

Processos da Indústria Mecânica

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

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, 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

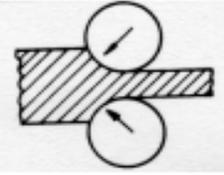
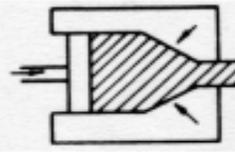
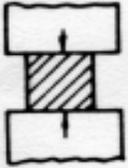
Os processos conformação podem ser classificados de acordo com vários critérios:

- 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).

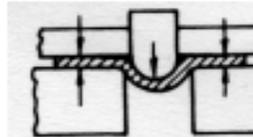
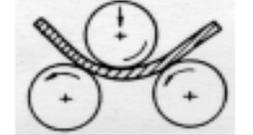
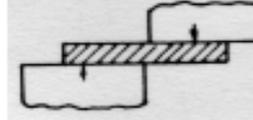
Classificação quanto ao tipo de esforço predominante

- 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).

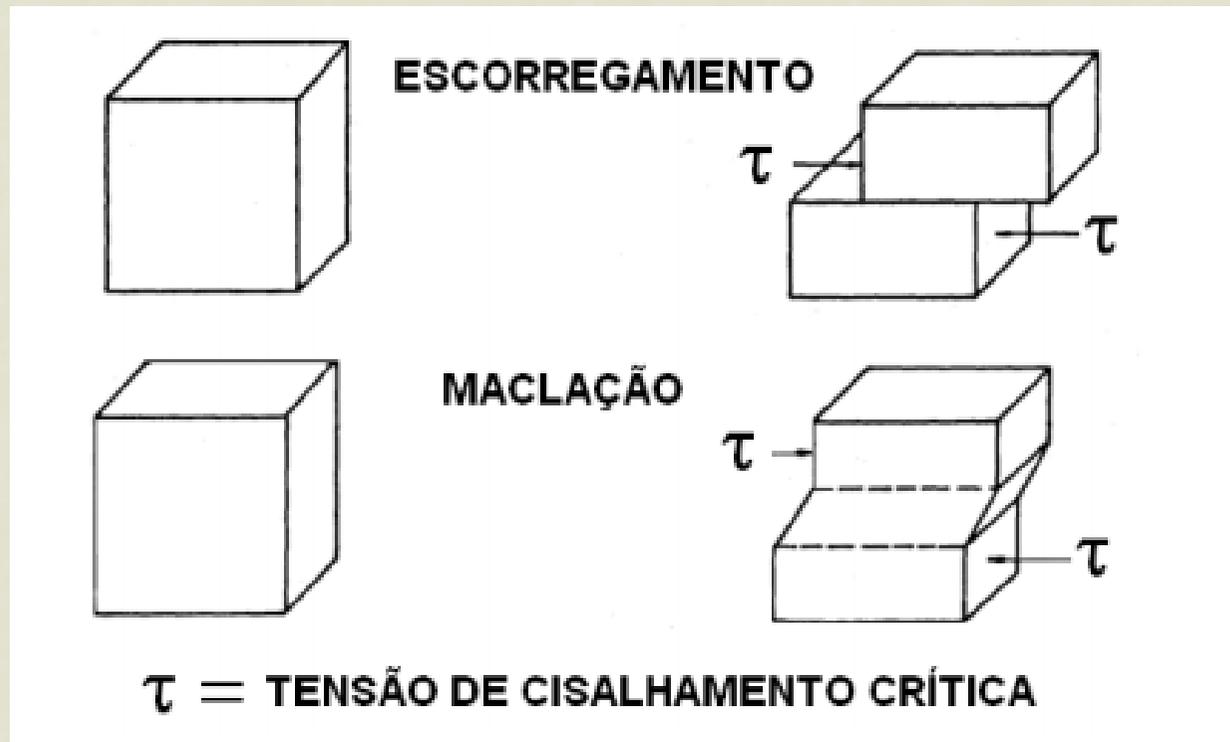
Propriedades do Material na Conformação

- 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

Sistemas de Escorregamento do Cristal

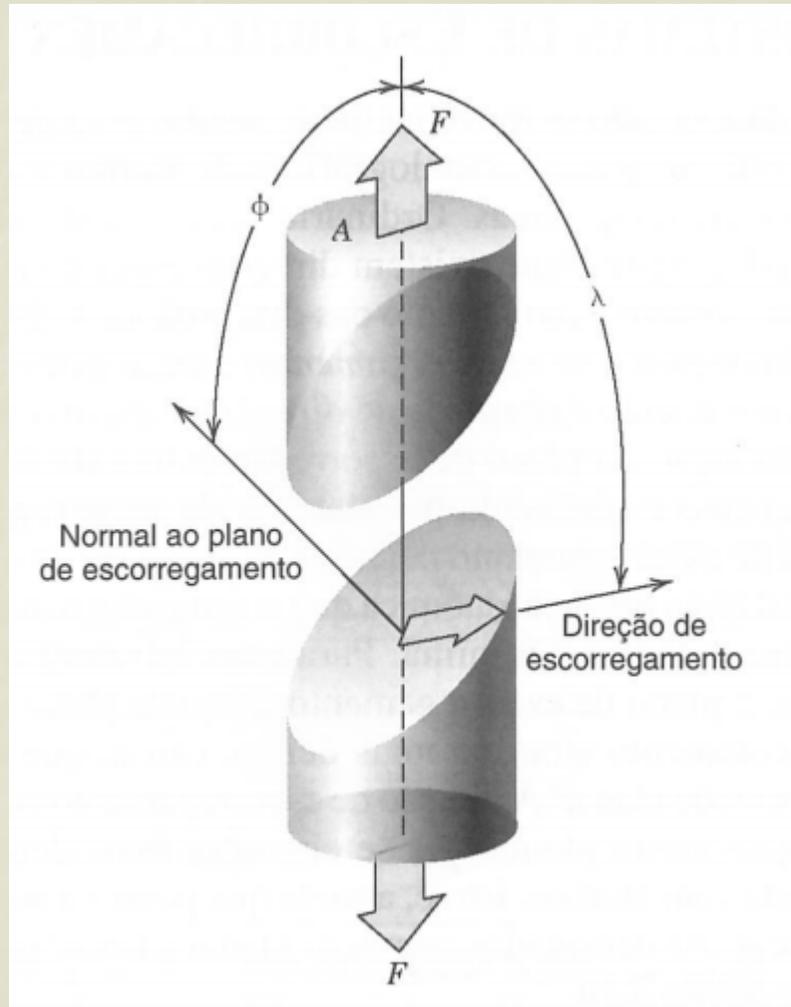
- 1) A direção de escorregamento coincide preferencialmente com as direções onde os átomos estão mais próximos, ou seja, com as direções de maior densidade atômica;
- 2) O plano de escorregamento é, também, preferencialmente o de maior densidade atômica;
- 3) O escorregamento ocorre segundo um sistema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

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

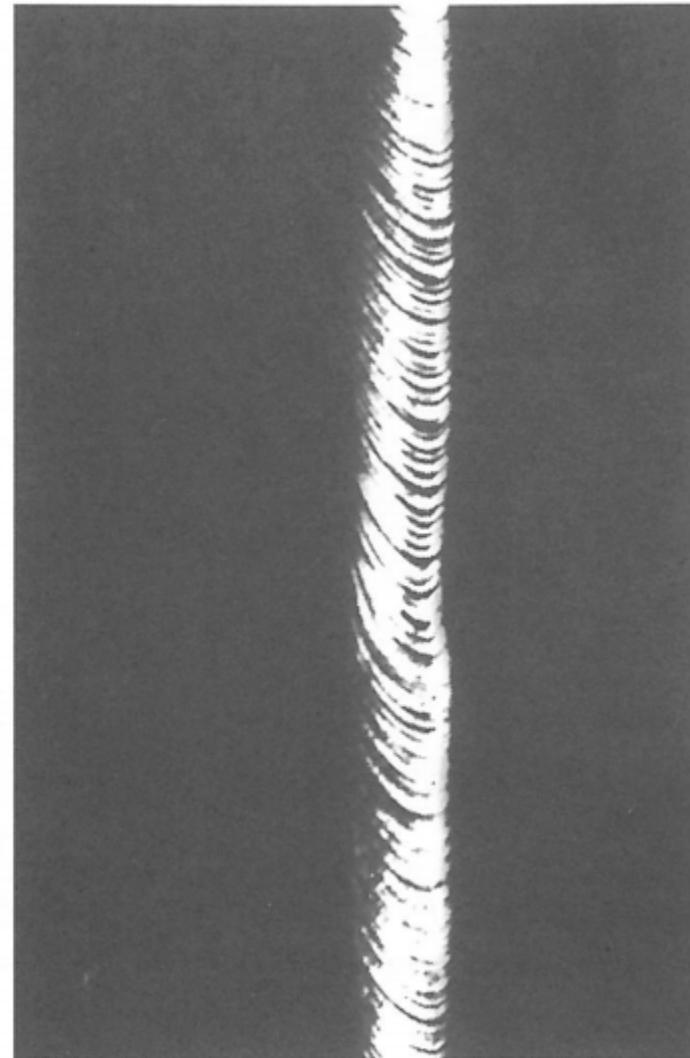
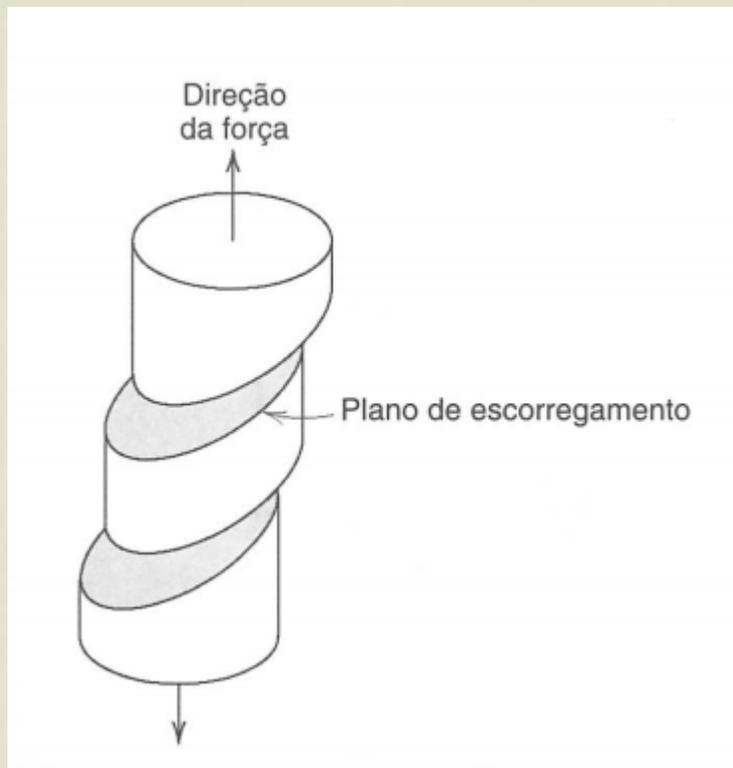
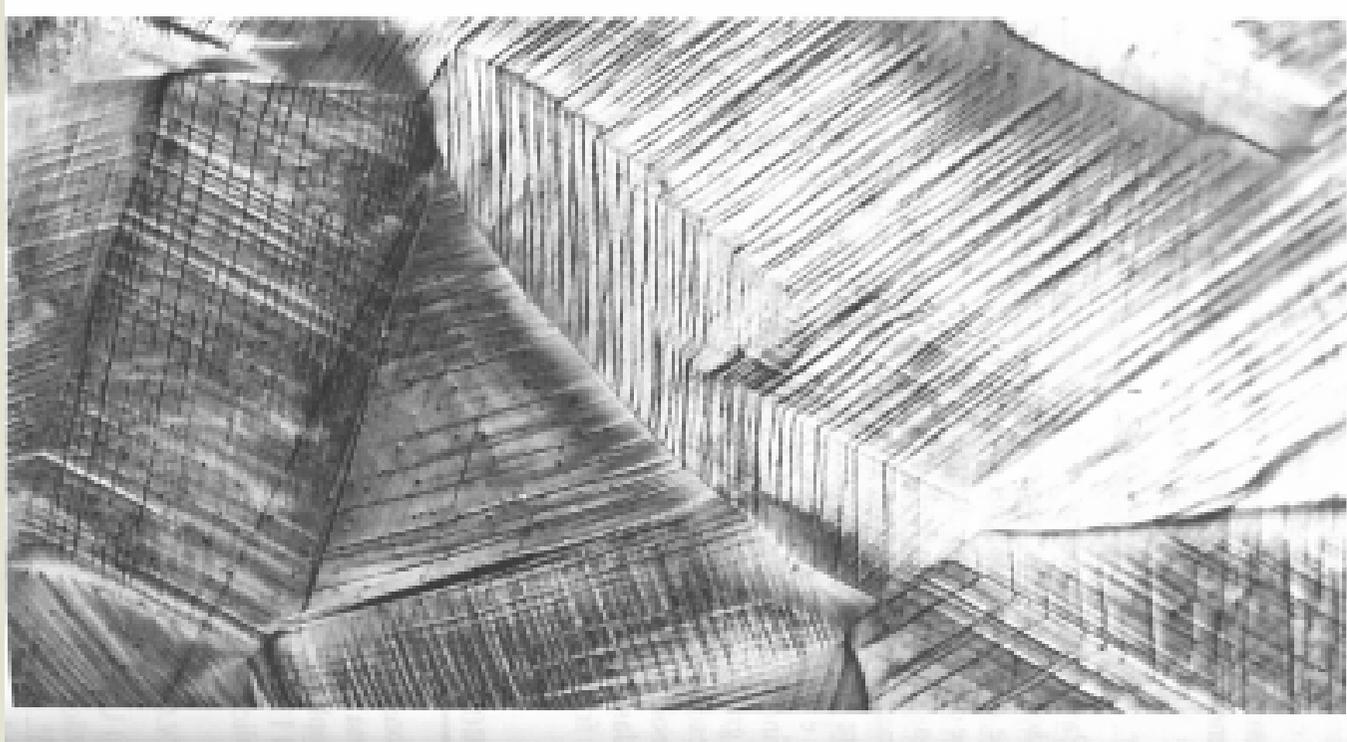


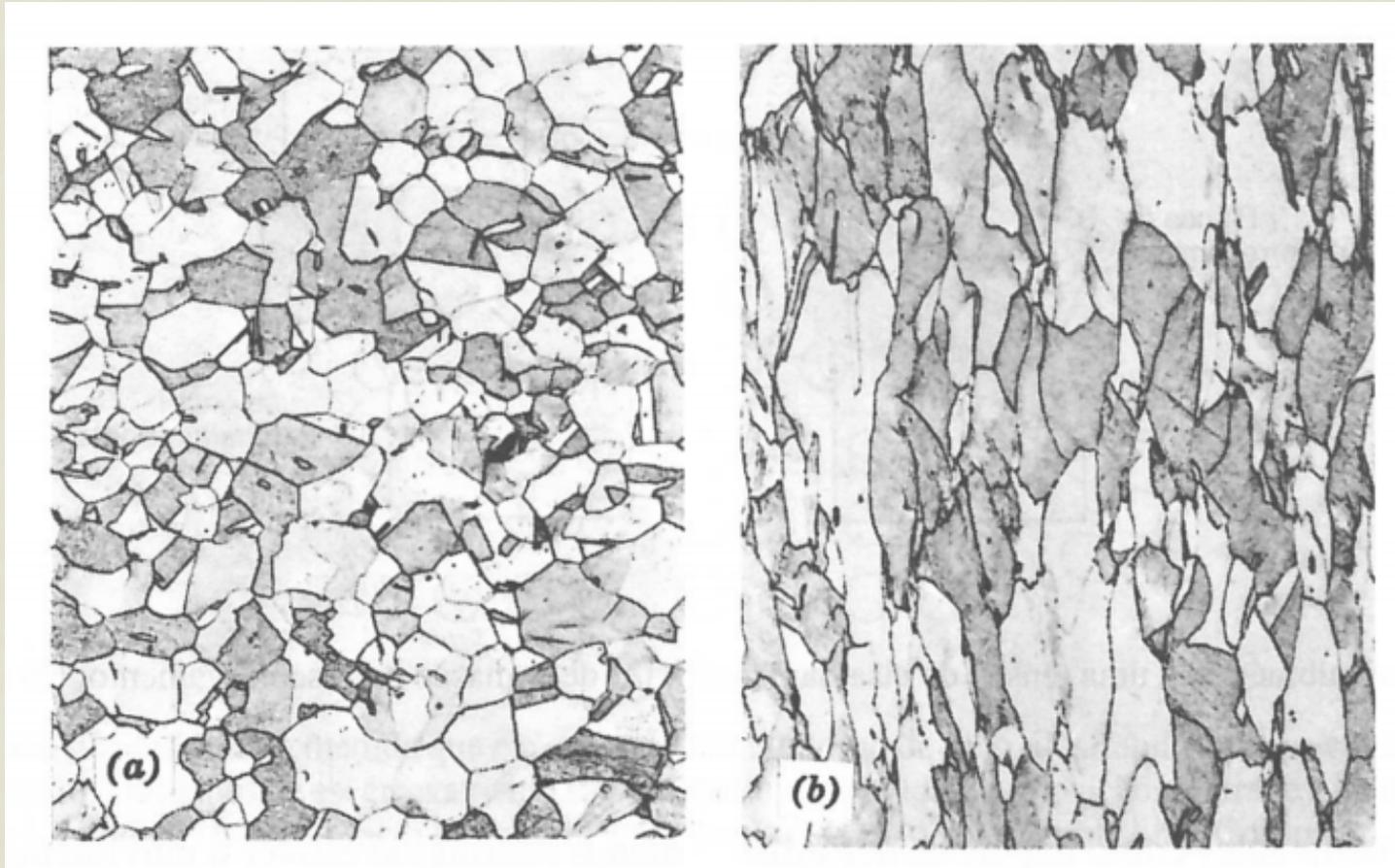
Fig. 7.9 Escorregamento em um monocristal de zinco. (De C. F. Elam, *The Distortion of Metal Crystals*, Oxford University Press, London, 1935.)

Deformação Plástica de Materiais Policristalinos



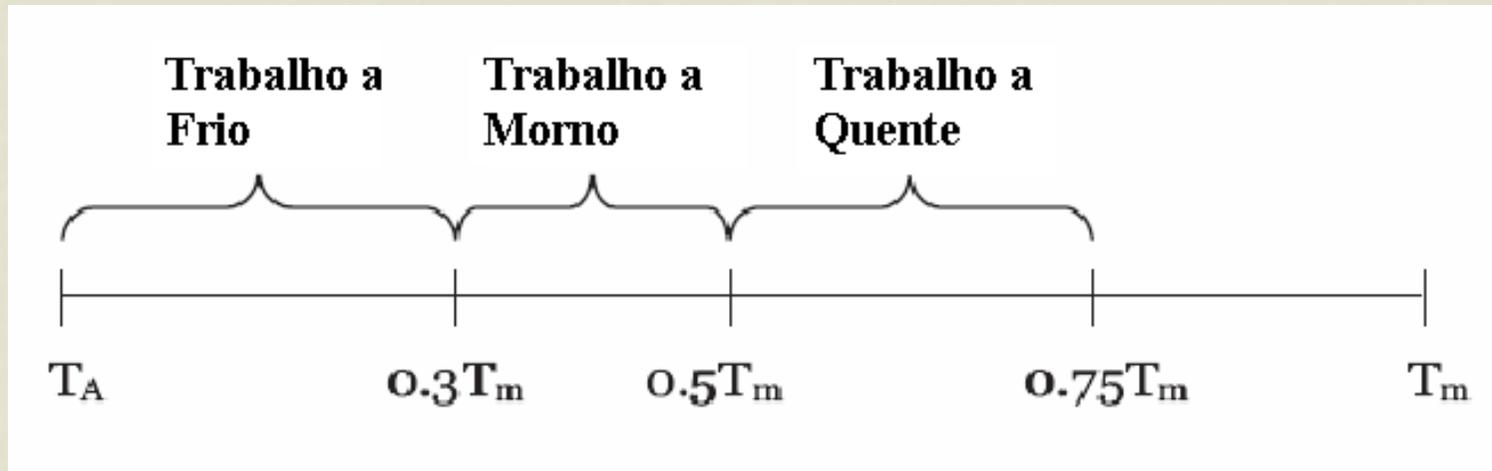
Linhas de escorregamento sobre uma superfície de uma amostra de cobre polida

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

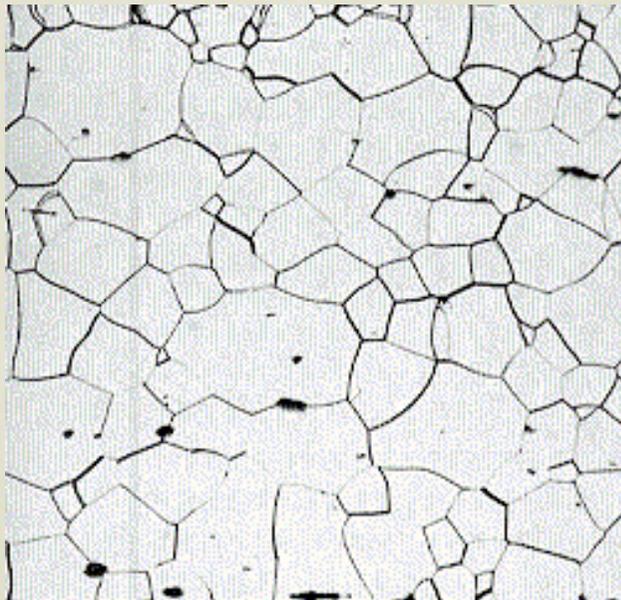
- Ocorre abaixo da temperatura de recristalização (próximo da temperatura ambiente);
- Ocorre o fenômeno do **ENCRUAMENTO**, ("*strain hardening*")
- Os grãos alongam-se na direção do esforço mecânico aplicado (menos intensamente na laminação a frio e mais intensamente quando severamente estirado – trefilação).

Efeitos do encruamento nas características mecânicas de metais

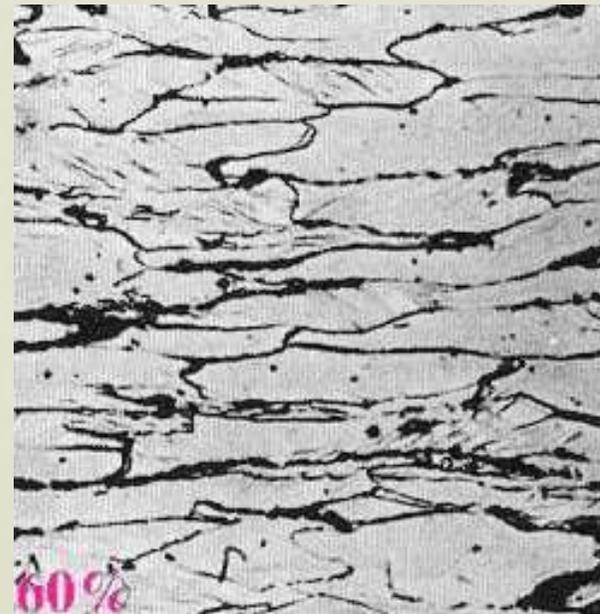
Liga	Estado	Resist. a tração	Alongamento	Dureza
		Kgf/mm ²	%	Brinell
Aço doce (1010)	normal	33,6	38%	120
Aço doce (1010)	Trabalhado a frio	91,0	2%	265
Aço inoxidável	normal	77,0	60%	165
Aço inoxidável	Laminado a a frio	129,0	9%	380

Encruamento e microestrutura

- Antes da deformação



- Depois da deformação



Trabalho a Frio

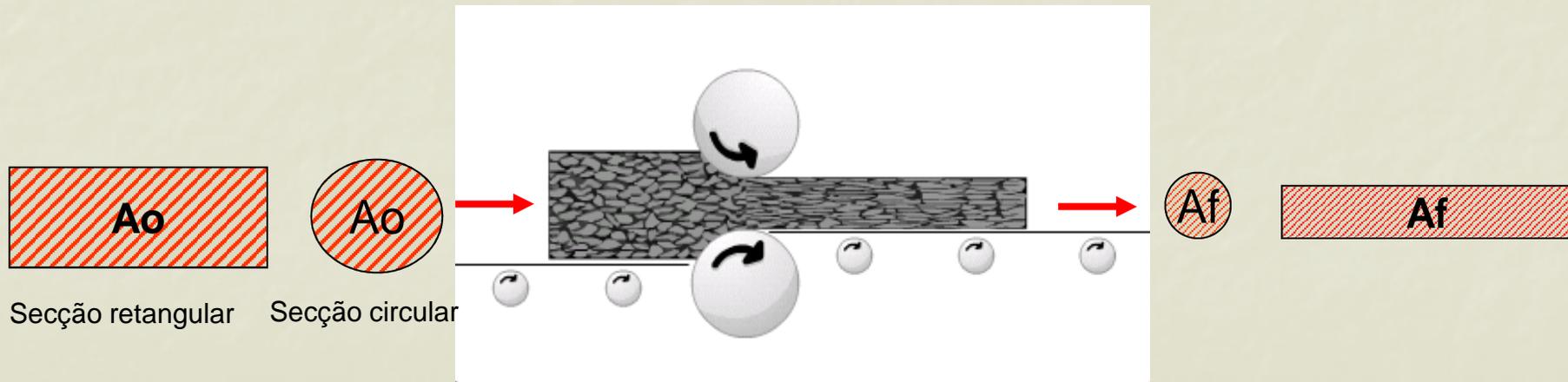
- Expressa-se o grau de deformação plástica com um percentual de trabalho a frio;
- O percentual de trabalho a frio (%TF) é definido como:

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

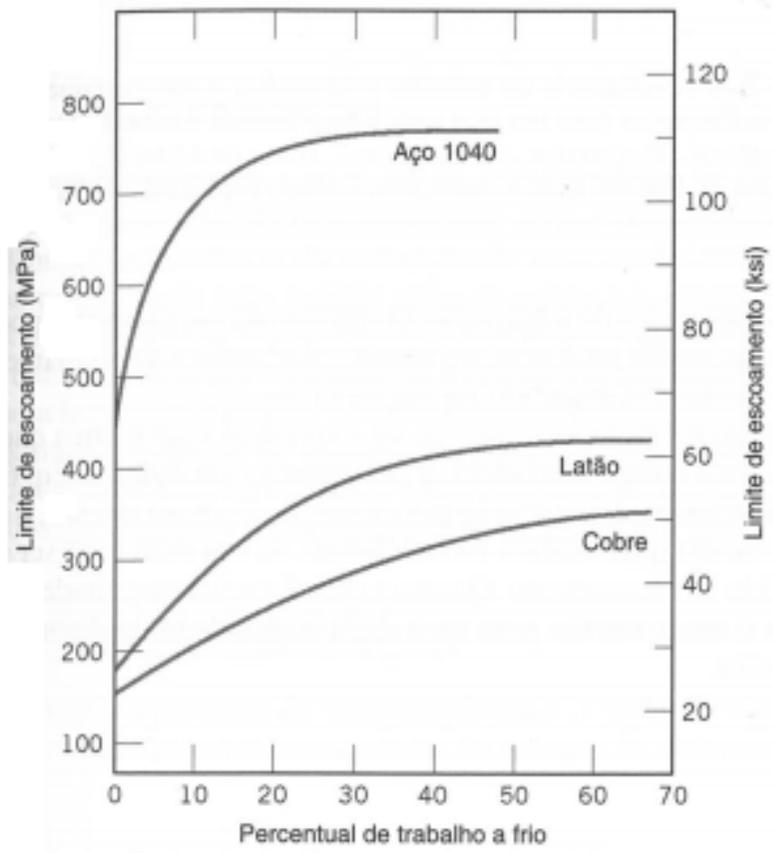
Em que,

A_0 : área original da seção reta;

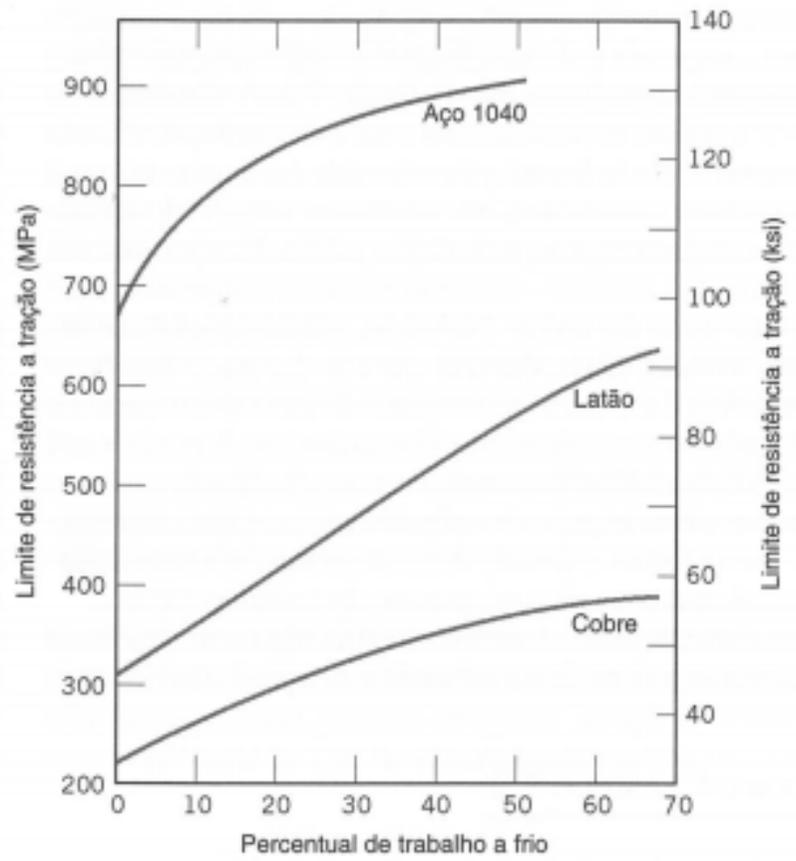
A_F : área final, após deformação;



Influência do Trabalho à Frio nas Propriedades Mecânicas

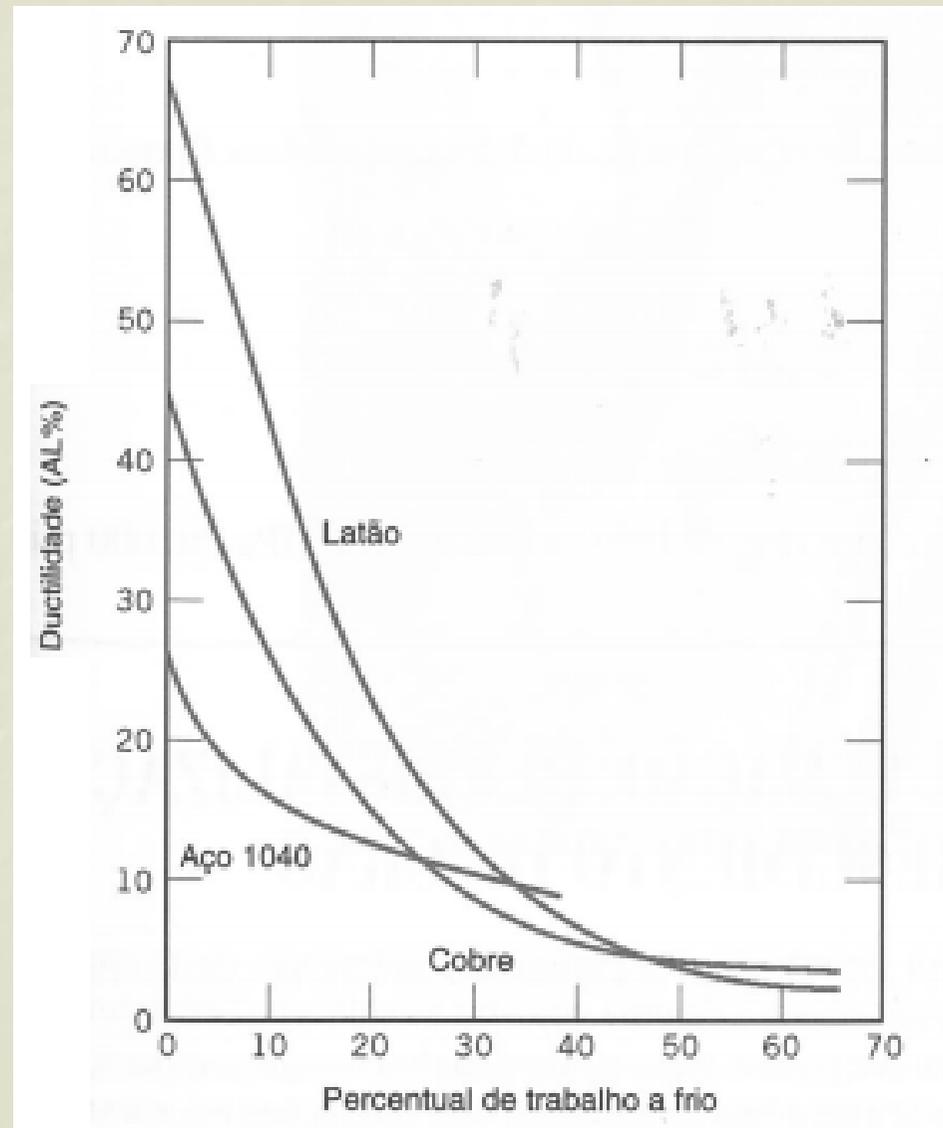


(a)



(b)

Influência do Trabalho à Frio nas Propriedades Mecânicas



Trabalho a Frio

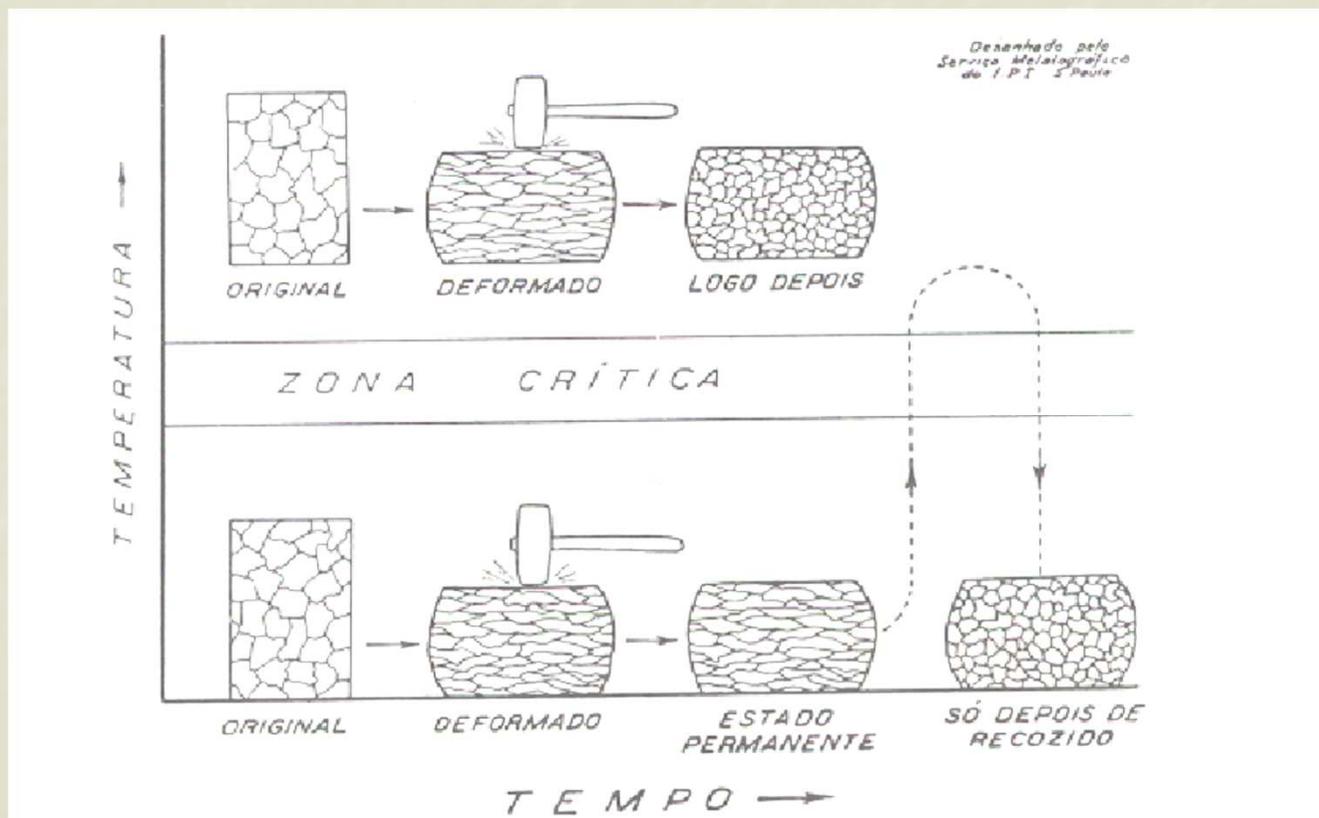
Vantagens:

- 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”.



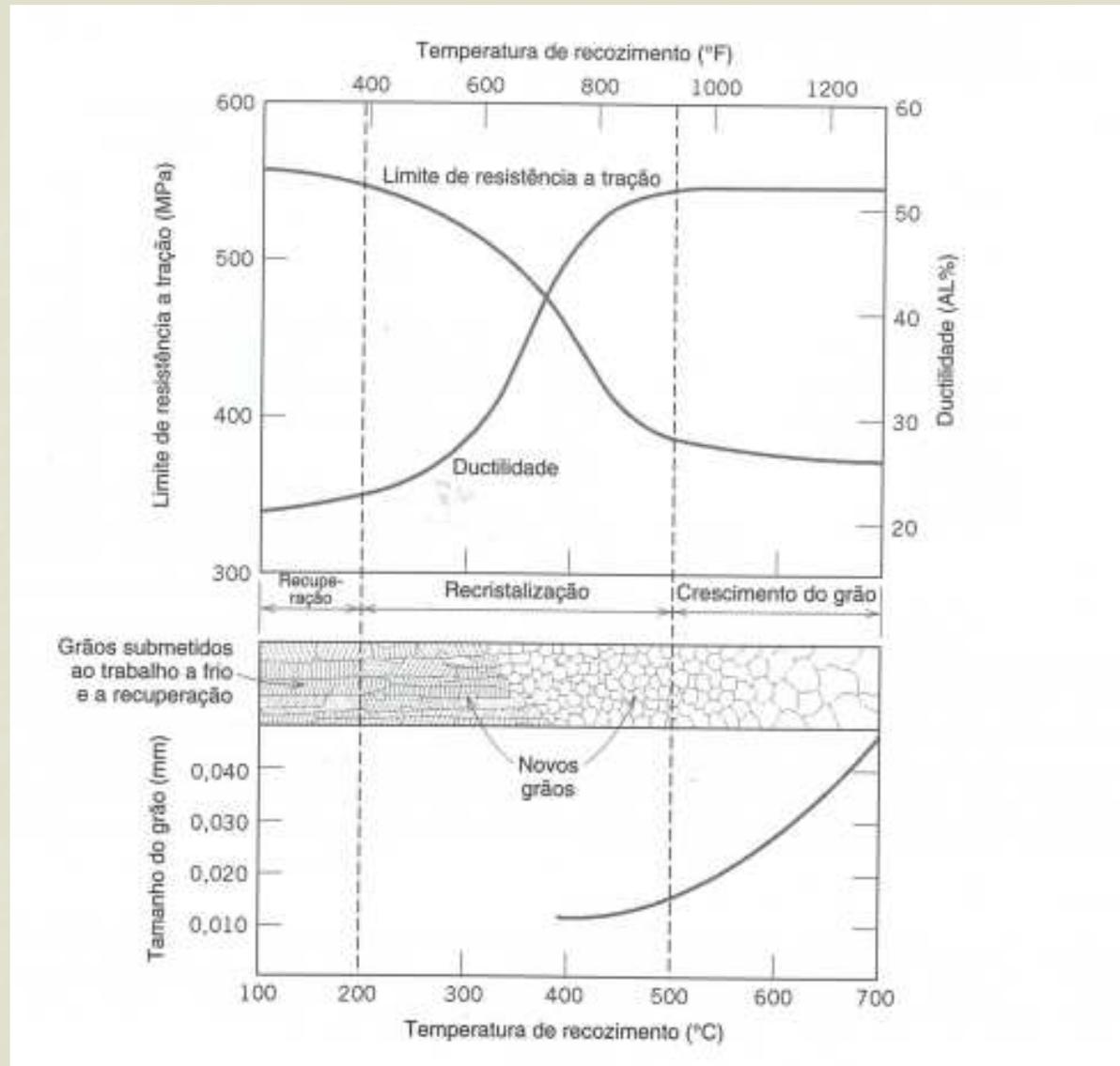
Encruamento x Recozimento

- 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

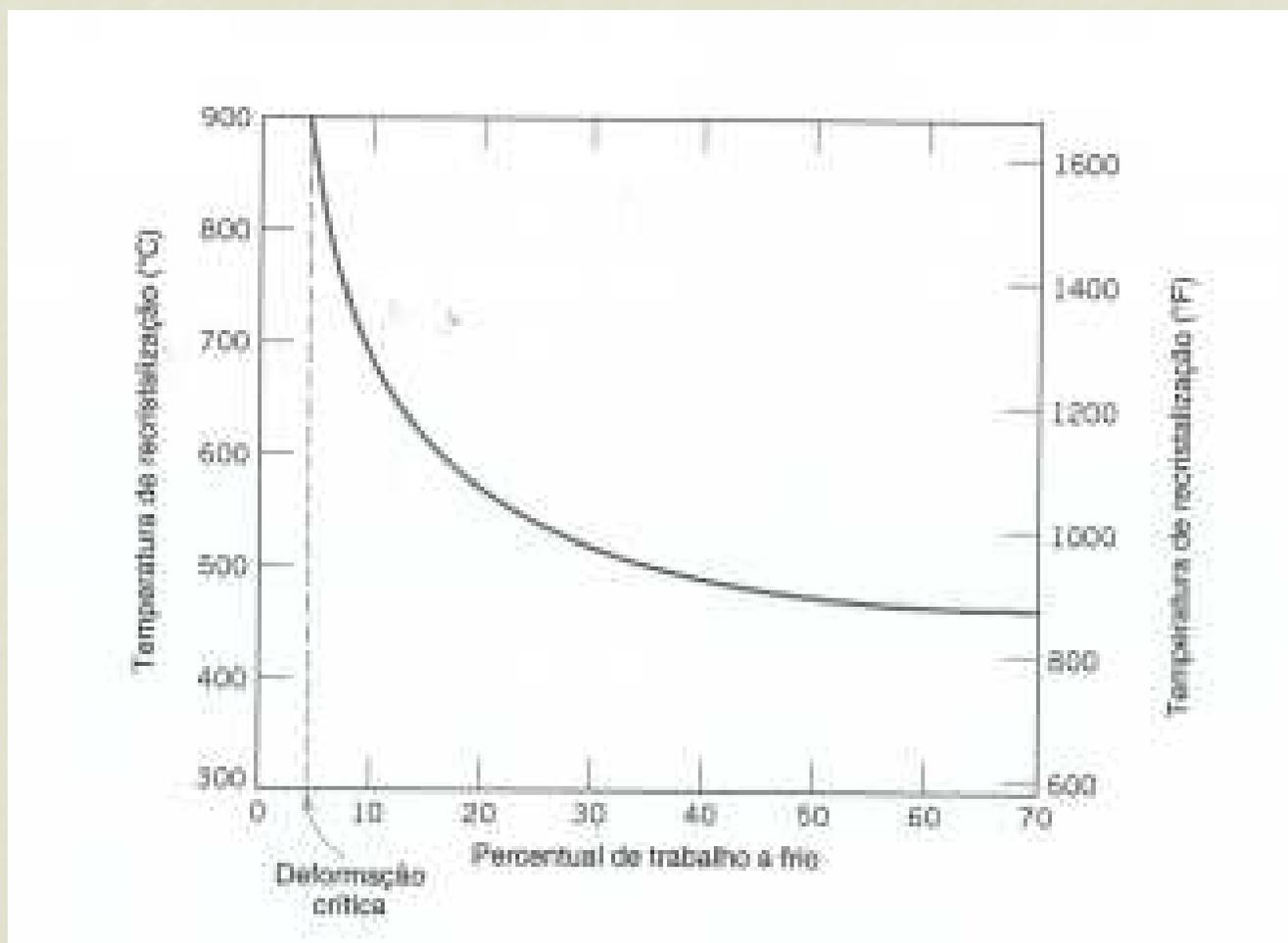
Recuperação

- 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.

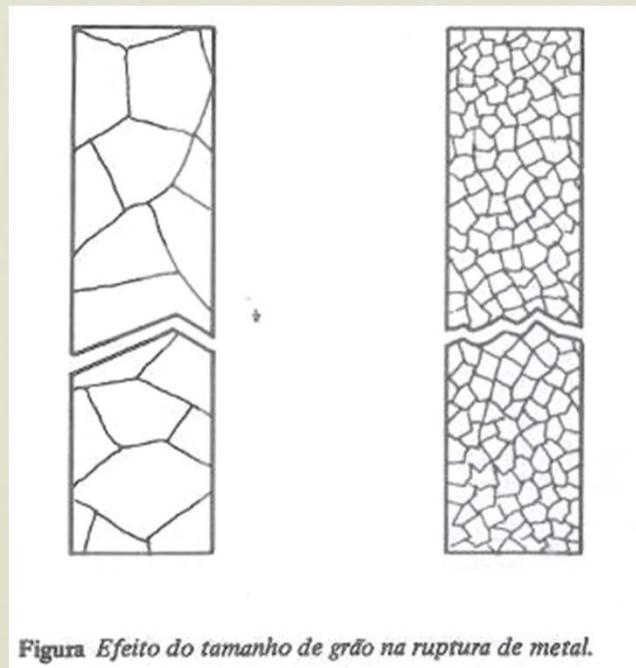


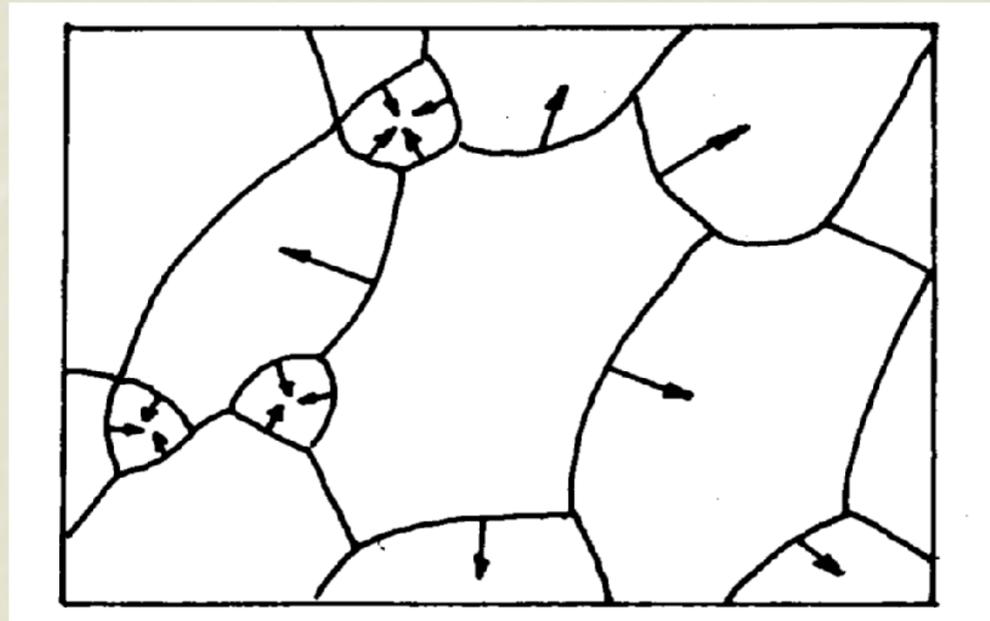
Figura Efeito do tamanho de grão na ruptura de metal.

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.