

## CIÊNCIA E TECNOLOGIA DOS MATERIAIS

### 1. INTRODUÇÃO

Os materiais têm sido importantes na cultura humana desde milênios de anos atrás para o uso em transportes, habitação, comunicação, recreação, proteção, etc...enfim, em tudo que está ligado a sua sobrevivência. Entretanto os primeiros seres humanos , tiveram acesso apenas a um número limitado de materiais, os naturais.

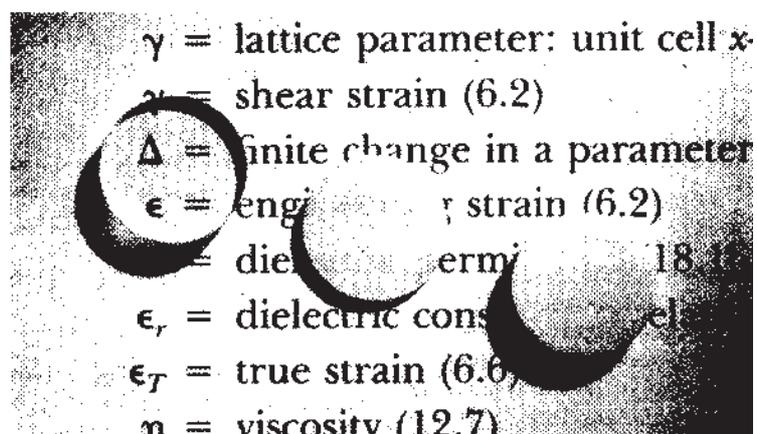
### 2. OBJETIVOS DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA DOS MATERIAIS

Os objetivos deste estudo, é o de buscar soluções para projetos específicos, procurar novos materiais, bem como manipulá-los e analisar sua micro estrutura, segundo alguns critérios:

- Analisando as condições de serviços e de exposição.
- Quais as propriedades físicas e mecânicas esperadas?
- Viabilização econômica do projeto.

Elementos do projeto:

#### PROCESSAMENTO - ESTRUTURA - PROPRIEDADES - DESEMPENHO



( figura 01 ) Amostras de óxido de alumínio

Então, as propriedades finais , o tipo de material, a forma geométrica ,ou seja, o produto final de um projeto nasce passando sempre pôr estes elementos:

Processamento: É a maneira como será fabricado o material;

Estrutura : É como ficará arranjada atômicamente a matéria;

Propriedades: Quais propriedades físicas, químicas ou mecânicas apresentará ?

Desempenho: Será satisfatório ou não ?

A figura 01, mostra uma amostra de óxido de alumínio nas três situações, mas, a primeira à esquerda é um monocristal perfeito, dando a propriedade de transparência, a do meio, já mostra um material policristalino pouco transparente e a da direita um policristalino poroso, completamente opaco.

Neste exemplo, podemos observar que a maneira como foi processado o óxido de alumínio, afetou diretamente a condição de transparência.

Virtualmente as propriedades importantes dos materiais sólidos podem ser agrupadas em seis categorias diferentes:

- Mecânica ( módulo de elasticidade, Resistência mecânica);
- Elétrica ( constante dielétrica, condutividade );
- Térmica ( capacidade calorífica, condutividade );
- Magnética ( estímulo a campo magnético );
- Ótica ( reflexão , refletividade, radiação luminosa );
- Deteriorativa ( reatividade química ).

## **2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS: ( Callister- 2000)**

1º grupo: sólidos

- metais
- cerâmicos
- polimeros

2º grupo: adicionais

- compósitos
- semicondutores
- biomateriais

Metais : São combinações de elementos metálicos, bons condutores de eletricidade e calor e não transparentes, também são muito resistentes e deformáveis.

Cerâmicos: São compostos entre elementos metálicos e não metálicos frequentemente óxidos, nitretos e carbeto. A grande variedade de materiais que se enquadra nesta classificação são compostos de materiais argilosos, cimentos e vidros. Os cerâmicos são duros, porém muito quebradiços.

Polímeros: São materiais comuns de plásticos e borracha, compostos orgânicos baseados no carbono, hidrogênio e outros não metálicos, estrutura molecular muito grande, baixa densidade e extremamente flexíveis.

Compósitos: Consiste em um ou mais tipos de material, trabalhando juntos, sendo que, as propriedades do conjunto são melhores do que a de um material individual. Ex: concreto e fibras de carbono impregnadas.

Semicondutores: São materiais que possuem propriedades elétricas intermediárias aos condutores normais. Eles tornaram possível os circuitos integrados que revolucionaram as indústrias de eletrônicos. ( micro circuitos )

Biomateriais: São empregados em componentes implantados no interior do corpo humano. Todos os materiais citados anteriormente, podem ser usados como biomateriais.

## 2.2 ESTRUTURA ATÔMICA DOS MATERIAIS

Para o estudo dos diversos materiais usados na engenharia, é preciso conhecer a sua estrutura atômica, propriedades e comportamento, quando submetidos à tensões, esforços ou tratamento que modificam sua microestrutura.

## 2.3 ATRAÇÕES INTERATÔMICAS

Elas resultam da interferência de ondas estacionárias e eletrônicas, isto é, do contato entre níveis e órbitas de elétrons, de dois ou mais átomos.

Os tipos de ligações atômicas são as já vistas na química ( iônica, covalente, metálica e secundárias de Van Der Waals). Os materiais macroscópicos, da engenharia civil, como por exemplo, a cerâmica, o aço, os plásticos, etc..., cada um deles se originou de um tipo de ligação atômica.

a) Ligação iônica : Atração mútua entre positivo e negativo  
(propriedades encontradas : Materiais isolantes, duros e quebradiços. Ex: cerâmica, cimentos, rebolos e sal de cozinha).

b) Ligação covalente : Compartilhamento de elétrons de átomos adjacentes.  
(propriedades encontradas : Também isolantes, menos quebradiços. Ex: Plásticos).

c) Ligação metálica : Caracterizada por uma nuvem de elétrons livres e íons positivos. (propriedades encontradas : bons condutores de eletricidade e calor. Ex: ferro, cobre e alumínio).

## 3. TIPOS DE ESTRUTURAS ( ARRANJOS ATÔMICOS)

As propriedades dos materiais dependem do arranjo de seus átomos.  
Estes arranjos podem ser classificados em:

- Estruturas moleculares - agrupamentos de átomos.
- Estruturas cristalinas - arranjo repetitivo de átomos.

- Estruturas amorfas.

### 3.1 ESTRUTURA MOLECULAR

Pode ser definida por um número limitado de átomos, fortemente ligados entre si.

Os exemplos mais comuns de moléculas incluem os compostos como H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CCL<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, etc...

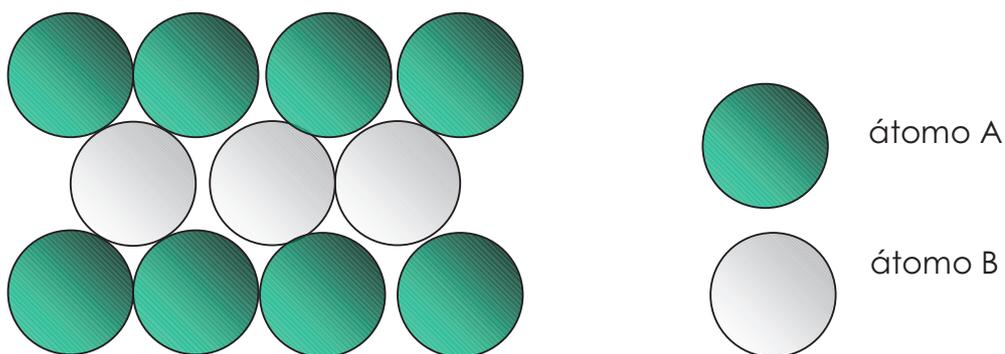
### 3.2 MATERIAIS CRISTALINOS

- compostos por átomos, moléculas ou íons arranjados de uma forma periódica em 3 dimensões.
- As posições que são ocupadas seguem uma ordenação que se repete ao longo de grandes distâncias
- ordem de longo alcance

#### 3.2.1 MODELO DE ESFERAS RÍGIDAS

- os átomos são considerados com se fossem esferas sólidas de diâmetro fixo.

Exemplo: modelo bi-dimensional

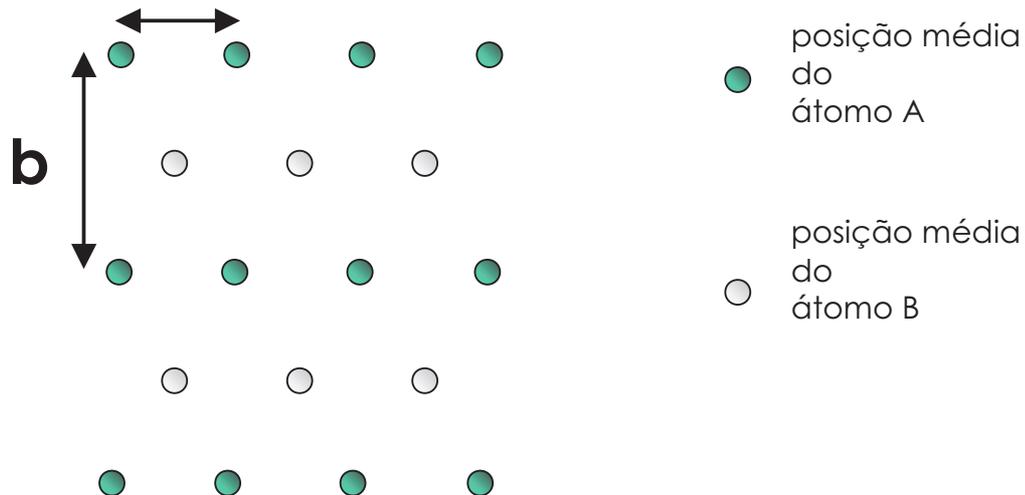


( figura 02 ) Amostras de óxido de alumínio

### 3.2.2 RETICULADO CRISTALINO

— arranjo de pontos que representam a posição média dos átomos

Exemplo: modelo bi-dimensional



( figura 03 ) Amostras de óxido de alumínio

### 3.2.3 CÉLULAS UNITÁRIAS

São as menores entidades que se repetem em uma estrutura cristalina. Várias células unitárias formarão um grão e vários grãos, formarão a matéria.

### 3.2.4 FATOR DE EMPACOTAMENTO ATÔMICO ( f.e.a )

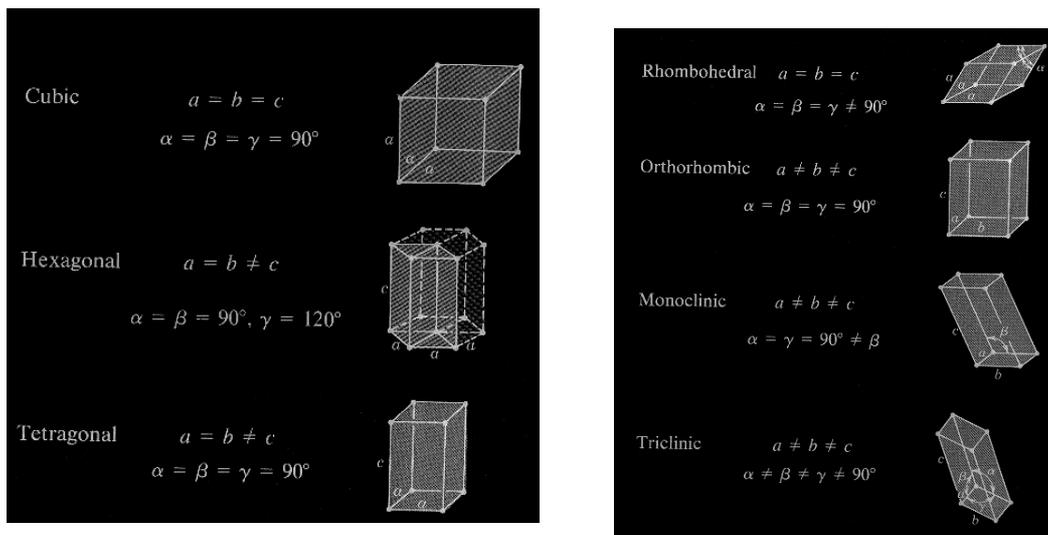
É a relação entre o volume ocupado pelos átomos e o volume da célula unitária.

### 3.2.5 NÚMERO DE COORDENAÇÃO

É o número de vizinhos mais próximos de um átomo.

### 3.3 SISTEMAS CRISTALINOS

Existem somente sete diferentes combinações dos parâmetros de rede. Cada uma dessas combinações constitui um sistema cristalino. O que difere um do outro, é a forma geométrica de cada um deles com mostra a figura 04 abaixo.



( figura 04 ) Sistemas Cristalinos Existentes

Para facilitar nossos estudos, vamos analisar apenas os sistemas mais comuns, que são o cúbico e o hexagonal.

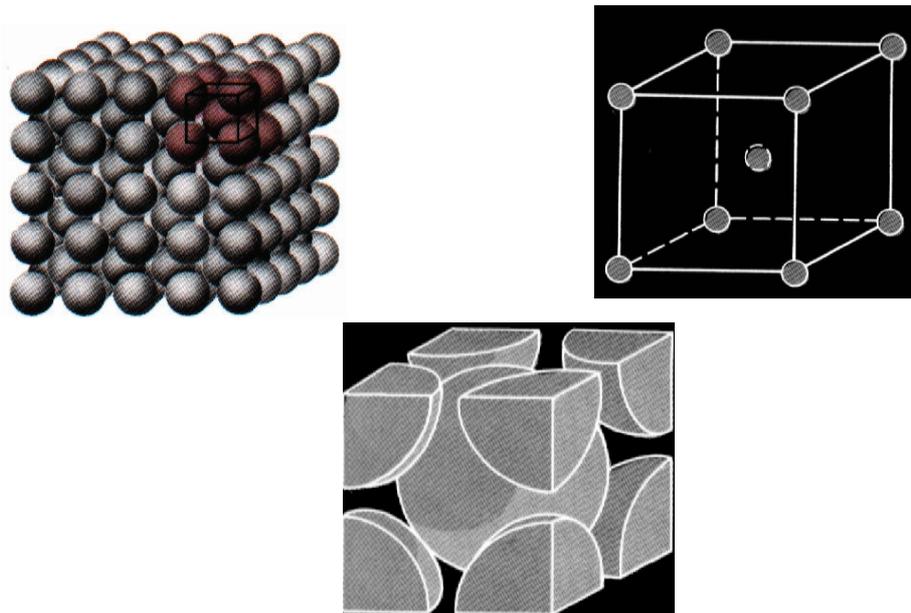
#### 3.3.1 SISTEMA CÚBICO

##### 3.3.1.1 CÉLULA CÚBICA DE CORPO CENTRADO (CCC)

Os átomos estão localizados no **vértice** do cubo e no **centro do cubo**. Célula unitária de um reticulado cristalino. Os círculos representam as posições ocupadas pelos átomos.

Observando a figura 05, ela mostra que , por se tratar de um reticulado cristalino, teremos  $1/8$  de átomos em cada vértice e um átomo ao centro da célula, totalizando 2 átomos.

O fator de empacotamento atômico neste caso é de 0,68, ou seja, volume de 2 átomos dividido pelo volume da célula. A aresta da célula está relacionada com o raio atômico R pela expressão  $a = 4R/\sqrt{3}$ .



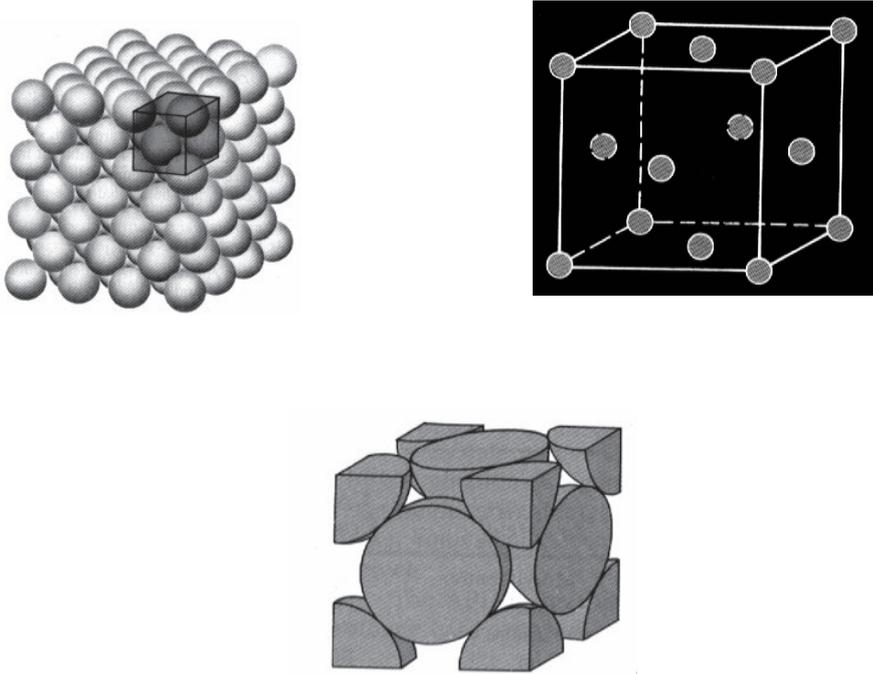
( figura 05 ) Célula unitária representada por esferas rígidas – tamanho real – sólido cristalino CCC.

### 3.3.1.2 CÉLULA CÚBICA DE FACE CENTRADA (CFC)

Os átomos estão localizados no **vértice** do cubo e na **face do cubo**. Célula unitária de um reticulado cristalino. Os círculos representam as posições ocupadas pelos átomos.

Observando a figura 06, ela mostra que , por se tratar de um reticulado cristalino, teremos  $1/8$  de átomos em cada vértice e metade de átomo em cada da célula, totalizando 4 átomos.

O fator de empacotamento atômico neste caso é de 0,74, ou seja, volume de 4 átomos dividido pelo volume da célula. A aresta da célula está relacionada com o raio atômico R pela expressão  $a = 2R\sqrt{2}$ .

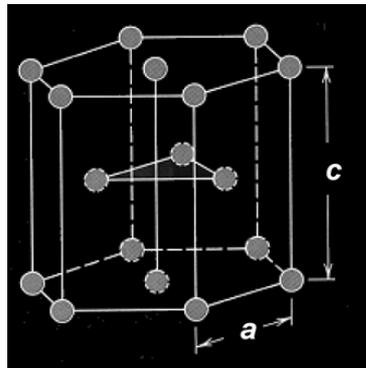


( figura 06 ) Célula unitária representada por esferas rígidas – tamanho real – sólido cristalino CFC.

### 3.3.2 SISTEMA HEXAGONAL

#### 3.3.2.1 CÉLULA HEXAGONAL COMPACTA (HC)

Na célula hexagonal compacta 1/6 dos átomos estão localizados em cada **vértice das faces** hexagonais, 3 átomos localizados no **centro da estrutura** e metade nos **pontos centrais** dos dois planos hexagonais, totalizando 6 átomos na célula e o fator de empacotamento atômico é também é de 0,74, e a distância  $c/a$  na figura 07 vale 1,633 .



( figura 06 ) Célula Unitária Hexagonal Compacta

### 3.4 MATERIAIS AMORFOS

Compostos por átomos, moléculas ou íons que não apresentam uma ordenação de longo alcance.

Podem, no entanto, apresentar uma ordenação de curto alcance. Estes materiais amorfos literalmente sem formas, incluem os gases , líquidos e os vidros.

#### 3.4.1 GASES

Cada molécula ou átomo está à uma distância suficiente dos outros átomos ou moléculas, para que possa ser considerado independente.

#### 3.4.2 LÍQUIDOS

Os líquidos, tal como os gases, são fluídos e não apresentam a ordem encontrada em grandes distâncias nos cristais.

Podemos notar que a estrutura dos líquidos tem muita coisa em comum com a dos cristais, ou seja, um cristal modificado por arranjos térmicos que é suficiente para destruir a ordem em grandes distâncias no reticulado cristalino.

### 3.4.3 VIDROS

Os vidros são considerados, como sendo líquidos super resfriados . Em temperaturas elevadas, os vidros formam líquidos verdadeiros, os átomos movem-se livremente e não há resistência para tensões de cisalhamento. Quando um vidro comercial, na sua temperatura de líquido é super resfriado, há contração térmica causada pelo rearranjo atômico, para produzir um empacotamento mais eficiente dos átomos.

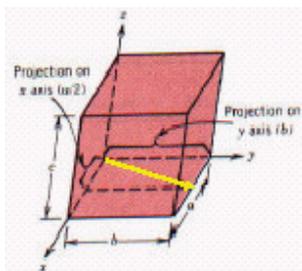
## 4. DIREÇÕES E PLANOS CRISTALINOS

O estudo das direções e dos planos cristalinos, se torna importante quando influencia nas propriedades físicas, mecânicas e elétricas de um determinado componente.

Através deste conceito, podemos entender que um material é chamado *anisotrópico*, quando estas propriedades dependem da direção cristalográfica a qual o material estará submetido. Para exemplificar esta propriedade podemos citar a madeira, que tem alto grau de anisotropia. Entretanto os materiais *isotrópicos* será o contrário, ou seja, as propriedades independem da direção cristalográfica. Para efeitos macroscópicos, podemos dizer que o aço de construção civil apresenta alto grau de isotropia.

Os *monocristais*, são materiais formados por um arranjo repetitivo e perfeito ao longo de toda uma direção, não havendo falhas, formando faces perfeito. Ex: diamante e toda as pedras preciosas. Já os *policristalinos*, são formados pelo crescimento de cristal em várias direções, como por exemplo a ferro , a cerâmica , o concreto etc....

As direções são representadas por um vetor a partir de uma origem “O”, e termina em uma coordenada conhecida a partir desta origem , como mostra a figura 07. Os “índices de Miller” ou coordenadas são apresentados sempre por números inteiros e dentro de colchetes ex: [ 1 1 1 ]. No caso da figura 07 abaixo, teremos [ ½ 1 0 ], então devemos multiplicar todos os índices pelo primeiro número inteiro maior que 1, ou seja, 2. Então os índices apresentados serão [ 1 2 0 ].



( figura 07 ) Direção [ 1 2 0 ]

Do ponto de vista cristalográfico, existem direções e planos equivalentes, dependendo apenas da escolha arbitrária dos eixos de base.

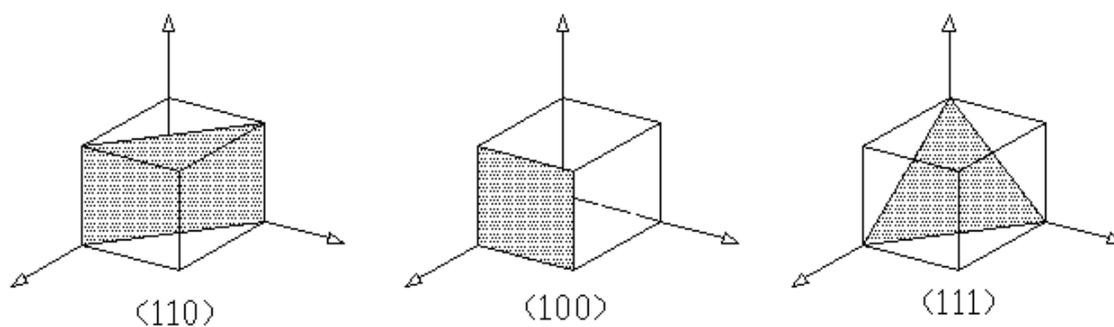
Ex. Direções [100], [010] e [001]

Direções equivalentes são expressas por  $\langle \quad \rangle$ , no ex. dado temos direções  $\langle 100 \rangle$

Ex. Planos (100), (010) e (001)

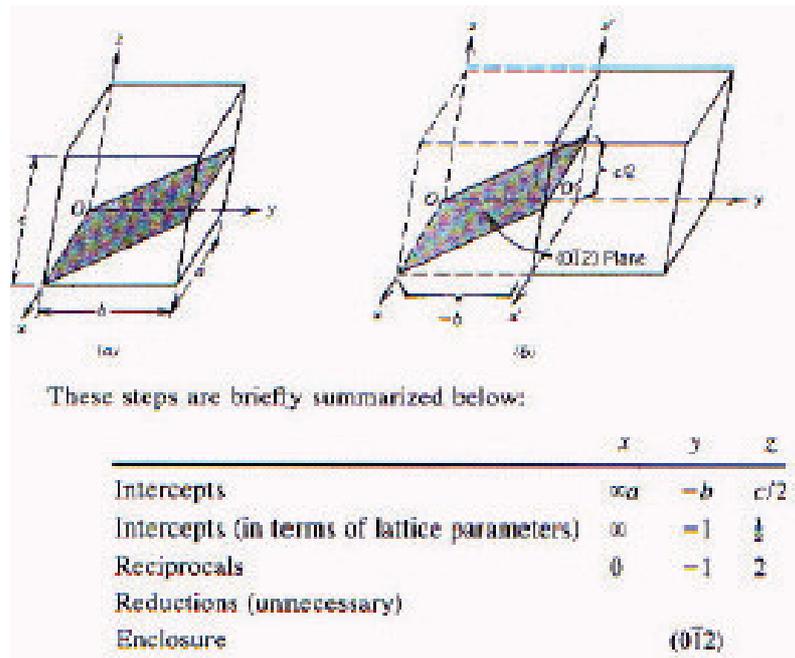
Planos equivalentes são expressos por  $\{ \quad \}$ , no ex. dado temos os planos  $\{ 100 \}$ .

A figura 08 , mostra os planos mais comuns de uma célula unitária cúbica, que também são representados por números inteiros dentro de parênteses.



( figura 08 ) Exemplo de planos cristalinos

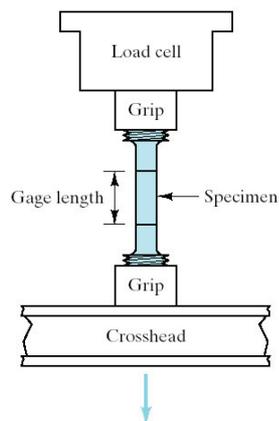
Quando as intersecções não são óbvias, fazemos com mostra a figura 09, ou seja, desloca-se o plano . Se encontrarmos números fracionários, devemos apresentá-lo pelo seu inverso.



( figura 09 ) Plano ( 0 -1 2 )

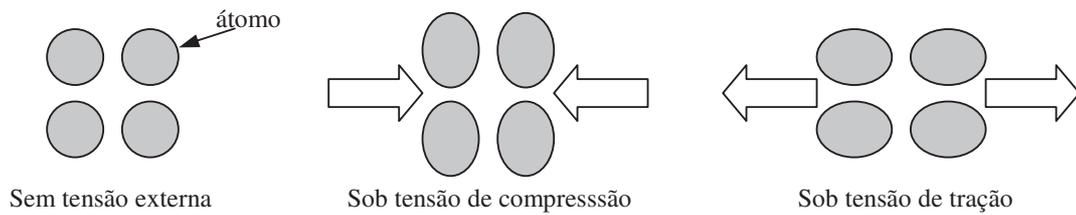
## 5. TENSÃO E DEFORMAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais, quando submetidos a um esforço de natureza mecânica como mostra a figura 10, tendem a deformar-se. Conforme a sua natureza, o comportamento varia durante a deformação. Podem apresentar apenas deformação elástica até a ruptura, como no caso de elastômeros, ou sofrer apreciável deformação plástica antes da ruptura, como nos metais e termoplásticos.



*Load cell* = célula de carga  
*Grip* = dispositivo de fixação  
*Specimen* = corpo de prova  
*Gage length* = comprimento útil  
*Cross head* = travessão móvel

(Figura 10) – Dispositivo para ensaio de tração.



(Figura 11) Deformação elástica no nível atômico.

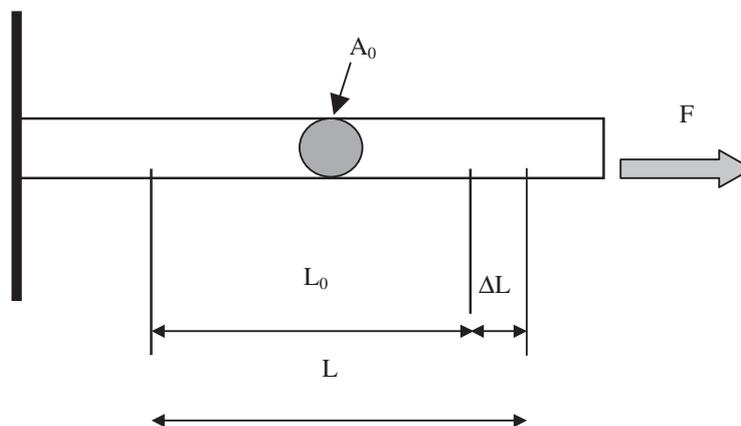
## 5.1 DEFORMAÇÃO ELÁSTICA

A deformação elástica é resultado de uma pequena alongação ou contração do retículo cristalino na direção da tensão (tração ou compressão) aplicada.

A resistência mecânica de um material é caracterizada pelo parâmetro chamado **tensão**, que é a resistência interna de um corpo a uma força externa aplicada sobre ele, por unidade de área.

Considerando uma barra como mostra a figura 12, de área transversal  $A_0$  submetida a um esforço de tração  $F$ , a tensão ( $\sigma$ ) é medida por:

$$\sigma = F / A_0$$



(Figura 12) Barra submetida a esforço de tração.

Com a aplicação da tensão  $\sigma$ , a barra sofre uma deformação  $\epsilon$ . A carga  $F$  produz um aumento da distância  $L_0$ , de um valor  $\Delta L$ . A deformação é dada, então por:

$$\varepsilon = \Delta L / L_0$$

onde:  $\Delta L = L - L_0$

Deve-se observar que a tensão tem a dimensão de força por unidade de área e a deformação é uma grandeza adimensional.

A tensão pode ser relacionada com a deformação através da equação correspondente a lei de Hooke:

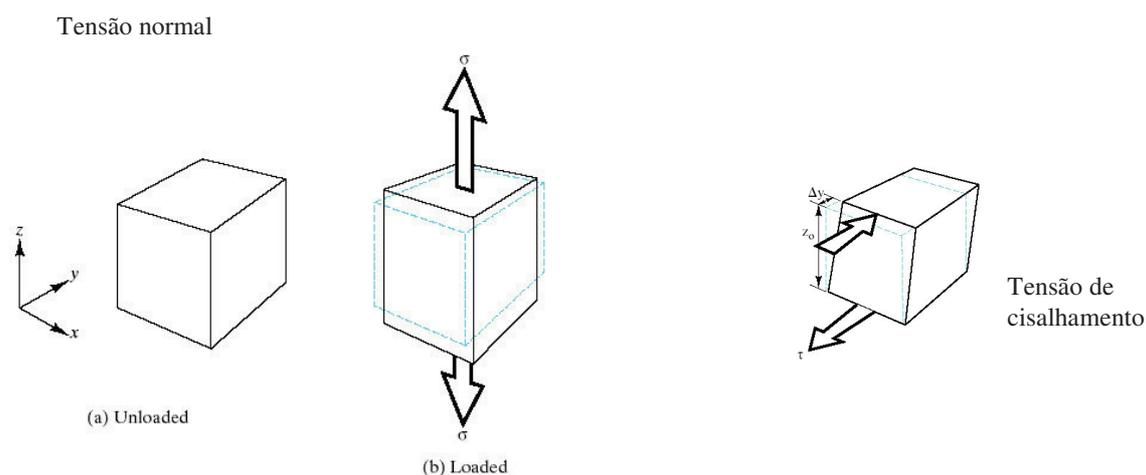
$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

onde E é uma constante do material denominada **módulo de elasticidade**. A tabela 1 mostra módulos de elasticidade para vários metais e ligas.

Quanto mais intensas as forças de atração entre os átomos, maior é o módulo de elasticidade E.

Qualquer elongação ou contração de uma estrutura cristalina em uma direção, causada por uma tensão, produz uma modificação na dimensão perpendicular (lateral), como mostra a figura 13. A relação entre a deformação lateral  $\varepsilon_x$  e a deformação longitudinal  $\varepsilon_y$  é chamada de **coeficiente de Poisson**:

$$\nu = - \varepsilon_x / \varepsilon_y$$



(Figura 13) Deformação causada a um corpo de prova sob efeito de tensão, no regime elástico.

Tabela 1 - Módulo de Elasticidade na temperatura ambiente.

Metal	poisson	E (MPa)	Liga Metálica	poisson	E (MPa)
Ferro	0,3	210.000	Aço	0,3	210.000
Cobre	0,34	112.00	Latão	0,34	97.000
Alumínio	0,33	70.000	Alumínio	0,33	74.200
Magnésio	0,29	43.750	Magnésio	0,29	45.500
Chumbo	0,3	17.500	Titânio	0,34	107.000

Obs: A direção cristalina influencia no módulo de elasticidade do material.

Os materiais não são isotrópicos em relação ao módulo de elasticidade. Por exemplo, o ferro tem um módulo de elasticidade variando de 272.000 MPa na direção [1 1 1] a 125.000 MPa na direção [1 0 0]. O conhecido valor de  $E=210.000$  MPa é, na verdade, um valor médio, pois o material é policristalino.

ATENÇÃO: observe apenas que cada direção tem um nome. Ex. [100], [111]

Isotrópico: a propriedade especificada é igual em qualquer direção.

Anisotrópico: a propriedade especificada varia conforme a direção.

## 5.2. DEFORMAÇÃO PLÁSTICA

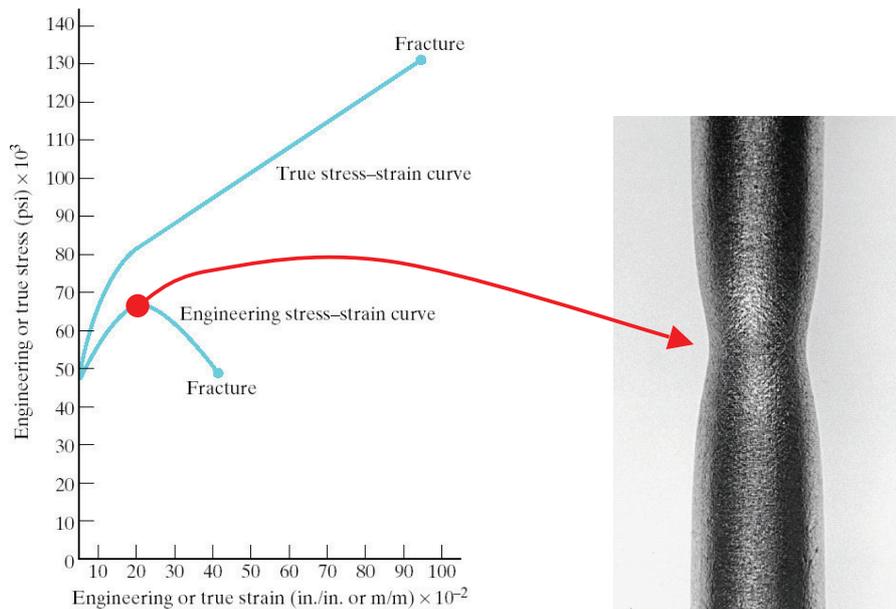
Na prática a importância da deformação elástica na maioria das peças, estruturas e equipamentos que fabricamos não devem sofrer modificações na sua forma com o tempo. Por exemplo, não queremos montar um telhado sobre uma estrutura metálica, e o peso deste telhado deformar algumas tesouras, podendo ocasionar um efeito catastrófico. Por isto, projetamos esta estrutura para suportar apenas deformação elástica.

A capacidade dos metais de serem deformados de modo permanente é chamada de **plasticidade**. Portanto, deformação plástica é aquela que ocorre quando um carregamento causa um deslocamento permanente, ou seja, a retirada da tensão não implica no retorno dos planos cristalinos as suas posições originais.

### 5.3. TENSÃO VERDADEIRA E DEFORMAÇÃO VERDADEIRA

Considerando sempre a área inicial para o cálculo de tensão, ocorre um erro devido à mudança do valor da área na região plástica, em especial após o fenômeno de estricção (figura 14). A tensão real deveria ser calculada através da seguinte equação:

$$\sigma = F / A_{real}$$



(Figura 14) Diagrama tensão x deformação mostrando as curvas  $\sigma \times \epsilon$  e  $\sigma_v \times \epsilon_v$  e o fenômeno de estricção (formação de um “pescoço” no corpo de prova) na máxima tensão.

Pode-se utilizar o seguinte modelo que caracteriza a região plástica do material:

$$\sigma_{real} = K \epsilon_{real}^n$$

onde  $K$  e  $n$  são constantes que dependem do tipo de material e da história termomecânica (grau de trabalho mecânico, tratamentos térmicos, etc.).

## 5.4. PROPRIEDADES DE TRAÇÃO

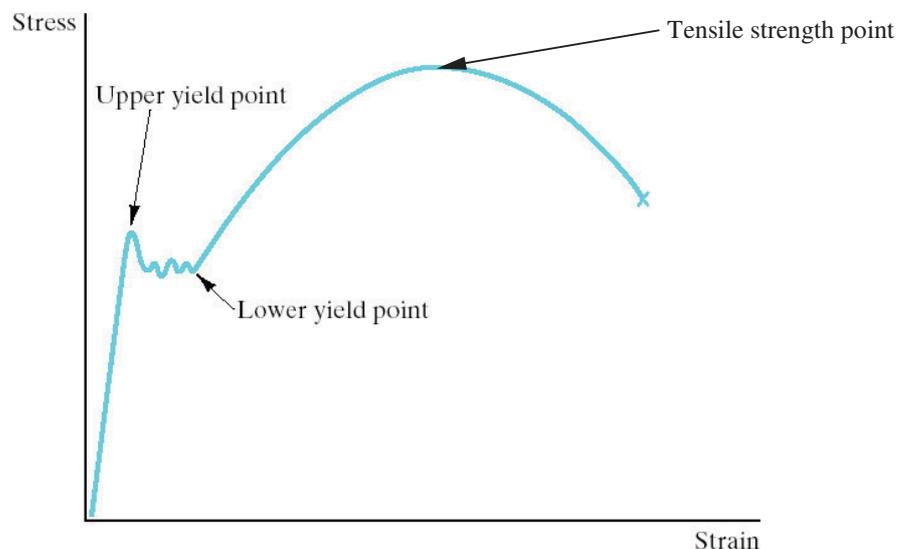
A resistência à tração é uma das propriedades mais importantes dos materiais, pois por intermédio de sua determinação, podem ser obtidas características significativas do material, tanto no projeto, quanto no controle de qualidade.

A resistência à tração, como também as outras propriedades mecânicas, depende do tipo de material, do teor de elementos de liga, das condições de fabricação e tratamento, da estrutura, da temperatura, etc.

Os valores obtidos nos ensaios de tração permitem ao projetista:

1. conhecer as condições de resistência do material sem que sofra deformação permanente;
2. superada a fase elástica, conhecer até que carga o material pode suportar, em condições excepcionais.

Além disto, o exame da fratura do corpo de prova, depois de realizado o ensaio, permite verificar o comportamento dúctil ou frágil do material e a presença de eventuais falhas originadas durante a sua fabricação (ex. porosidades de fundição).



(Figura 15) curva tensão x deformação para um aço de baixo teor de carbono, mostrando o limite de escoamento superior e inferior e o limite de resistência à tração.

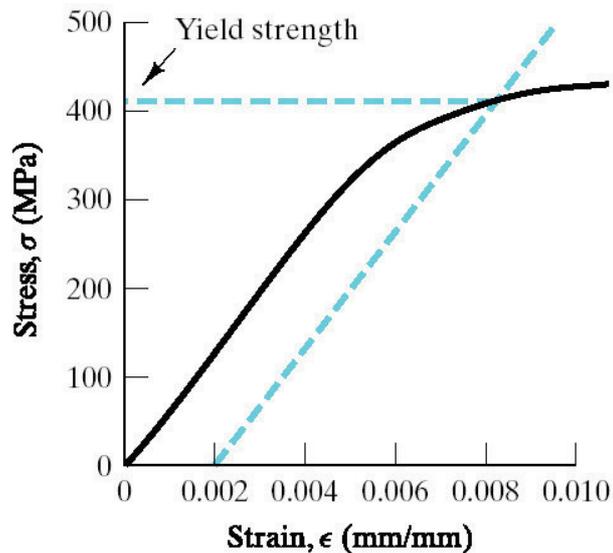
De um ensaio de tração convencional, são obtidos os seguintes dados do material:

1. **Limite de resistência à tração** (*tensile strenght*): valor da máxima tensão suportada pelo material (MPa);
2. **Limite de escoamento** (*yield strength*): tensão que caracteriza o início da fase plástica (MPa);
3. **Alongamento após a ruptura**: valor do alongamento permanente, medido no corpo de prova, após o rompimento;
4. **Coefficiente de estricção**: redução percentual da área, medido no corpo de prova após o rompimento.

Materiais macios, como o aço AISI1020, por exemplo, apresentam um limite de escoamento nítido, através da formação de um patamar. Apresentam-se claramente dois pontos: o limite de escoamento superior e o limite de escoamento inferior (figura 15).

Na grande maioria dos materiais ensaiados, não há a constatação de um limite de escoamento nítido, o que dificulta a determinação do ponto onde inicia a zona plástica. As normas, então determinam uma outra técnica para obter o limite de escoamento, através do uso de um extensômetro. Com isto determina-se o limite de escoamento tendo ocorrido uma deformação permanente de 0,2%, também chamado  $\sigma_{0,2\%}$  (figura 16). Para encontrar o ponto, levanta-se a curva  $\sigma \times \epsilon$  através de um extensômetro e é traçada uma reta paralela à da região elástica. No ponto onde esta reta traçada encontra a curva tem-se o valor de tensão que corresponde à tensão de escoamento do material.

Os dados dos materiais são encontrados nos catálogos dos fabricantes e nas normas correspondentes. A tabela 2 mostra os dados do aço AISI304, indicando os valores mínimos esperados para as propriedades mecânicas.



(Figura 16) Definição da tensão de escoamento, tendo uma deformação permanente de 0,2% ou 2/1000.

## 6. DISCORDÂNCIAS E DEFEITOS NOS CRISTAIS (*dislocations*)

Elas têm uma forte influência sobre as propriedades mecânicas dos metais e de alguns cerâmicos.

Características das discordâncias:

- ◆ elas são criadas devido às condições de **processamento** (a forma usada na fabricação do material) e por forças mecânicas que atuam sobre o material.
- ◆ estão quase sempre presentes nos cristais reais.
- ◆ em um material típico, aproximadamente **5 de cada 100 milhões de átomos** (0.000005%) pertencem a um defeito tipo discordância. Em uma porção de material de  $10 \text{ cm}^3$  (cerca do tamanho de um dado de seis lados), haverá aproximadamente  $10^{17}$  átomos que pertencem a defeitos tipo discordância.

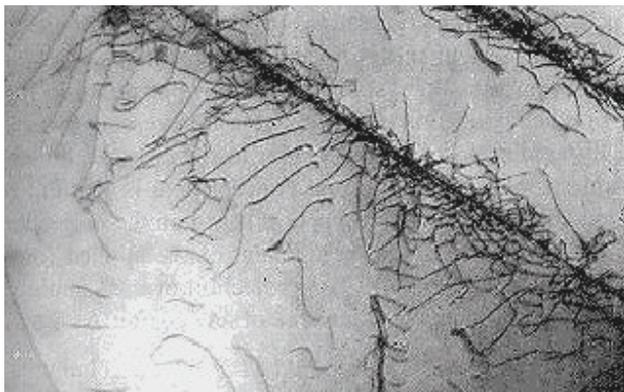


Figura 17 – Discordâncias (linhas) mostradas através de um microscópio eletrônico de transmissão.

O tipo mais simples de discordância pode ser visto como um semi plano atômico extra, inserido na estrutura, o qual termina em qualquer lugar do cristal. A extremidade do meio plano é a discordância, conforme mostra a figura abaixo.

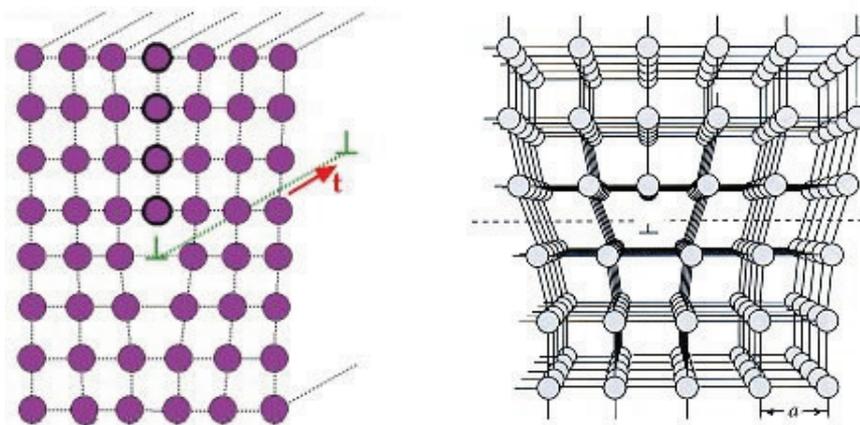


Figura 18 – Discordância em cunha mostrando distorção do cristal

Considerando o semi plano extra que está dentro do cristal, observa-se claramente que o cristal está distorcido onde o semi plano atinge o plano de escorregamento. Pode-se também deduzir que a distorção diminui de intensidade quando se caminha em sentido oposto à aresta do semi plano, porque a grandes distâncias dessa aresta, os átomos tendem a rearranjar-se como em um cristal perfeito. A distorção do cristal é, pois, centrada em torno da aresta do plano extra.

A figura abaixo ilustra como uma discordância se move através do cristal, sob a aplicação de uma tensão de cisalhamento. Pela aplicação da tensão, o átomo c pode mover-se para a posição c' indicada na figura. Se isso acontecer, a discordância mover-se-á de uma distância atômica para a direita. A contínua aplicação da tensão levará à movimentação da discordância em etapas repetidas. O resultado final é que o cristal é cisalhado no plano de escorregamento de uma distância atômica. **Isto significa que as discordâncias estão ligadas à deformação permanente (escorregamento dos planos atômicos).**

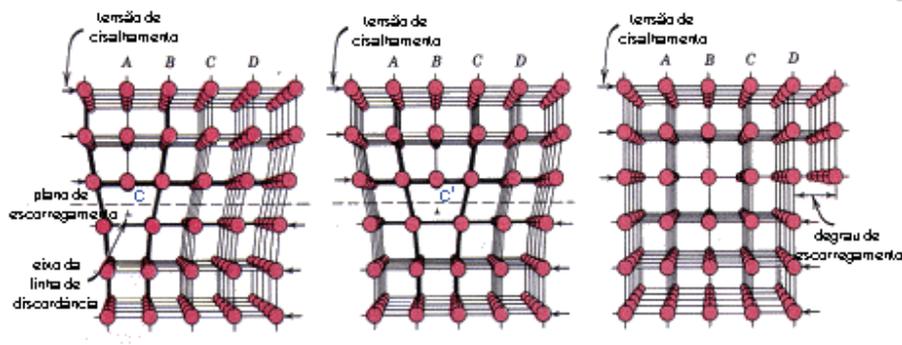


Figura 19 – Movimento de discordância

Cada etapa do movimento da discordância requer somente um pequeno rearranjo de átomos nas vizinhanças do plano extra. Resulta disso que uma força muito pequena pode mover uma discordância. Cálculos teóricos mostram que essa força é de ordem de grandeza compatível para justificar os baixos limites de escoamento dos cristais reais.

O movimento de uma discordância através de todo o cristal produz um degrau na superfície do mesmo, cuja profundidade é de uma distância atômica. Como uma distância atômica em cristais metálicos é da ordem de alguns nanômetros, esse degrau evidentemente não é visível a olho nu. Muitas centenas ou milhares de discordâncias devem movimentar-se em um plano de escorregamento para que seja produzida uma linha de escorregamento visível.

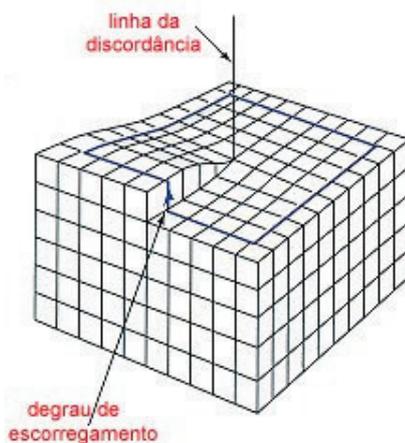


Figura 20 – Discordância em hélice.

Além das discordâncias em cunha, existem as **discordâncias em hélice ou helicoidais**. A designação 'hélice' para esse defeito do reticulado deriva do fato de que os planos do reticulado do cristal formam uma espiral na linha da discordância.

A figura 21 mostra a evolução de uma discordância mista (cunha + helicoidal) sob a ação de forças de cisalhamento.

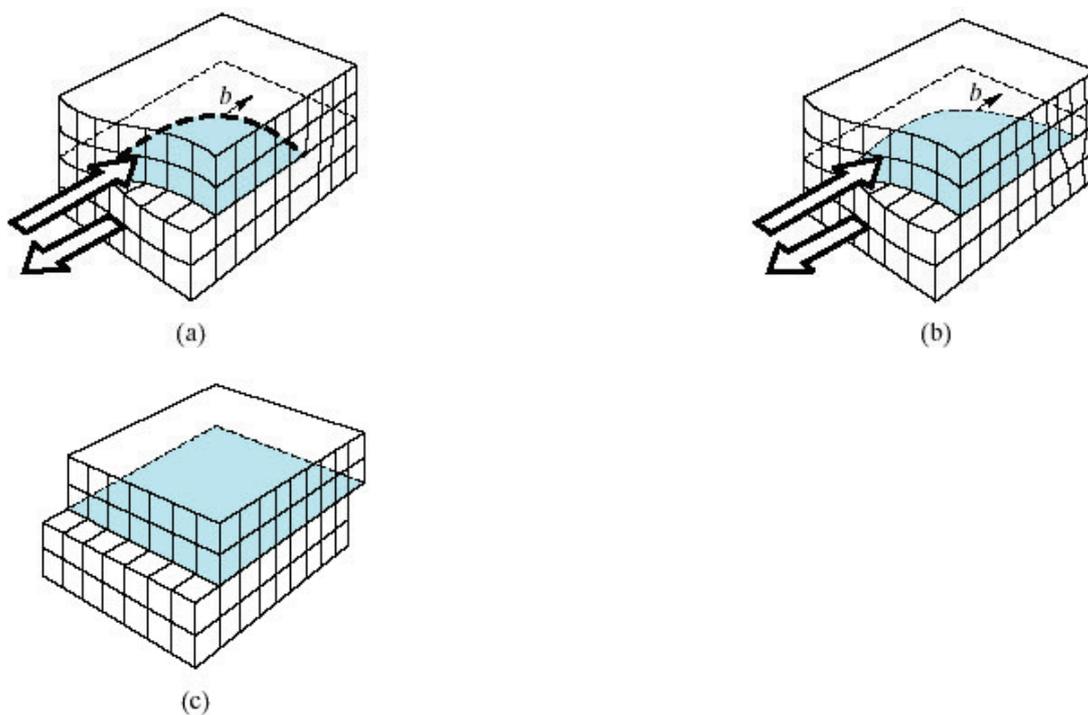


Figura 21- Evolução de uma discordância mista sob tensão de cisalhamento

## 7 FALHA OU RUPTURA NOS METAIS

### 7.1 IMPORTÂNCIA DO ESTUDO

A engenharia e ciência dos materiais ocupam papéis importantes na prevenção e análise de falhas em peças ou componentes mecânicos.

### 7.2 FRATURA

Consiste na separação do material em 2 ou mais partes devido à aplicação de uma carga estática à temperaturas relativamente baixas em relação ao ponto de fusão do material

#### 7.2.1 TIPOS DE FRATURA

**a) Dúctil** .A deformação plástica continua até uma redução na área para posterior ruptura (É OBSERVADA EM MATERIAIS CFC)

**b) Frágil**. Não ocorre deformação plástica requerendo menos energia que a fratura dúctil que consome energia para o movimento de discordâncias e imperfeições no material (É OBSERVADA EM MATERIAIS CCC E HC)

#### 7.2.2 MECANISMO DA FRATURA DÚCTIL

##### A RUPTURA SE DÁ EM CINCO ETAPAS:

- a- formação do pescoço
- b- formação de cavidades
- c- coalescimento das cavidades para promover uma trinca ou fissura
- d- formação e propagação da trinca em um ângulo de 45 graus em relação à tensão aplicada
- e- rompimento do material por propagação da trinca

### 7.3 FLUÊNCIA (CREEP)

- Quando um metal é solicitado por uma carga, imediatamente sofre uma deformação elástica. Com a aplicação de uma carga constante, a deformação plástica progride lentamente com o tempo (fluência) até haver um estrangulamento e ruptura do material
- Velocidade de fluência (relação entre deformação plástica e tempo) aumenta com a temperatura
- Esta propriedade é de grande importância especialmente na escolha de materiais para operar a altas temperaturas
- Então, fluência é definida como a deformação permanente, dependente do tempo e da temperatura, quando o material é submetido à uma carga constante

- Este fator muitas vezes limita o tempo de vida de um determinado componente ou estrutura
- Este fenômeno é observado em todos os materiais, e torna-se importante à altas temperaturas (0,4TF)

### 7.3.1 FATORES QUE AFETAM A FLUÊNCIA

Os fatores mais importantes a serem observados são:

- Temperatura
- Módulo de elasticidade
- Tamanho de grão

### 7.4 FADIGA

- É a forma de falha ou ruptura que ocorre nas estruturas sujeitas à forças dinâmicas e cíclicas
- Nessas situações o material rompe com tensões muito inferiores à correspondente à resistência à tração (determinada para cargas estáticas)
- É comum ocorrer em estruturas como pontes, aviões, componentes de máquinas
- A falha por fadiga é geralmente de natureza frágil mesmo em materiais dúcteis.
- A fratura ou rompimento do material por fadiga geralmente ocorre com a formação e propagação de uma trinca.
- A trinca inicia-se em pontos onde há imperfeição estrutural ou de composição e/ou de alta concentração de tensões (que ocorre geralmente na superfície)
- A superfície da fratura é geralmente perpendicular à direção da tensão à qual o material foi submetido
- Os esforços alternados que podem levar à fadiga podem ser:
  - Tração
  - Tração e compressão
  - Flexão
  - Torção,...

## 8 LIGAS COMERCIAIS

As ligas comerciais se dividem em dois grupos:

- a) **Ligas Ferrosas** : O ferro é o elemento principal.
- b) **Ligas não ferrosas** : Não tem como base o ferro.

### 8.1 CARACTERÍSTICAS DAS LIGAS FERROSAS

c) **AÇOS** -- Ligas de ferro ao carbono

d) **AÇOS COMUNS AO CARBONO** - Concentrações residuais de impurezas além de carbono e manganês.

e) **AÇOS COM BAIXO TEOR DE CARBONO**

Menos que 0.25 % de Carbono.

Microestrutura - ferrita e perlita

Usados em carcaças de automóveis, edificações e pontes.

f) **AÇOS COM MÉDIO TEOR DE CARBONO**

0.25 % A 0.6 % de Carbono.

Podem ser tratados (Têmpera e revenimento)

Usados para rodas e trilhos de trens, engrenagens, virabrequins e componentes estruturais de alta resistência

g) **AÇOS COM ALTO TEOR DE CARBONO--**

0.6 % A 1.4 % de Carb.

Mais duros e resistentes

Usados em condição endurecida e revenida

Resistente ao desgaste e abrasão

Usados para fabricação de ferramentas ( brocas, serras, ferramentas de torno e plaina.

h) **AÇOS INOXIDÁVEIS**

Concentração de cromo de pelo menos 11%.

Resistentes à corrosão

Usado em equipamentos para processos químicos.

i) **FERROS FUNDIDOS**

Formam uma classe de ligas ferrosas com teores de carbono acima de 2.14%.Na prática os teores variam de 3.0 a 4.5 %.

j) **FERRO CINZENTO**

C/ teores de carbono e silício entre 2.5 e 4.0 % e 1.0 e 3.0 % respectivamente.

Usados em bases e barramentos de máquinas operatrizes.

k) **FERROS DÚCTIL E NODULAR**

Formado quando se adiciona uma pequena quantidade de magnésio e/ou cério ao aço cinzento antes da fundição.

Usados para válvulas, de bombas virabrequins engrenagens e componentes automotivos e de máquinas.

#### **l) FERRO BRANCO E MALEÁVEL**

**BRANCO**- C/ teores silício menores que 1 %.

Taxas de resfriamento rápidas.

Ligas de aparência branca, dura e resistentes.

#### **m) FERRO BRANCO E MALEÁVEL**

**MALEÁVEL**-O ferro fundido branco é usado como um intermediário na produção de um ferro maleável.

A microestrutura é semelhante a do ferro nodular.

Usado em engrenagens de transmissão e barras de ligação, flanges, conexões de tubulações, válvulas para serviços marítimos, em ferrovias e outro serviços pesados.

#### **n) LIMITAÇÕES DAS LIGAS FERROSAS**

Densidade relativamente alta.

Codutividade elétrica comparativamente baixa.

Suscetibilidade inerente à corrosão e alguns ambientes usuais.

## **8.2 CARACTERÍSTICAS DAS LIGAS NÃO FERROSAS**

#### **a) LIGAS DE COBRE**

**LATÃO** - é uma liga de cobre e zinco.

**BRONZE** - é uma liga de cobre e vários outros elementos incluindo o estanho, alumínio, silício e o níquel.

Alta resistência à corrosão em diversos ambientes

Usadas para fios elétricos, rebites e parte central de radiador de carros.

#### **b) LIGAS DE ALUMÍNIO**

Densidade relativamente baixa ( $2.7 \text{ g/cm}^3$ )

Principais elementos de liga (cobre, magnésio, silício, manganês e zinco)

Est. Crist. - HC

Usadas para estruturas de aeronaves, latas de bebidas e peças automotivas.

#### **c) LIGAS DE MAGNÉSIO**

Densidade baixa ( $1.7 \text{ g/cm}^3$ )

Principais elementos de liga (alumínio manganês , zinco)

E = 45 GPa , est. Crist. – HC

Usadas para rodas automotivas

**d) LIGAS DE TITÂNIO**

Densidade relativamente baixa ( $4.5 \text{ g/cm}^3$ )

Principais elementos de liga (alumínio molibdênio e estanho)

$E = 107 \text{ GPa}$

Usadas para carcaças, fuselagens de avião e equipamentos resistentes à corrosão p/ indústria naval e de processamento químico.

e) **OS METAIS REFRAATÓRIOS** ( temperaturas de fusão extrema/e altas usadas para peças estruturais em veículos espaciais), elemento de liga (nióbio, molibdênio,tungstênio e tântalo)

f) **AS SUPERLIGAS** (turbinas, reatores nucleares, equipamentos petroquímicos), elemento de liga (nióbio, molibdênio,tungstênio e tântalo)

g) **OS METAIS NOBRES**

h) **LIGAS NÃO FERROSAS DIVERSAS**

**9 TRATAMENTO TÉRMICO EM FERRO E AÇO****9.1 INTRODUÇÃO**

Há muitos séculos atrás o homem descobriu que com aquecimento e resfriamento podia modificar as propriedades mecânicas de um aço, isto é, torná-los mais duro, mais mole, mais maleável, etc.

Mais tarde, descobriu também que a rapidez com que o aço era resfriado e a quantidade de carbono que possuía influíam decisivamente nessas modificações.

O processo de aquecer e resfriar um aço, visando modificar as suas propriedades, denomina-se **TRATAMENTO TÉRMICO**, que ser feito em três fases distintas:

- **1 - aquecimento**
- **2- manutenção da temperatura**
- **3 – resfriamento**

**9.2 TIPOS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS**

Os tratamentos que por simples aquecimento e resfriamento, modificam as propriedades de toda a massa do aço, são conhecidos como:

- a - Têmpera
- b - Revenimento
- c - Reozimento

Os tratamentos que modificam as propriedades somente numa fina camada superficial da peça:

- a - Cementação
- b - Nitretação

### 9.3 TÊMPERA

É o tratamento térmico aplicado aos aços com porcentagem *igual* ou *maior* do que *0,4% de carbono*.

O efeito principal da têmpera num aço é o aumento de dureza, tornando-o mais quebradiço.

- **Fases da têmpera**

*1ª Fase:*

- **Aquecimento** – A peça é aquecida em forno ou forja, até uma temperatura recomendada. (Por volta de 800°C para os aços ao carbono).

*2ª Fase:*

- **Manutenção da temperatura** – Atingida a temperatura desejada esta deve ser mantida por algum tempo afim de uniformizar o aquecimento em toda a peça.

*3ª Fase:*

- **Resfriamento** – A peça uniformemente aquecida na temperatura desejada é resfriada em água, óleo ou jato de ar.

### 9.4 REVENIMENTO

É o tratamento térmico que se faz nos aços já temperados, com a finalidade de diminuir a sua fragilidade, isto é, torná-lo menos quebradiço.

O revenimento é feito aquecendo-se a peça temperada até uma certa temperatura resfriando-a em seguida. As temperaturas de revenimento são encontradas em tabelas e para os *aços ao carbono* variam entre 210°C e 320°C.

*1ª Fase:*

- **Aquecimento** – Feito geralmente em fornos controlando-se a temperatura com pirômetro.

*2ª Fase:*

- **Manutenção da Temperatura** – Possível quando o aquecimento é feito em fornos.

*3ª Fase:*

- **Resfriamento** – O resfriamento da peça pode ser:
  - *Lento* – deixando-a esfriar naturalmente.
  - *Rápido* – mergulhando-a em água ou óleo.

O revenimento diminui um pouco a dureza da peça temperada, porém aumenta consideravelmente a sua resistência aos choques.

Geralmente, toda peça temperada passa por um revenimento, sendo até comum dizer-se “peça temperada” ao invés de “peça temperada e revenida”.

## 9.5 RECOZIMENTO

O recozimento é o tratamento térmico que tem por finalidade eliminar a dureza de uma peça temperada ou normalizar materiais com tensões internas resultantes do forjamento, da laminação, trefilação etc.

1ª Fase:

**Aquecimento** – A peça é aquecida a uma temperatura que varia de acordo com o material a ser recozido. (Entre 500°C e 900°C)

2ª Fase:

**Manutenção da temperatura** – A peça deve permanecer aquecida por algum tempo na temperatura recomendada para que as modificações atinjam toda a massa da mesma.

O recozimento elimina a dureza de uma peça temperada anteriormente, fazendo-se voltar a sua dureza normal.

Torna o aço mais homogêneo, melhora sua ductilidade tornando-o facilmente usinável e dobrável.

## 9.6 CEMENTAÇÃO

É o tratamento térmico que aumenta a dureza em uma fina camada superficial do aço.

1ª Fase:

**Aquecimento** em caixa com carburante ou em banho no carburante líquido aquecido.

2ª Fase:

**Manutenção da temperatura** – O tempo de duração desta fase é de acordo com a espessura. (0,1mm a 0,2mm por hora).

3ª Fase:

**Resfriamento** – A peça é esfriada lentamente dentro da própria caixa. Após a cementação as peças são temperadas.

## 9.7 NITRETAÇÃO

É um processo semelhante à cementação, que se faz aquecendo o aço a uma temperatura de 500°C a 525°C na presença de um gás denominado Nitrogênio. Após algum tempo, obtém-se uma fina camada, extremamente dura, não havendo necessidade de se temperar a peça.

## 10 CORROSÃO

É a ação química que o meio ambiente exerce sobre o material, tornando-o impréstável para vários usos, como, por exemplo, na construção civil.

- **Corrosão Metálica:** é o caso mais importante da corrosão em que o material corroído é um metal ou uma liga metálica.

### 10.1 TIPOS DE CORROSÃO EM RELAÇÃO AOS MEIOS

- **Em relação aos meios naturais:**
  - Corrosão Atmosférica: Provocada pela atmosfera, em condições ambientes.
  - Corrosão pelas águas
  - Corrosão pelos solos

#### 10.1.2 CORROSÃO ATMOSFÉRICA

A causa : **umidade** atmosférica

Atmosfera seca não corrói.

Atmosfera poluída corrói mais, são poluentes atmosféricos:

- a poeira (urbanas e industriais)
- o sal
- o dióxido de enxofre
- produtos industriais variados

#### 10.1.3 CORROSÃO PELAS ÁGUAS

A água será mais corrosiva dependendo da:

- a) quantidade de ar e de sais nela dissolvida e da natureza desses sais.
  - A água sem ar é pouco corrosiva ( caldeiras para produção de vapor)
- b) Produtos químicos dissolvidos na água
- substâncias que aumentam a alcalinidade (soda e soda cáustica):
  - Reduz a ação corrosiva da água frente aos aços
- **Inibidores de corrosão:**
  - Sais (cromato, dicromato de sódio ou de potássio, nitrito de sódio, o fosfato de sódio e outros)
  - Alguns compostos orgânicos

### 10.1.4 CORROSÃO PELO SOLO

- O solo será mais corrosivo se:
  - For mais úmido e poroso ( solos bem secos, como a areia do deserto, não são corrosivos);
  - passar acidentalmente correntes elétricas contínuas;
  - a presença de bactérias predomina.

## 11. FORMAS DE CORROSÃO

- As formas mais importantes de corrosão metálica são:
  - uniforme;
  - por pites;
  - por crêvice;
  - intergranular;
  - fragilização pelo hidrogênio;
  - fraturante;
  - galvânica.

### a) corrosão uniforme

Corrosão mais ou menos uniforme;  
 Fácil de detectar;  
 Menos perigosa;  
 Os tanques são super dimensionados;  
 Alumínio e aço inox ( muito resistentes.)

### b) corrosão por pites:

Corrosão em alguns pontos;  
 Várias formas e profundidades;  
 Perfuração de tanques e tubos;  
 Perfurante;  
 Mais difícil de detectar;  
 Alumínio e aço inox, (violentamente atacados em meios que contenham cloretos).

### c) Corrosão por crêvice:

Também é perfurante;  
 Ocorre a perda de massa;  
 Causas:
 

- aprisionamento de água entre duas chapas;
- depósitos de materiais não metálicos sobre a superfície metálica.

### d) corrosão intergranular :

Também chamada de intercrystalina;

Ex: Ocorre no aço inox soldado elétrica/e;

Consequências:

- perda de massa;
- perfuração do tubo.

#### **e) corrosão por fragilização do hidrogênio :**

Ocorre em materiais de elevadíssima resistência. Mecânica.;

Causas:

- absorção de hidrogênio no estado atômico;
- (H) produzido por um processo de corrosão a partir da água.

Consequências:

- penetração de (H) na superfície do metal;
- perda da resistência Mecânica.

#### **f) corrosão fraturante:**

Forma mais grave de corrosão;

Ex: Ocorre quando aparece fissuras na superfície do metal

Causas:

- peças tracionadas em meio aquoso corrosivo, que dependerá do tipo do aço.

Consequências:

- fissuras »» fraturas

#### **g) corrosão galvânica:**

Se dá em metais de nobrezas diferentes;

Potenciais elétricos diferentes;

Consequências:

- perda de massa;

## **11 MECANISMO DA CORROSÃO**

Pilha de corrosão ampliada;

Ânodo e cátodo ligado direta/e;

- pilha em curto circuito, funcionando sempre;
- o metal passa p/ água;(oxidação - se corrói)

## **12 PREVENÇÃO DA CORROSÃO**

- Uso de inibidores (orgânicos ou alguns sais);
- Isolamento elétrico de materiais de nobrezas diferentes;
- Aplicação de revestimentos protetores (prateados, niquelados, e até cerâmicos);
- Ânodo de sacrifício;
- Uso de materiais de nobreza próxima;
- Proteção por passivação.