

# **Processamento de Materiais Metálicos I**

Aula 1

# Bibliografia Básica

- DIETER, G.E. **Metalurgia Mecânica**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.
- HELMAN, H. e CETLIN, P. R., **Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais**, Ed. Artliber, 2005.
- RODRIGUES, J. **Tecnologia Mecânica**. Volumes 1 e 2, Ed. Escolar, 2005.
- BRESCIANI FILHO, E. **Conformação Plástica dos Metais**. Volumes 1 e 2. Campinas: UNICAMP.
- ROWE, G.W. **Elements of Metalworking Theory**. Edward Arnold Publishers, 1979
- HONEYCOMBE, R.W.K. **The Plastic Deformation of Metals**. Edward Arnold Publishers, 1968.

# Bibliografia Complementar

- CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 1999.
- M P Groover. **Fundamentals of Modern Manufacturing** 4/e John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- Horiochi, L.N. **Materiais Metálicos**. Curso SENAI CIMATEL aula 3, 2010.

Internet:

[http://xa.yimg.com/kq/groups/24030724/1730564209/name/Aula+03\\_MM\\_Deforma%C3%A7%C3%A3os.ppt](http://xa.yimg.com/kq/groups/24030724/1730564209/name/Aula+03_MM_Deforma%C3%A7%C3%A3os.ppt)

[www.cimm.com.br](http://www.cimm.com.br)

<http://me.emu.edu.tr/majid/4.ppt>

# Tradicionais Processos de Fabricação

- Conformação Primária: fundição, extrusão por fusão, metalurgia do pó.  
⇒ Sem forma inicial e forma final bem definida.
- Usinagem: serra, torno, fresa, plaina, etc.  
⇒ A forma é obtida por remoção de material.
- Junção ou união:  
Metalúrgica: solda, brasagem  
Mecânica: rebites, acoplamento, etc.
- Tratamento do metal: Tratamento térmico; Tratamento superficial.  
⇒ sem mudança de forma, mas mudança nas propriedades e na aparência.
- Conformação Mecânica: Laminação, trefilação, forjamento, extrusão, etc.  
⇒ **O material é formado por deformação plástica.**

# **Vantagens da Conformação mecânica como um processo de fabricação**

- Pouca ou nenhuma geração de sucata
- Obtenção da forma final em curto espaço de tempo
- Melhores propriedades mecânicas e metalúrgicas (resistência, tenacidade, tamanho de grão, etc.)

# Características básicas dos processos de Conformação

- Alteram a geometria inicial (força x ferramenta);
- Trabalham a frio ou a quente (encruamento, recristalização, ductilidade, outros);
- Alteram as propriedades mecânicas;
- Agrega valor ( matéria prima em produto acabado);
- Possibilidade de utilização em outros processos de fabricação para obtenção da forma final do componente (Usinagem, soldagem, outros);
- Fatores limitadores: ductilidade do material a ser conformado, custos relacionados, tamanho, quantidade, tolerância, outros.

# Classificação Geral da Conformação dos Metais

Os processos conformação podem ser classificados de acordo com vários critérios:

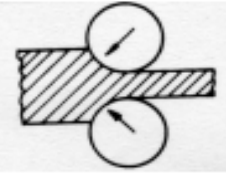

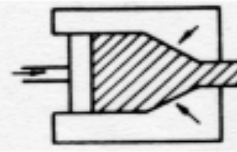
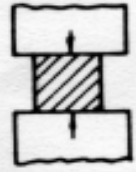
- Tipo de esforço predominante;
- Temperatura de trabalho;
- Forma do material trabalhado ou do produto final;
- Tamanho da região de deformação (localizada ou geral);
- Tipo de fluxo do material (estacionário ou intermitente);
- Tipo de produto obtido (semiacabado ou acabado).

## **Classificação quanto ao tipo de esforço predominante**

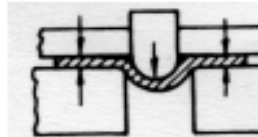
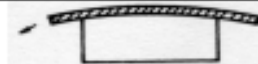

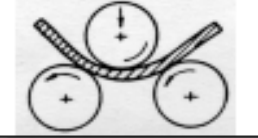
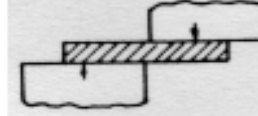
- Processo de conformação por compressão direta;
- Processo de conformação por compressão indireta;
- Processo de conformação por tração;
- Processo de conformação por cisalhamento;
- Processo de conformação por flexão.



# Operações Típicas de Conformação

Processo	Força preponderante	Trabalho		Ilustração	Semi-produtos ou produtos	
		A quente	A frio		Aços	Não ferrosos
Laminação	Compressão direta	x			Placas Chapas Barras Perfis	Placas Chapas Barras
			x		Chapas	
Trefilação	Compressão indireta		x		Barras Arame Fios	Barras Arame Fios Tubos
Extrusão	Compressão indireta	x			Tubos	Barras Tubos Perfis
			x		Peças pequenas extrudadas	Peças longas extrudadas
Forjamento	Compressão direta	x			Peças forjadas	
			x		Peças pequenas forjadas	

# Operações Típicas de Conformação

Processo	Força preponderante	Trabalho		Ilustração	Semi-produtos ou produtos	
		A quente	A frio		Aços	Não ferrosos
Estampagem (profunda)	Compressão indireta em parte	x			Peças grandes estampadas (a partir de placas)	
			x		Peças de chapas estampadas	
Estiramento de chapas	Tração		x		Peças de chapas estiradas	
Dobramento	Flexão	x	x		Peças de chapas e tiras dobradas	
Calandragem	Flexão		x		Tubos	
Corte	Cisalhamento	x	x		Peças cortadas de chapas ou pequenos diversos	

[Desenho: BRESCIANI, 1991]

# Definições

**Processos de deformação plástica:** operações que induzem mudança de forma numa peça por meio de forças aplicadas em várias ferramentas e matrizes.

## **Processos de deformação localizada**

Esses processos envolvem larga quantia de deformação plástica. A razão seção transversal área/volume é pequena. Para a maioria das operações, as condições a quente ou a morno são preferidas apesar de que algumas operações serem executadas à temperatura ambiente.

Ex. Laminação, extrusão, trefilação, forjamento

## **Processos de conformação de chapas**

Em operações de conformação de chapas o material está sujeito somente a mudança de forma, ou seja, o processo envolve deformação generalizada. A razão seção transversal área/volume é muito alta. São operações realizadas à frio.

Ex. Estampagem.

# Processo com deformação localizada

**Laminação:** Processo de compressão direta na qual a espessura de uma chapa é reduzida pela ação de espremer a peça entre rolos cilíndricos rotativos.

**Forjamento:** conformação por esforços compressivos tendendo a fazer o material assumir o contorno da ferramenta conformadora, chamada matriz ou estampo.

**Extrusão:** conformação por compressão indireta em o material trabalhado é forçado através de um matriz contendo a sua forma de seção final.

**Trefilação:** conformação por compressão indireta em que o diâmetro do fio ou da barra é reduzido puxando-se a peça através de uma ferramenta (Fieira ou trefila).

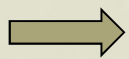
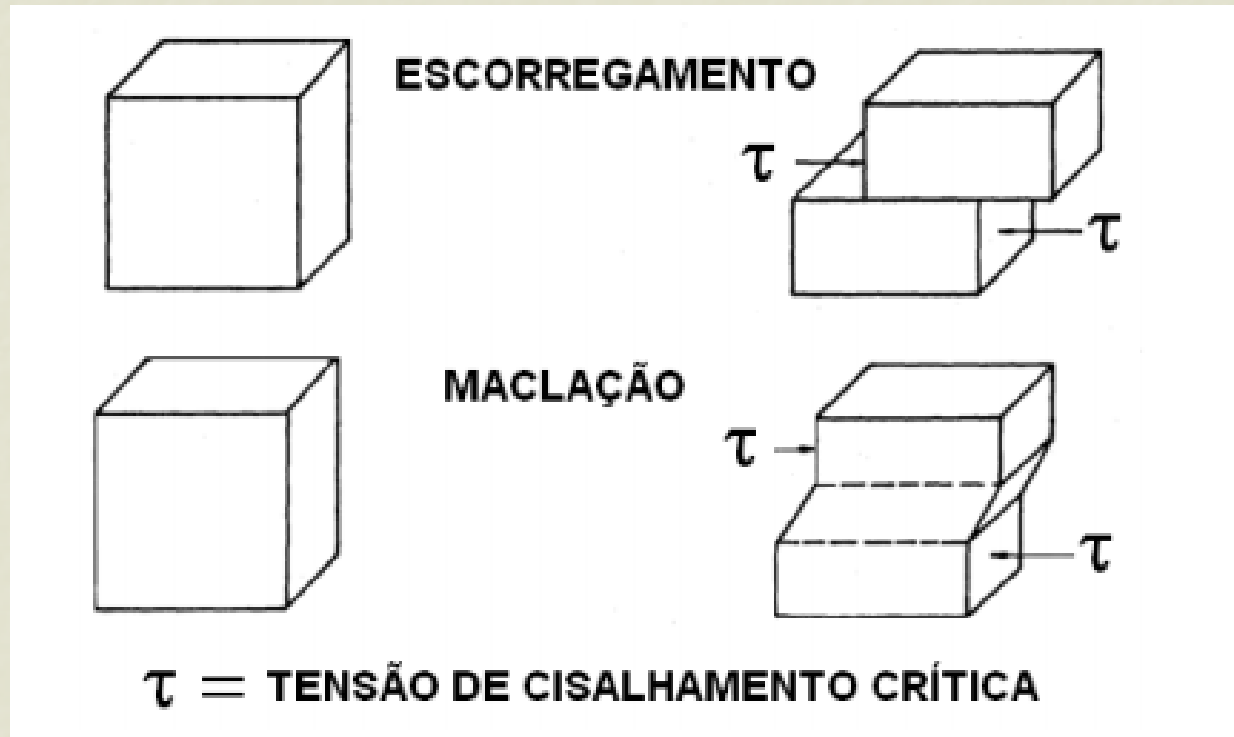
# Propriedades do Material na Conformação

- Propriedades desejáveis do material:
  - Baixa tensão de escoamento e alta ductilidade.
- Essas propriedades são afetadas pela temperatura:
  - Ductilidade aumenta e a tensão de escoamento diminui com o aumento da temperatura.
- Outros fatores a considerar:
  - Taxa de deformação e atrito.

# Deformação Plástica

- Após o limite elástico a deformação torna-se permanente ou seja passa-se para a fase plástica;
- Significado prático da deformação plástica:
  - 1) Conformação mecânica (fabricação);
  - 2) Comportamento em serviço.
- Processo de deformação plástica:
  - 1) Deformação por escorregamento;
  - 2) Deformação por maclação.

# Mecanismos de deformação plástica



O principal mecanismo de deformação plástica é o de escorregamento provocado pela movimentação de discordâncias

# Deformação plástica e discordâncias

- Em uma escala microscópica a deformação plástica é o resultado do movimento dos átomos devido à tensão aplicada. Durante este processo ligações são quebradas e outras refeitas;
- Nos sólidos cristalinos a deformação plástica geralmente envolve o escorregamento de planos atômicos, o movimento de discordâncias e a formação de maclas;
- Então, a formação e movimento das discordâncias têm papel fundamental para o aumento da resistência mecânica em muitos materiais. A resistência mecânica pode ser aumentada restringindo-se o movimento das discordâncias.



# Sistemas de Escorregamento do Cristal

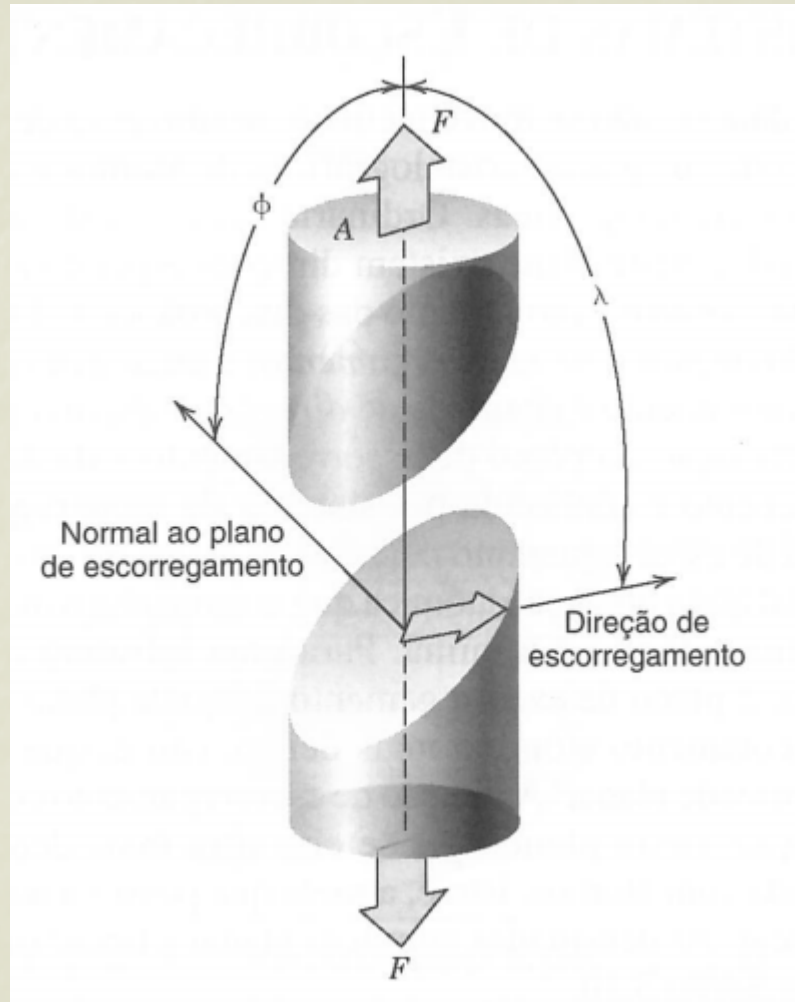
- 1) A direção de escorregamento coincide preferencialmente com as direções onde os átomos estão mais próximos, ou seja, com as direções de maior densidade atômica;
- 2) O plano de escorregamento é, também, preferencialmente o de maior densidade atômica;
- 3) O escorregamento ocorre segundo um sistema de escorregamento (planos e direções), onde é maior a tensão de cisalhamento decomposta.

# Deformação Plástica

## Deformação por escorregamento:

- Os metais cúbicos e suas ligas desordenadas deformam-se predominantemente por cisalhamento plástico, ou deslizamento, onde um plano de átomos desliza sobre o plano adjacente seguinte por cisalhamento.
- A tensão de cisalhamento necessária para produzir deslizamento em um determinado plano cristalino é denominada tensão crítica de cisalhamento.

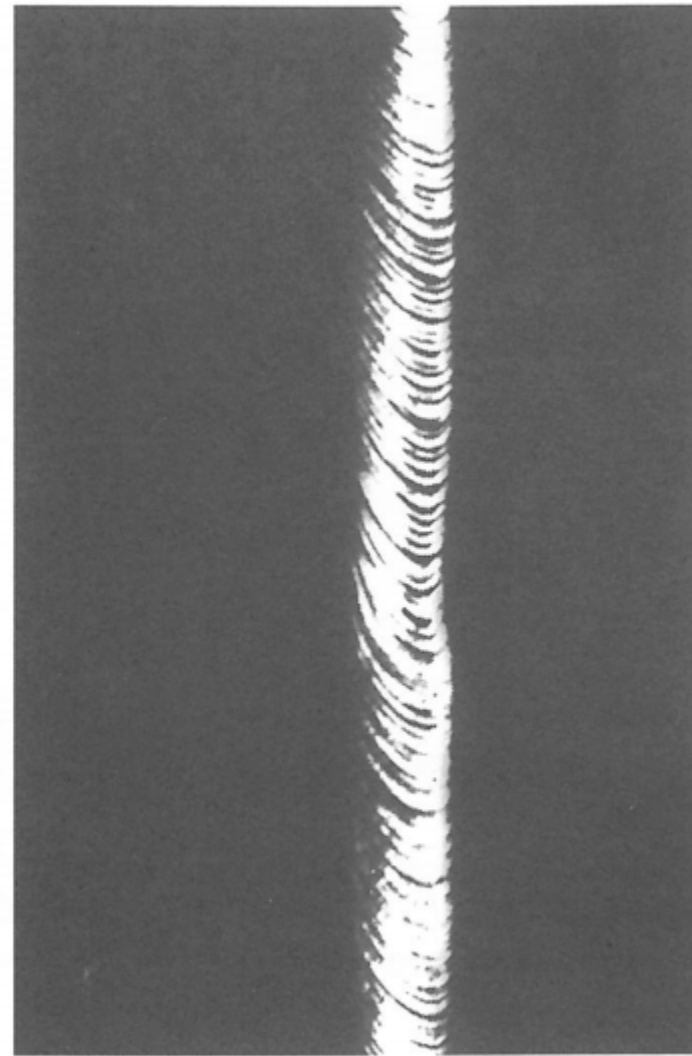
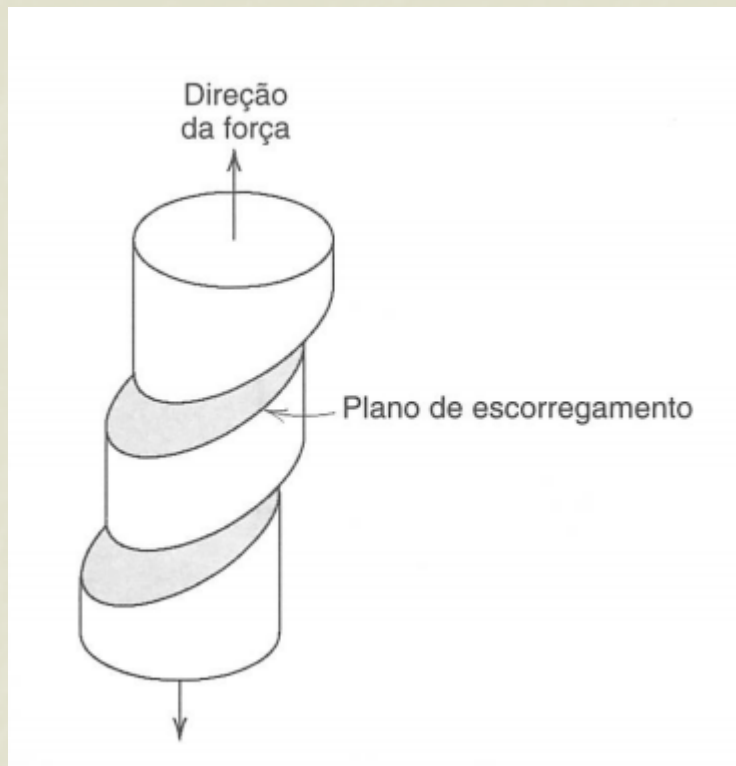
# Escorregamento em monocristais



$$\tau_R = \sigma \cos \phi \cos \lambda$$

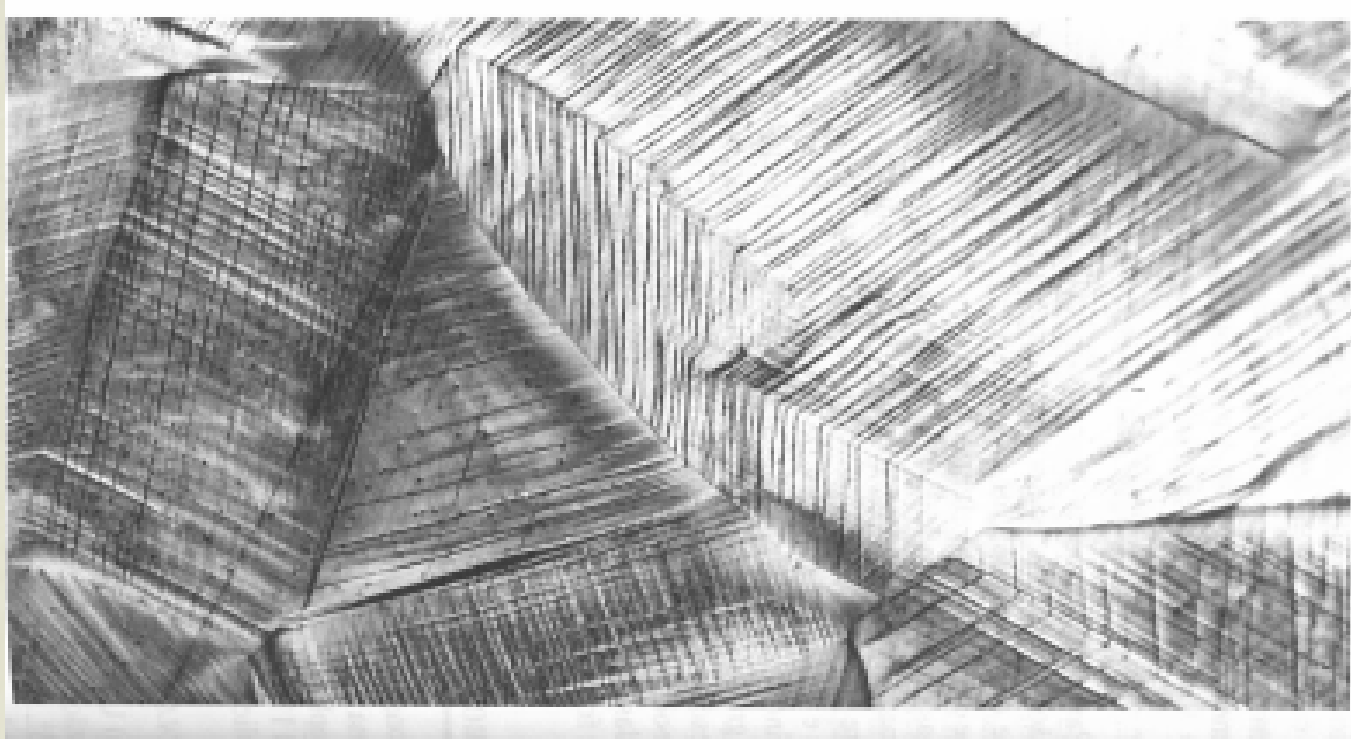
tensão de cisalhamento resolvida crítica

$$\tau_R(\text{máx}) = \sigma(\cos \phi \cos \lambda)_{\text{máx}}$$



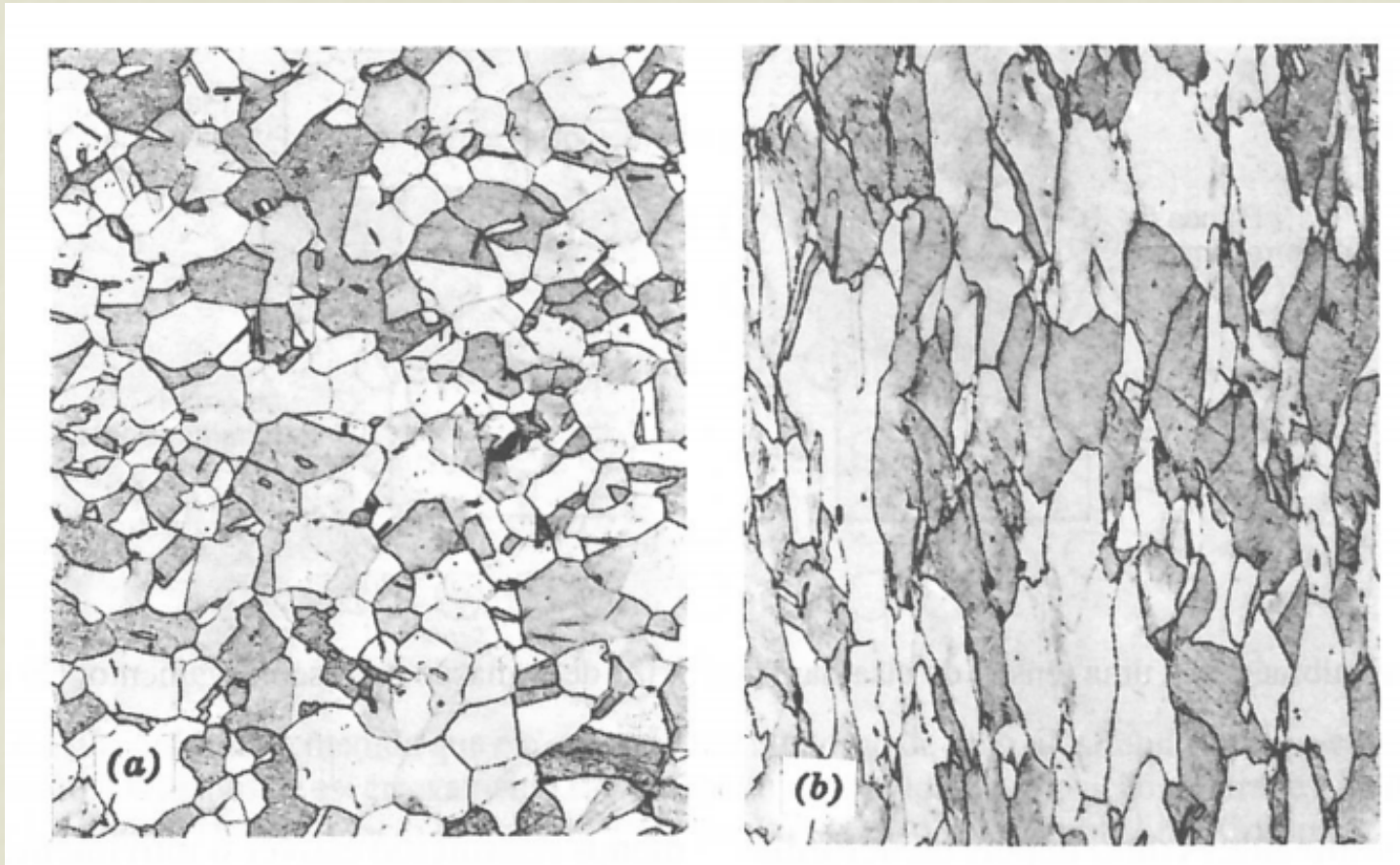
**Fig. 7.9** Escorregamento em um monocristal de zinco. (De C. F. Elam, *The Distortion of Metal Crystals*, Oxford University Press, London, 1935.)

# Deformação Plástica de Materiais Policristalinos



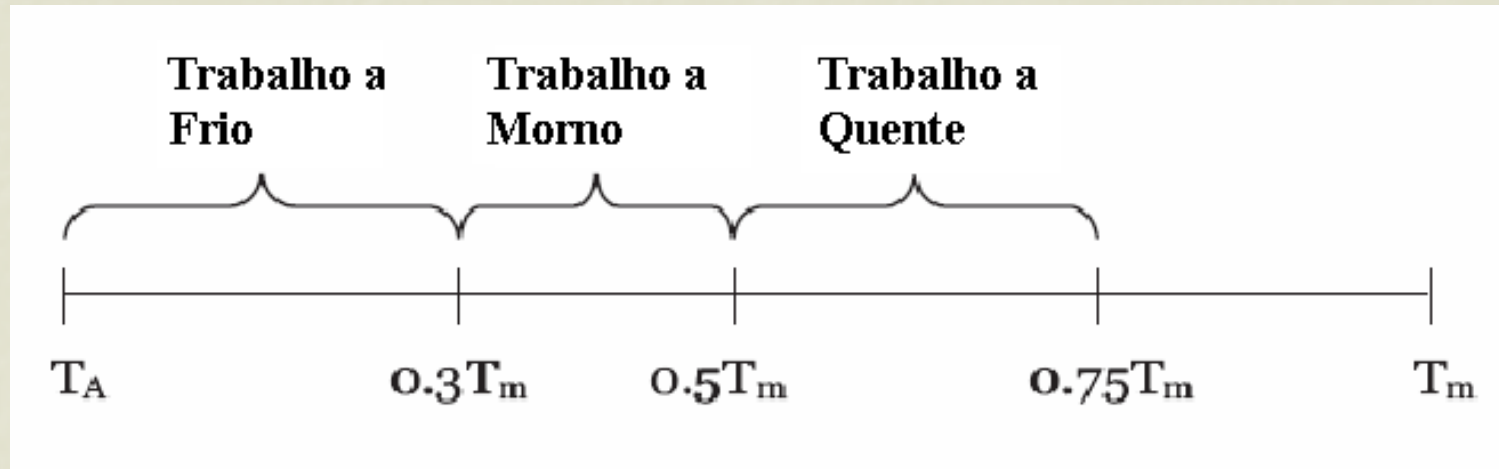
Linhas de escorregamento sobre uma superfície de uma amostra de cobre polida

## Estrutura de grão policristalino como resultado de uma deformação plástica

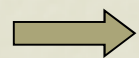


- a) Antes da deformação ( grãos do tipo equiaxiais)
- b) Após deformação plástica (grãos alongados )

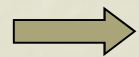
# Trabalho a Quente e a Frio



Classificação das faixas de Temperatura de operação em Conformação mecânica



$T_A$  é a temperatura ambiente



$T_m$  é a temperatura de fusão do metal.

# Trabalho a Frio

- Ocorre abaixo da temperatura de recristalização (próximo da temperatura ambiente);
- Ocorre o fenômeno do **ENCRUAMENTO**, ("*strain hardening*")
- Os grãos alongam-se na direção do esforço mecânico aplicado (menos intensamente na laminação a frio e mais intensamente quando severamente estirado – trefilação).

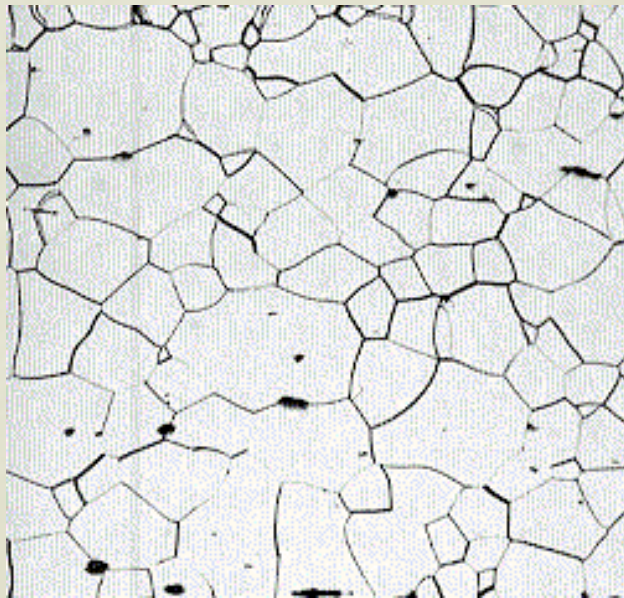


## Efeitos do encruamento nas características mecânicas de metais

Liga	Estado	Resist. a tração	Alongamento	Dureza
		Kgf/mm <sup>2</sup>	%	Brinell
Aço doce (1010)	normal	33,6	38%	120
Aço doce (1010)	Trabalhado a frio	91,0	2%	265
Aço inoxidável	normal	77,0	60%	165
Aço inoxidável	Laminado a a frio	129,0	9%	380

# Encruamento e microestrutura

- Antes da deformação



- Depois da deformação



# Trabalho a Frio

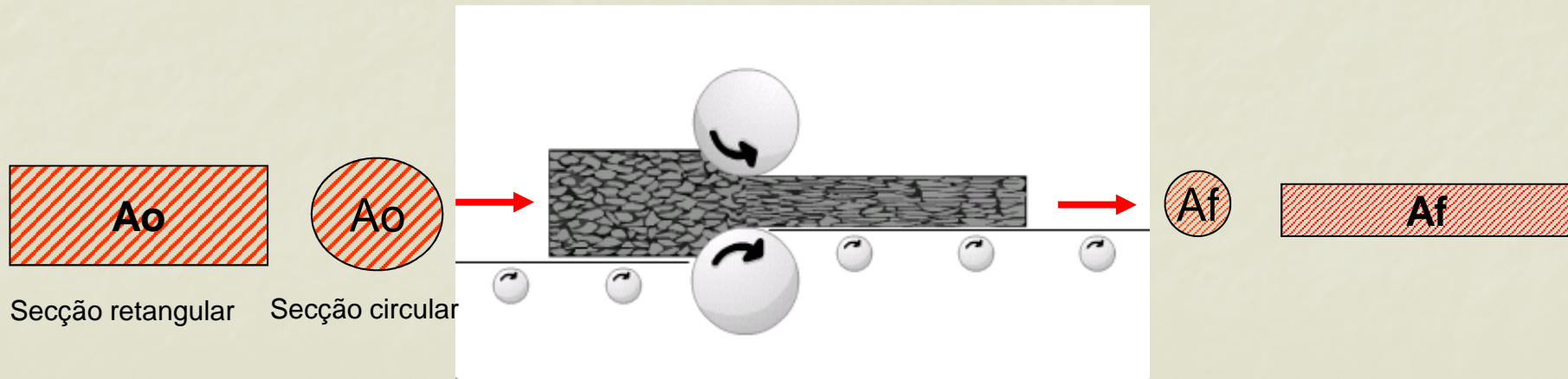
- Expressa-se o grau de deformação plástica com um percentual de trabalho a frio;
- O percentual de trabalho a frio (%TF) é definido como:

$$\%TF = \left[ \frac{A_0 - A_F}{A_0} \right] \times 100$$

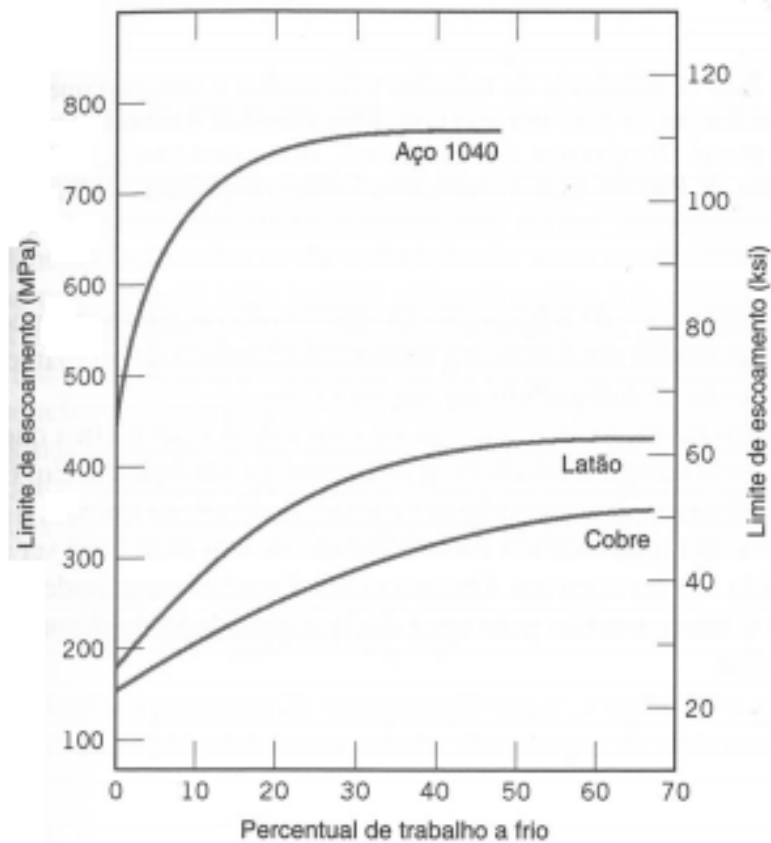
Em que,

$A_0$ : área original da seção reta;

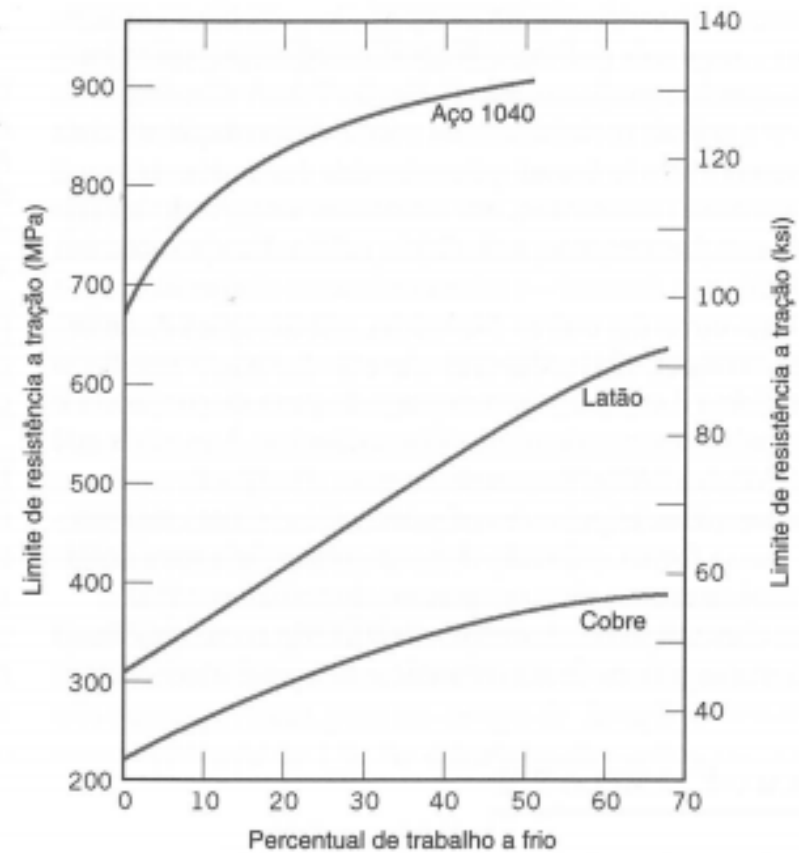
$A_F$ : área final, após deformação;



# Influência do Trabalho à Frio nas Propriedades Mecânicas

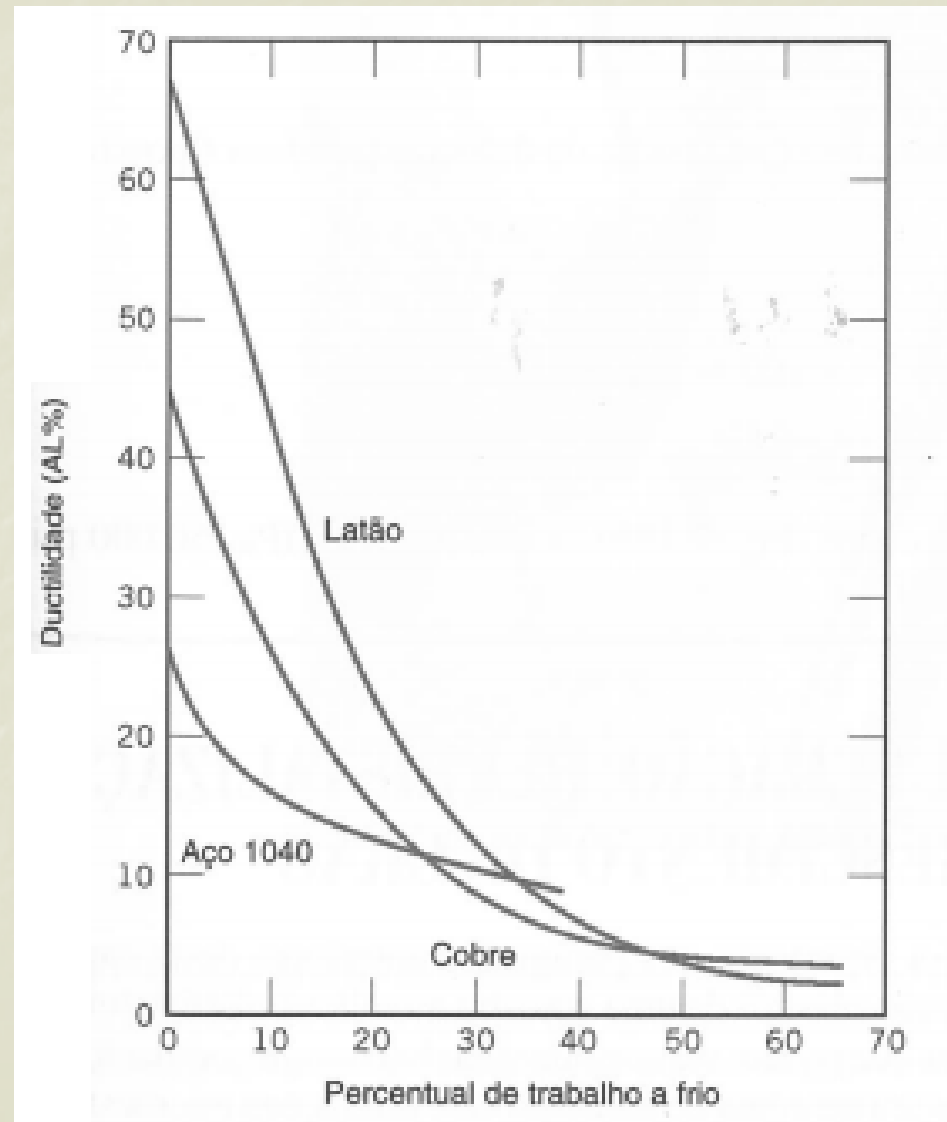


(a)



(b)

# Influência do Trabalho à Frio nas Propriedades Mecânicas



# Trabalho a Frio

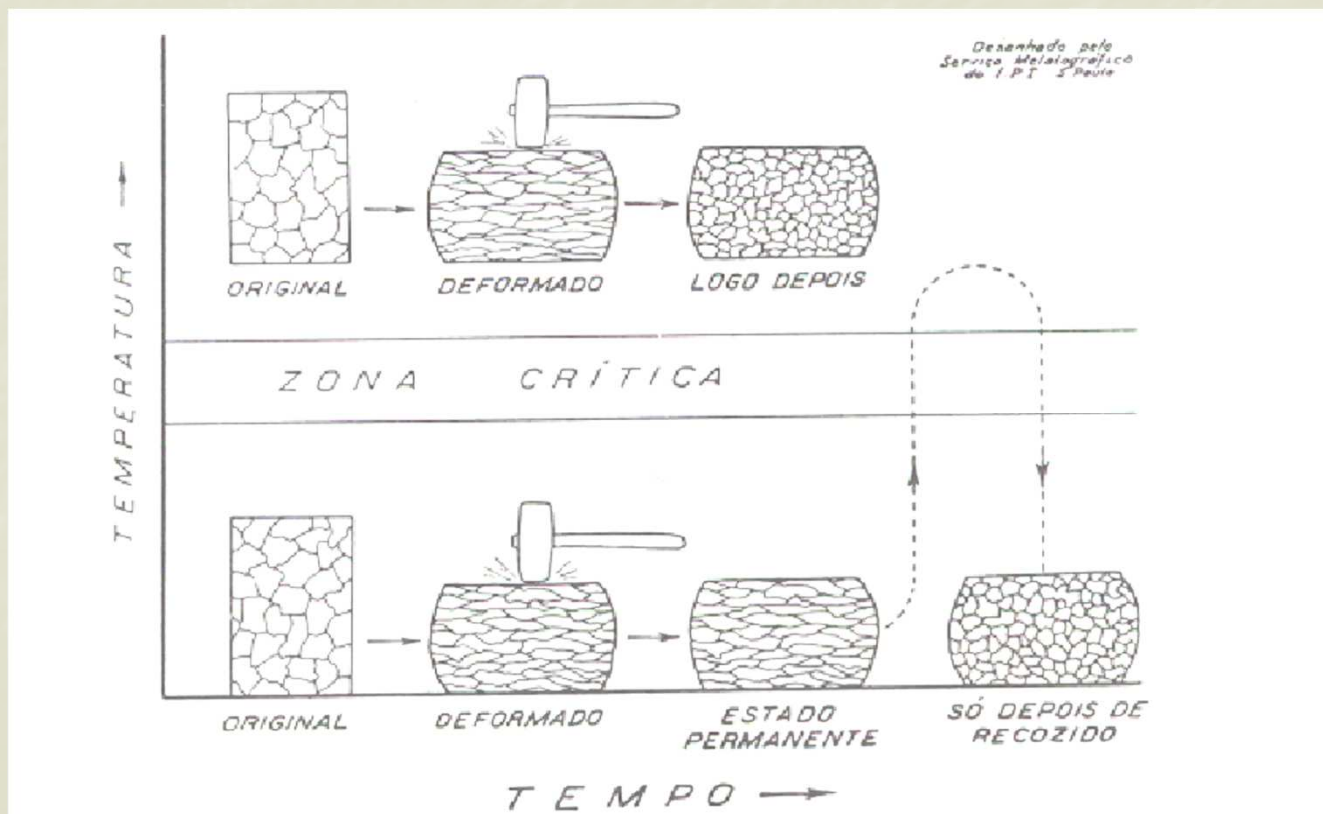
## **Vantagens:**

- Melhor controle dimensional;
- Melhor acabamento superficial;
- Aumento da resistência mecânica e dureza do material;

## **Desvantagens:**

- Maior energia para deformar;
- Menor deformação;
- O material após a conformação apresenta elevado estado de tensões (<ductilidade);
- Exige ferramental que suportem maiores tensões.

- Costuma-se distinguir o “trabalho mecânico a frio” do “trabalho mecânico a quente” por uma temperatura indicada como “temperatura de recristalização”.
- **Temperatura de recristalização** – A menor temperatura na qual uma estrutura deformada de um metal trabalhado a frio é restaurada ou substituída por uma estrutura nova, livre de tensões, após a permanência nessa temperatura por um tempo determinado”.



# Encruamento x Recozimento

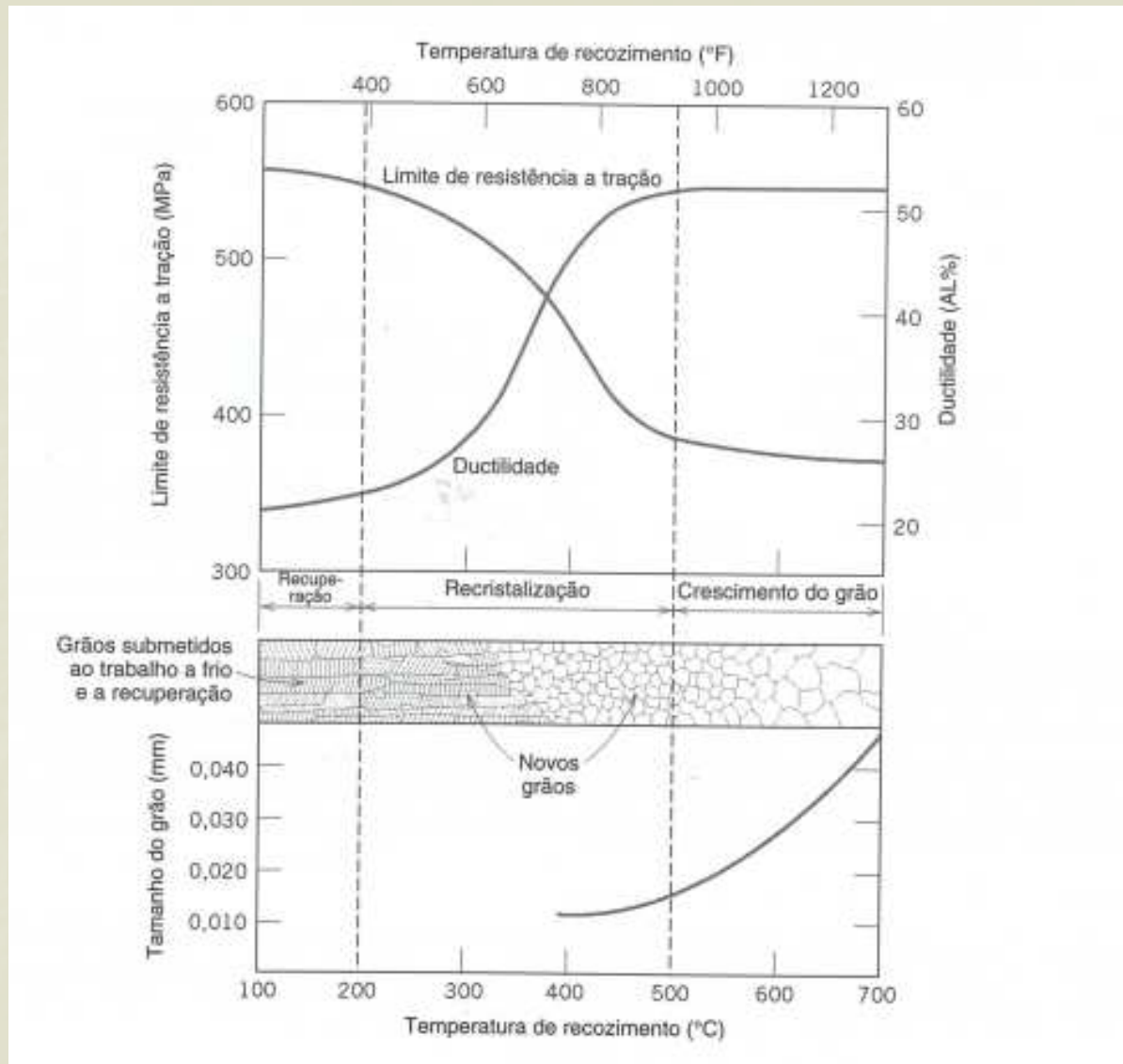
- As propriedades e a estrutura do metal alteradas pelo trabalho a frio podem ser recuperadas ou devolvidas ao estado anterior ao encruamento mediante um tratamento térmico de recristalização ou "recozimento".
- Com isso a elevada energia interna do encruamento tende a desaparecer e o metal tende a voltar a condição de energia livre, resultando num amolecimento (queda de dureza) e isenção paulatina das tensões internas.



# Processo de Recozimento

- Três etapas:
  1. Recuperação
  2. Recristalização
  3. Aumento do tamanho de grão

# Etapas de Recozimento



Influência da temperatura de recozimento nas propriedades mecânicas e estrutura uma liga Cu-Zn

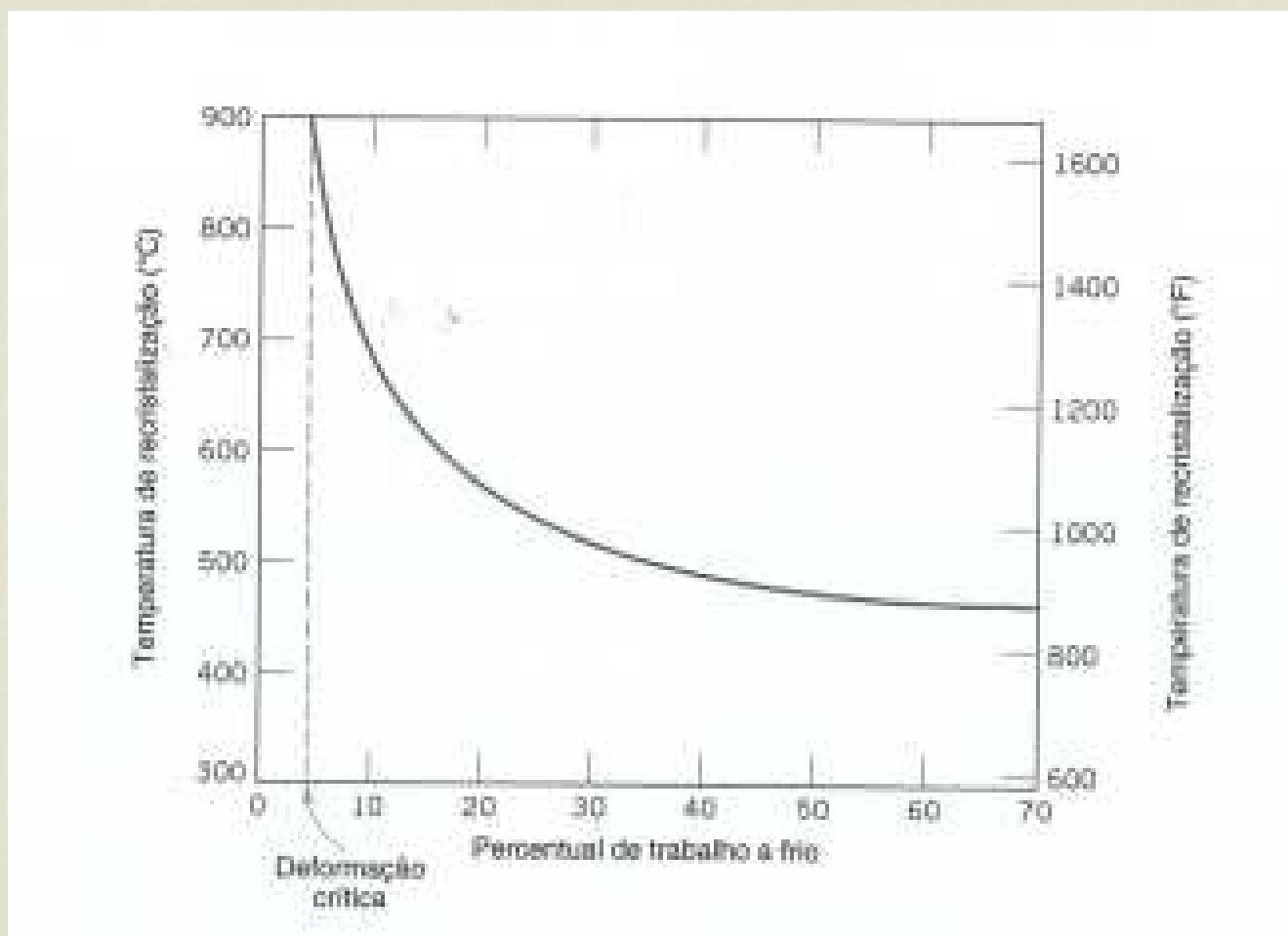
# Recuperação

- 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 grão ainda estão tensionados;
- O número de discordâncias reduz mais ainda;
- As propriedades mecânicas voltam ao seu estado original.

## Variação da temperatura de Recristalização em função do percentual de trabalho a frio para o ferro



# Aumento da resistência pela diminuição do tamanho de grão

- O contorno de grão funciona como um barreira para a continuação do movimento das discordâncias devido as diferentes orientações presentes e também devido às inúmeras descontinuidades presentes no contorno de grão.

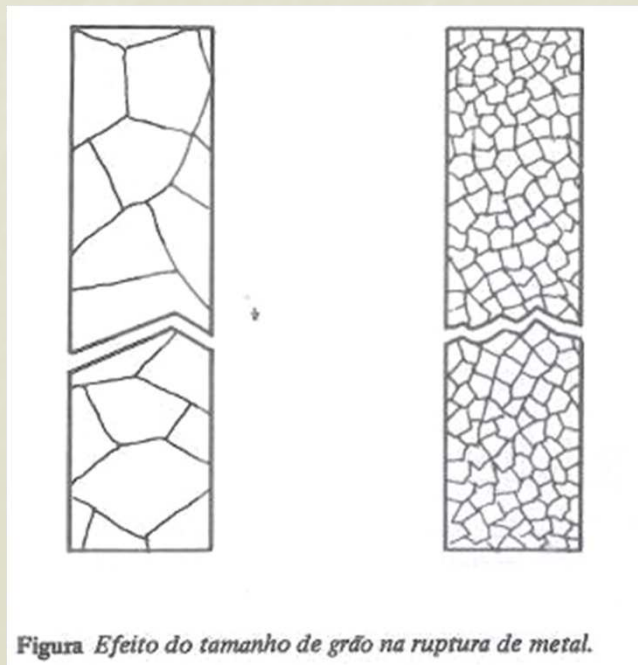


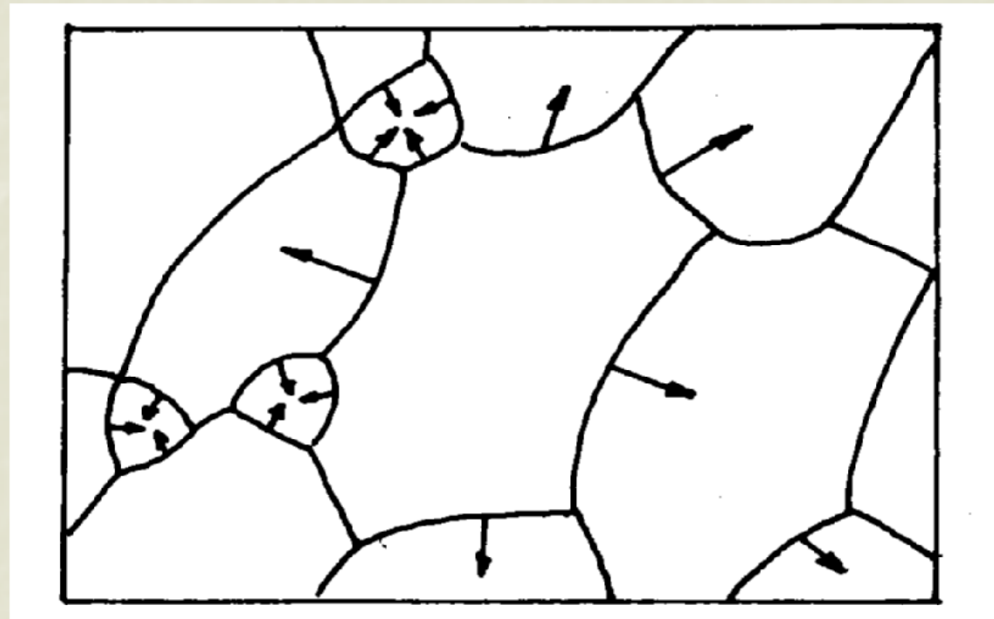
Figura Efeito do tamanho de grão na ruptura de metal.

# Crescimento de Grão

- A temperatura continuando a aumentar, os grãos cristalinos, agora inteiramente livres de tensões, tendem a crescer. Este crescimento de grão é também favorecido pela permanência a temperaturas acima da de recristalização. Com isso os grãos menores são engolidos pelos maiores.
- Desse modo, a única maneira de diminuir ou refinar o tamanho de grão consiste em deformar plasticamente os grãos existentes e iniciar a formação de novos grãos.

# Crescimento de Grão

Formação de novos grãos





# Crescimento de grão

- A granulação grosseira torna o material quebradiço, porque a coesão entre os grãos é afetada pela concentração de impurezas nos seus contornos e com o aumento da granulação dessa concentração;
- As fissuras também se propagam mais facilmente no interior dos grãos graúdos.
- Por isso, entre os aços de igual composição, os grãos mais finos possuem melhores propriedades mecânicas.

# Trabalho a Quente

Os fenômenos de aumento de dureza causado pela deformação e o amolecimento, devido ao recozimento, ocorrem simultaneamente → à temperatura acima da recristalização.



# Trabalho a Quente

## Características:

- É a primeira etapa do processo metalúrgico de conformação mecânica;
- A energia para deformar é menor;
- O metal adquire maior capacidade de deformar-se sem fissuração;
- Algumas heterogeneidades das peças (ou lingotes) como porosidades, bolhas, etc., são praticamente eliminadas pelo trabalho a quente;
- A estrutura granular, grosseira de peças fundidas, é rompida e transformada em grãos menores;
- Alguns metais dificilmente são deformados a frio sem fissurar; exemplos: tungstênio, molibdênio e outros;
- Ocorre o recozimento: crescimento grãos.

# Trabalho a Quente

## **Vantagens:**

- Permite emprego de menor esforço mecânico para a mesma deformação (máquinas de menor capacidade 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 resistente ao calor (>custo);
- O material sofre maior oxidação, formando casca de óxidos;
- Não permite a obtenção de dimensões dentro de tolerâncias estreitas.

# Trabalho a Frio e a Quente

## Comparativo:

### Trabalho a quente

- grandes deformações;
- recozimento;
- baixa qualidade dimensional e superficial;
- normalmente empregado para “desbaste”;
- peças grandes e de formas complexas;
- contração térmica, crescimento de grãos, oxidação.

### Trabalho a frio

- pequenas deformações (relativamente);
- encruamento;
- elevada qualidade dimensional e superficial;
- normalmente empregado para “acabamento”
- recuperação elástica;
- equipamentos e ferramentas mais rígidos

# Porque Escolher Trabalho a Quente?

Devido a grande capacidade possível de deformação plástica quando comparada com o trabalho a frio ou a morno.

- Porquê?
  - Coeficiente de resistência ( $K$ ) é bem menor que na temperatura ambiente.
  - Coeficiente de encruamento ( $n$ ) do material é zero (teoricamente).
  - Ductilidade aumenta significativamente.