

COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS SOB TENSÃO

X.1. INTRODUÇÃO

O comportamento de um material sob solicitação mecânica é fundamental na identificação de propriedades de interesse em engenharia mecânica. Tal comportamento é função direta de três fatores básicos ligados às características do material, ou seja: o tipo e a intensidade das ligações envolvendo átomos ou moléculas; a natureza do arranjo dos átomos ou moléculas e a natureza e quantidade de defeitos no arranjo dos átomos ou moléculas do material. Além desses três fatores, o processamento a que o material foi submetido, determina intensamente a definição das propriedades do mesmo.

Uma das características mais importantes dos materiais no estado sólido é a capacidade dos mesmos em resistir ou transmitir tensões. A resposta desses materiais sob tensão está intimamente relacionada com a propriedade do material em se deformar elasticamente ou plasticamente. Quando um material é submetido a esforços mecânicos, ele deforma-se de duas maneiras: elasticamente e plasticamente. Considera-se que um material exibe comportamento elástico, quando o mesmo, ao ser submetido a esforços mecânicos, apresenta deformações não-permanentes, ou seja, ao se remover tais tensões, o material retorna as suas dimensões originais. Ao nível atômico, a deformação elástica é observada quando as células unitárias alteram suas dimensões, alongando, se o esforço for de tração ou comprimindo, se o esforço for de compressão, como apresenta a figura X.1. Quando os esforços de tração ou compressão cessam, as células cristalinas voltam às formas e dimensões originais.

O comportamento plástico é observado quando o mesmo material é submetido a tensões mais elevadas e suas dimensões são alteradas permanentemente, ou seja, cessados os esforços, o material não retorna as suas dimensões originais. Ao nível atômico, a deformação plástica é principalmente observada quando planos atômicos são deslizados uns sobre os outros, de tal maneira que ao se remover os esforços mecânicos, o material não exibe suas dimensões originais.

A caracterização do comportamento mecânico de um material pode ser implementada pelo emprego do ensaio de tração do mesmo (figura X.2). A aplicação de uma força em um material provoca tensões e deformações (permanentes ou não) no mesmo, como mostra a figura X.3.

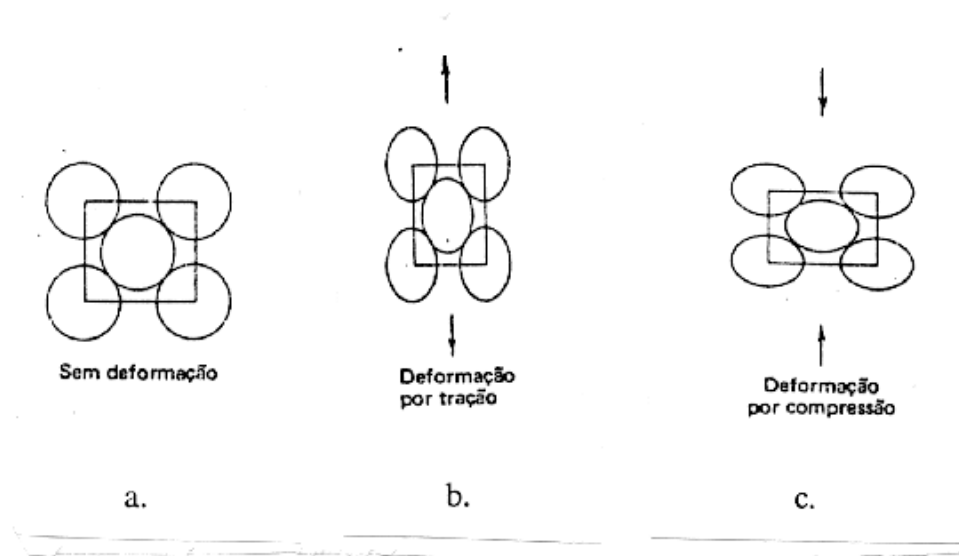


Figura X.1. Deformação elástica em cristais: (a) Cristal sem deformação; (b) Cristal deformado por tração; (c) Cristal deformado por compressão.

A tensão, σ , é definida como força por unidade de área, ou:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{X.1})$$

onde:

σ = Tensão (Pa = N/m²);

F = Força Aplicada (N);

A = Área do Plano (m²).

A deformação (ϵ) é definida como o efeito da tensão em um material, relaciona-se à alteração nas dimensões originais do material e é expressa como variação do comprimento inicial, ou:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (\text{X.2})$$

onde:

ϵ = Deformação (%);

$\Delta L = (L - L_0)$ = Variação de comprimento (m);

L_0 = Comprimento inicial (m);

L = Comprimento final (m).

O ensaio de tração revela duas fases distintas: a elástica e a plástica. Na fase elástica um dos principais parâmetros que o ensaio de tração permite revelar é o módulo de elasticidade do material.

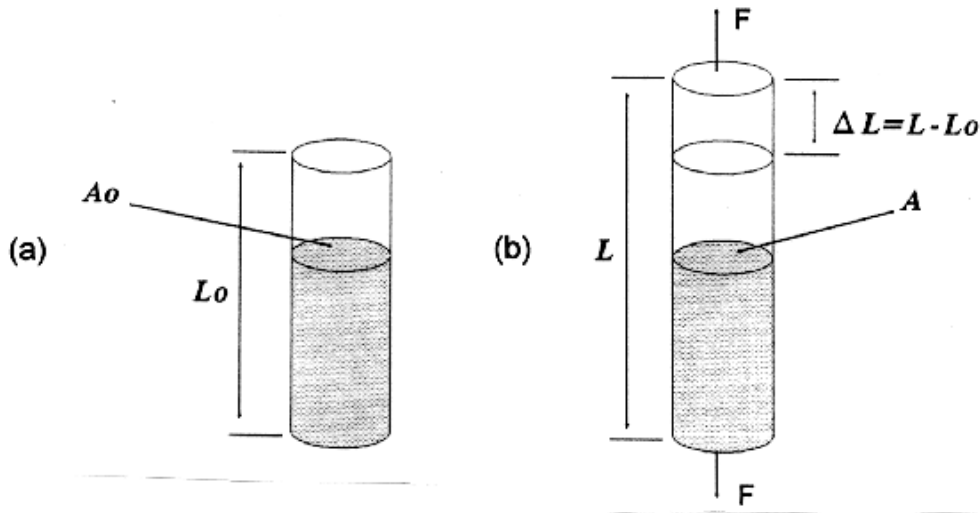
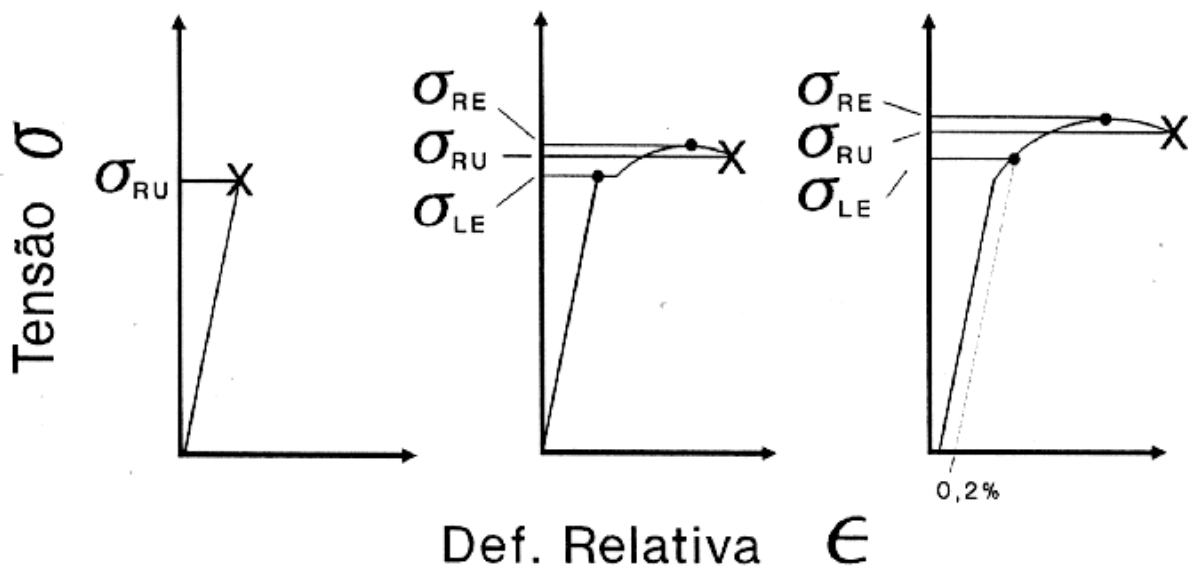


Figura X.2. Diagrama esquemático de um ensaio de tração: (a) Sem deformação; (b) Com deformação.



(a)

(b)

(c)

Tensão limite de escoamento (σ_{LE}) - Tensão necessária para iniciar a deformação plástica;

Tensão limite de ruptura (σ_{RU}) - Final do comportamento plástico (ruptura);

Tensão limite de resistência (σ_{RE}) - Máxima carga suportada pelo material.

Figura X.3. Curvas tensão-deformação relativa: (a) Material não-dúctil sem deformação plástica (ex.: ferro fundido); (b) Material dúctil com ponto de escoamento definido (ex.: aço de baixo carbono); (c) Material dúctil sem ponto de escoamento definido (ex.: alumínio).

X.2. DEFORMAÇÃO ELÁSTICA

Se um material apresenta comportamento elástico, o mesmo segue a lei de Hook, que estabelece que sua deformação varia linearmente com a tensão aplicada. A relação entre tensão aplicada e deformação resultante é constante e denominada de Módulo de Elasticidade (E), ou:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{X.3})$$

O módulo de elasticidade de um material é a medida de rigidez do mesmo. Se um material exibe valor elevado desse parâmetro, isso significa que uma tensão mecânica elevada será necessária para deformá-lo. Como visto no estudo das forças interatômicas, o módulo de elasticidade está diretamente relacionado com a variação de F_{Total} (equação II.3), em relação à distância interatômica ou,

$$\frac{dF_{\text{Total}}}{da} = - \frac{d \left[\frac{(Z_1 e)(Z_2 e)}{4\pi \epsilon_0 a^2} + \frac{nb}{a^{n+1}} \right]}{da} \quad (\text{X.4})$$

A temperatura influencia intensamente o módulo de elasticidade, e quanto mais elevada for a mesma, menor será o módulo de elasticidade. Como o módulo de elasticidade varia com a direção em um cristal (depende da densidade linear de átomos), a anisotropia dos cristais permite que o mesmo varie intensamente com a orientação do cristal. Como exemplo, o ferro tem um módulo de elasticidade médio de cerca de 205 MPa. Porém, o módulo real de um cristal de ferro varia de 208 MPa na direção [111], para apenas 125 GPa na direção [100]. A tabela X.1 apresenta valores de módulo de elasticidade de diversos materiais.

Um outro parâmetro importante, relacionado ao comportamento mecânico dos materiais, é o módulo de elasticidade transversal (G), que relaciona tensões e deformações de cisalhamento dentro da fase elástica do material. Este parâmetro é definido de maneira semelhante ao módulo de elasticidade (E), ou seja:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (\text{X.5})$$

onde:

τ = Tensão de cisalhamento

γ = Deformação elástica por cisalhamento.

Conforme mostra figura X.4, a deformação elástica por cisalhamento, γ , é definida como a tangente do ângulo de cisalhamento α , ou $\gamma = \text{tg } \alpha$.

X.3. DEFORMAÇÃO PLÁSTICA POR DESLIZAMENTO

Na fase plástica do material, ocorrem as deformações permanentes no mesmo. Neste caso, planos atômicos do material são deslocados permanentemente de suas posições originais. Existem dois mecanismos de deformação plástica, quais sejam: o deslizamento de planos cristalinos e a maclação. Em ambos os casos, a deformação ocorre devido às componentes de cisalhamento das tensões aplicadas. A deformação permanente de um material submetido a ensaio de tração pode ser tratada como o alongamento, que é a quantidade de deformação permanente observada antes da ruptura ou estrição, que é a redução da área da secção transversal, observada antes da ruptura.

Material	Módulo de elasticidade (GPa)
Borracha Sintética	0,004 - 0,075
Nylon	2,8
Borracha Vulcanizada	3,5
Chumbo	14
Magnésio	45
Ligas de Alumínio	72,4
Cobre	110
Aço de Baixo Carbono	200
Aço Inoxidável	193
Titânio	117
Quartzo (SiO ₂)	310
Alumina (Al ₂ O ₃)	350
Tungstênio	400

Tabela X.1. Valores do módulo de elasticidade de diversos materiais.

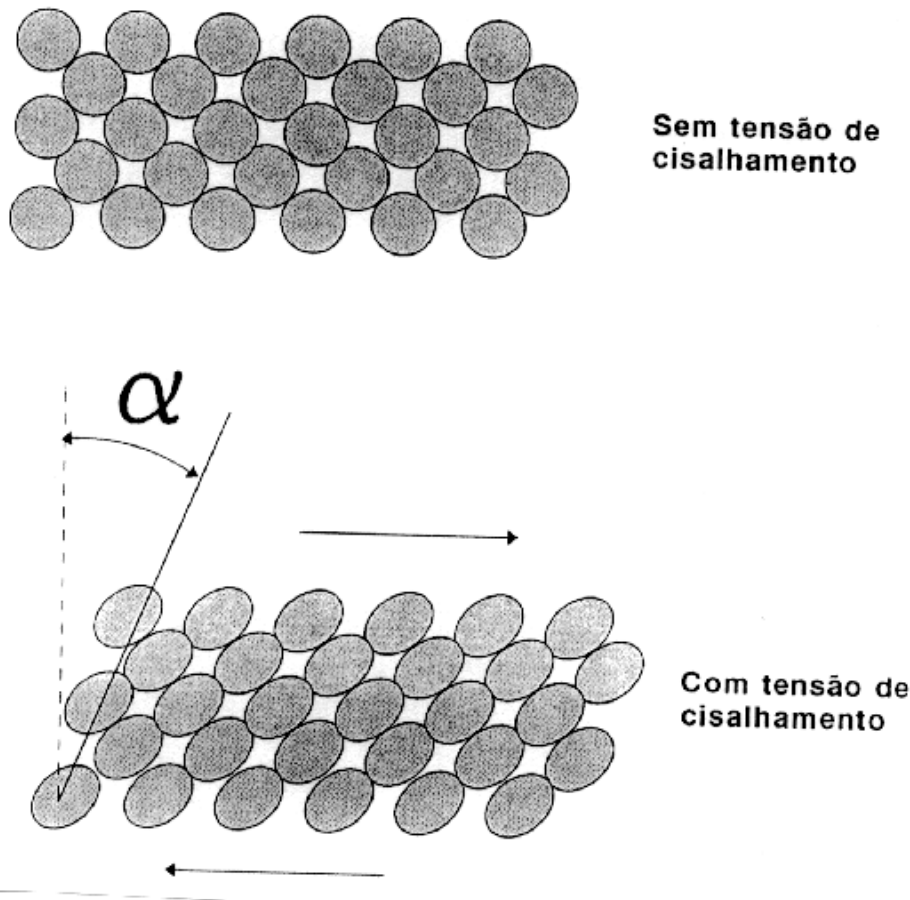


Figura X.4. Diagrama esquemático da deformação elástica por cisalhamento.

O principal mecanismo de deformação plástica é o deslizamento de planos atômicos e caracteriza-se pelo movimento de uma parte do cristal em relação a outra (figura X.5). Nas estruturas cristalinas, estes deslizamentos acontecem em torno de planos atômicos compactos (de alta densidade planar de átomos), seguindo direções compactas (de alta densidade linear de átomos). A tabela X.2 apresenta planos e direções de deslizamento das estruturas cristalinas mais comuns.

A tensão necessária para iniciar a deformação plástica em monocristais, depende não apenas da tensão necessária para deslizar os planos cristalinos, mas também da orientação da tensão aplicada em relação ao sistema de deslizamento. Para que esta deformação plástica por deslizamento de planos atômicos ocorra, é necessário que a componente de cisalhamento da força aplicada ao material, no plano e na direção de deslizamento, atinja o limite de resistência ao cisalhamento do material, também chamado de tensão crítica de cisalhamento. O cálculo desta tensão necessária para deformar o cristal envolve a determinação da área de cisalhamento, bem como da força na direção de cisalhamento.

Considere como exemplo um ensaio de tração. Assumindo que um corpo de prova de geometria cilíndrica e secção transversal A , é solicitado mecanicamente através da força de tração F , como mostra a figura X.6.

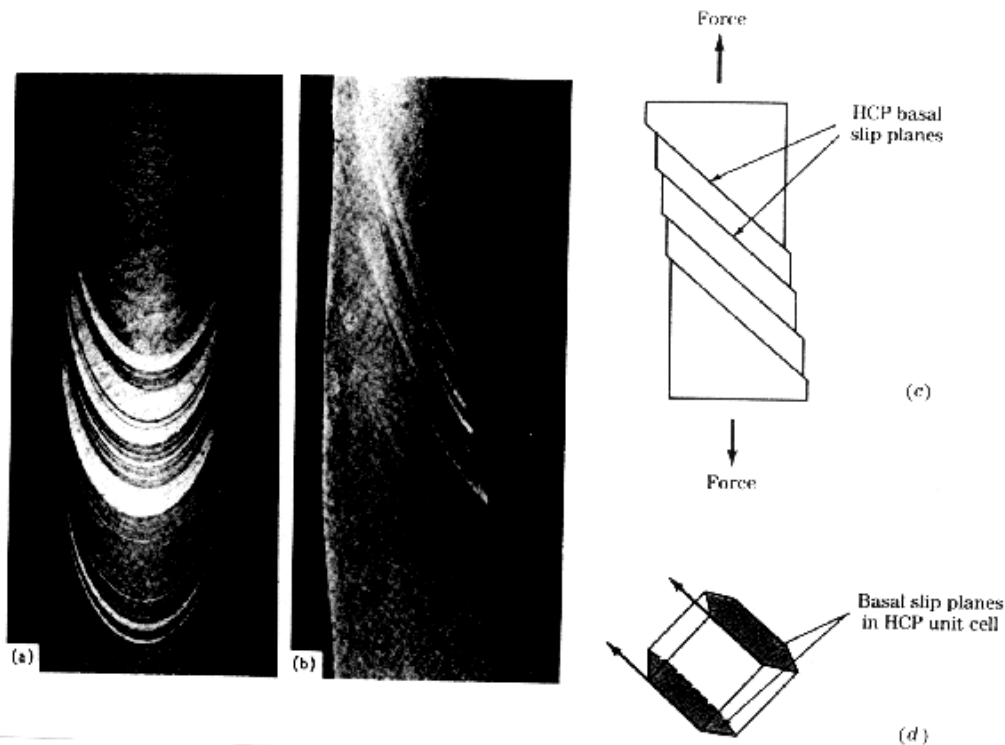


Figura X.5. Deslizamento em um monocristal de zinco paralelo ao plano (0001): (a) vista frontal - cristal real; (b) vista lateral - cristal real; (c) diagrama da vista lateral com os planos de deslizamento; (d) célula HC mostrando os planos de deslizamento.

A aplicação da força F no corpo de prova provoca o aparecimento de uma tensão de tração no mesmo, que é dada por:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{X.6})$$

No plano de deslizamento, a componente desta força F , causa uma tensão de cisalhamento τ , igual a:

$$\tau = \frac{F_S}{A_S} \quad (\text{X.7})$$

onde:

A_S = Área da secção transversal no plano de deslizamento;

F_S = Força aplicada no plano de deslizamento;

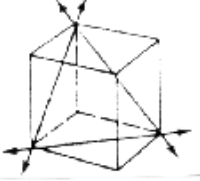
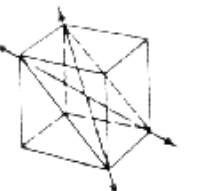
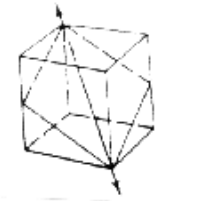
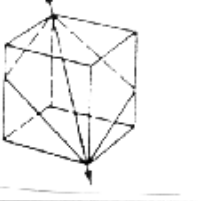
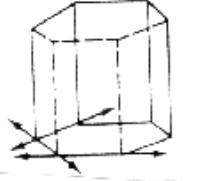
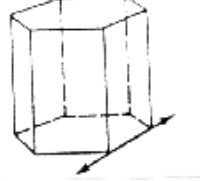
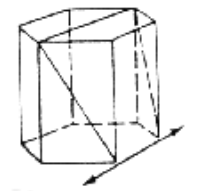
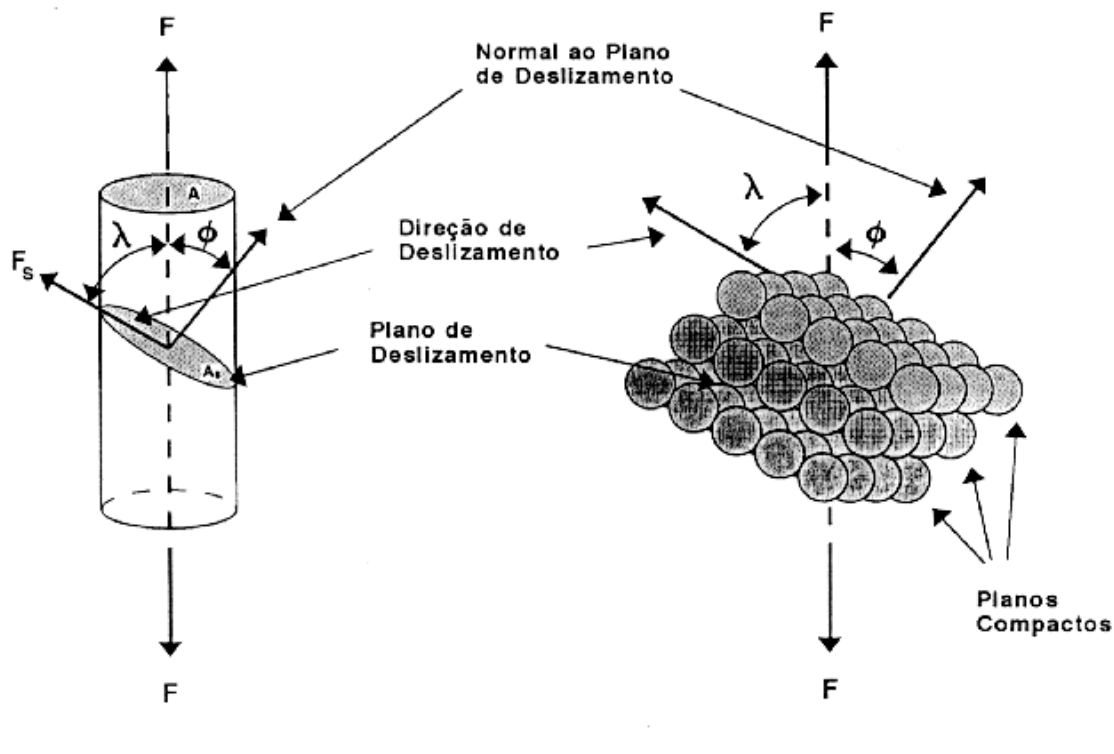
Estrutura	Plano de Deslizamento	Direção de Deslizamento	Número de Sistemas	Diagrama
CFC (Cu, Al, Ni, Pb, Au, Ag ...)	{111}	$\langle 110 \rangle$	$4 \times 3 = 12$	
CCC (Fe _a , W, Mo)	{110}	$\langle 111 \rangle$	$6 \times 2 = 12$	
CCC (Fe _a , W, Mo)	{211}	$\langle 111 \rangle$	$12 \times 1 = 12$	
CCC (Fe _a , K)	{321}	$\langle 111 \rangle$	$24 \times 1 = 24$	
HC (Cd, Zn, Mg, Ti, Be ...)	{0001}	$\langle 1120 \rangle$	$1 \times 3 = 3$	
HC (Ti)	{1010}	$\langle 1120 \rangle$	$3 \times 1 = 3$	
HC (Ti, Mg)	{1011}	$\langle 1120 \rangle$	$6 \times 1 = 6$	

Tabela X.2. Planos e direções preferenciais de deslizamento em alguns cristais



(a)

(b)

Figura X.6. Tensão de cisalhamento em um cristal submetido a esforços de tração: (a) Nível macroscópico; (b) Nível atômico, mostrando direções e planos compactos (sistemas de deslizamento).

Supondo que a força F apresenta um ângulo ϕ em relação à normal ao plano de deslizamento, então:

$$A_S = \frac{A}{\cos\phi} \quad (\text{X.8})$$

A força F_S atuando no plano e na direção de deslizamento é dada por:

$$F_S = F \cos \lambda \quad (\text{X.9})$$

A tensão de cisalhamento no plano de deslizamento é igual a:

$$\tau = \frac{F_S}{A} \cos \phi \quad (\text{X.10})$$

ou

$$\tau = \frac{F}{A} \cos \phi \cos \lambda = \sigma \cos \phi \cos \lambda \quad (\text{X.11})$$

Esta tensão atinge seu valor máximo quando os valores de ϕ e λ são iguais a 45° . Neste caso tem-se:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma}{2} \quad (\text{X.12})$$

A tabela X.3. apresenta valores do limite de resistência ao cisalhamento de diversos metais.

Na deformação plástica por deslizamento, assumindo um mecanismo simplificado onde a deformação implica na ruptura de muitas ligações interatômica ao mesmo tempo, nota-se que a resistência do material considerado será muito maior que a encontrada experimentalmente.

Evidências experimentais sugerem um mecanismo de deformação envolvendo movimentos de discordâncias (figura X.7). As discordâncias facilitam o movimento de planos de átomos dentro de um material. Assim, a tensão de cisalhamento calculada para o ferro é de 10^{10} N/m², porém a obtida experimentalmente é de 10^8 N/m², ou seja, é 100 vezes menor. A razão disto reside no fato de que as ligações entre os átomos são reajustadas passo a passo pelo movimento das discordâncias.

X.4. DEFORMAÇÃO PLÁSTICA POR MACLAÇÃO

O segundo mecanismo de deformação plástica que pode ocorrer em metais é a deformação por maclação. Neste processo, parte da rede cristalina é deformada de modo que a mesma forme uma imagem especular da parte não deformada (figura X.8).

O plano cristalográfico de simetria entre as regiões deformadas e não deformada, é chamado de plano de maclação. A maclação, como o deslizamento, ocorre em direções específicas chamadas de direções de maclação. Entretanto, no deslizamento, os átomos em um lado do plano de deslizamento deslocam-se igualmente. Na maclação, as distâncias de movimentação dos átomos são proporcionais a suas distâncias do plano de maclação. A maclação envolve pequenas

frações do volume total da estrutura atômica e assim, a deformação resultante deste mecanismo é mínima. Porém, um importante papel da maclação é a mudança de orientação do cristal, permitindo a reorientação do mesmo segundo sistemas favoráveis à deformação por deslizamento. A figura X.9 compara os dois tipos de mecanismos de deformação plástica.

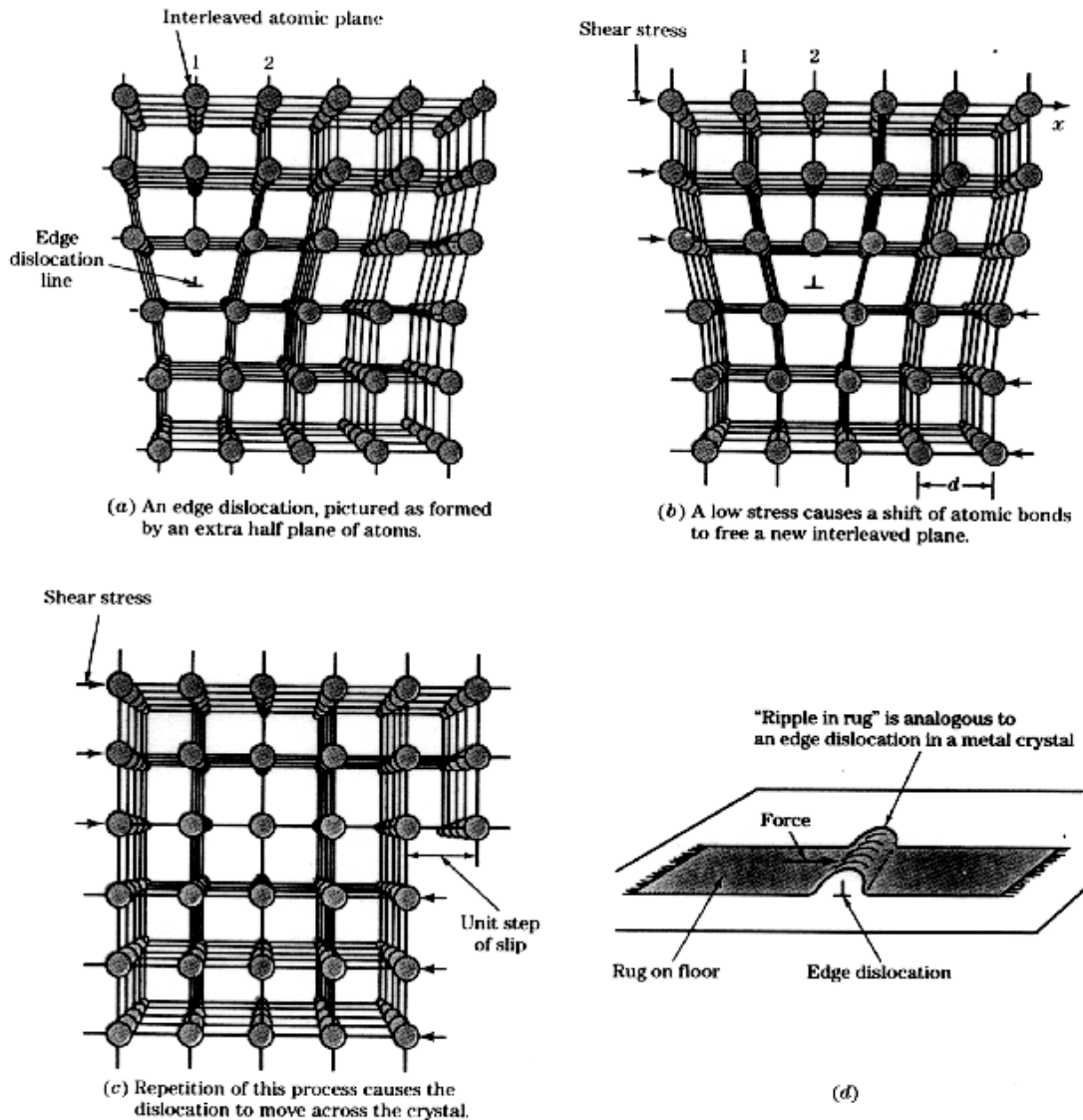


Figura X.7. Ilustração do movimento de uma discordância em cunha produzindo um degrau unitário com a aplicação de uma pequena tensão de cisalhamento: (a) discordância em cunha; (b) tensão provoca mudança das ligações atômicas, para libertar um novo plano intercalado; (c) repetição do processo faz com que a discordância se mova através do cristal; (d) analogia do movimento de uma discordância com o movimento de uma dobra em um tapete.

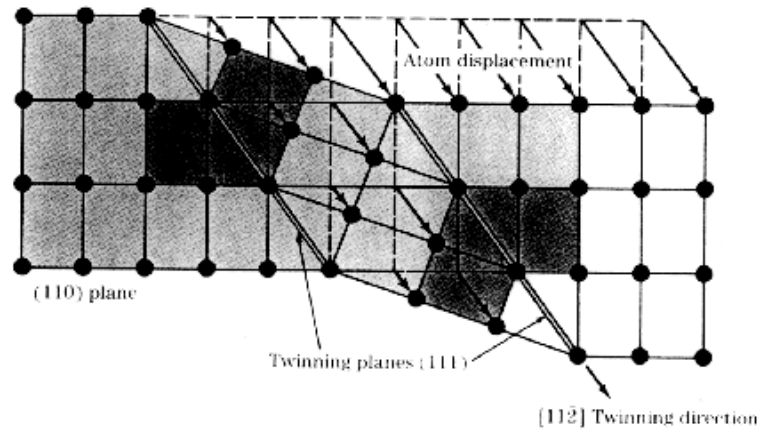


Figura X.8. Diagrama esquemático do processo de maclação, mostrando planos e direções de maclação.

Metal	Estrutura Cristalina	Plano de Deslizamento	Direção de Deslizamento	Resistência ao Cisalhamento (MPa)
Zn	HC	(0001)	[1120]	0,18
Mg	HC	(0001)	[1120]	0,77
Cd	HC	(0001)	[1120]	0,58
Ti	HC	(1010)	[1120]	13,7
Ag	CFC	(111)	[110]	0,48
Cu	CFC	(111)	[110]	0,65
Ni	CFC	(111)	[110]	5,7
Fe	CCC	(110)	[111]	27,5
Mo	CCC	(110)	[111]	49,0

Tabela X.3. Valores de tensão limite de cisalhamento necessários para ocorrer o deslizamento em monocristais de alguns metais.

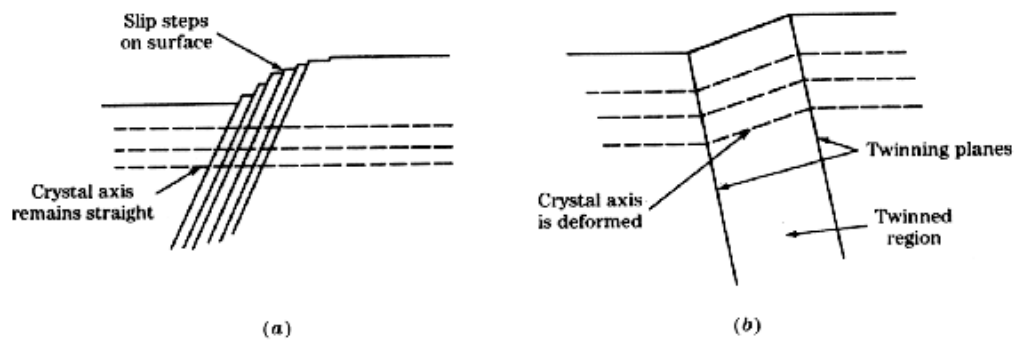


Figura X.9. Diagrama esquemático de superfícies de um cristal deformado por deslizamento (a) e por maclação (b).

X.5. PROPRIEDADES MECÂNICAS

Em função do comportamento mecânico dos materiais, as seguintes propriedades mecânicas podem ser definidas:

a. **Elasticidade** - Capacidade do material ser deformado elasticamente, sem atingir o campo plástico. A relação entre tensão e deformação elástica (σ/ϵ) é definida como módulo de elasticidade (E).

b. **Ductilidade** - Capacidade do material ser deformado plasticamente, sem atingir a ruptura. Pode ser obtida da análise do alongamento e da estricção.

c. **Fragilidade** - Comportamento oposto à ductilidade.

d. **Fluência** - Capacidade do material se deformar lentamente, quando submetido a tensões menores que a de escoamento, sob temperaturas elevadas.

e. **Tenacidade** - Capacidade de um material em armazenar energia sem se romper. Pode ser quantificada através do cálculo da área sob a curva tensão/deformação.

f. **Dureza** - Capacidade de um material em resistir à penetração de sua superfície e está intimamente relacionada com a tensão limite de resistência do material.

EXERCÍCIOS

X.1. Por que a resistência mecânica de um metal monocristalino, calculada teoricamente, é sempre maior que aquela obtida na prática ?

X.2. Quais são os 2 principais mecanismos de deformação plástica ?

X.3. Qual é a função do fenômeno de maclação em um processo de deformação plástica?

X.4. Descreva o papel das discordâncias no processo de deformação plástica ?

X.5. A tensão de cisalhamento crítica para o sistema $\langle 110 \rangle / \{ 111 \}$ do Cu monocristalino é de 1 MPa. a. Qual a tensão a ser aplicada na direção [001] para produzir deslizamento na direção [011] e no plano (111)?