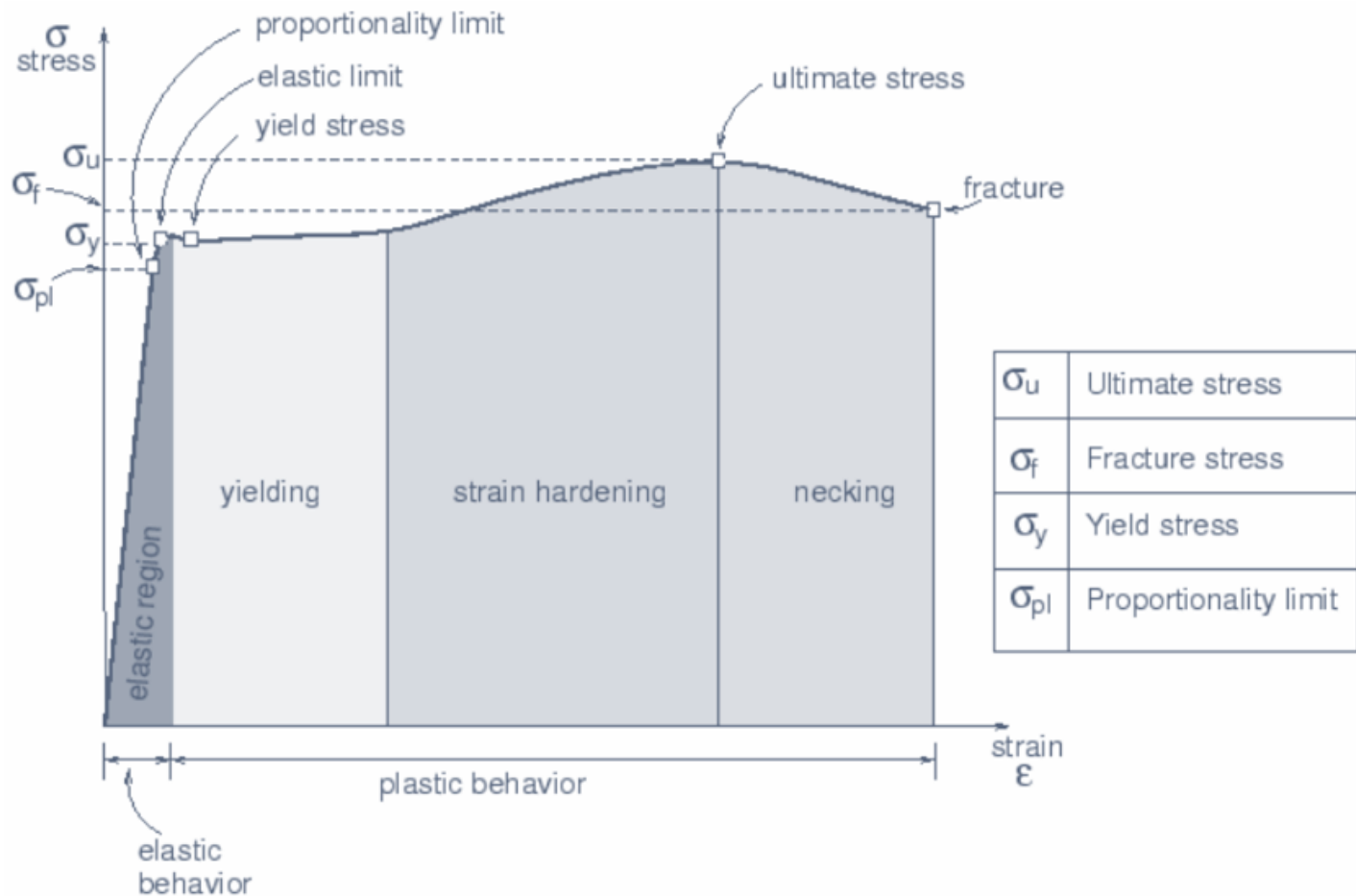


LOM3036
Metalurgia Física

Aula 4
Mecanismos de Deformação Plástica

Profa. Maria Ismênia Sodero
maria.ismenia@usp.br

A curva Tensão x Deformação



Limite Escoamento

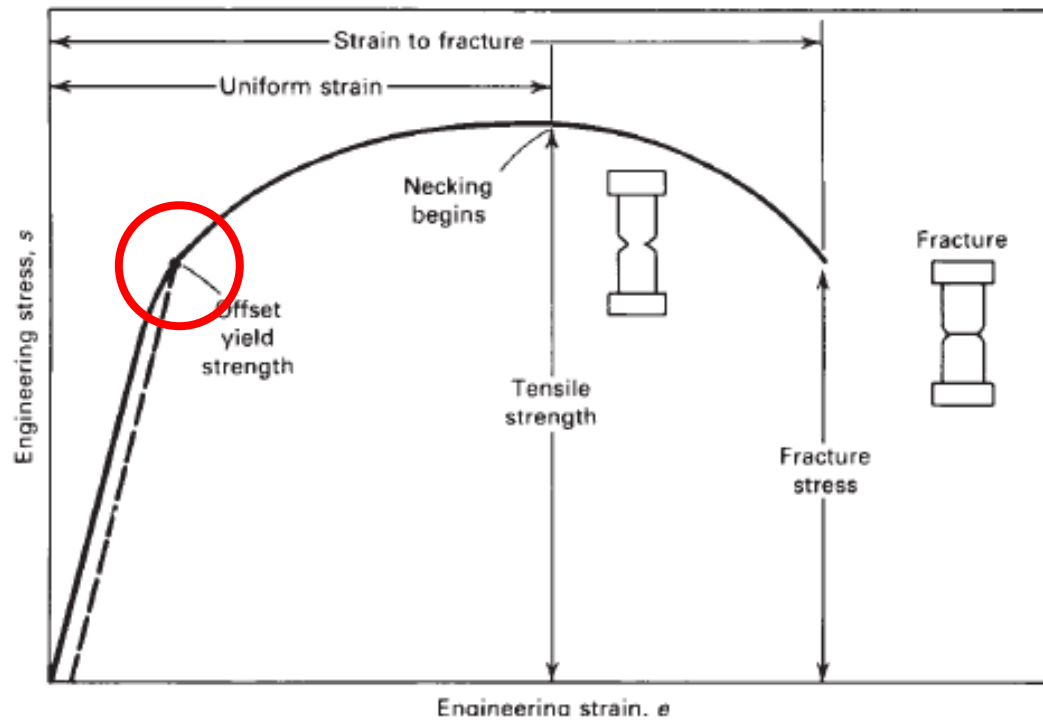


Fig. 3.2 Engineering stress-strain curve. The intersection of the dashed line with the stress-strain curve determines the offset yield strength.

Critérios de Escoamento (fluxo)

Critério Tensão Máxima - Rankine

De acordo com o critério de tensão máxima, o fluxo plástico ocorre quando a maior tensão principal em um estado complexo de tensão atinge a tensão de fluxo em tração uniaxial.

Como $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, temos $\sigma_0(\text{tensão}) < \sigma_1 < \sigma_0(\text{compressão})$, onde σ_0 é a tensão de fluxo do material.

Tensão Cisalhante Crítica ou Critério de Tresca

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

Este critério de escoamento admite que O escoamento ocorre quando a tensão de cisalhamento máxima atinge o valor da tensão de cisalhamento no ensaio uniaxial de tração.

Critério de Von Mises

É importante notar que segundo o critério de von Mises o escoamento não depende de uma tensão normal ou cisalhante particular, mas sim de uma função dos valores das três tensões cisalhantes principais.

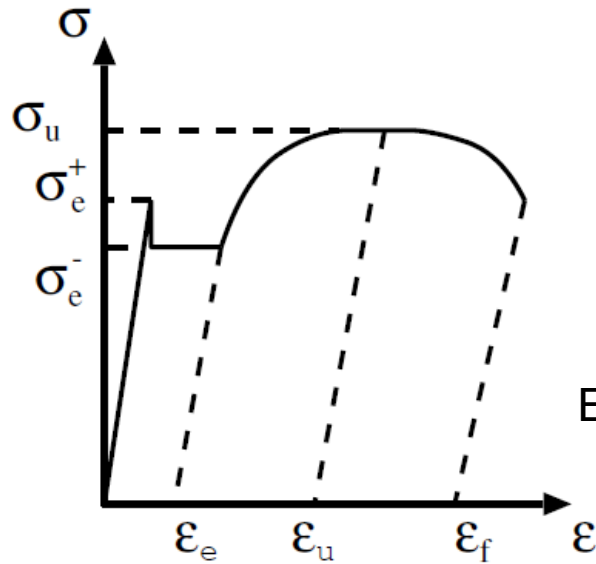
Em resumo, é importante notar que segundo o critério de von Mises o escoamento não depende de uma tensão normal ou cisalhante particular, mas sim de uma função dos valores das três tensões cisalhantes principais.

Embora Tresca seja mais conservador, o de von Mises é mais preciso para materiais dúcteis.

Padrão em engenharia aeroespacial - para um bom equilíbrio entre segurança e desempenho.

Escoamento descontínuo em aços carbono

Cada ponto de máximo corresponde a propagação ao longo do corpo de uma instabilidade de deformação por cisalhamento conhecida como banda de Luders, que corresponde a um degrau na superfície do corpo (deletério na estampagem) orientado a 45° do eixo de tração.



Efeito “Portevin-LeChatelier”

Figura 4.13: Curva $\sigma \times \epsilon$ esquemática de um aço doce típico.

SKIN PASS

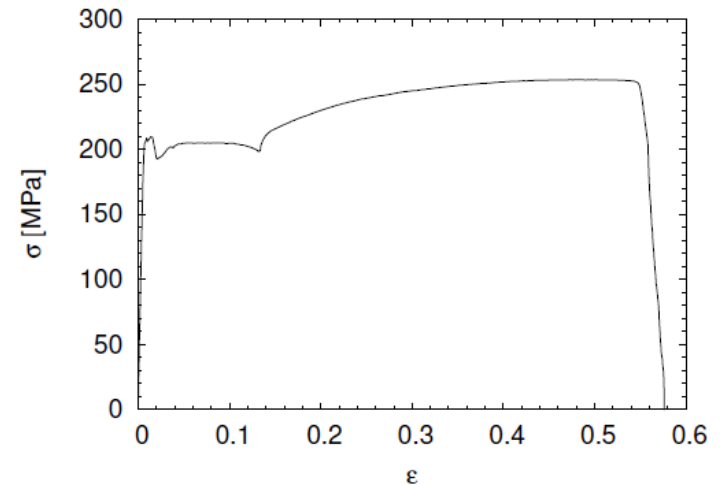


Figura 4.14: Curva tensão-deformação obtida em um aço AISI 1006 no estado recozido. Compare com a Figura 4.6 que corresponde ao mesmo aço, porém após sofrer *skin pass*.

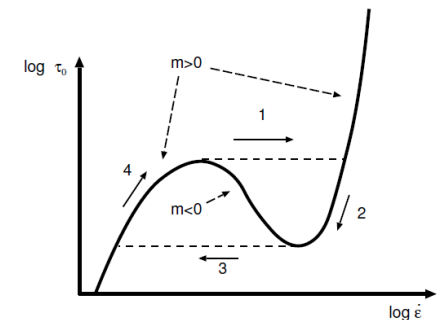


Figura 4.15: Modelo explicativo do efeito Portevin-LeChatelier (PLC).

Efeito da taxa de deformação na tensão limite escoamento

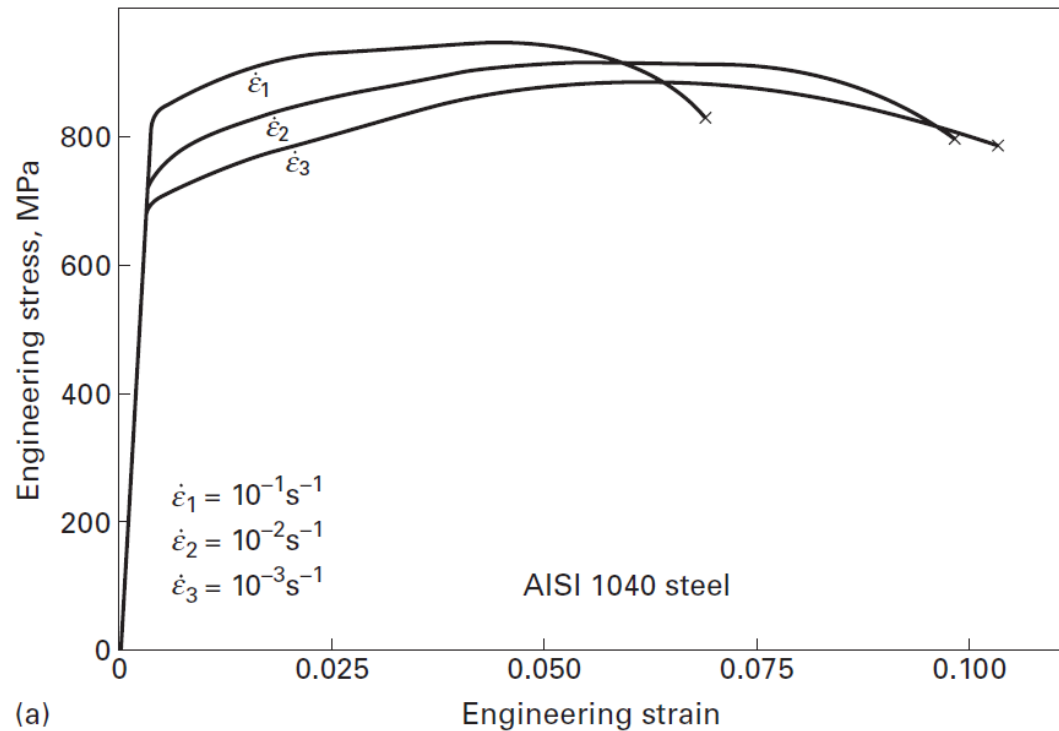


Fig. 3.12 (a) Effect of strain rate on the stress-strain curves for AISI 1040 steel. (b) Strain-rate changes during tensile test. Four strain rates are shown: 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , and 10^{-4} s^{-1} .

Deformação plástica uniforme

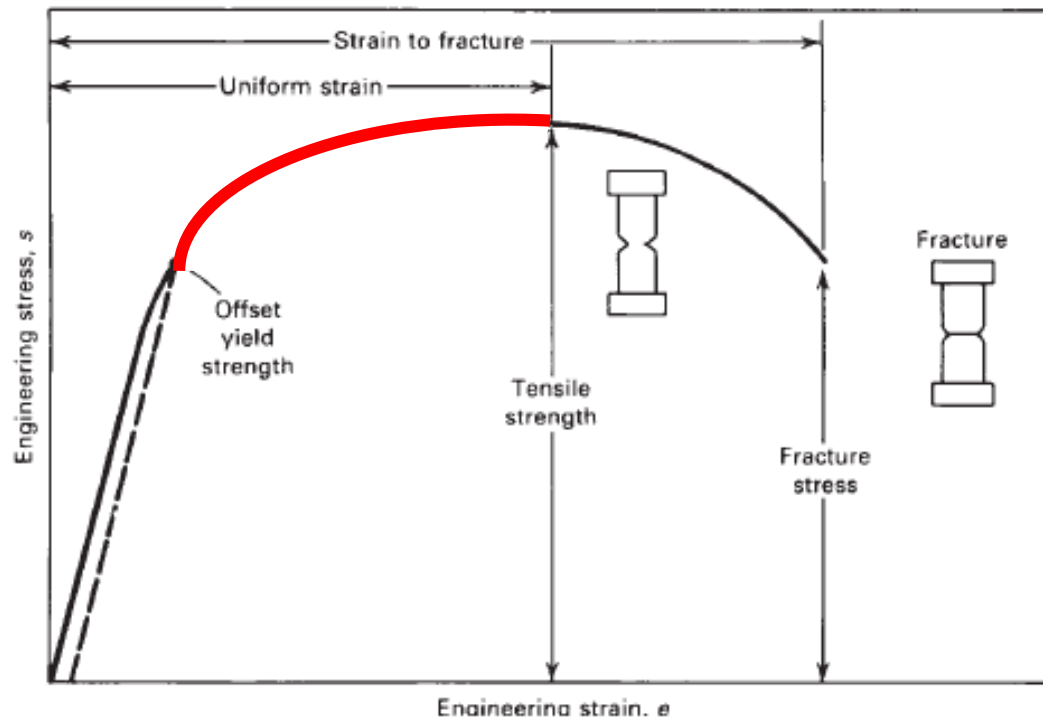


Fig. 3.2 Engineering stress-strain curve. The intersection of the dashed line with the stress-strain curve determines the offset yield strength.

Tensão Cisalhante Crítica para o Deslizamento

A extensão de deslizamento num monocristal depende da magnitude da tensão cisalhante produzida pela ação e cargas externas, da geometria da estrutura cristalina e da orientação dos planos de deslizamento ativos em relação às tensões de cisalhamento.

O deslizamento começa quando a tensão cisalhante no plano de deslizamento, segundo a direção de deslizamento, atinge um valor limite denominado *tensão cisalhante resolvida crítica*. Este valor é o equivalente para monocristais, do limite de escoamento observado nas curvas tensão-deformação dos policristais, e depende principalmente da composição química e da temperatura.

O fato de serem necessárias diferentes cargas de tração para produzir deslizamento num monocristal do mesmo material, porém com diferentes orientações, pode ser explicado pela ação de uma tensão de cisalhamento resolvida de valor crítico, como proposto originalmente por Schmid.

$$\tau_R = \frac{P \cos \lambda}{A / \cos \phi} = \frac{P}{A} \cos \phi \cos \lambda \quad (4.13)$$

Fig. 4.20 Esquema para o cálculo da tensão cisalhante resolvida crítica.

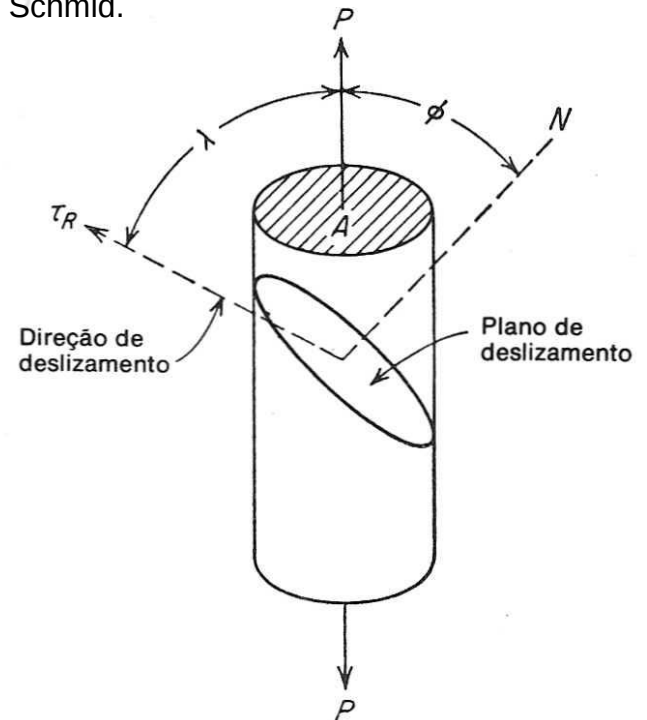


Tabela 4.4 Sistemas de deslizamento à temperatura ambiente e tensão cisalhante resolvida crítica para monocristais metálicos

<i>Metal</i>	<i>Estrutura cristalina</i>	<i>Pureza %</i>	<i>Plano de deslizamento</i>	<i>Direção de deslizamento</i>	<i>Tensão de cisalhamento crítica, g/mm²</i>	<i>Ref.</i>
Zn	h.c.	99,999	(0001)	[11 $\bar{2}$ 0]	18	<i>a</i>
Mg	h.c.	99,996	(0001)	[11 $\bar{2}$ 0]	77	<i>b</i>
Cd	h.c.	99,996	(0001)	[11 $\bar{2}$ 0]	58	<i>c</i>
Ti	h.c.	99,99	(1010)	[11 $\bar{2}$ 0]	1.400	<i>d</i>
		99,9	(1010)	[11 $\bar{2}$ 0]	9.190	<i>d</i>
Ag	c.f.c.	99,99	(111)	[110]	48	<i>e</i>
		99,97	(111)	[110]	73	<i>e</i>
		99,93	(111)	[110]	131	<i>e</i>
Cu	c.f.c.	99,999	(111)	[110]	65	<i>e</i>
		99,98	(111)	[110]	94	<i>e</i>
Ni	c.f.c.	99,8	(111)	[110]	580	<i>e</i>
Fe	c.c.c.	99,96	(110)	[111]	2.800	<i>f</i>
			(112)			
			(113)			
Mo	c.c.c.	...	(110)	[111]	5.000	<i>g</i>

Equação de Ludwik - Hollomon

Para alguns materiais metálicos deformados a temperatura ambiente, a curva tensão-deformação pode ser descrita em sua parcela plástica por:

$$\sigma^r = \sigma_1 (\varepsilon_p^r)^n$$

equação de Hollomon.

onde σ_1 e n são constantes e o ultimo recebe o nome de coeficiente de encruamento.

O subescrito p" indica que apenas a parcela plástica da deformação real e considerada na equação (na maioria dos casos a parcela elástica e desprezível).

$$\sigma^r = \sigma_0 + \sigma_1 (\varepsilon_p^r)^n$$

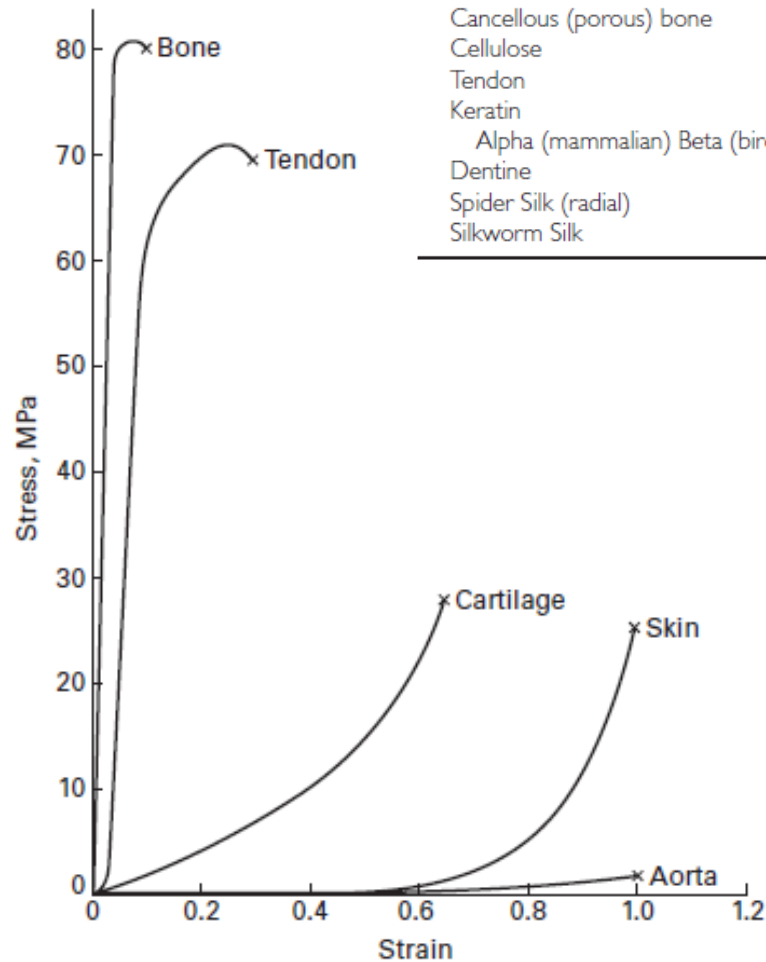
equação de Ludwik-Hollomon

onde σ_0 representaria o limite de escoamento do material.

Table 3.4 Mechanical Properties of Some Biological Materials

Material	E (MPa)	Fracture Stress (MPa)	Strain at Fracture
Elastin	0.6		
Resilin	1.8		
Collagen	1,000	70	0.09
Fibroin	10,000		
Cortical bone –			
Longitudinal	$(14\text{--}24) \times 10^3$	150	~ 0.015
Transverse	$(8\text{--}18) \times 10^3$	50	
Cancellous (porous) bone	10–200		
Cellulose	80,000	1000	0.024
Tendon	1,300	75	0.09
Keratin	2,500	50	0.02
Alpha (mammalian) Beta (birds)	2,000	20	
Dentine		300	
Spider Silk (radial)		1,500	0.06
Silkworm Silk		500	

Fig. 3.52 Stress–strain response for a number of biological materials.



Limite Escoamento

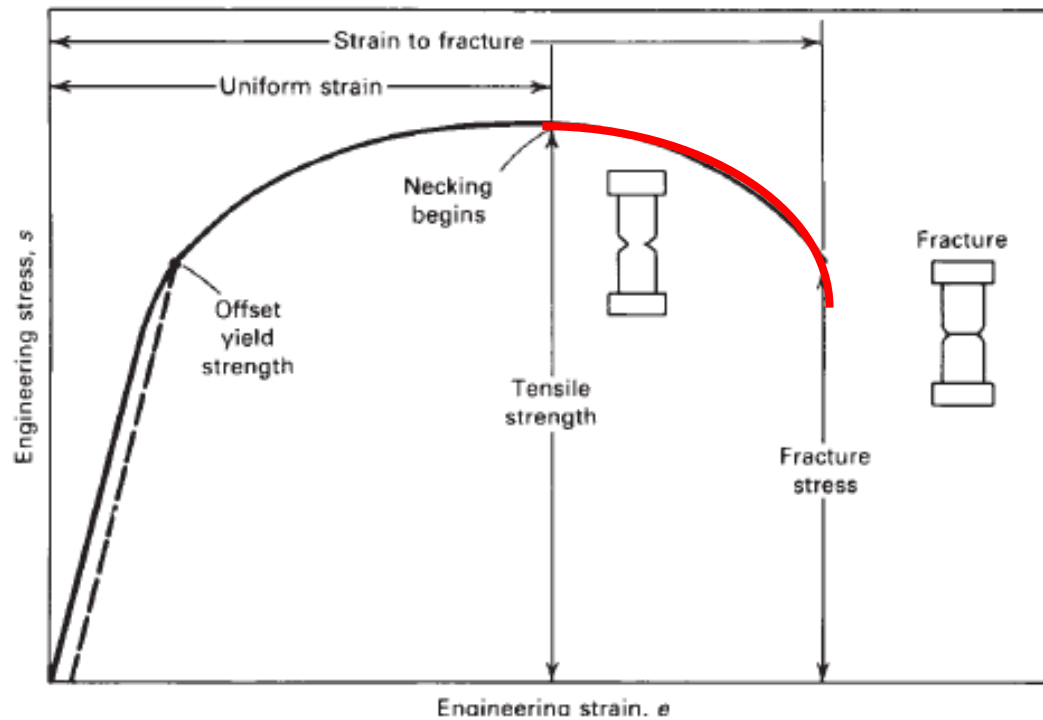


Fig. 3.2 Engineering stress-strain curve. The intersection of the dashed line with the stress-strain curve determines the offset yield strength.

Instabilidade Plástica

instabilidade de deformação associada ao máximo da curva tensão - deformação (de engenharia) esta relacionada ao balanço entre encruamento e a taxa de diminuição da área com o progresso da deformação plástica.

Essa instabilidade recebe o nome de estricção e corresponde a localização da deformação em uma determinada região do corpo,

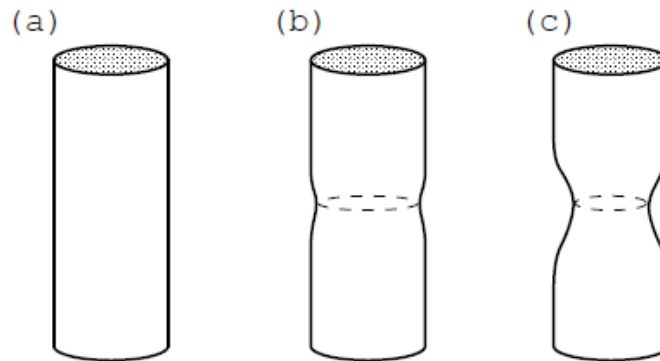
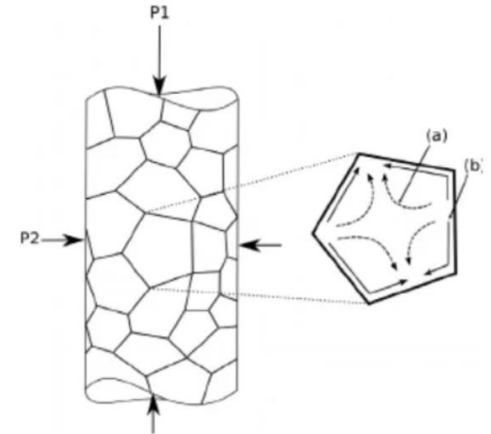


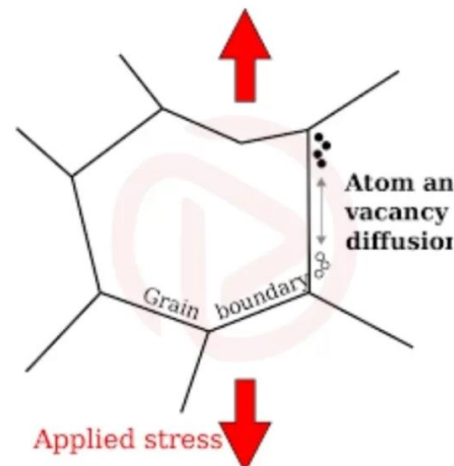
Figura 4.8: Representação gráfica esquemática do desenvolvimento da estricção em um corpo de prova metálico.

MECANISMO DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA

- ✓ Difusão (+ atuante em cerâmicos)
- ✓ Movimento relativo dos grãos
- ✓ Transformação de Fases com aumento de volume
- ✓ Deslizamento Planar;
- ✓ Maclação



Efeito de fluência Nabarro-Herring



Efeito de fluência Coble

Deformação por Deslizamento

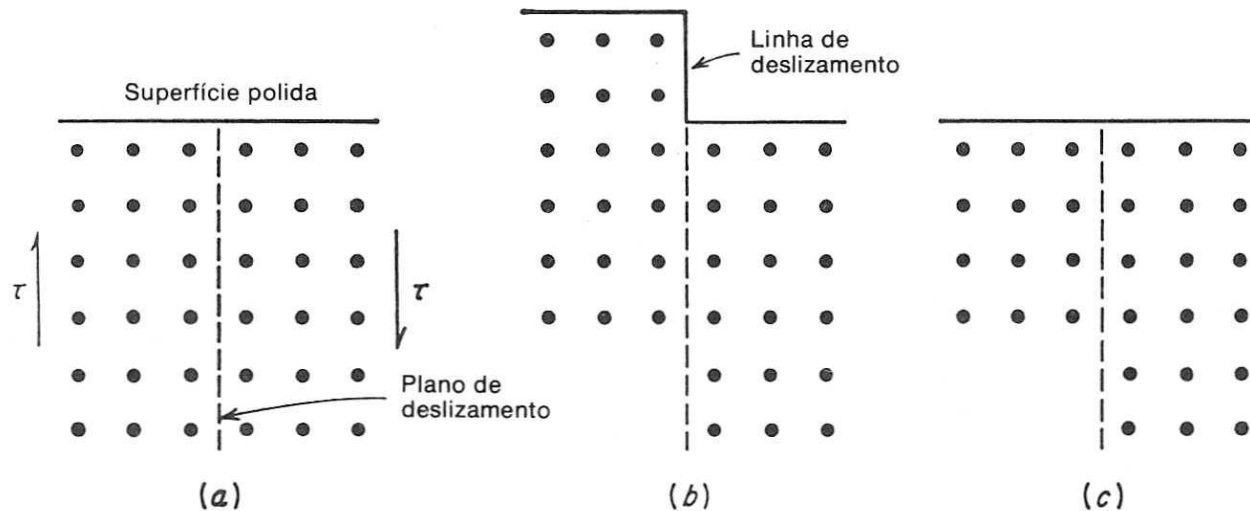


Fig. 4.11 Desenho esquemático da idéia clássica de deslizamento.

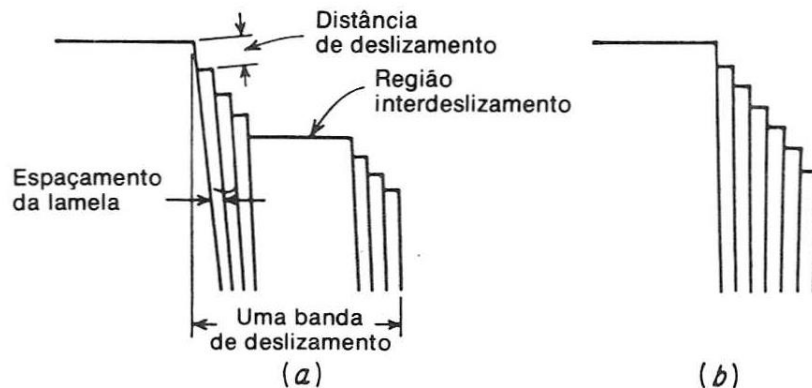


Fig. 4.13 Desenho esquemático da estrutura fina de uma banda de deslizamento. (a) Pequena deformação; (b) grande deformação.

Deformação por Deslizamento

Tendo como referência a Fig. 4.17a, o plano atômico extra da discordância-aresta está inicialmente em 4. Sob a ação da tensão cisalhante, um pequeníssimo movimento de átomos para a direita permitirá que este semiplano se alinhe com o semiplano 5', ao mesmo tempo que o semiplano 5 é separado dos seus vizinhos abaixo do plano de deslizamento.

Através deste processo a linha de discordância aresta movimentou-se de sua posição inicial entre os planos 4' e 5' para uma nova posição entre os planos 5' e 6'. Uma vez que os átomos em volta da discordância estão dispostos simetricamente nos lados opostos do semiplano extra, forças iguais e opostas se opõem e ajudam o movimento.

Desta forma, numa primeira aproximação **não existe uma força resultante sobre a discordância, e a tensão necessária para movimentá-la é zero**. A continuação deste processo, sob a ação das tensões representadas na Fig. 4.17, movimenta a discordância para a direita.

Quando o semiplano extra atinge a superfície livre (Fig. 4.17b), é formado um degrau de deslizamento igual a um vetor de Burgers, ou uma distância atômica para a rede cúbica simples.

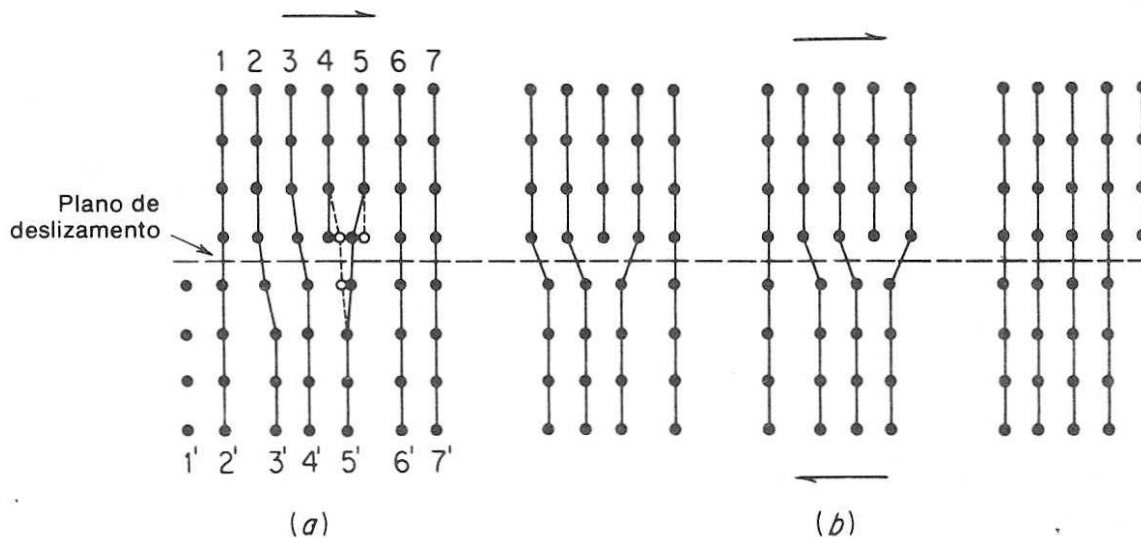


Fig. 4.17 (a) Movimentos de átomos próximos à discordância no deslizamento; (b) movimento de uma discordância-aresta.

A distância interatômica segundo as direções de deslizamento é b , enquanto que o espaçamento entre planos adjacentes da rede é a .

A tensão cisalhante provoca um deslocamento x , segundo a direção de deslizamento, entre o par de planos adjacentes da rede.

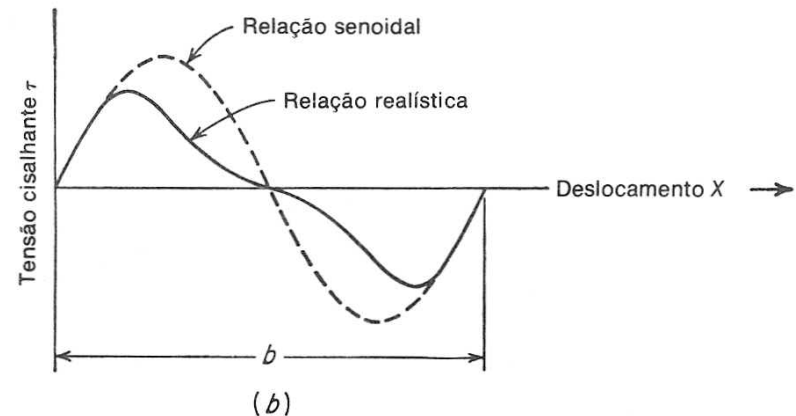
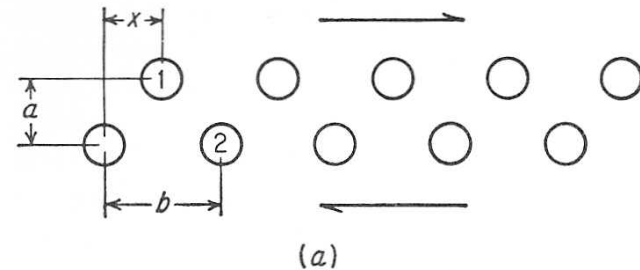
Quando os dois planos são coincidentes, a tensão inicial é zero, valor que se repetirá quando os dois planos forem deslocados relativamente de uma distância b , isto é, quando o ponto 1 do plano superior estiver sobre o ponto 2 pertencente ao plano inferior.

A tensão cisalhante é também zero quando os átomos do plano superior estão situados a uma distância média entre os átomos do plano inferior, uma vez que esta é uma posição de simetria.

relação entre tensão
cisalhante e deslocamento

$$\tau = \tau_m \sin \frac{2\pi x}{b}$$

Fig. 4.16 (a) Deslocamento por cisalhamento de um plano de átomo sobre outro plano atômico; (b) variação da tensão cisalhante com o deslocamento na direção de deslizamento.



Entre estas três posições de tensão nula, cada átomo é atraído em direção ao vizinho mais próximo da outra fila, tornando a tensão cisalhante uma função periódica do deslocamento.

Deformação por Deslizamento

Cottrell' propôs uma maneira particularmente instrutiva de se encarar o deslizamento através do movimento de discordância. Considere que a deformação plástica seja a transição de um estado não-deslizado para um estado deslizado.

Esta região interfacial é uma *discordância*. A espessura (l_i) é a *largura* da discordância.

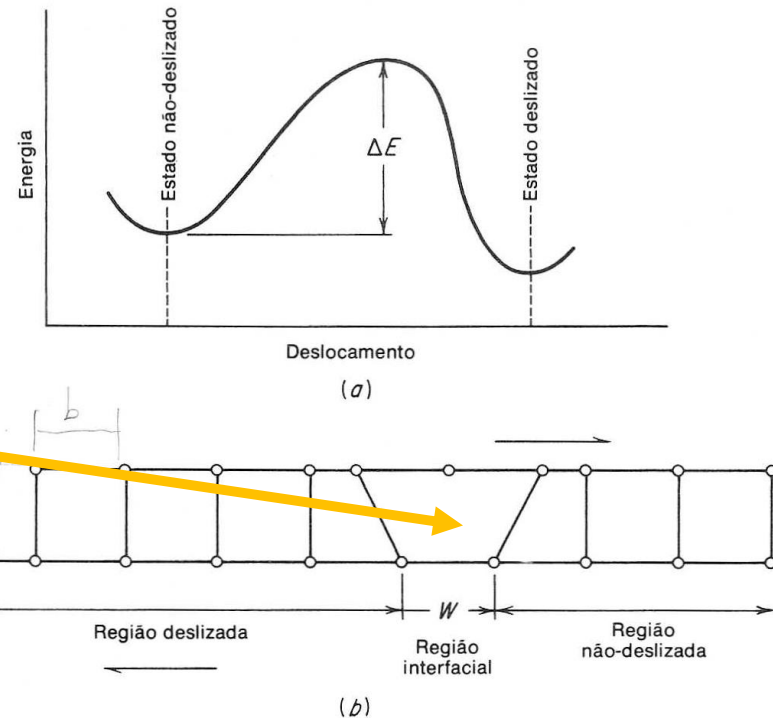


Fig. 4.18 (a) Variação de energia do estado não-deslizado para o deslizado; (b) estágios de crescimento da região deslizada.

Deformação por Deslizamento

Força de Peierls-Nabarro

A largura da discordância é importante porque determina a força necessária para movimentar uma discordância através da rede cristalina. Esta força é chamada de *força de Peierls-Nabarro*.

A tensão de Peierls é a tensão cisalhante necessária para movimentar uma discordância através de uma rede cristalina segundo uma direção particular

$$\tau_p \approx \frac{2G}{1-\nu} e^{-2\pi w/b} \approx \frac{2G}{1-\nu} e^{-[2\pi a/(1-\nu)b]} \quad (4.7)$$

onde a é a distância entre planos de deslizamento e b é a distância entre átomos na direção de deslizamento.

Deve-se notar que a (largura da discordância aparece no termo exponencial da Eq. (4.7), o que significa que a tensão de Peierls será muito sensível às posições atômicas no núcleo de uma discordância.

Materiais que apresentam discordâncias "largas" necessitam de tensões baixas para movimentá-las.

Deformação de cisalhamento decorrente do movimento de uma discordância através de um monocristal

Vamos agora considerar o caso em que uma discordância movimentou-se apenas de uma determinada distância dentro do cristal, ao longo do plano de deslizamento (Fig. 4.19b).

Uma vez que b é muito pequeno comparado com L ou h , o deslocamento causado por uma discordância em uma posição intermediária entre $X_i = 0$ e $X_i = L$ será proporcional a x_i/L .

$$\gamma = b/h$$

onde v , velocidade média das discordâncias, é uma grandeza que pode ser medida experimentalmente de várias maneiras.

Taxa de Deformação Cisalhante

$$\dot{\gamma} = b\rho\bar{v} \quad (4.11)$$

densidade de discordâncias é o comprimento total de linhas de discordâncias por unidade de volume ou, ainda, o número de linhas de discordância que cortam uma área transversal unitária. De qualquer maneira, ρ possui unidades de número de discordâncias por centímetro quadrado.

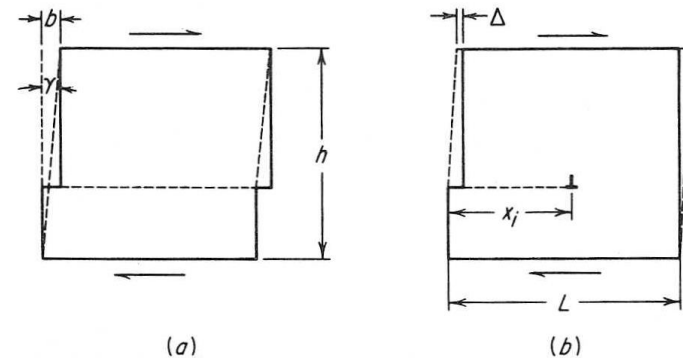
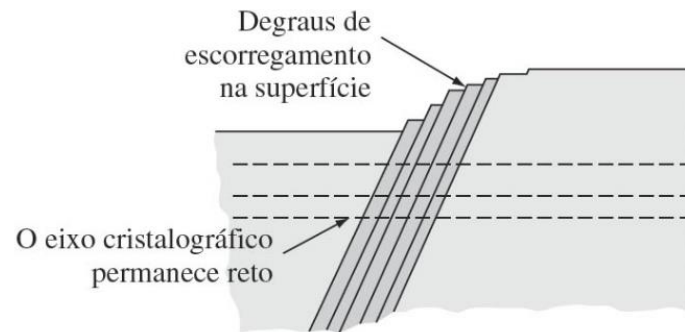
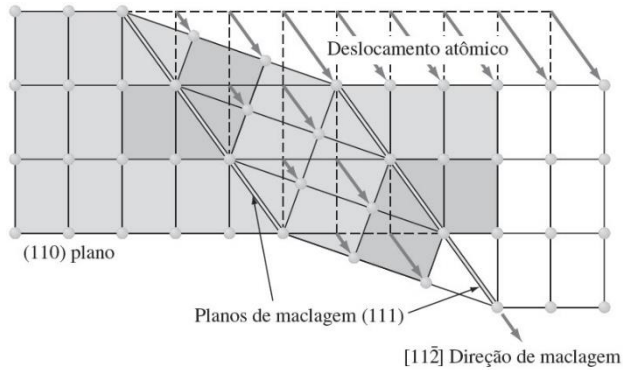
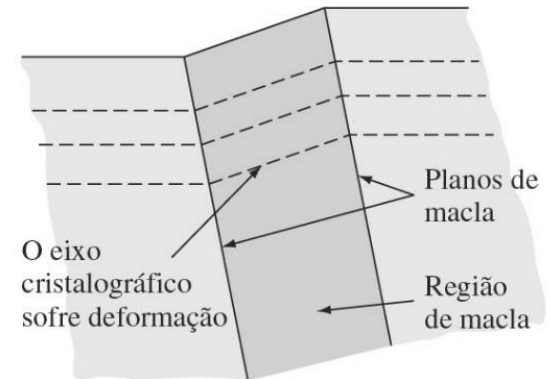


Fig. 4.19 (a) Deformação cisalhante associada à passagem de uma única discordância através do cristal; (b) deformação cisalhante devido ao movimento de uma discordância através de apenas parte do cristal.

Deformação por maclação



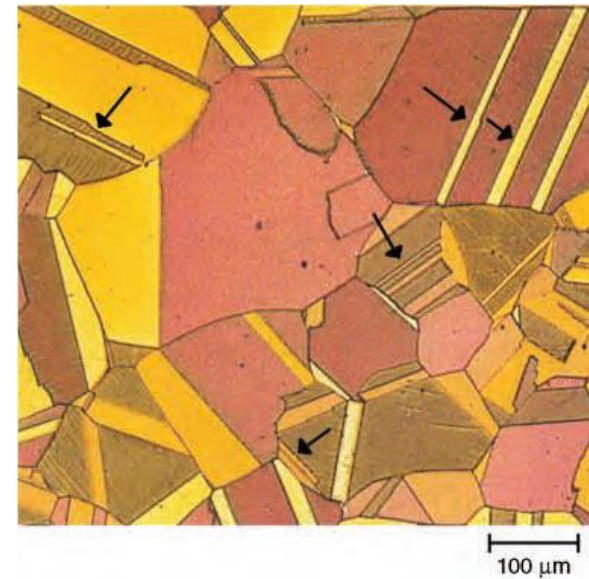
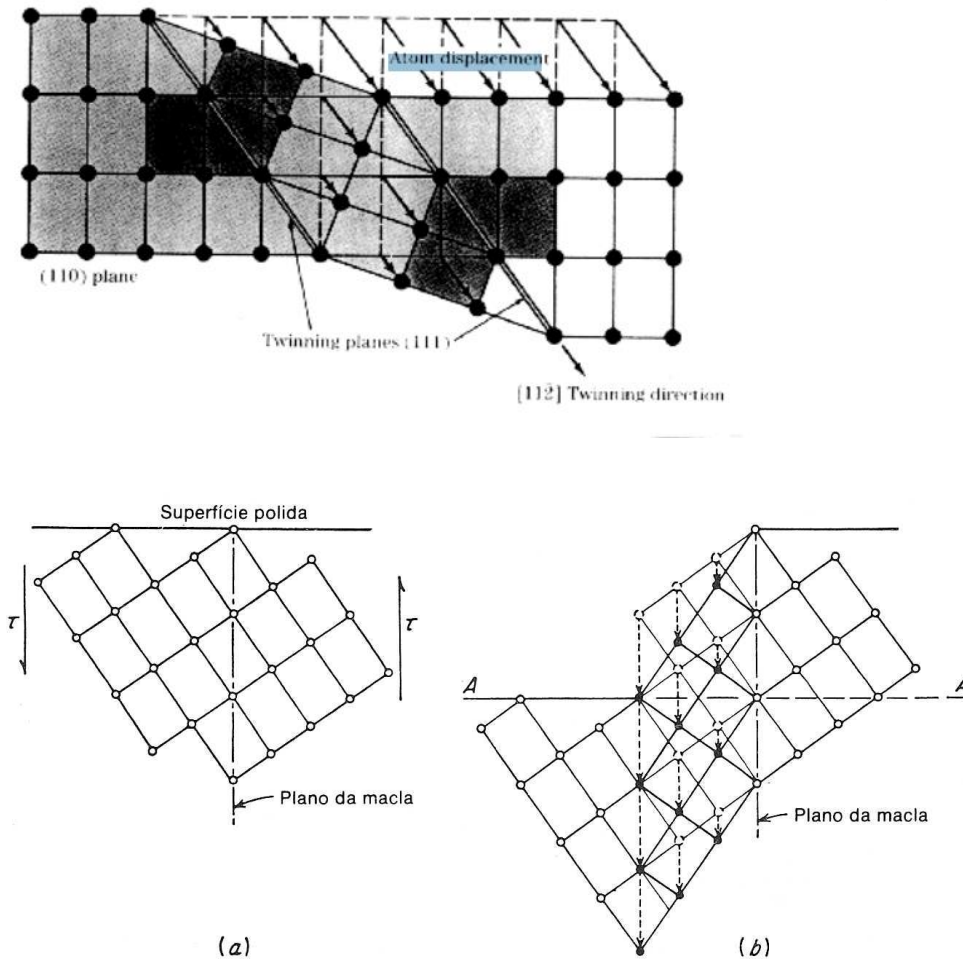
(a)



(b)

Esquema da superfície de um material metálico deformado por (a) escorregamento e (b) maclagem.

Deformação por maclação



Micrografia colorida de latão alfa (Cu-30Zn) trabalhado a frio e recozido com muitas maclas de recozimento (alguns com setas).
Grãos e maclas são tingidos em várias cores de acordo com sua orientação cristalográfica

ig. 4.27 Esquema clássico da maclação.

Limites de maclas geralmente são muito planos, aparecendo como linhas retas em micrografias.

Maclas são defeitos bidimensionais com menor energia armazenada do que a energia armazenada em contornos de grãos de ângulo alto.

Portanto, contornos maclas são menos eficazes como fontes e sumidouros de outros defeitos e são menos ativos em deformação e corrosão do que contornos de grãos comuns.



Estanho puro, apresentando grãos mecanicamente maclados se grãos recristalizados ao longo dos limites dos grãos originais resultantes do trabalho durante o polimento metalográfico

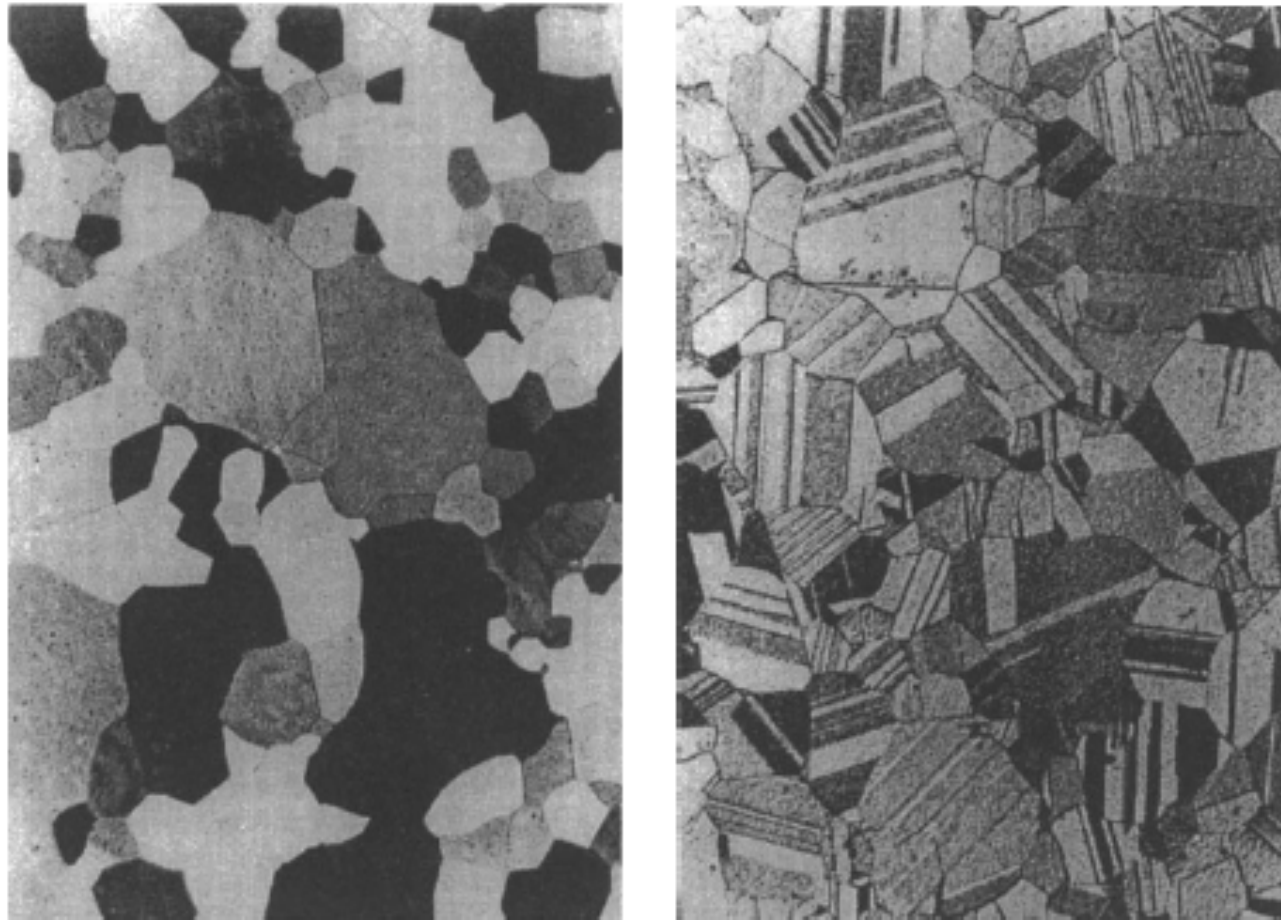
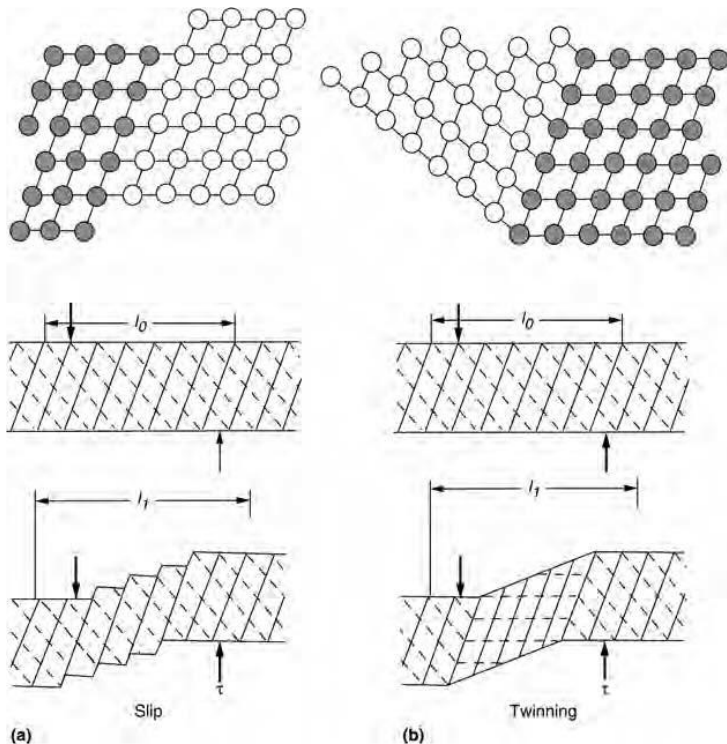


Fig. 1.1. Microstructure of recrystallized aluminium (a) and α -brass (b). The typical straight grain boundaries (twin boundaries) observed in brass are not present in aluminum and give the two structures a totally different appearance.

Comparação entre deslizamento e maclação



A comparação dos mecanismos de deslizamento e maclação é mostrada na Fig. 2.19. As diferenças entre os dois mecanismos de deformação incluem:

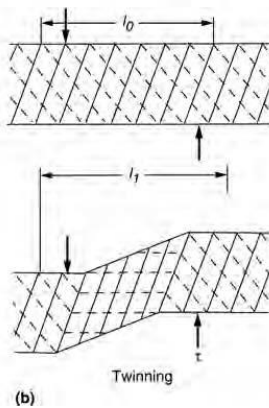
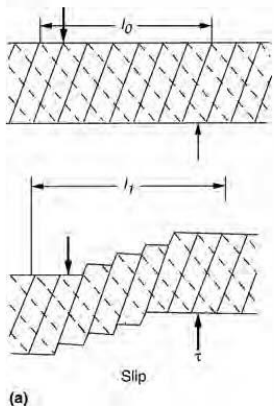
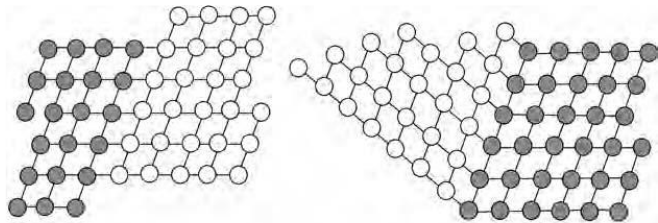
- Orientação.

No deslizamento, a orientação acima e abaixo do plano de deslizamento é a mesma após o deslizamento, enquanto na maclação há uma mudança de orientação através do plano de maclação.

- Imagem espelhada.

Os átomos na porção maclada da rede formam uma imagem espelhada com a porção não geminação. Tal relação não existe no deslizamento.

Comparação entre deslizamento e maclação



A comparação dos mecanismos de deslizamento e maclação é mostrada na Fig. 2.19. As diferenças entre os dois mecanismos de deformação incluem:

- Deformação.

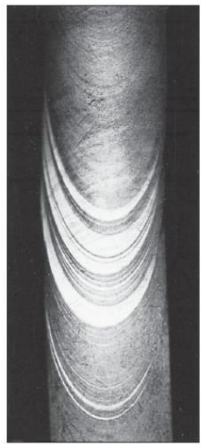
No deslizamento, a deformação é não homogênea porque está concentrada em bandas, enquanto o metal adjacente às bandas Fig. 2.18 Deformação por maclação é em grande parte indeformado. Na maclação, a deformação é homogênea porque todos os átomos se movem cooperativamente ao mesmo tempo.

- Tensão.

No deslizamento, uma tensão menor é necessária para iniciá-lo, enquanto uma tensão maior é necessária para mantê-lo em propagação. Na maclação, uma tensão alta é necessária para iniciar, mas uma tensão muito baixa é necessária para a propagação. A tensão de cisalhamento necessária para a maclação é geralmente maior do que o necessário para deslizamento.

$$\tau_{\text{Maclar}} > \tau_{\text{cisalhar}}$$

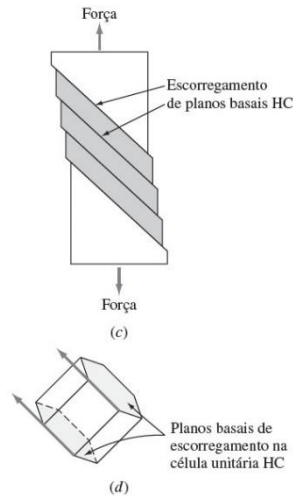
Deformação em monocristais



(a)

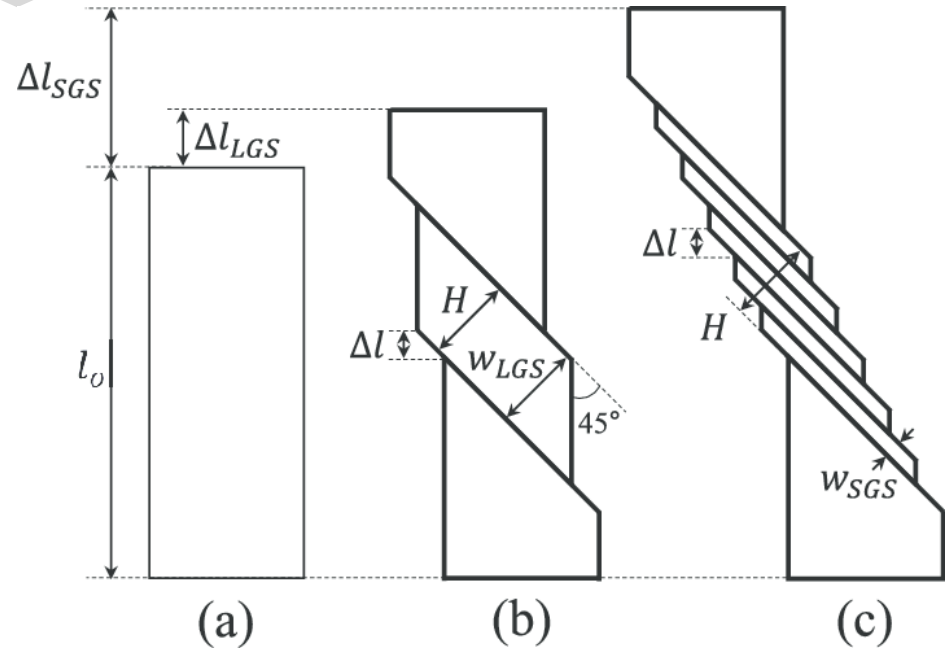


(b)



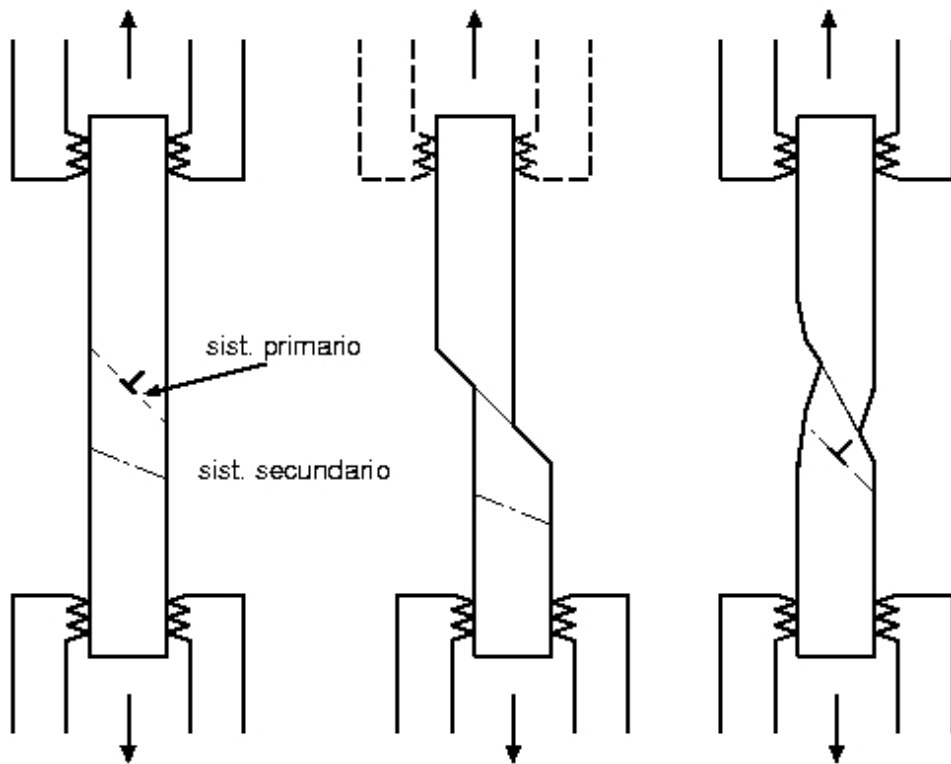
(d)

Monocristal de zinco deformado plasticamente, mostrando bandas de escorregamento: (a) vista frontal do cristal, (b) vista lateral do cristal, (c) vista lateral esquemática, indicando os planos basais de escorregamento no cristal HC e (d) indicação dos planos basais de escorregamento na célula unitária HC.



Diagramas esquemáticos para explicar a diferença da deformação de Lüder no tamanho do grão: (a) antes do ensaio de tração, (b) o aumento do comprimento (ILGS) no tamanho de grão maior e (c) o aumento do comprimento (ISGS) no tamanho de grão menor. l_0 é o comprimento de referência inicial da placa de ensaio. H é a região onde as bandas de Lüder são formadas no comprimento de referência

Deformação em monocristais



Com o progresso da deformação plástica a orientação do monocristal se altera (o reticulado “roda” no espaço)

Mesmo que o cristal esteja orientado de tal forma a ativar apenas um sistema de escorregamento no início da deformação plástica ($\Rightarrow$ monodeslizamento),

o progresso da mesma irá orientar favoravelmente outros sistemas, ativando-os ($\Rightarrow$ polideslizamento $\Rightarrow$ encruamento).

Em um material policristalino esta rotação ocorre em cada grão e resulta em uma redistribuição das orientações cristalinas dos mesmos $\Rightarrow$ textura cristalográfica.

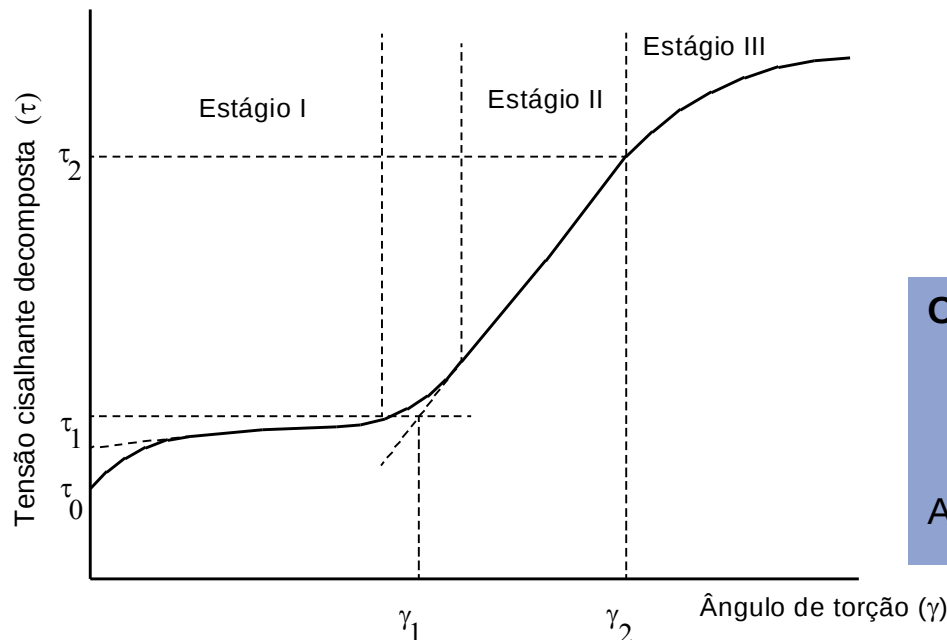
Curva de escoamento genérica para monocristais CFC

O estágio I - estágio de deslizamento fácil (“easy glide”). As discordâncias praticamente não encontram obstáculos ao escorregamento. Apenas um sistema é ativado. Taxa de encruamento muito baixa.

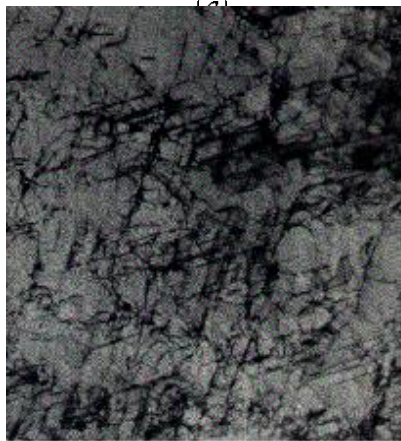
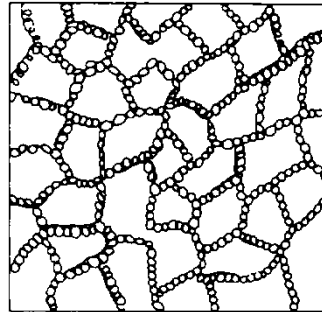
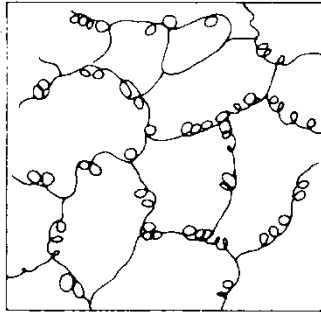
O estágio II - endurecimento linear. Outros sistemas de escorregamento são ativados e ocorre interação entre discordâncias formando emaranhados (“tangles”) que provocam encruamento. Aqui se forma a subestrutura de células, com uma escala cada vez menor.

O estágio III – endurecimento parabólico. Neste estágio ocorre escorregamento com desvio (“cross slip”), em que discordâncias mudam de sistema de escorregamento.

A escala da estrutura de células permanece inalterada.

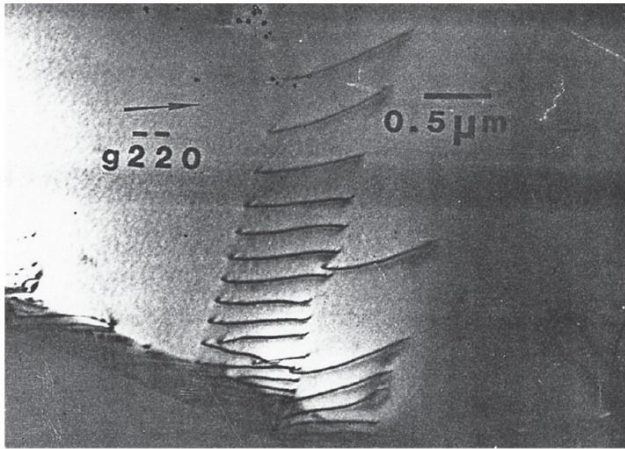


Estrutura celular de discordâncias

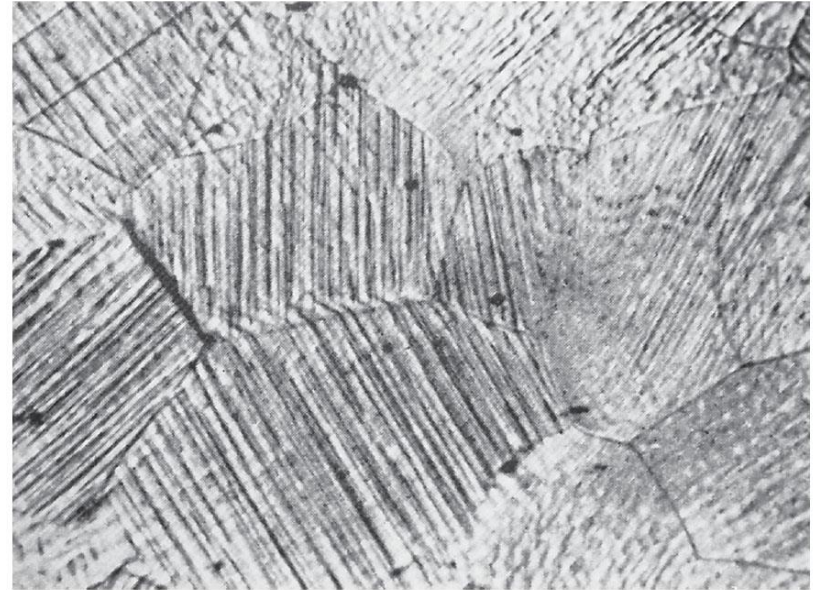


emaranhados de discordâncias, que darão origem a uma **estrutura celular de discordâncias**, que consiste em regiões praticamente livres de discordâncias rodeadas por material de alta densidade de discordâncias

Deformação Plástica em Policristais



Discordâncias empilhadas em um contorno de grão, observadas em uma folha fina de aço inoxidável utilizando microscopia eletrônica de transmissão. (Ampliação 20.000 × .)



Alumínio policristalino deformado plasticamente. Note-se que as bandas de escorregamento são paralelas no interior do grão, mas que há descontinuidade nos contornos. (Ampliação 60 × .)

$$\tau_R = \sigma \cdot \cos \lambda \cdot \cos \Phi$$

Exercícios

Para a realização das questões abaixo, tome como base as anotações de sala de aula e referências abaixo.

1. Qual a influência do escoamento descontínuo nas propriedades dos materiais?
2. O que é necessário para descrever a deformação plástica macroscópica em termos do comportamento das discordâncias?
3. Qual a importância da EDE na deformação por maclação?
4. Quais condições facilitam acontecer a deformação por maclação?
5. Correlacione a estrutura cristalina de um material com a curva de escoamento de três estágios
6. Descreva sobre a possibilidade de aparecimento de maclas de deformação em materiais CFC.

ZHOU, P.; LIANG, Z.Y.; LIU, R.D.; HUANG, M.X.: Evolution and twins in a strong and ductile nanotwinned steel. Acta Materialia. v.111, p. 96-107, 2016.

NEZHADFAR, P.D.; REZAEIN, A.; PAPKIADEH, M.S.: Softening Behavior of a Cold Rolled High-Mn Twinning-Induced Plasticity Steel. ASM International, v. 24, p. 3820-3825, 2015

ANÁLISE DO EFEITO DE CONCENTRADORES DE TENSÃO NA FORMAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE BANDAS DE LÜDERS ATRAVÉS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS
GIORGINI, DANIELLE GRANHA; SILVA, JOÃO PAULO BATISTA; BUBANI, FRANCO DE CASTRO; CETLIN, PAULO ROBERTO; CORRÊA, ELAINE CARBALLO SIQUEIRA

Referências complementares

https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/work_harden/printall.php