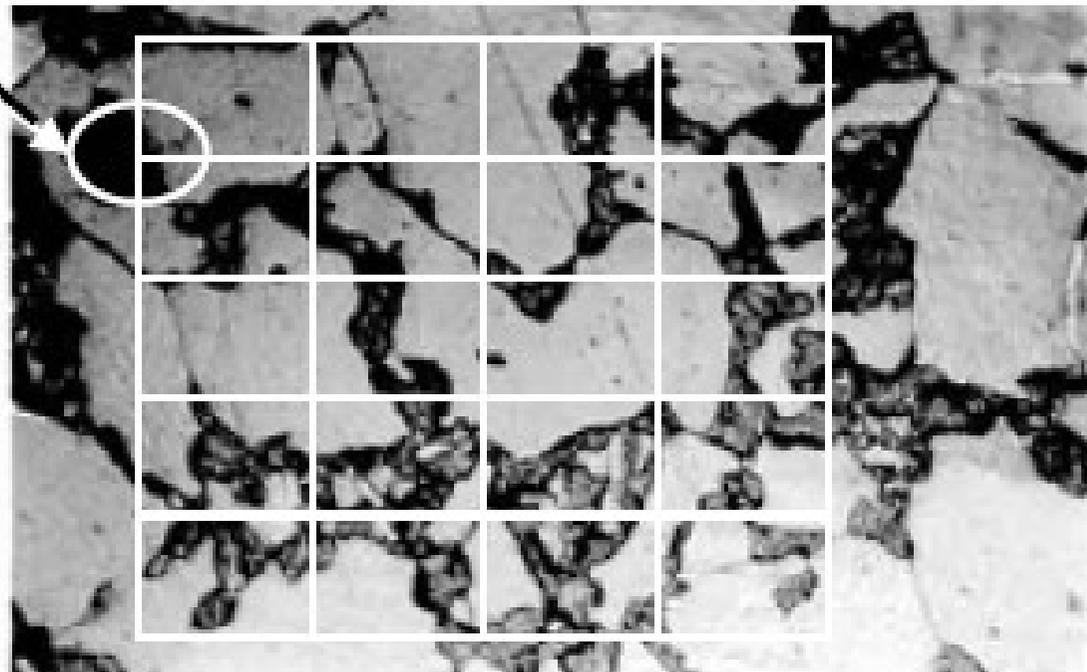
## MEDIDA DA PROPORÇÃO DE FASE

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

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  $i$

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