

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
EEL7052 - MATERIAIS ELÉTRICOS**



**Prof<sup>a</sup>. Jacqueline Gisèle Rolim**

# ÍNDICE

## Capítulo I - Propriedades Gerais dos Materiais

1.1 - Introdução à Materiais Elétricos.....	1
1.2 - Revisão - Ligações Químicas.....	2
1.3 - Estruturas Cristalina.....	5
1.4 - Propriedades Elétricas.....	7
1.4.1 - Condução nos sólidos condutores, no mercúrio e nos metais em fusão.....	7
1.4.2 - Condução nos líquidos.....	7
1.4.3 - Condução nos gases.....	8
1.5 - Propriedades Mecânicas.....	9
1.5.1 - Deformação nos metais.....	9
1.5.2 - Outras propriedades mecânicas.....	11
1.6 - Propriedades Térmicas.....	11
1.7 - Propriedades químicas .....	13
1.7.1 - Efeito das radiações nos materiais.....	13
1.7.2 - Corrosão.....	13
1.8 - Propriedades versus Microestruturas.....	23
1.8.1 - Introdução.....	23
1.8.2 - Diagramas de Fase.....	23
1.8.3 - Polimorfismo.....	27
1.8.4 - Tratamentos Térmicos.....	27
1.9 - Problemas Típicos.....	31

## Capítulo II - Materiais Magnéticos

2.1 - Introdução.....	33
2.2 - Revisão de Conceitos.....	33
2.2.1 - Comportamento Magnético.....	33
2.2.2 - Curvas de Magnetização e Histerese.....	34
2.2.3 - Classificação dos Materiais Quanto à Permeabilidade.....	39
2.2.4 - Perdas por Histerese e Correntes Parasitas.....	40
2.3 - Núcleos Magnéticos Laminados ou Compactados.....	41
2.4 - Materiais Magnéticos.....	43
2.4.1 - Introdução.....	43
2.4.2 - Ferro.....	44
2.4.3 - Diagramas de Fase do Ferro – Carbetos de Ferro (Fe-Fe <sub>3</sub> C).....	45
2.4.4 - Ligas de Ferro-Silício.....	46
2.4.5 - Ímãs Permanentes.....	46
2.4.6 - Ligas Ferromagnéticas Diversas.....	47
2.5 – Problemas Típicos.....	48

### **Capítulo III - Materiais Condutores**

3.1 - Introdução.....	49
3.2 - Algumas características dos materiais condutores.....	49
3.2.1 - Variação da resistividade com a temperatura e a frequência.....	49
3.2.2 - Resistência de contato nos metais.....	50
3.3 - Materiais de Elevada Condutividade.....	51
3.4 - Materiais de Elevada Resistividade.....	61
3.5 - Aplicações Especiais.....	65
3.6 - Supercondutores.....	67

### **Capítulo IV - Materiais Isolantes**

4.1 - Introdução.....	71
4.2 - Comportamento dos Dielétricos em Serviço.....	73
4.3 - Materiais Isolantes.....	76
4.3.1 - Isolantes Gasosos.....	78
4.3.2 - Isolantes Líquidos.....	78
4.3.3 - Isolantes Pastosos e Ceras.....	83
4.3.4 - Isolantes Sólidos.....	86
4.4 - Aplicações.....	96

### **Capítulo V - Materiais Semicondutores**

5.1 - Introdução.....	97
5.2 – Estruturas de Bandas de Energia nos Sólidos.....	97
5.3 – Condução em Termos de Bandas Eletrônicas.....	100
5.4 – Semicondução Intrínseca.....	102
5.5 – Semicondutores Extrínsecos.....	103
5.5.1 – Semicondutor do tipo $n$ .....	103
5.5.2 – Semicondutor do tipo $p$ .....	105

### **Referências Bibliográficas**



# CAPÍTULO I

## PROPRIEDADES GERAIS DOS MATERIAIS

### 1.1 - Introdução a Materiais Elétricos

O objetivo do curso de *Materiais Elétricos* é habilitar os estudantes de Engenharia Elétrica e Engenharia de Produção elétrica a distinguir e recomendar os diversos materiais utilizados em equipamentos e componentes elétricos e magnéticos, correlacionando as propriedades dos metais, ligas, materiais cerâmicos, semicondutores, plásticos e outros tipos de polimerizados com suas propriedades estruturais, além de conhecer as tendências atuais e perspectivas futuras no campo da ciência dos materiais.

Considera-se que os alunos tenham conhecimento básico de química geral, física e eletromagnetismo, mas alguns conceitos principais são lembrados.

Espera-se ao final deste curso que o leitor tenha adquirido não apenas conhecimento, mas também entendimento de como diferentes fatores (propriedades químicas, elétricas, térmicas, óticas, mecânicas, custo) se relacionam no projeto e seleção de materiais.

Apesar do enorme progresso ocorrido na área de engenharia e ciência dos materiais nos últimos anos, ainda há desafios tecnológicos, inclusive considerações sobre o impacto ambiental da produção dos materiais.

A grande maioria dos engenheiros em algum ponto de sua carreira se deparará com algum problema de projeto envolvendo a seleção de materiais. Não existe um conjunto padrão de procedimentos a serem seguidos na escolha de materiais corretos para determinada aplicação. Cada situação é diferente e requer conhecimento sobre os materiais e sobre as condições às quais eles estarão sujeitos. Entretanto existem alguns pontos gerais que fornecem um ponto de partida:

- ◆ Qualquer material selecionado precisa possuir propriedades consistentes com as condições de serviço;
- ◆ É necessário considerar os efeitos das mudanças destas condições para fora dos limites da normalidade;
- ◆ Para selecionar um material apropriado, primeiro liste os materiais possíveis e então elimine alguns devido a características não adequadas em relação as propriedades mecânicas, corrosão, fraturas, etc., ou ainda, falta de segurança ou alto custo. Se os materiais restantes na lista não preencherem os requisitos há ainda algumas opções, tais como tratar os materiais de maneira apropriada (térmica ou quimicamente), mudar o ambiente de serviço, produzir uma liga que tenha os efeitos específicos desejados, etc.

A disciplina de materiais elétricos envolve a investigação das relações que existem entre as estruturas e as propriedades dos materiais. A estrutura dos materiais depende do arranjo subatômico, da organização dos átomos e moléculas e do processamento que este material sofre.

Este primeiro capítulo apresenta uma revisão sobre ligações químicas e conceitos básicos relacionados às propriedades elétricas, mecânicas, térmicas e químicas. Nos capítulos seguintes serão vistos os materiais ferromagnéticos, condutores, isolantes e semicondutores.

## **1.2 - Revisão: Ligações Químicas**

O átomo é composto por um núcleo circundado por elétrons. O núcleo é composto por prótons e neutrons. Os elétrons são partículas carregadas e com  $1/1836$  da massa de um neutron. A carga do elétron é convencionalmente negativa. Como os elétrons são componentes de todos os átomos, sua carga elétrica é frequentemente tomada como unidade. Em unidades físicas, a carga do elétron vale  $1,6 \times 10^{-19}$  C.

Sabemos que um próton possui uma carga que é numericamente igual a do elétron, só que de sinal oposto. Por exemplo, o átomo de hidrogênio, o mais simples de todos, é composto de um próton e de um elétron e é eletricamente neutro.

De uma forma simplificada, um átomo de um certo elemento pode ser considerado como sendo uma combinação de prótons e neutrons em um núcleo circundado por elétrons. Como a massa de um elétron é  $0,0005$  da massa de um próton ou de um neutron, a massa total de um átomo é aproximadamente proporcional ao número de prótons e neutrons no núcleo. A massa atômica é expressa em gramas por átomo-grama. Um átomo-grama sempre contém  $6,02 \times 10^{23}$  átomos (número de Avogadro).

$$\text{Massa do átomo} = \frac{\text{massa atômica}}{6,02 \times 10^{23}} \quad (1.1)$$

Com exceção da densidade e calor específico, o fator massa atômica exerce uma influência relativamente pequena sobre as propriedades dos materiais. O número de elétrons que circundam o núcleo de um átomo neutro é mais significativo. Este número, denominado número atômico, é igual ao número de prótons no núcleo.

Os elétrons que circundam o núcleo do átomo não têm todos o mesmo nível energéticos, sendo divididos em vários níveis, com propriedades energéticas diferentes (quatro números quânticos).

As atrações interatômicas, forças que mantêm os átomos unidos, também estão relacionadas à estrutura eletrônica dos átomos. Em um fio de cobre estas forças são fortes (caso contrário o metal se deformaria facilmente), já nos gases nobres, tais como He, Ne, Ar, etc, existe apenas uma pequena atração pelos outros átomos porque eles possuem um arranjo muito estável de oito elétrons (2 para o He) na sua camada mais externa, chamada de valência. A maior parte dos outros elementos, ao contrário dos gases nobres, deve adquirir a configuração altamente estável de oito elétrons na camada mais externa, através de um dos seguintes mecanismos:

- ♦ recebendo elétrons,
- ♦ perdendo elétrons,
- ♦ compartilhando elétrons.

*Ligação iônica:* Este tipo de ligação resulta da atração mútua entre íons positivos e negativos. Átomos de elementos como o sódio e cálcio, com um e dois elétrons na camada de valência, respectivamente, perdem facilmente estes elétrons externos e se tornam íons positivos. Por outro lado, os átomos de cloro e oxigênio facilmente recebem um ou dois elétrons na camada mais externa, respectivamente, de modo a completar oito elétrons nesta camada. A atração entre íons positivos e negativos liga os íons vizinhos de carga oposta, como pode ser observado na figura 1.1 a seguir.

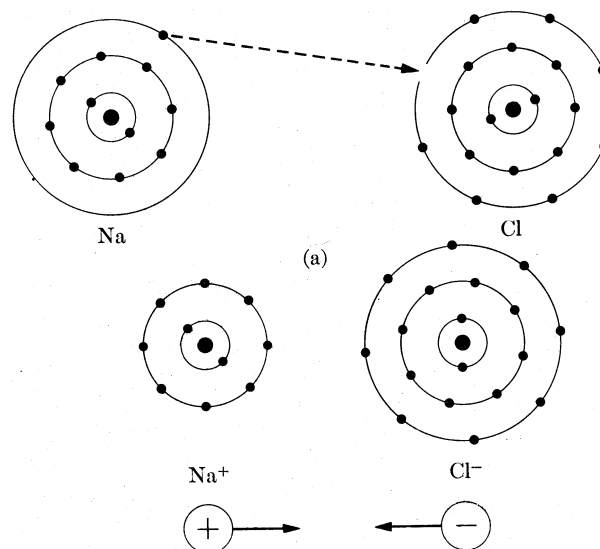


Fig. 1.1 - Ionização.

Na realidade uma carga negativa é atraída por todas as cargas positivas e uma carga positiva por todas as negativas. Consequentemente os íons de sódio ficam envolvidos por íons cloreto, e os íons cloreto por íons de sódio.

*Ligação covalente:* Este é um outro tipo de ligação forte. Neste caso um átomo adquire oito elétrons na camada de valência compartilhando elétrons com um átomo adjacente. O exemplo mais simples deste compartilhamento é encontrado na molécula de hidrogênio  $H_2$ . Esta molécula e outras moléculas diatômicas são mostradas na fig. 1.2 abaixo.

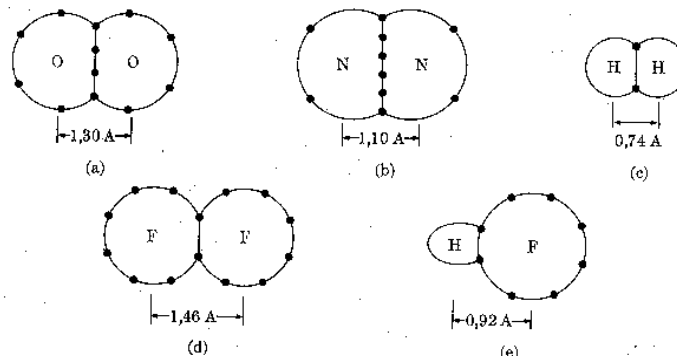


Fig. 1.2 - Moléculas diatômicas.

Que a ligação covalente implica em intensas forças de atração entre os átomos é evidenciado no diamante, que é o material mais duro encontrado na natureza e inteiramente constituído por carbono. A força desta ligação covalente (cada átomo compartilha seus 4 elétrons da camada de valência com 4 átomos adjacentes) também pode ser demonstrada pela temperatura extremamente elevada ( $>3000^\circ C$ ) a que pode ser aquecido antes da destruição da sua estrutura.

*Ligação metálica:* A ligação metálica é outro tipo de atração interatômica forte. Se um átomo apresenta apenas uns poucos elétrons de valência, estes podem ser removidos com relativa facilidade, enquanto que os demais elétrons são firmemente ligados ao núcleo. Isto origina uma estrutura formada por íons positivos e elétrons “livres”, como pode ser visto na figura 1.3

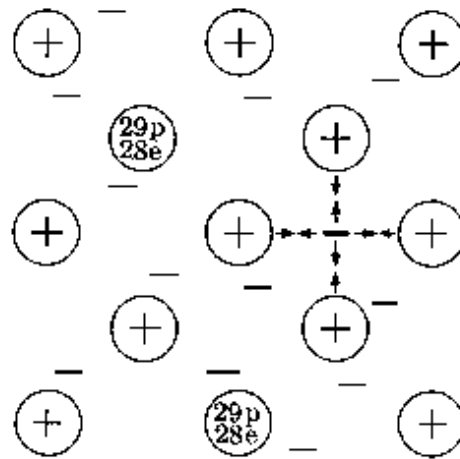


Fig. 1.3 - Ligação Metálica

**Ligações secundárias:** Existem também forças secundárias que ligam moléculas umas às outras. Estas ligações são fracas em relação às outras. Estas forças aparecem a partir dos dipolos atômicos ou moleculares. Os dipolos elétricos existem sempre que existir alguma assimetria entre as partes positivas e negativas dos átomos e moléculas. A ligação resulta da atração coulombiana entre um pólo positivo e a região negativa do adjacente. Exemplos de ligações secundárias são as pontes de hidrogênio e as forças de Van der Waals.

A Fig. 1.4 mostra a polaridade na molécula de HF, onde o flúor é bem mais eletronegativo que o hidrogênio, atraindo o par de elétrons da ligação covalente, criando uma carga ligeiramente negativa ao redor do flúor e positiva ao redor do hidrogênio.

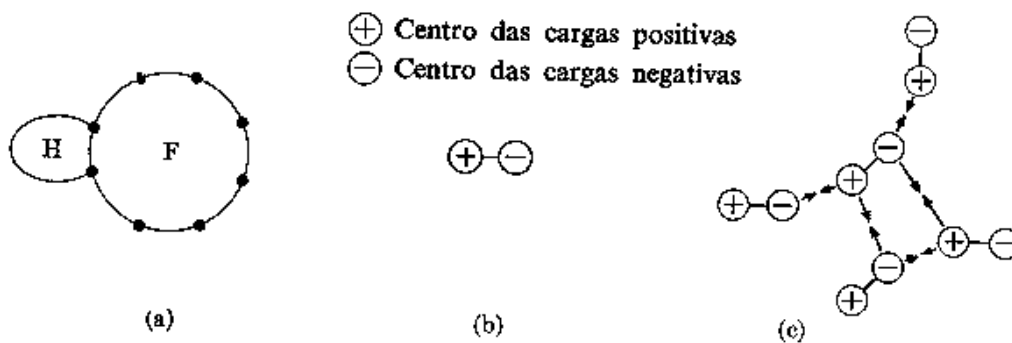


Fig. 1.4 - (a) Polarização da molécula de HF (b) Conseqüente dipolo elétrico. (C) Forças de atração secundárias entre as moléculas.

Apesar de uma molécula de água ser eletricamente neutra como um todo, a distribuição de carga pela molécula não é uniforme. Esta força pode ser atrativa em relação a outros grupos similares, por exemplo íons hidroxila (OH-) em moléculas orgânicas que atraem moléculas de água. Estas forças são conhecidas como ligações de hidrogênio e existem em algumas moléculas que têm o hidrogênio como um dos seus constituintes.

Pequenas variações de carga podem resultar em pequenas forças que existem entre todas as moléculas, conhecidas como forças de Van der Waals.

### 1.3 – Estruturas Cristalinas

Os materiais sólidos podem ser classificados de acordo com a regularidade com a qual átomos e íons se arranjam em relação uns aos outros. Um material cristalino é aquele nos quais os átomos se repetem num arranjo periódico em largas distâncias atômicas. Todos os metais, muitos materiais cerâmicos e certos polímeros formam estruturas cristalinas sob condições normais de solidificação.

Os materiais que não possuem esta ordenação atômica a largas distâncias são chamados amorfos. Os vidros, por exemplo, não são cristalinos. A fig. 1.5 apresenta um dos vidros mais simples ( $B_2O_3$ ), no qual cada pequeno átomo de boro se aloja entre três átomos maiores de oxigênio. Como o boro é trivalente e o oxigênio bivalente, o balanceamento elétrico é mantido se cada átomo de oxigênio estiver entre dois átomos de boro. Como resultado, desenvolve-se uma estrutura contínua de átomos fortemente ligados.

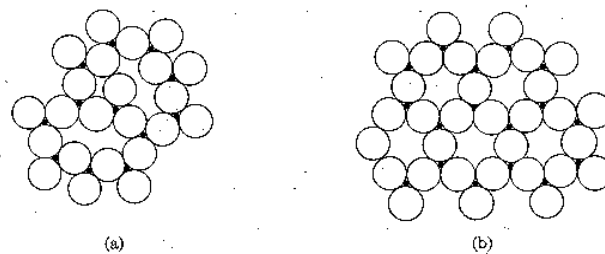


Fig. 1.5 - Estrutura do  $B_2O_3$ . O vidro (a) tem ordem somente em pequenas distâncias. O cristal (b) tem ordem em grandes distâncias, além da ordem em pequenas distâncias.

Uma *fase* pode ser definida como uma parte estruturalmente homogênea de um sistema material. Isto significa que cada fase de um material possui seu próprio arranjo atômico. Já vimos que uma *fase cristalina* tem um arranjo atômico definido, com uma estrutura repetitiva que se estende por muitas distâncias atômicas. O número de fases cristalinas é imenso, porque há muitas permutações e combinações de átomos e grupos de átomos.

Uma *fase amorfa* tem apenas ordem em pequenas distâncias (ver Fig. 1.5). Seus arranjos atômicos são menos definidos e permitem maiores diferenças na composição que as fases cristalinas. Entretanto, esta flexibilidade reduz o número de possíveis fases amorfas que podem coexistir em um material. Algumas das fases amorfas mais comuns na temperatura ambiente são água, óleo, mercúrio, baquelite e vidro.



Uma molécula tem uma regularidade estrutural, porque as ligações covalentes determinam um número específico de vizinhos para cada átomo e a orientação no espaço dos mesmos. A maioria dos materiais de interesse para o engenheiro tem arranjos atômicos que se repetem nas três dimensões de uma unidade básica. Tais estruturas são denominadas cristais. Existem 7 tipos principais de cristais: cúbico, tetragonal, ortorrômbico, monoclinico, triclínico, hexagonal e romboédrico. Existem ainda alguns subgrupos, que podem ser observados na Fig. 1.6. Quando se descrevem estruturas cristalinas os átomos ou íons são tratados como sendo esferas sólidas com diâmetros bem definidos. Algumas propriedades dos sólidos cristalinos dependem da estrutura do cristal deste material, ou seja, da maneira na qual os átomos, íons e moléculas estão ordenadas espacialmente.

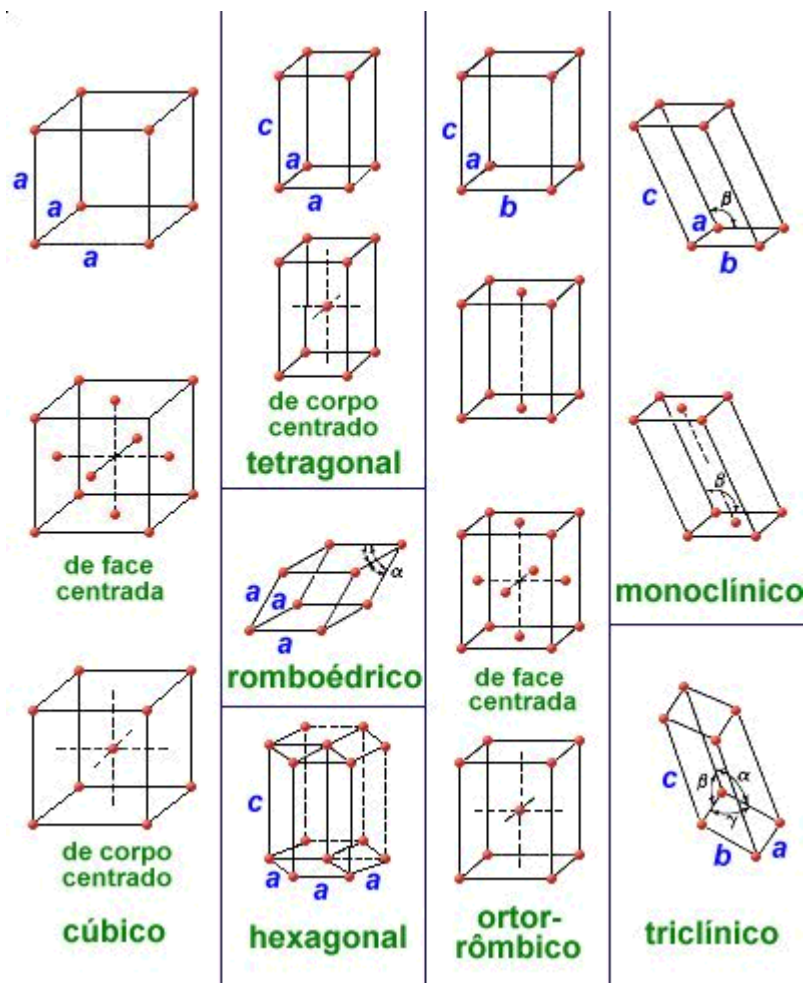


Fig. 1.6 - Grupos espaciais de cristais.

## 1.4 - Propriedades Elétricas

As cargas elétricas deslocam-se sob a forma de corrente elétrica através das diferentes substâncias mas sob aspectos diversos. Se chama de *resistência* a maior ou menor dificuldade que opõe um condutor à passagem de corrente elétrica. A carga pode ser carregada por íons ou elétrons cuja mobilidade varia para os diferentes materiais formando um completo espectro de resistividade/condutividades, como mostrado na figura 1.7.

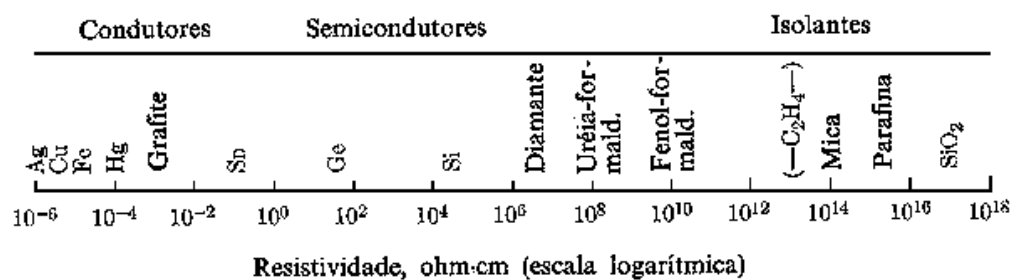


Fig. 1.7 - Espectro da resistividade.

Na condutividade iônica os portadores de carga podem ter tanto cátions como ânions. Na condutividade eletrônica os portadores de carga são elétrons ou “buracos” eletrônicos (a serem estudados na parte de semicondutores). Como já foi dito, a carga por elétron é  $1,6 \times 10^{-19}$  Coulomb. Como os íons contêm uma deficiência ou um excesso de elétrons, a carga por íon é sempre um múltiplo inteiro de  $1,6 \times 10^{-19}$  C.

### 1.4.1 - Condução nos sólidos condutores, no mercúrio e nos metais em fusão

Nestes materiais existem elétrons livres que podem se deslocar com um movimento que depende da temperatura e de outras condições físicas a que estejam sujeitos. Estes elétrons estão constantemente sujeitos a um movimento de agitação térmica, com velocidades da ordem dos 100 km/s, movimento desordenado e equilibrado no seu conjunto, não constituindo portanto uma corrente elétrica.

Se no entanto, esta substância for sujeita a um campo elétricos, os elétrons vão sendo arrastados no seu movimento, formando assim uma corrente elétrica.

O sentido positivo desta corrente foi arbitrado como o contrário ao do deslocamento dos elétrons. A corrente elétrica dá-se a uma velocidade muito mais baixa que a da agitação térmica, na ordem dos cm/s.

Quando são arrastados os elétrons se chocam com as moléculas do material condutor, perdendo parte da sua energia sob a forma de calor.

### 1.4.2 - Condução nos líquidos

Pela hipótese de Arrhenius sabemos que, quando se dissolve um ácido, uma base ou um sal na água, dá-se a dissociação das suas moléculas em íons que podem se deslocar no seio do líquido. Sob a ação de um campo elétrico estes íons, positivos ou negativos, irão se deslocar em sentidos contrário, de acordo com a respectiva carga.

Daqui se conclui que a corrente elétrica nos eletrólitos é conduzida de forma diferente da que ocorre nos condutores sólidos, já que nos líquidos há movimento nos dois sentidos. As acelerações dos anions e cátions são diferentes porque dependem das suas massas e sua carga elétrica.

#### 1.4.3- Condução nos gases

Um gás à pressão atmosférica é considerado um bom isolante, mas se for submetido a um campo elétrico suficientemente forte, ele deixa de o ser.

Quando o campo atinge um determinado valor alguns elétrons se libertam dos átomos ficando estes conseqüentemente com carga positiva. A este fenômeno é dado o nome de ionização do gás.

Se, uma vez o gás ionizado, nele existir um campo elétrico, haverá através dele a passagem de uma corrente elétrica, geralmente acompanhada de efeitos luminescentes.

O número de moléculas ionizadas num gás é sempre pequeno em comparação com o que se passa nos líquidos. De fato, considera-se uma boa ionização quando existe uma molécula ionizada para cada  $10^{12}$  moléculas de gás.

Quando a causa da ionização desaparece, o gás mantém a condutividade por alguns instantes, mas esta vai diminuindo até desaparecer. Isto mostra que os íons voltam a se combinar.

A curva que nos permite ter uma idéia da variação da corrente com o campo elétrico, suposto uniforme nos gases ionizados, supondo-se ainda que se mantém constante a causa da ionização é mostrada na Figura 1.8.

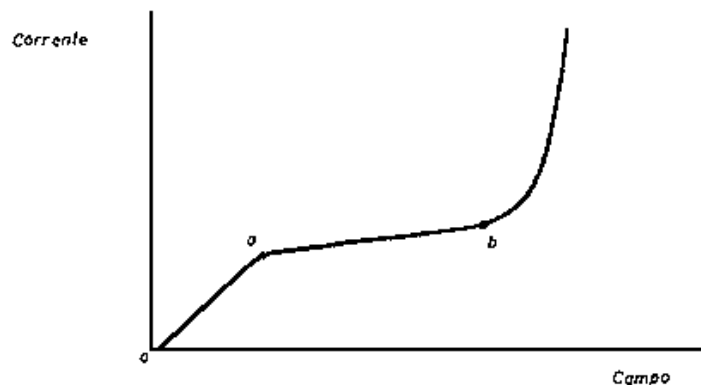


Fig. 1.8 - Variação da corrente com o valor do campo elétrico.

Dela tiramos que, para campos muito pequenos (entre 0 e  $a$ ), existe uma proporcionalidade entre a corrente e o campo.

Entre  $a$  e  $b$  dá-se como que uma saturação e o aumento da corrente é insignificante. Isto se explica pelo fato que a causa da ionização pode produzir apenas uns tantos íons na unidade de tempo e por unidade de volume do gás e, uma vez que a corrente atinja um valor correspondente ao transporte de todos estes íons na unidade do tempo, ela não pode crescer mais, qualquer que seja o crescimento do campo.

Para campos superiores a  $b$ , dá-se como que uma libertação e a corrente aumente livremente.

Até aqui supusemos a corrente transportada pelos íons que vão sendo arrastados para os eletrodos, animados de pequena energia cinética, incapaz de dissociar as moléculas com que vão chocando com grande frequência pois, estando o gás a uma pressão normal, é grande a densidade de moléculas, o que por sua vez não permite o aumento da energia cinética dos íons.

Assim, a ionização não aumenta e o gás permite apenas a passagem de uma corrente de intensidade relativamente baixa.

Se o campo elétrico aumenta acima de determinado valor, a energia cinética dos íons consegue aumentar a ponto de o seu choque de encontro às moléculas poder dissociá-las. A ionização vai progredindo rapidamente até que as moléculas por dissociar se tornam escassas e o fluxo de íons e elétrons deixa de encontrar resistência. É a descarga. O valor de campo elétrico para o qual se verifica a descarga depende também da pressão a que o gás se encontra submetido.

## 1.5 - Propriedades Mecânicas

Para selecionar materiais apropriados e então obter um projeto eficiente, é essencial que se conheçam as propriedades relevantes dos materiais. As propriedades mecânicas dos materiais são medidas em termos do comportamento do material quando sujeito a uma força e são determinadas pelas deformações. Valores numéricos absolutos de algumas propriedades mecânicas não são determinados facilmente, mas são apresentados em comparação a outros materiais.

Muito materiais em serviço estão sujeitos a forças ou carga, por exemplo a liga de alumínio empregada nas asas dos aviões ou o aço no eixo dos automóveis. Em tais situações é necessário projetar o equipamento de tal forma que as deformações em serviço não serão excessivas e fraturas não ocorrerão.

### 1.5.1 - Deformação nos metais.

Quando uma tensão (definida como a relação da força aplicada por unidade de área) é aplicada em um material o mesmo sofrerá deformação. Esta deformação pode ser elástica, a qual desaparece quando a tensão é retirada, ou plástica, que é uma deformação permanente. A Fig. 1.9 a seguir mostra diagramas tensão x deformação típicos.

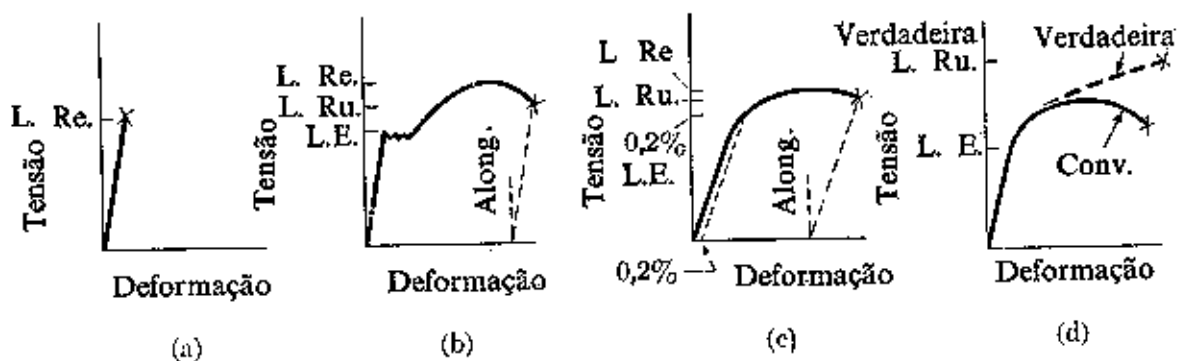


Fig. 1.9 - Curva tensão x deformação ideal.

Por convenção a área da seção transversal utilizada nas curvas da Fig. 1.9 é sempre a área inicial, embora a mesma se modifique ao longo do teste de levantamento dos dados, como no caso que pode ser visualizado na Fig. 1.10.

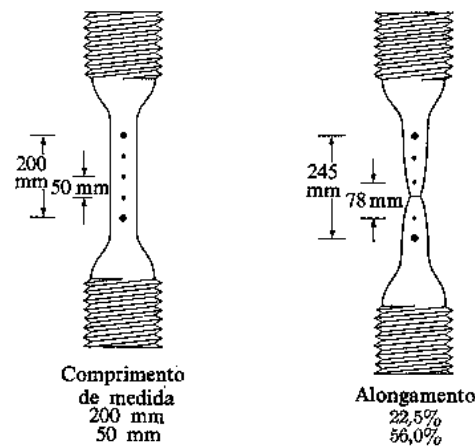


Fig. 1.10 - Redução na área da seção reta durante deformação

Até o ponto L.E. na curva da Fig. 1.9 a deformação é proporcional, ou seja, obedece a lei de Hooke, sendo o coeficiente de elasticidade calculado pela razão entre a tensão e a deformação correspondente. O ponto **L.E** é o limite de elasticidade ou Limite de Escoamento. Em materiais tais como os aços doces, o limite de escoamento é bem definido, quando o material escoar, ou seja, a deformação plástica ocorre sem que praticamente aumente a tensão. Além do ponto L.E. a deformação será em parte elástica e em parte inelástica, mas o material não mais retornará as suas dimensões originais quando a força é removida. Após o ponto L.E o material estica rapidamente e a máxima tensão é aplicada no ponto L.Re. No ponto L.Ru. ocorre a fratura.

Ainda sobre a Fig. 1.9 cabe ressaltar a diferença de comportamento nas diversas curvas mostradas. Por exemplo, na figura (a) trata-se de um material frágil, que se rompe sem que haja deformação plástica. Já na figura (b) temos um material dútil, com limite de escoamento definido. Quando não ocorre escoamento, o L.E. é definido como a tensão necessária para provocar uma deformação permanente de 0,2% (Fig. 1.9.c).

Resumindo:

Tensão: força por unidade de área;

Deformação plástica: deformação permanente provocada por tensões que ultrapassam o limite de elasticidade;

Deformação elástica: deformação reversível, proporcional à tensão aplicada;

Módulo de elasticidade (módulo de Young): quociente entre a tensão aplicada e a deformação elástica resultante.

Dutilidade: deformação plástica total até o ponto de ruptura. Pode ser expressa como o alongamento (ver Fig. 1.10) ou como a redução na área da seção reta do corpo, imediatamente antes da ruptura, chamada estrição: No material dútil a região do regime plástico é muito maior que a do regime elástico; o alongamento e estrição são grandes.

$$\text{Estrição} = \frac{\text{área inicial} - \text{área final}}{\text{área inicial}} \quad (1.2)$$

O limite de resistência à tração de um material é calculado dividindo-se a carga máxima suportada pelo mesmo pela área da seção reta inicial. Esse limite, tal como os demais, é expresso

em unidades de tensão. Deve-se notar que o limite de resistência é calculado em relação à área inicial. Essa é uma observação importante, particularmente para os materiais dúteis, pois os mesmos sofrem uma redução de área quando solicitados pela carga máxima. Embora a tensão verdadeira que solicita o material seja calculada considerando-se a área real, a tensão tal como definida anteriormente é mais importante para o engenheiro, pois os projetos devem ser feitos com base nas dimensões iniciais. Por este motivo também o limite de ruptura pode ser inferior ao limite de resistência (Fig. 1.9.c).

Outro aspecto importante é que a deformação plástica (permanente) dos metais ocorre pelo deslizamento dos átomos, escorregando uns sobre os outros no cristal. Este deslizamento tende a acontecer preferencialmente ao longo de planos e direções específicos do cristal.

### *1.5.2 - Outras propriedades mecânicas*

A dureza é definida pela resistência da superfície do material à penetração. Como se pode esperar, a dureza e a resistência à tração estão intimamente relacionadas. A escala Brinell de dureza (BNH) é um índice de medida da dureza, calculado a partir da área de penetração de uma bilha no material. A penetração desta bilha, que é uma esfera de aço duro ou de carbeto de tungstênio, é feita mediante uma força padronizada. A escala Rockwell de dureza, outra das mais comuns escalas de dureza usadas em engenharia, está relacionada ao BNH, mas é medida pela profundidade de penetração de uma pequena bilha padronizada. Muitas escalas Rockwell foram estabelecidas para materiais com diferentes faixas de dureza; estas escalas diferem entre si nas dimensões da bilha e na carga de penetração.

A tenacidade é uma medida de energia de deformação: É a energia total necessária para provocar a fratura do corpo de prova. Pode ser representada pela área sob a curva tensão-deformação.

Existem ainda outras propriedades como resistência à fadiga, ao choque, à fluência, etc.

As propriedades mecânicas dos materiais são levantadas através de cuidadosos testes de laboratório, sendo imperativo que haja consistência na forma como os testes são conduzidos e os resultados interpretados. Estes requisitos são atendidos através do uso das normas técnicas apropriadas. No caso de aplicações práticas é sempre importante lembrar a natureza das forças a serem aplicadas e sua duração, além da temperatura ambiente.

## **1.6 - Propriedades Térmicas**

Inicialmente é importante distinguir claramente a diferença entre calor e temperatura. Temperatura é um nível de atividade térmica (medida em graus Celsius ou Fahrenheit), enquanto que calor é a energia térmica (expresso em calorias ou Btu).

As condições térmicas nas vizinhanças de um material afetam-no de diversas formas, sendo os efeitos mais importantes aqueles que produzem alterações nas microestruturas e portanto nas propriedades dos materiais. Estas alterações em propriedades são por exemplo utilizadas para se obter determinadas características após tratamentos térmicos, a serem discutidos em tópico futuro.

As propriedades térmicas mais importantes são o calor específico, a resistência ao calor, a resistência ao frio, a condutividade térmica e a dilatação.



*Calor específico médio*  $C_m$  de um corpo entre dois limites de temperatura  $\theta_0$  e  $\theta_1$  é a relação entre a quantidade de calor necessário  $Q$  para elevar a unidade de massa do corpo da temperatura  $\theta_0$  a  $\theta_1$  e a elevação de temperatura  $(\theta_1 - \theta_0)$ , ou seja:

$$C_m = \frac{Q}{(\theta_1 - \theta_0)}, \quad (1.3)$$

A *resistência ao calor (ao frio)* é a capacidade dos materiais e peças suportarem, sem prejuízo de suas propriedades à manutenção por períodos curtos ou longos de altas(baixas) temperaturas. O efeito da temperatura nas propriedades dos materiais será visto com mais detalhes nos capítulos sobre materiais condutores e isolantes.

Se chama de *condutividade térmica* a propagação do calor através dos corpos e tem lugar quando todos os pontos destes não estão a mesma temperatura. O calor se propaga de molécula a molécula, desde os pontos mais quentes aos mais frios. Se considerarmos uma placa de faces paralelas de espessura finita e dimensões transversais infinitas, onde cada face se mantenha a temperatura constante, se produz uma passagem de calor através da massa da placa. Um vez estabelecido o regime permanente, a quantidade de calor que atravessa, durante um tempo muito curto, uma pequena seção paralela às faces depende da temperatura destas e do *coeficiente de condutividade térmica* da substância que constitui a placa. Este coeficiente expressa o número de calorias-grama que atravessam perpendicularmente, em um segundo, um centímetro quadrado de uma lâmina que tenha um centímetro de espessura e cujas faces se mantenham a temperaturas que difiram de um grau entre si.

Existe uma certa correlação entre condutividade elétrica e térmica, a qual pode explicar-se pela teoria eletrônica da corrente elétrica. Por ação de uma diferença de potencial os elétrons livres, que se movem em todas as direções nos espaços intermoleculares, tomam um movimento de conjunto, que constitui a corrente elétrica. Quando entre dois pontos de um metal existe uma diferença de temperatura, os elétrons das partes mais quentes, que têm maior velocidade média, cedem por choque uma parte de sua energia e de sua velocidade aos elétrons das partes mais frias. A soma de todos estes choques dá lugar, após um tempo mais ou menos longo, à igualação das velocidades médias e, por conseguinte, ao equilíbrio da temperatura. Nos polímeros a transferência de energia é obtida através da vibração e rotação das cadeias de moléculas. Os polímeros são freqüentemente empregado como isolantes térmicos devido a sua baixa condutividade térmica. Assim como nas cerâmicas, a introdução de pequenos poros reduz a condutividade térmica.

*Coeficiente de dilatação linear:* Quando se aquece um sólido, aumenta em geral suas dimensões em todos os sentidos, aumentando portanto, sua superfície e seu volume. A dilatação linear se refere ao aumento do comprimento em uma determinada direção. Chamando  $l_0$  ao comprimento inicial e  $l_1$  ao comprimento final, correspondentes às temperaturas  $\theta_0$  e  $\theta_1$ , se tem:

$$\alpha = \frac{l_1 - l_0}{l_0(\theta_1 - \theta_0)} \quad (1.3)$$

onde  $\alpha$  é o coeficiente médio de dilatação linear entre as temperaturas  $\theta_0$  e  $\theta_1$ . Por não serem iguais os coeficientes de dilatação de todos os materiais, surgem várias dificuldades, entre as quais a soldadura de diferentes corpos.

## **1.7 - Propriedades Químicas**

*1.7.1- Efeito das Radiações nos materiais:* No campo da engenharia também tem-se preocupado muito sobre os efeitos das radiações nos materiais. Em particular, os efeitos danosos de radiação devem ser levados em conta no projeto de reatores nucleares, embora não seja somente nesse caso que se tem irradiação de materiais. Sabe-se há muito tempo que os materiais podem ser modificados por radiações. O botânico observa os efeitos da fotossíntese, o fotógrafo usa esse fato na exposição de seus filmes, o físico utiliza essas interações para aplicações de fluorescência, o médico aplica radiações em terapia. Os efeitos das radiações visíveis (luz) nos materiais é medido através de ensaios padronizados (ASTM).

O principal efeito das radiações nos materiais é originado pela energia extra que ela fornece, que facilita a ruptura de ligações existentes e o rearranjo dos átomos em novas estruturas. Em materiais poliméricos a base de polietileno utilizados em lacres de medidores de energia, a radiação UV, assim como o calor e a umidade, causa degradação.

*1.7.2 Corrosão:* Num aspecto muito difundido e aceito universalmente pode-se definir corrosão como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos. A deterioração representa alterações prejudiciais indesejáveis, sofridas pelo material, tais como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais.

A deterioração de materiais não-metálicos, como por exemplo concreto, borracha, polímeros e madeira, devido à ação do meio ambiente, é considerada também, por alguns autores, como corrosão.

Sendo a corrosão, em geral, um processo espontâneo, está constantemente transformando os materiais metálicos de modo que sua durabilidade e desempenho deixam de satisfazer os fins a que se destinam.

Com exceção de alguns metais nobres, que podem ocorrer no estado elementar, os metais são geralmente encontrados na natureza sob a forma de compostos, sendo comum a ocorrência de óxidos e sulfetos metálicos. Os compostos que possuem conteúdo energético inferior aos dos metais são relativamente estáveis. Deste modo, os metais tendem a reagir espontaneamente com os líquidos ou gases do meio ambiente em que são colocados: o ferro se “enferruja” ao ar e na água, e objetos de prata escurecem quando expostos ao ar.

Em alguns casos, pode-se admitir a corrosão como o inverso do processo metalúrgico, cujo objetivo principal é a extração do metal a partir de seus minérios ou de outros compostos, ao passo que a corrosão tende a oxidar o metal. Assim, muitas vezes o produto da corrosão de um metal é bem semelhante ao minério do qual é originalmente extraído. O óxido de ferro mais comumente encontrado na natureza é a hematita,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e a ferrugem é o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  hidratado:  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ .

Além do prejuízo econômico causado para substituição de peças danificadas pela corrosão, uma outra importante consideração sobre corrosão que não pode deixar de ser feita refere-se ao aspecto energético. Sabe-se que a obtenção de um metal se faz à custa de uma certa quantidade de energia, a qual é cedida por intermédio dos processos metalúrgicos, como se vê na clássica expressão:



Como resultado do próprio processo de obtenção, sabe-se que os metais, nas suas formas refinadas, encontram-se num nível energético superior ao do composto que lhe deu origem. Excetuam-se apenas os metais nobres que são encontrados na natureza na forma metálica. Esta é portanto a razão termodinâmica da espontaneidade das reações de corrosão que transformam os metais novamente em compostos, num processo inverso ao metalúrgico. A energia liberada nesta transformação é perdida para o meio ambiente.

Por outro lado, para manter os metais protegidos contra a corrosão há necessidade de uma parcela adicional de energia, a qual pode ser aplicada de diversas formas, dependendo logicamente das condições de emprego do metal. Essa energia adicional pode ser representada por revestimentos protetores, inibidores de corrosão, e outros métodos a serem vistos nos próximos itens.

Corrosão por dissolução: A corrosão mais simples é através de uma dissolução química, como ocorre, por exemplo, no caso do açúcar e do sal na água. Obviamente materiais tão solúveis quanto o açúcar e o sal não são utilizados ordinariamente na fabricação de peças, mas há ocasiões em que os materiais entram em contato com solventes poderosos. Por exemplo, uma mangueira de borracha através da qual corre gasolina, está em contato com hidrocarbonetos solventes e tijolos refratários de sílica entram em contato com escórias de óxido de ferro que dissolvem a sílica. Podem ser feitas as seguintes generalizações a respeito da dissolução química:

- ◆ Moléculas de íons pequenos se dissolvem mais facilmente - os componentes do asfalto, por exemplo, se dissolvem mais facilmente que os de um plástico altamente polimerizado;
- ◆ A solubilização ocorre mais facilmente quando o soluto e o solvente têm estruturas semelhantes - materiais orgânicos são mais facilmente solúveis em solventes orgânicos metais em outros metais líquidos e materiais cerâmicos em cerâmicos fundidos;
- ◆ A presença de dois solutos pode produzir maiores solubilidades que a presença de um só - como exemplo, o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) do calcário é praticamente insolúvel em água, entretanto, a presença de gás carbônico, para formar ácido carbônico em contato com a água, aumenta marcadamente a solubilidade de  $\text{CaCO}_3$ ;
- ◆ A velocidade de dissolução aumenta com a temperatura - a dissolução envolve difusão e, como essa aumenta rapidamente com a temperatura, a corrosão por dissolução também ocorre mais rapidamente.

Corrosão Eletroquímica: O tipo mais comum de corrosão envolve um processo de oxidação eletroquímica de um metal. Rigorosamente falando, *oxidação* é a remoção de elétrons de um átomo. Por exemplo, a Eq. 1.5 é a expressão para a oxidação do ferro para íons ferrosos e a Eq. 1.6 expressa a oxidação de íons ferrosos a férricos.



Essa combinação de reação química e perda de elétrons leva a outras reações, como por exemplo a formação de ferrugem. A ferrugem é hidróxido férrico e se forma de acordo com a seguinte reação global:

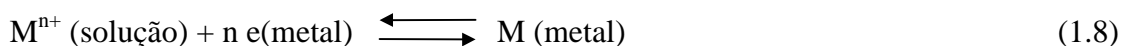


Para haver formação a partir do ferro, as reações (1.5) e (1.6) devem ocorrer e tanto oxigênio como a umidade devem estar presentes.

Verifica-se experimentalmente que os metais apresentam diferentes tendências à oxidação. Assim, em presença de ar e umidade nota-se que o ferro se oxida mais do que o níquel e que o ouro não se oxida. É portanto, de grande ajuda para o estudo ou previsão de alguns processos corrosivos, dispor os metais em uma tabela que indique a ordem preferencial de cessão de elétrons. Esta tabela é conhecida por tabela de potenciais de eletrodo. A elaboração e a utilização desta tabela serão consideradas a seguir.

A imersão de um metal, sob a forma de lâmina, placa, bastão, fio, tela, etc. nas soluções eletrolíticas determina o estabelecimento de uma diferença de potencial entre as duas fases, a sólida e a líquida. Esta diferença de potencial é, simultaneamente, de natureza elétrica e de natureza química, e por isso se denomina diferença de potencial eletroquímico. A maior parte da corrosão ocorre através da interação dos processos de *dissolução* e *oxidação*.

De maneira mais específica, o eletrodo é o sistema formado pelo metal e pela solução eletrolítica vizinha ao metal. Assim, para o caso do ferro pode-se representar como se vê na Fig. 1.11. O sistema constituído pelo metal e a solução tende a evoluir espontaneamente de modo a atingir um estado de equilíbrio. Este equilíbrio eletroquímico, que ocorre nos eletrodos é normalmente representado por:



e se estabelece uma diferença de potencial entre as camadas de cargas elétricas de sinais contrários, que existem na interface metal-solução.

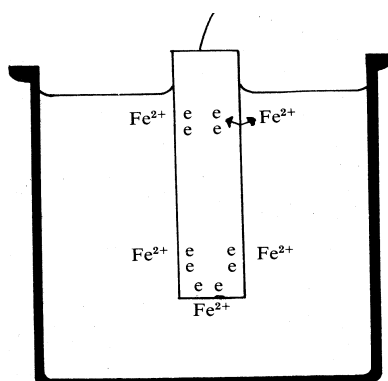


Fig. 1.11 - Eletrodo

O potencial de eletrodo mostra a tendência de uma reação se passar no eletrodo, isto é, dá a medida da facilidade com que os átomos do eletrodo metálico perdem elétrons ou da facilidade com que os íons recebem elétrons.

Evidentemente, a medida de um potencial não pode ser realizada sem um valor de referência ou de um potencial padrão. Pode-se medir o potencial de um eletrodo ligando-o a um segundo eletrodo tomado como referência. Devido a diferença de potencial desses eletrodos haverá um fluxo de elétrons do eletrodo de maior potencial para o outro. Assim, valores relativos de potenciais podem ser determinados experimentalmente comparando-se o potencial da meia pilha com o eletrodo normal de hidrogênio que foi escolhido como referência e, arbitrariamente, fixado como tendo potencial nulo.

O *eletrodo normal de hidrogênio* (Fig. 1.12) é constituído de um fio de platina coberto com platina finamente dividida (negro de platina) que adsorve grande quantidade de hidrogênio, agindo como se fosse um eletrodo de hidrogênio. Esse eletrodo é imerso em uma solução de 1 M

de íons hidrogênio (por exemplo, solução de 1 M de HCl), através da qual o hidrogênio gasoso é borbulhado sob pressão de 1 atmosfera e temperatura de 25°C.

O *potencial de eletrodo padrão* de um elemento é, então, a diferença de potencial expressa em volt entre o elemento e uma solução de 1 M de seus íons em relação ao eletrodo normal de hidrogênio, que tem potencial igual a zero.

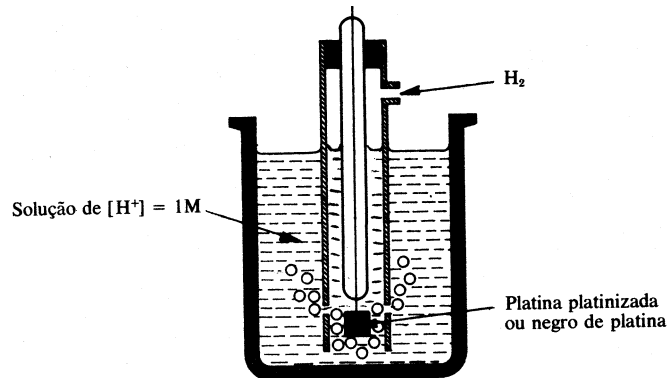
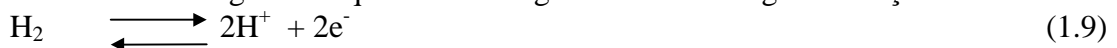


Fig. 1.12 - Eletrodo normal de hidrogênio

No caso do hidrogênio o equilíbrio é atingido através da seguinte reação:



A diferença de potencial entre os eletrodos de ferro e de hidrogênio na Fig. 1.13 é 0,44

V

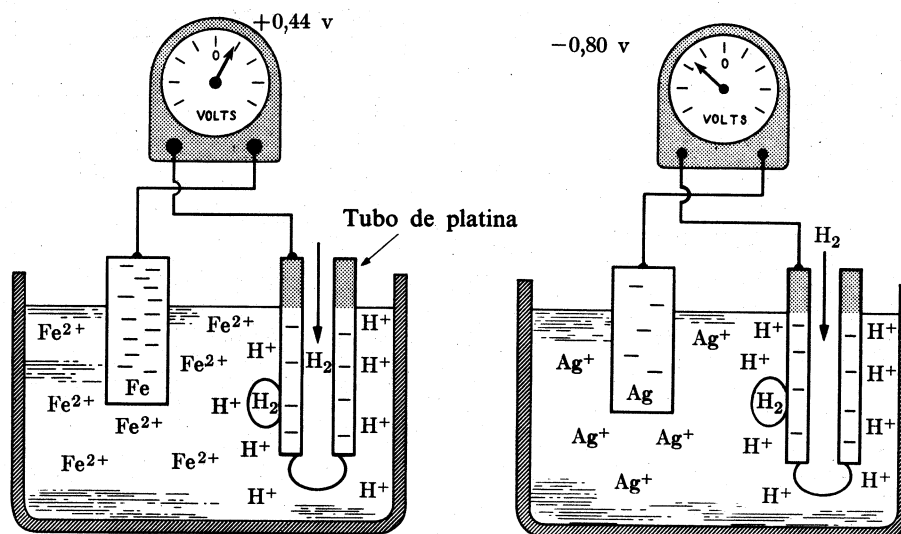


Fig. 1.13 - Diferença de potencial do ferro e da prata versus H<sub>2</sub>

Medidas semelhantes para outros metais levaram aos dados constantes da Tabela 1.1. Os metais alcalinos e alcalino-terrosos, cujos elétrons da camada de valência são mais fracamente ligados, apresentam um potencial superior ao do ferro. Por outro lado, os metais nobres, tais como prata, platina e ouro, produzem menos elétrons que o hidrogênio, razão pela qual seus potenciais são mais baixos.

Tabela 1.1 - Potenciais de Eletrodo de Metais (25° C, solução 1 M dos íons metálicos)

Íon metálico	Potencial*
Li <sup>+</sup> (básico)	+ 2,96 (anódico)
K <sup>+</sup>	+ 2,92
Ca <sup>2+</sup>	+ 2,90
Na <sup>+</sup>	+ 2,71
Mg <sup>2+</sup>	+ 2,40
Al <sup>3+</sup>	+ 1,70
Zn <sup>2+</sup>	+ 0,76
Cr <sup>2+</sup>	+ 0,56
Fe <sup>2+</sup>	+ 0,44
Ni <sup>2+</sup>	+ 0,23
Sn <sup>2+</sup>	+ 0,14
Pb <sup>2+</sup>	+ 0,12
Fe <sup>3+</sup>	+ 0,045
H <sup>+</sup>	0,000 (referência)
Cu <sup>2+</sup>	- 0,34
Cu <sup>+</sup>	- 0,47
Ag <sup>+</sup>	- 0,80
Pt <sup>++</sup>	- 0,86
Au <sup>+</sup> (nobre)	- 1,50 (catódico)

\* Esses sinais são consistentes com a termodinâmica e usados pelos fisicoquímicos. Os sinais opostos são ainda usados por muitos eletroquímicos e especialistas em corrosão.

0

**Células Galvânicas:** O par de eletrodos, mostrado na figura 1.13 envolve o ferro. O eletrodo que fornece os elétrons para o circuito externo é denominado anodo, enquanto que o eletrodo que recebe elétrons do circuito externo é chamado catodo.

Ao se fazer o contato elétrico entre os dois eletrodos, o maior potencial do anodo faz com que os elétrons se dirijam do anodo para o catodo (Fig. 1.14).

A introdução do excesso de elétrons no catodo faz com que o equilíbrio descrito pela Eq. 1.9, se desloque para a direita. Dessa forma, é libertado H<sub>2</sub> no catodo, formado a partir dos íons hidrogênio da água. Essa reação remove parte dos elétrons do eletrodo de ferro, fazendo com que o equilíbrio descrito pelas Eqs. 1.5 e 1.6 se desloque para a direita. Consequentemente, essas reações continuam a ocorrer espontaneamente, dissolvendo o metal do anodo e produzindo hidrogênio no catodo.

Esse exemplo demonstra o mecanismo da corrosão galvânica. A corrosão ocorre apenas no anodo, pois aí o potencial é mais elevado que no catodo. O equilíbrio da dissolução é deslocado na direção de maior dissolução (isto é, de corrosão), ao se fazer o contato elétrico e os elétrons serem removidos.



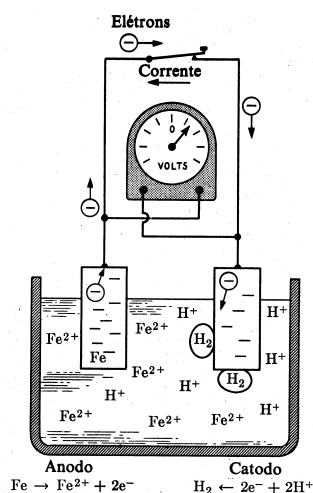


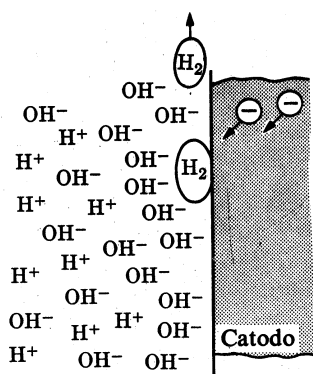
Fig. 1.14 - Corrosão galvânica

O hidrogênio se desprende no catodo porque está abaixo do ferro na série das tensões eletrolíticas. O  $H_2$  é proveniente dos íons hidrogênio presentes na água em virtude da reação:



Geralmente, esta reação produz apenas uns poucos íons hidrogênio. Consequentemente, a reação da Figura 1.14 não se processa rapidamente. Por outro lado, a remoção de íons  $H^+$  da solução reduz a concentração dos íons hidrogênio nas vizinhanças do catodo, estabelecendo-se um equilíbrio temporário até que mais íons hidrogênio possam (1) se difundir para a superfície do catodo ou (2) se formar de acordo com a eq. 1.10.

Quando a reação expressa pela equação 1.9 se desloca para a esquerda, tem-se uma reação importante no catodo perceptível pois se tem desprendimento gasoso. Entretanto, outras alterações importantes também ocorrem no catodo, embora menos óbvias. A primeira é o aumento na concentração de íons  $OH^-$  que acompanham a remoção de íons  $H^+$  (Fig. 1.15).

Fig. 1.15 - Concentração de  $OH^-$  no catodo

A remoção de  $H^+$  da solução faz com que a reação expressa pela equação 1.10 se desloque à direita e produza mais íons  $OH^-$  na superfície do catodo, o qual permite a formação de ferrugem (Fig. 1.16) na presença de íons  $Fe^{3+}$ .



Em virtude da sua insolubilidade quase total na maior parte das soluções aquosas, o  $Fe(OH)_3$  se precipita facilmente e permite que a reação acima prossiga, conforme os íons  $Fe^{3+}$  e  $OH^-$  entrem em contato.

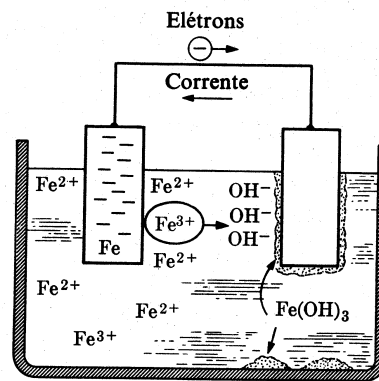


Fig. 1.16 - Formação de Ferrugem

Esses dois reagentes se originam no catodo e no anodo respectivamente; entretanto a combinação de ambos ocorre comumente no anodo, pois os íons  $\text{Fe}^{3+}$  sendo menores que os  $\text{OH}^-$ , se difundem mais rapidamente. Além disso, apenas um íon  $\text{Fe}^{3+}$  deve se difundir para o anodo para cada três íons  $\text{OH}^-$ . Isso significa que, embora a corrosão ocorra no anodo, a ferrugem se deposita no catodo.

A corrosão galvânica, portanto, se caracteriza pelo acoplamento de materiais metálicos dissimilares imersos em um eletrólito, causando uma transferência de carga elétrica de um para outro, por terem potenciais elétricos diferentes. A corrosão é localizada, próxima à região do acoplamento, ocasionando profundas perfurações no material metálico que funciona como anodo.

Casos onde estes mecanismos são observados:

- trocadores ou permutadores de calor, com feixe de tubos de alumínio; a presença de pequenas concentrações de  $\text{Cu}^{2+}$  na água de refrigeração ocasiona, em pouco tempo, perfurações nos tubos;
- tubos de caldeiras onde ocorre, em alguns casos, depósitos de cobre ou óxido de cobre. Isto porque a água de alimentação da caldeira pode conter íons cobre, cobre metálico ou suas ligas. O cobre e suas ligas ou íons são originados, geralmente, de contaminações na água de alimentação por substâncias usadas durante o processamento;
- tanques de aço carbono ou de aço galvanizado. A corrosão galvânica é ocasionada pela presença de cobre ou compostos originados pela ação corrosiva ou erosiva da água sobre a tubulação de cobre que alimenta o tanque.

As células galvânicas formadas por materiais diferentes são chamadas células de composição, outros tipos de células galvânicas são as células de tensão (nas quais os contornos dos grãos são atacados devido a diferença de potencial causada pelas tensões internas) e as células de concentração (onde eletrodos se encontram mergulhados em eletrólitos de concentrações diferentes).

Quando se tem necessidade de ligar dois materiais metálicos de potenciais diferentes, a consulta à tabela de potenciais é de grande utilidade, pois permite caracterizar o material que terá tendência a funcionar como anodo. Os potenciais se alteram com a mudança da solução do meio corrosivo, e como estes são vários, nem sempre são encontrados dados suficientes na literatura especializada que permitam caracterizar o material que funcionará como anodo.

Em alguns casos se procura, quando for inevitável a junção de dois materiais metálicos diferentes, fazer em um deles um revestimento metálico que permita uma aproximação de

potenciais, diminuindo portanto a diferença de potencial e consequentemente, o processo corrosivo (Ver Fig. 1.17 e 1.18).

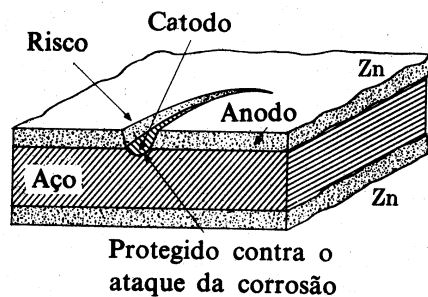


Fig. 1.17- Aço Galvanizado. O zinco atua como anodo e o ferro como catodo. Portanto, o ferro está protegido, mesmo que a camada de zinco seja perfurada

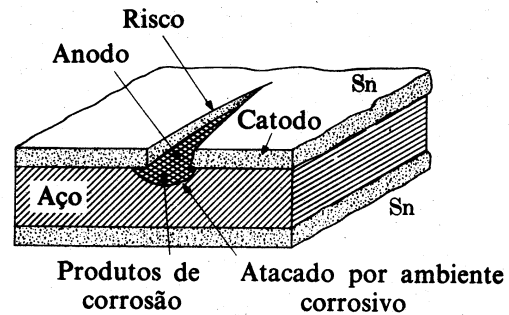


Fig. 1.18 - Aço Estanhado. O estanho protege o ferro, enquanto a camada for contínua. Quando a camada é perfurada o ferro do aço funciona como anodo e o estanho como catodo, o que acelera a corrosão

Galvanoplastia: A eletrodeposição de cobre e de outros metais ocorre através da reação correspondente a Eq. 1.12. A peça na qual vai haver a deposição é usada como catodo de uma célula eletrolítica; uma fonte externa introduz elétrons (Fig. 1.19).



Em princípio, a eletrodeposição é o inverso da corrosão, ou seja, na primeira o metal se deposita a partir da solução, enquanto que, na corrosão, o metal se dissolve. A corrosão sempre ocorre no anodo enquanto que a eletrodeposição sempre se dá no catodo.

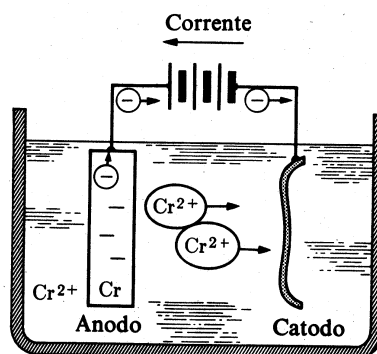


Fig. 1.19 - Eletrodeposição

Prevenção da Corrosão: Pelas considerações apresentadas, pode-se concluir que devem ser tomadas medidas adequadas de proteção, a fim de se evitar, ou diminuir, a ação corrosiva devido à formação de pilhas galvânicas. Entre essas medidas são indicadas:

- ♦ uso de inibidores de corrosão;
- ♦ isolamento elétrico dos materiais de nobrezas diferentes: quando for inevitável a existência de grandes diferenças de potencial (por exemplo, chapas de alumínio sobre estruturas de aço, juntas de latão em canalizações de aço, etc), deverá sempre ser especificada a colocação, nos pontos de conexão, de gaxetas, niples e de arruelas não metálicas como hypalon, neoprene, teflon, etc., que agirão como isolantes;

♦ aplicação de revestimentos protetores: se for aplicado qualquer revestimento protetor, que alguns poderiam imaginar somente necessário para o metal funcionando como anodo, é recomendável a pintura também do catodo, evitando assim que, caso haja falha no revestimento do anodo, não fique uma pequena área anódica exposta a uma grande área catódica. A única limitação desse método é o comportamento em serviço da camada protetora. Por exemplo, as camadas orgânicas causam problemas, se usadas em temperaturas elevadas ou em condições de abrasão severa; além disso, necessita-se de um recobrimento periódico da superfície em virtude da oxidação da camada com o tempo. Entretanto, as camadas protetoras não precisam ser necessariamente orgânicas. Por exemplo, pode-se usar estanho como uma protetora “inerte” para o aço. Superfícies prateadas, niqueladas ou cobreadas também são resistentes à corrosão. Essa camada protetora serve como um anodo de sacrifício, que se corrói no lugar do aço. Esses metais podem ser depositados por imersão a quente em banhos metálicos líquidos, ou na forma de placas que podem ser substituídas facilmente, como mostrado na Fig. 1.20,. Também se podem usar como camadas protetoras materiais cerâmicos inertes;

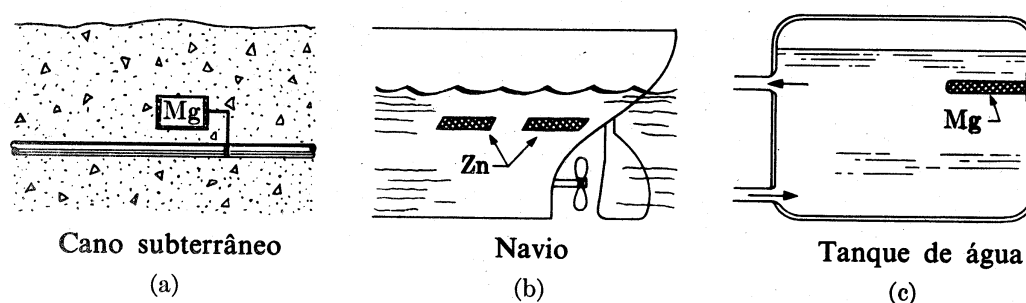


Fig. 1.20 - Anodos de sacrifício. (a) placas de magnésio enterradas ao longo de um oleoduto. (b) placas de zinco em casco de navio. (c) barra de magnésio em um tanque industrial de água quente.

♦ uso de materiais de nobrezas próximas: os metais selecionados, se possível, deverão estar localizados, na tabela de potenciais, o mais próximo possível;

♦ um outro método de proteção galvânica é o uso de uma tensão aplicada no metal. A Fig. 1.21 ilustra este procedimento. O princípio de proteção é o mesmo do anodo de sacrifício, ou seja, fornecem-se elétrons ao metal, de forma que o mesmo se torne catódico e as reações de corrosão deixem de ocorrer;

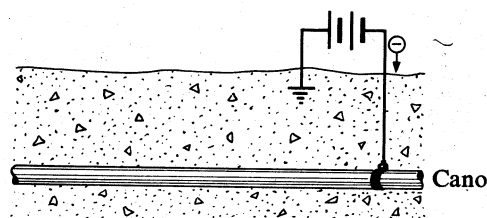
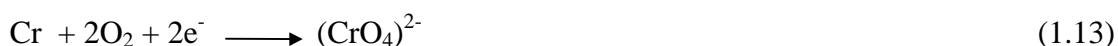


Fig. 1.21 - Tensão aplicada

♦ proteção por passivação. Em uma célula de concentração o oxigênio acentua a corrosão nas regiões onde sua concentração é baixa. Na ausência de diferenças de concentração de oxigênio, outros efeitos podem ser observados. Especificamente, o oxigênio pode reagir com íons e elétrons do anodo formando uma camada protetora. Essa reação é particularmente importante nos aços inoxidáveis (contendo cromo) onde:



Os íons são adsorvidos pela superfície anódica e, desta forma, isolam esta superfície evitando as reações de corrosão; o metal fica apassivado (Fig. 1.22). Um aço contendo cromo é muito resistente à corrosão em condições oxidantes; entretanto, na ausência de oxigênio a reação (1.14) pode se dar

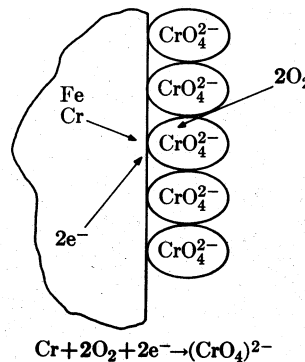


Fig. 1.22 - Passivação do aço com 18% de Cr

A corrosão também pode ser causada por correntes ocasionadas por potenciais externos que produzem casos severos de corrosão, por exemplo, em tubulações enterradas e cabos telefônicos, que estão freqüentemente sujeitos a esses casos devido às correntes elétricas de interferência que abandonam o seu circuito normal para fluir pelo solo ou pela água. Esse tipo de corrosão é chamada de corrosão por eletrólise ou eletrolítica, e pode-se definí-la como a deterioração da superfície externa de um metal forçado a funcionar como anodo ativo de uma célula ou pilha eletrolítica. Geralmente as áreas corroídas se apresentam livres do produto de corrosão e como é uma forma de corrosão localizada, em pouco tempo ocorre a perfuração das instalações.

Ainda uma outra forma de corrosão é a corrosão microbiológica, também chamada microbiana ou biológica, onde a corrosão do material metálico se processa sob a influência de microorganismos, quase que exclusivamente bactérias, embora existam exemplos de corrosão atribuídos a fungos e algas. Casos relacionados com deterioração microbiana podem aparecer em diversos materiais, metálicos ou não-metálicos

## 1.8- Propriedades Versus Microestruturas

### 1.8.1 Introdução

Alguns metais, usados comercialmente em aplicações em engenharia são puros. Isso ocorre com o cobre usado em condutores elétricos e com a camada de zinco em aços galvanizados.

Mas em muitos casos, elementos estranhos são intencionalmente adicionados a um material, a fim de melhorar suas propriedades. O latão é um exemplo de cobre que contém zinco.

As soluções sólidas formam-se mais facilmente quando os átomos do solvente e do soluto têm dimensões e estruturas eletrônicas semelhantes. No caso do latão, o cobre e o zinco têm raios atômicos de 1,278 e 1,332 Å, respectivamente, ambos têm excetuando-se os do nível de valência, 28 elétrons e apresentam, quando isolados, número de coordenação 12. Portanto, quando se adiciona zinco ao cobre, ele substitui facilmente o cobre no reticulado cfc, até que, um máximo de aproximadamente 40% dos átomos de cobre tenham sido substituídos.

As soluções sólidas podem ser *substitucionais* ou *intersticiais*. O caso do latão, descrito acima, é um exemplo de solução substitucional, porque os átomos de zinco substituem os de cobre na estrutura cristalina. Existe, no entanto, um limite até o qual o elemento pode ser substituído, passando deste limite de *solubilidade sólida*, forma-se uma segunda fase. Um outro tipo de solução sólida são as intersticiais, onde um pequeno átomo pode se localizar nos interstícios entre os átomos maiores (ver os dois casos na Fig. 1.23). O carbono no ferro é um exemplo. Em temperaturas abaixo de 910°. C, o ferro puro ocorre com uma estrutura cúbica de corpo centrado. Acima de 910°. C, existe uma faixa de temperatura na qual o ferro tem uma estrutura cúbica de faces centradas. No reticulado cúbico de faces centradas, existe um “buraco” desocupado, relativamente grande, no centro da célula unitária. O átomo de carbono, extremamente pequeno, pode se alojar nesse vazio.

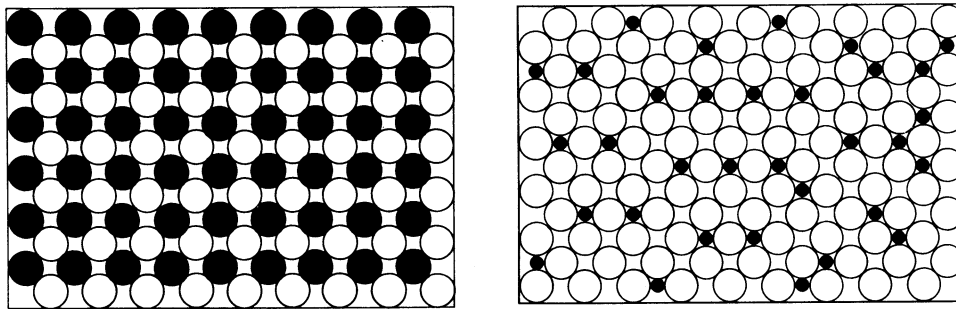
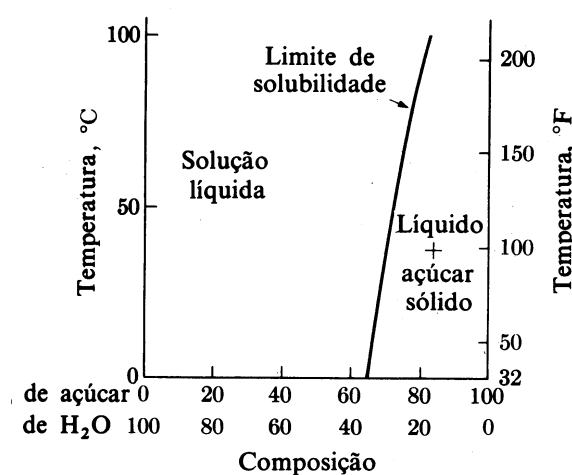


Fig. 1.23 - Solução sólida substitucional e intersticial

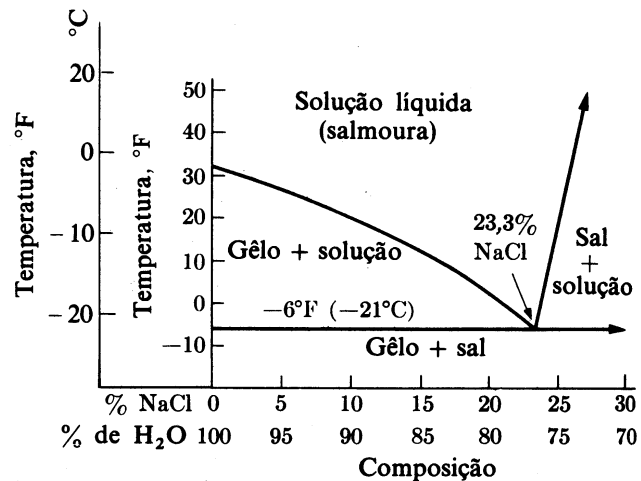
### 1.8.2 Diagramas de Fase

A Fig. 1.24 mostra a solubilidade do açúcar na água; a curva na figura é uma curva de solubilidade. Todas as composições à esquerda da curva, correspondem a uma única fase, pois todo o açúcar está dissolvido na fase líquida. Com porcentagens mais elevadas de açúcar, que correspondem ao lado direito da curva, é impossível dissolver completamente o açúcar; logo, teremos uma mistura de duas fases, açúcar sólido e um “xarope” líquido.





1.24 - Solubilidade do açúcar na água



1.25 - Solubilidade do NaCl (curva superior à direita) e da água (curva superior esquerda) em uma solução aquosa de sal.

A Fig. 1.25 mostra um outro sistema de dois componentes que possui maior importância prática que o primeiro. Aqui, os extremos da abscissa são 100% de H<sub>2</sub>O e 30% de NaCl. Observe que a solubilidade do NaCl aumenta com a temperatura e que a solubilidade de H<sub>2</sub>O também aumenta com a temperatura e que as composições intermediárias têm temperaturas de fusão inferiores à da água pura (0°. C) e do sal puro (800°. C).

Essas relações de fusão e solidificação são muito comuns em todos os tipos de combinações de dois componentes.

Quando dois metais formam uma fase líquida homogênea, isto é, eles são completamente solúveis um no outro, eles não necessariamente se solidificarão para formar uma fase sólida homogênea. Quando solidificados dois metais podem ser:

- \* completamente solúveis um no outro;
- \* completamente insolúveis um no outro;
- \* parcialmente solúveis um no outro;
- \* combinados para formar um composto intermetálico.

Os diagramas de equilíbrio ou de fase (algumas vezes chamados curvas de solubilidade) são usados para mostrar a percentagem de cada metal na liga com o eixo das ordenadas indicando a temperatura. Este é um método conveniente para indicar as mudanças de estado e estrutura pelas quais cada liga passa durante o resfriamento lento a partir do estado líquido para o estado sólido em condições de equilíbrio.

A situação mais comum ocorre quando dois metais são parcialmente solúveis. O diagrama de fases para esta situação é mostrado na Fig. 1.26, que mostra a solubilidade sólida e a formação de uma mistura eutética.

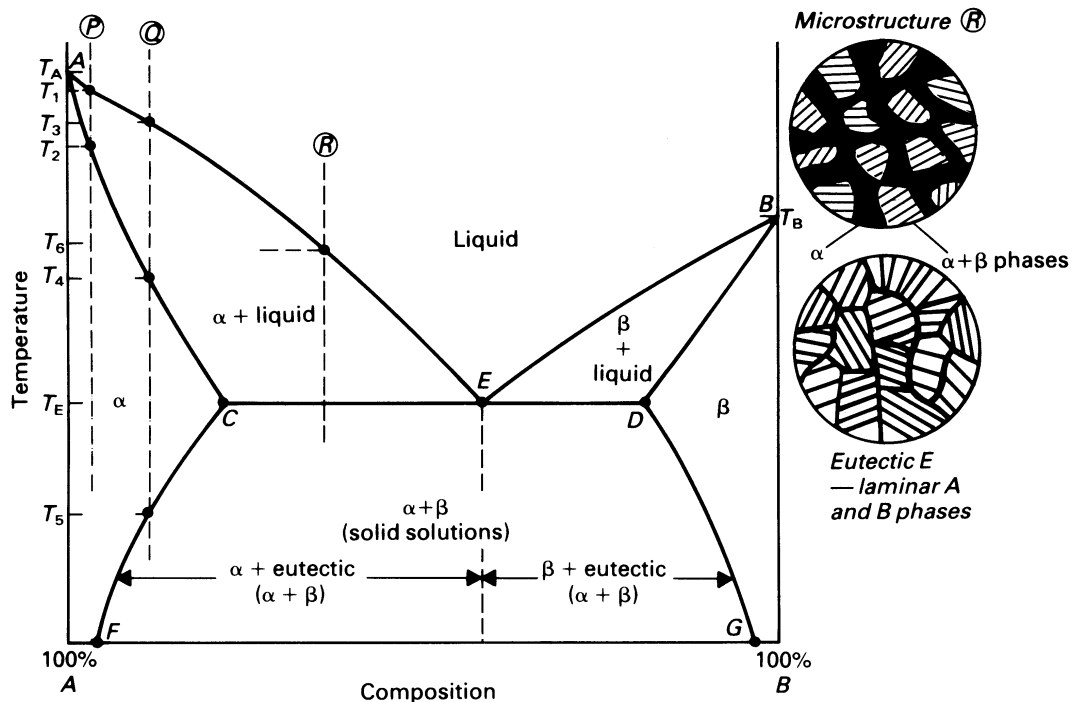
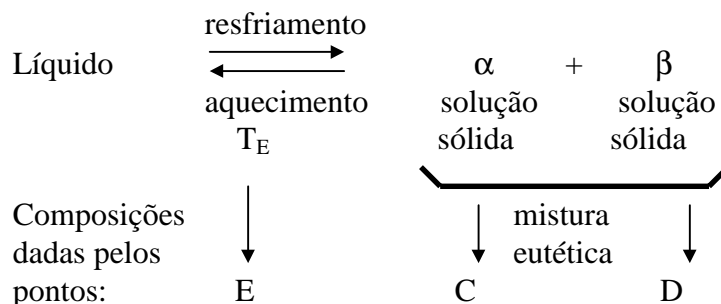


Fig. 1.26 - Diagrama de fases para o caso da solubilidade parcial

Com referência a Fig. 1.26:

- \* a linha AEB é do líquido e a linha ACEDB é sólido;
- \* a solução sólida  $\alpha$  é metal (soluto) dissolvido no metal A (solvente);
- \* a solução sólida  $\beta$  é metal A (soluto) dissolvido no metal B (solvente);
- \* as linhas CF e DG denotam a máxima solubilidade de B em A e de A em B, respectivamente.

Se uma pequena quantidade de qualquer dos metais está presente, então a solução sólida ( $\alpha$  ou  $\beta$ ) se forma; para proporções intermediárias a estrutura contém laminações de ambas soluções sólidas. A mistura eutética contém ambas soluções sólidas, e a microestrutura mostrada na Fig. 1.26. As solubilidades sólidas de B em A e de A em B, ocorrem ambas na temperatura eutética ( $T_E$ ) e são representadas pelos pontos C e D respectivamente. Se uma liga líquida tem uma composição dada pelo ponto E, então quando resfriada para  $T_E$ , a mistura eutética é formada de acordo com a reação:



Considere o resfriamento de três ligas mostradas na Fig. 1.26 e representadas pelos pontos P, Q e R. Para liga P a solidificação começa em  $T_1$  e é completa em  $T_2$ , formando a solução sólida completa ( $\alpha$ ).

Para a liga Q a solidificação começa em  $T_3$  e é completa em  $T_4$ , formando uma solução sólida completa ( $\alpha$ ). Se a temperatura for reduzida um pouco além, então abaixo de  $T_5$  o limite de solubilidade de B em A é excedido, e o metal em excesso B é precipitado da solução sólida  $\alpha$ . Entretanto, não é B puro, mas uma solução sólida  $\beta$  saturada. Esta fase  $\beta$  precipitada pode ocorrer nas bordas dos grãos  $\alpha$  ou dentro dos cristais  $\alpha$  ou em ambas localizações.

Para a liga R a solidificação começa em  $T_6$  e produz uma solução sólida  $\alpha$ . A proporção de B no líquido remanescente aumenta, até que a solidificação em  $T_E$  é completada e a estrutura contém  $\alpha$  e o eutético ( $\alpha+\beta$ ). O resfriamento desta mistura abaixo da temperatura  $T_E$  causa a mudança da solubilidade de A em B e de B em A e as composições da solução sólida ( $\alpha$  e  $\beta$ ) são dadas pelos pontos nas curvas CF e DG respectivamente. A microestrutura para esta liga (sólida) é mostrada também na Fig. 1.26. Resultados similares podem ser deduzidos para o resfriamento de soluções líquidas com composições de metal B maiores que a eutética.

Para uma composição particular de uma liga a microestrutura pode ser composta de uma ou duas fases. É frequentemente necessário conhecer o quanto de cada fase está presente. Informações quantitativas podem ser obtidas dos diagramas de fases.

Duas fases nunca têm propriedades idênticas, pois têm estruturas diferentes. Algumas das propriedades dos materiais polifásicos são aditivas e podem ser determinadas pela média, (levando-se em conta pesos adequados) das propriedades individuais. Outras propriedades são interativas, pois o comportamento de cada fase depende da natureza da adjacente.

Propriedades Aditivas: a densidade de uma estrutura polifásica pode ser calculada diretamente a partir da densidade  $\rho$  de cada uma das fases e da fração em volume  $f$  correspondente.

$$\rho_{Material} = f_1\rho_1 + f_2\rho_2 + \dots$$

Quando se tem apenas duas fases a densidade é uma função linear da fração em volume presente de cada uma das fases. No caso de se ter poros o produto  $f\rho$  é nulo, já que para essa fase a densidade é nula. Na figura 1.27 é mostrado um exemplo para mistura de plástico e fibra de vidro.

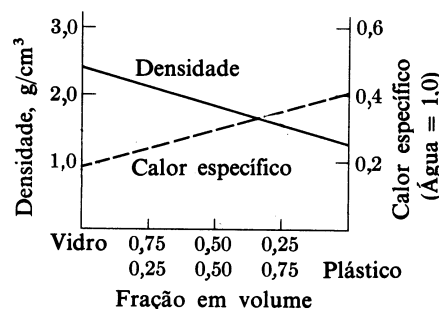


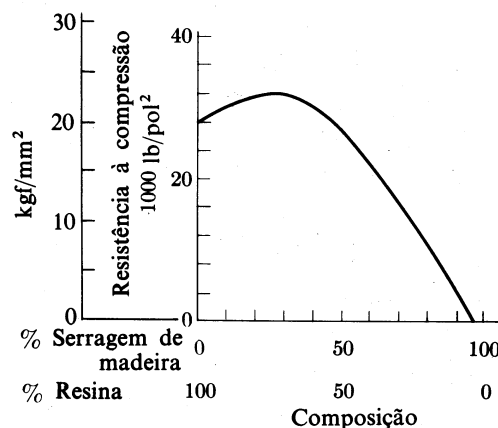
Fig. 1.27 - Propriedades Aditivas para Materiais compostos.

As condutividades elétrica e térmica dos materiais polifásicos também são aditivas. Entretanto, a escolha dos pesos é mais complexa, pois tanto a forma como a distribuição das fases, são importantes.

Propriedades Aditivas: Propriedades tais como dureza e resistência não podem ser interpoladas entre as das fases contribuintes, pois o comportamento de cada fase depende da natureza da adjacente. Por exemplo, uma dispersão de partículas finas de uma fase dura, inibe o escorregamento e evita o cisalhamento de uma matriz dútil.

Esta interdependência das propriedades mecânicas das fases torna possível obter-se materiais mais resistentes pela adição de reforçadores. Por exemplo, a adição de carbono à borracha, de areia à argila, de areia ao asfalto ou de serragem aos plásticos, aumenta a resistência destes materiais à deformação. O efeito na resistência no último exemplo está mostrado graficamente na Fig. 1.28.

Embora uma resina fenol-formaldeído isolada seja bastante resistente, ela é suscetível à ruptura por cisalhamento; a incorporação de uma segunda fase produz uma resistência adicional à deformação. No outro extremo da faixa de composições, a resistência da serragem isolada é nula; não existem forças que mantenham as partículas de celulose na forma de uma massa coerente. A resina adicionada age como um cimento, unindo essas partículas. A resistência máxima é conseguida em uma composição intermediária, na qual cada fase age como reforçadora da outra.



1.28 - Resistência de misturas (serragem de madeira como reforçador de uma resina fenol-formaldeído)

### 1.8.3 Polimorfismo (alotropia)

Como já foi visto anteriormente, moléculas podem ter estruturas diferentes, ainda que a composição seja a mesma. Denominamos estas moléculas de *isômeras*.

Uma situação análoga, polimorfismo, pode ser encontrada nos cristais e, de fato, isto se tornará extremamente importante para nós. Dois cristais são ditos polimorfos quando, embora tenham estruturas cristalinas diferentes, apresentam a mesma composição.

O principal exemplo de polimorfismo nos metais é o do ferro, já que a possibilidade de se fazer tratamentos térmicos no aço e, modificar assim suas propriedades, advém do fato de que o ferro, durante o aquecimento, passa de ccc para cfc. Ainda mais, esta mudança se reverte conforme o ferro se resfria.

### 1.8.4 Tratamentos Térmicos

Os cristais plasticamente deformados têm mais energia que os cristais não deformados, pois estão cheios de discordâncias e outras imperfeições. Havendo oportunidade, os átomos desses cristais se reacomodarão de forma a se ter um arranjo perfeito e não deformado. Tal oportunidade ocorre quando os cristais são submetidos a temperaturas elevadas, através de um processo denominado de *recozimento*.

A maneira como os grãos cristalinos são distorcidos pela deformação plástica pode ser observada na figura 1.29 a seguir.

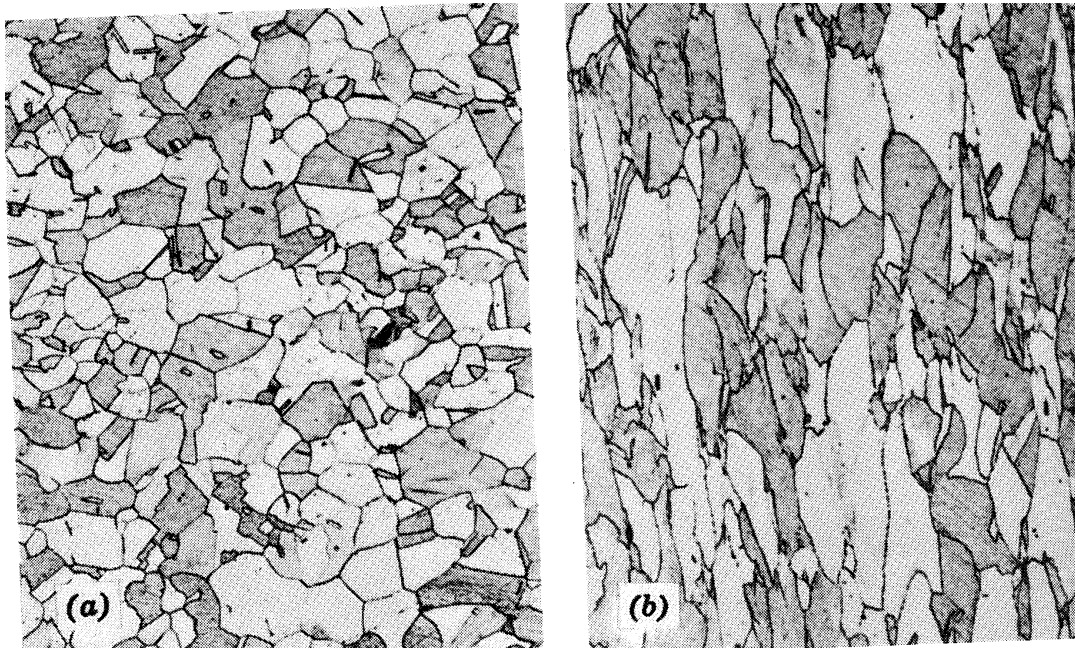


Fig. 1.29 – Alteração da estrutura de um metal policristalino resultante da deformação plástica.

A agitação térmica mais elevada do reticulado em temperaturas altas permite o rearranjo dos átomos em grãos menos deformados. Como a recrystalização forma cristais mais moles, os valores da dureza são excelentes índices de recrystalização. A Fig. 1.30 mostra a variação da dureza com o aumento da temperatura, para latões 65 Cu - 35 Zn com diferentes graus de encruamento. A temperatura na qual há uma marcada diminuição na dureza é denominada de temperatura de recrystalização. Esta temperatura também depende do tempo de aquecimento. Períodos de tempo mais longos dão aos átomos maiores oportunidades de se rearranjarem; logo, a recrystalização ocorre em temperaturas mais baixas.

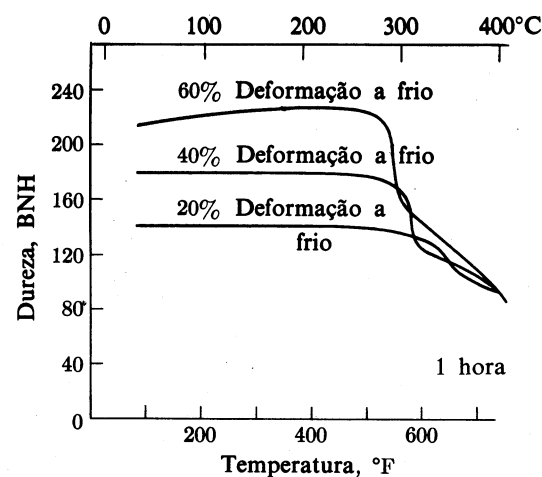


Fig. 1.30 - Amolecimento por recrystalização. O latão 65Cu-35Zn mais duro e mais encruado recrystaliza em temperaturas mais baixas.

Nas operações industriais, a distinção entre deformação a quente e a frio não está somente na temperatura, mas na relação entre a temperatura do processo e a de recrystalização. A

deformação a quente é efetuada acima da temperatura de recristalização, enquanto que a deformação a frio é realizada abaixo. Desta forma, a temperatura de deformação a frio do cobre pode ser superior à de deformação a quente do chumbo, por exemplo.

A escolha da temperatura de recristalização como o ponto de distinção entre deformação a frio e a quente é bastante lógica sob o ponto de vista das operações industriais. Abaixo da temperatura de recristalização o metal se torna mais duro e menos dútil ao ser deformado. Necessita-se de mais energia para a deformação e a probabilidade de aparecerem trincas durante o processamento é maior. Acima da temperatura de recristalização o metal se recoze ou durante o processo de deformação ou logo após este, de forma que permanece mole e relativamente dútil.

A deformação a frio permite que se use componentes menores e mais resistentes. Evidentemente, o produto não pode ser usado em temperaturas que permitam o recozimento do metal.

O trabalho a frio limita a deformação plástica que o metal pode sofrer posteriormente, durante a operação de moldagem. O metal pouco dútil e endurecido necessita de mais energia para ser trabalhado e fica mais suscetível a trincas. A figura 1.31 mostra um exemplo de um ciclo de deformação a frio e recozimento usado numa operação industrial. A perda de ductilidade durante o trabalho a frio tem um efeito secundário que é útil durante a usinagem (ajuda a operação de corte).

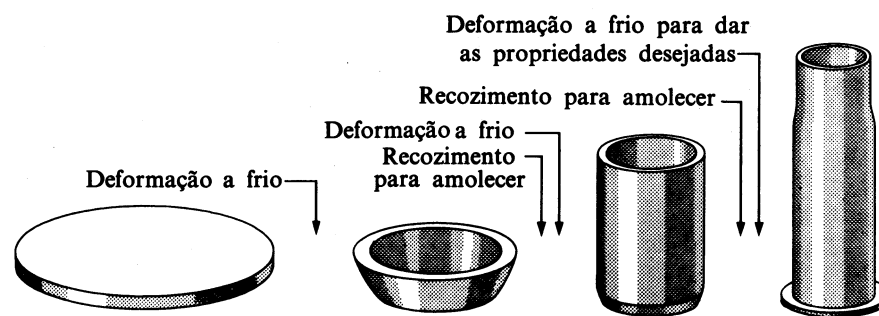


Fig. 1.31 - Ciclos de deformação a frio e recozimento (cápsula para cartuchos)

O termo *recozimento* é usado tanto para designar um tratamento de amolecimento como aquele para aumentar a tenacidade. Na tecnologia do vidro o tratamento térmico chamado recozimento é destinado a remover tensões residuais, a fim de diminuir a probabilidade de desenvolvimento de trincas no vidro frágil. No tratamento térmico para os aços, o mesmo é aquecido até o campo austenítico e, em seguida, resfriando-o lentamente (Fig. 1.32). Esse processo produz uma microestrutura muito mole.

O *recozimento subcrítico* (ou intermediário) é empregado quando se tem interesse em aliviar as tensões em um aço que foi trabalhado a frio, sem formação de austenita. Este processo envolve o aquecimento do aço a uma temperatura logo abaixo da eutetóide. Se a única finalidade for o alívio de tensões necessita-se de um pequeno período de aquecimento.



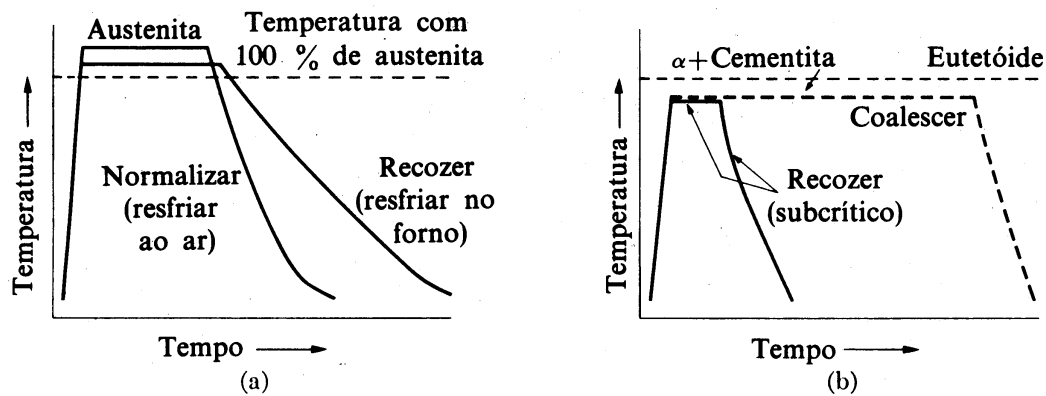


Fig. 1.32 - Tratamentos de amolecimento e enrijecimento. (a) recozimento e normalização. (b) recozimento subcrítico e coalescimento.

Já o *coalescimento* é utilizado para se atingir o máximo de ductilidade em aços ou em qualquer metal contendo duas fases, e a normalização, semelhante ao recozimento comum, é utilizada para homogeneizar o aço na faixa de temperaturas de estabilidade da austenita. A velocidade de resfriamento depende do tamanho da peça que está sendo tratada.

Em alguns casos pode ocorrer um notável aumento na dureza durante os estágios iniciais de precipitação a partir de uma solução sólida supersaturada. Esse endurecimento é comumente chamado de *envelhecimento* pois aparece com o tempo. O principal requisito que uma liga deve obedecer para ser envelhecível é que a solubilidade diminua com a temperatura, de forma a ser possível obter-se uma solução sólida supersaturada. Numerosas ligas metálicas possuem esta característica.

Um interessante exemplo da utilidade do envelhecimento é a forma pela qual é usado na construção de aviões. Os rebites de alumínio são mais fáceis de colocar e se ajustam melhor se forem moles e dúteis; entretanto, nessas condições não possuem resistência mecânica adequada. Para superar esse problema, escolhe-se uma liga de alumínio que forme solução sólida supersaturada ao ser resfriada bruscamente, mas que envelhece em temperatura ambiente. Os rebites são usados enquanto estão moles e dúteis e endurecem após terem sido fixados. Como o envelhecimento é razoavelmente rápido à temperatura ambiente, existe o problema prático de se atrasar o processo, o que normalmente é resolvido armazenando-os em geladeira.

Estudos levaram à seguinte interpretação do fenômeno de endurecimento por envelhecimento. Os átomos supersaturados tendem a se acumular ao longo de planos cristalinos específicos, na forma indicada na Fig. 1.33. A concentração de átomos de cobre (soluto) nessas posições diminui a concentração nos outros pontos, produzindo uma supersaturação menor e, portanto, uma estrutura cristalina mais estável. Nesse estágio, os átomos de cobre ainda não formaram uma fase completamente distinta; existe uma coerência dos espaçamento atômicos ao longo da fronteira entre as duas estruturas. O movimento das discordâncias ao longo destas regiões de distorção fica dificultado e, conseqüentemente, o metal se torna mais duro e mais resistente à deformação.

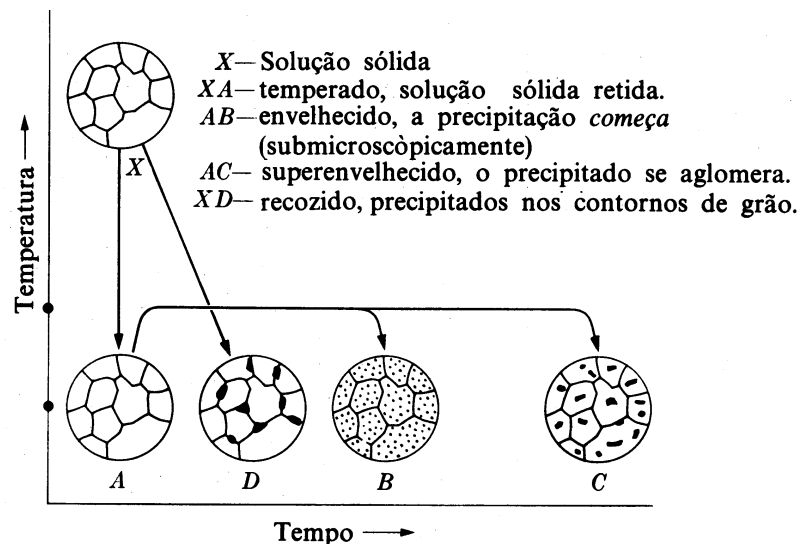


Fig. 1.33 - Tratamento de envelhecimento (liga 95,5% Al - 4,5% Cu)

A continuação do processo de segregação, por longos períodos de tempo, leva a uma precipitação verdadeira; o metal amolece e diz-se que foi *superenvelhecido*. Por exemplo, o desenvolvimento de uma estrutura verdadeiramente estável em uma liga com 96% de alumínio e 4% de cobre em temperatura ambiente, envolve a separação quase completa do cobre, o qual originariamente se encontrava dissolvido no alumínio cfc. Praticamente todos os átomos de cobre formam  $\text{CuAl}_2$ . Como o crescimento da segunda fase implica no aparecimento de áreas relativamente grandes, que não conseguem resistir ao escorregamento, observa-se um amolecimento marcante.

### 1.8 - Problemas Típicos

- 1) Um fio de cobre tem uma tensão de ruptura de  $300 \text{ N/mm}^2$  e apresenta uma estricção de 77%. Calcular a tensão verdadeira de ruptura.
- 2) Uma liga de cobre possui um módulo de elasticidade de  $110000 \text{ N/mm}^2$ , um limite de escoamento de  $336 \text{ N/mm}^2$  e um limite de resistência de  $357 \text{ N/mm}^2$ . Qual a tensão necessária para aumentar de 0,15 cm o comprimento de uma barra de 3 metros desta liga? Que diâmetro deve ter uma barra desta liga para que a mesma suporte uma carga de 23000 N sem deformação permanente?
- 3) Uma carga de 4500 N, quando aplicada a um fio de aço com 240 cm de comprimento e  $0,16 \text{ cm}^2$  de área de seção transversal, provoca uma deformação elástica de 0,3 cm. Calcule: a tensão, a deformação, o valor do módulo de Young.
- 4) Uma liga de alumínio possui um módulo de elasticidade de  $70000 \text{ N/mm}^2$  e um limite de escoamento de  $280 \text{ N/mm}^2$ . Qual a carga máxima que pode ser suportada por um fio de 0,275 de diâmetro sem deformação permanente? Admitindo-se que um fio deste diâmetro e de 30 m de comprimento esteja sendo solicitado por uma carga de 440 N, qual o aumento total no comprimento do mesmo?
- 5) Cite os principais fatores que levam à corrosão em sistemas de aterramento e sugira formas de evitá-la.

# CAPÍTULO II

## MATERIAIS MAGNÉTICOS

### 2.1 - Introdução

A habilidade de certos materiais - notadamente o ferro, o níquel, o cobalto e algumas de suas ligas e compostos - de adquirir um alto e permanente momento magnético, é de grande importância para a engenharia elétrica. As aplicações de materiais magnéticos são muitas e fazem uso de quase todos os aspectos do comportamento magnético.

Existe uma variedade extremamente grande de diferentes tipos de materiais magnéticos e é importante saber primeiro porque estes e somente estes materiais possuem propriedades magnéticas e em seguida saber o que leva a comportamento diferentes nestes materiais, por exemplo porque um material carrega um momento permanente enquanto outros não.

As pesquisas por materiais magnéticos com melhores características são motivadas pela possibilidade de redução nas dimensões dos equipamentos e diminuição de limitações no desempenho devido à saturação e perdas.

### 2.2 - Revisão de Conceitos

#### *2.2.1 - Comportamento Magnético*

Alguns materiais, tal como o ferro, são marcadamente magnéticos, enquanto que outros não o são. De fato, uma das técnicas mais simples de separação de materiais ferrosos dos não-ferrosos é através da comparação de suas propriedades magnéticas.

A importância histórica e comercial do ferro como um material magnético deu origem ao termo *ferromagnetismo*, para englobar as intensas propriedades magnéticas possuídas pelo grupo do ferro na tabela periódica.

O ferromagnetismo é resultado da estrutura eletrônica dos átomos. Relembremos que no máximo dois elétrons podem ocupar cada um dos níveis de energia de um átomo isolado e que isso também é válido para os átomos de uma estrutura cristalina. Esses dois elétrons têm spins opostos e, como cada elétron, quando girando em torno de si mesmo, é equivalente a uma carga se movendo, cada elétron atua como um magneto extremamente pequeno, com os correspondentes pólos norte e sul.

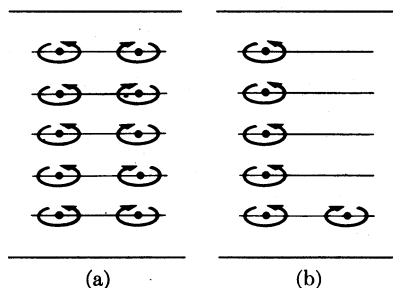


Fig. 2.1 Magnetismo atômico. (a) Diamagnético. (b) Magnético.

De uma maneira geral, em um elemento o número de elétrons que tem um certo spin é igual ao número de elétrons que tem o spin oposto e o efeito global é uma estrutura magneticamente insensível. Entretanto, em um elemento com subníveis internos não totalmente preenchidos, o número de elétrons com spin num sentido é diferente do número de elétrons com spin contrário (Fig 2.1). Dessa forma esses elementos têm um momento magnético global não-nulo.

Como os átomos ferromagnéticos adjacentes se alinham mutuamente, de forma a terem suas orientações numa mesma direção, um cristal ou grão contém domínios magnéticos. Os domínios geralmente não têm dimensões superiores a 0.05 mm.

Em um material magnético desmagnetizado os domínios estão orientados ao acaso, de forma que seus efeitos se cancelam. Entretanto, se os domínios são alinhados por um campo magnético, o material se torna magnético (Fig 2.2). O alinhamento de todos os domínios em uma direção origina um efeito aditivo, o qual pode ou não permanecer após a retirada do campo externo

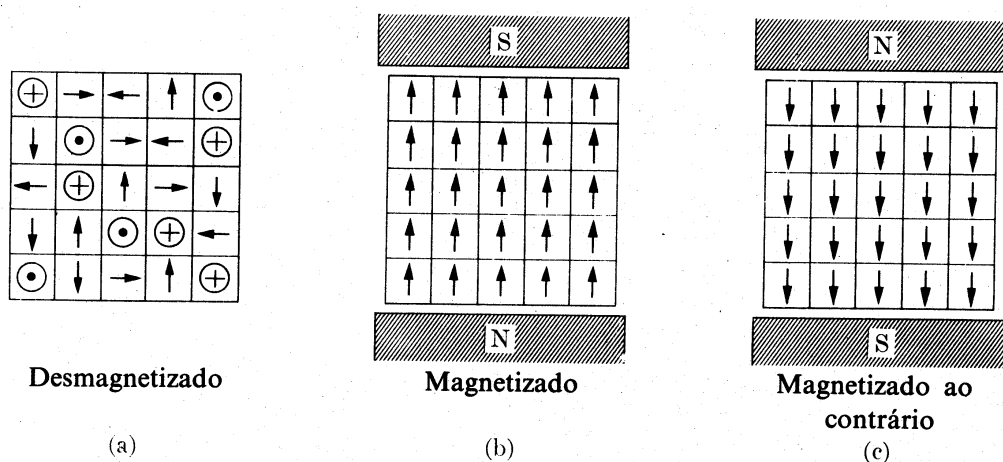


Fig. 2.2 - Alinhamento de domínios. Um campo magnético externo pode alinhar os domínios ferromagnéticos. Quando os domínios estão alinhados, o material está magnetizado.

Para designar quando o alinhamento magnético é permanentemente retido ou não, são usados respectivamente os termos “material magnético duro” e “material magnético mole”; como os materiais mecanicamente duros tendem a ser magneticamente duros, esses termos são adequados. As tensões residuais de um material endurecido evitam a redistribuição ao acaso dos domínios. Um material normalmente perde essa ordenação dos domínios magnéticos quando é recozido, já que a atividade térmica provoca a desorientação dos domínios.

### 2.2.2- Curvas de Magnetização e Histerese

O processo de magnetização de um material ferromagnético sob a influência de um campo externo se reduz a:

- crescimento daqueles domínios cujos momentos magnéticos formam o menor ângulo com a direção do campo,
- rotação dos momentos magnéticos na direção do campo externo.

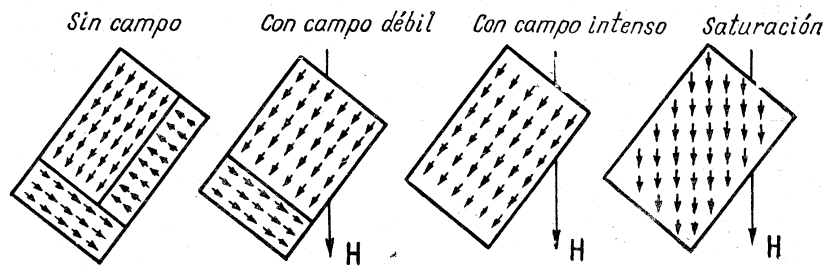


Fig. 2.3 - Esquema de orientação dos spins nos domínios.

A saturação magnética se alcança quando acaba o processo de crescimento dos domínios e os momentos magnéticos de todas as regiões imantadas espontaneamente estão na mesma direção do campo.

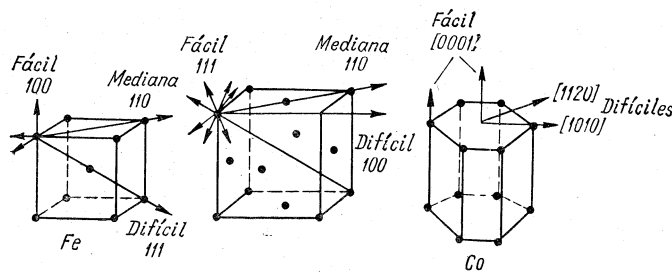


Fig. 2.4 - Direções de magnetização fácil, média e difícil para os cristais de ferro, níquel e cobalto.

Os monocristais das substâncias ferromagnéticas se caracterizam pela sua anisotropia magnética, ou seja a facilidade de magnetização dos cristais variam de acordo com a direção do campo aplicado, como se pode ver na Fig. 2.4 para os cristais de ferro, níquel e cobalto. O processo de magnetização de um material ferromagnético é caracterizado por suas curvas de magnetização  $B \times H$ .

Lembrando que a densidade de fluxo magnético em um ponto de um campo devido à circulação de corrente em um condutor, depende da intensidade da corrente, do comprimento do condutor, da posição deste em relação ao ponto e de um fator de proporcionalidade  $\mu$ , que é a permeabilidade do meio considerado, a equação abaixo:

$$B = \mu \cdot H \quad (2.1)$$

fornece a relação entre a densidade de fluxo magnético  $B$  (unidade: Tesla) e a força magnetizante  $H$  (unidade: A/m). Para o vácuo a permeabilidade magnética  $\mu = \mu_0$  é uma constante com o valor  $4\pi \cdot 10^{-7}$  no sistema internacional; para o ar,  $\mu$  é um pouco maior que  $\mu_0$  podendo ser admitida igual a  $\mu_0$  nas aplicações práticas.

No entanto, a permeabilidade magnética  $\mu$  (unidade: H/m) não é em geral uma constante, ou seja,  $B$  não é uma função linear de  $H$  para algumas substâncias. Portanto, mais importante que o valor da permeabilidade, a representação usual da relação dada pela Eq. 2.1 é através de curvas  $B \times H$ .

Estas curvas variam consideravelmente de um material para outro e para o mesmo material são fortemente influenciadas pelos tratamentos térmicos e mecânicos.

Sua obtenção é feita da seguinte forma: Para um material inicialmente não magnetizado, ao aumentar progressivamente a força magnetizante de 0 até  $H_{max}$  na Fig. 2.5, obtém-se o ramo  $0a'$ . Reduzindo-se em seguida  $H$  de  $H_{max}$  até zero, tem-se o ramo  $a'b'$ . Quando  $H = 0$ ,  $B = 0b'$ . Para reduzir  $B$  a zero, é necessário aumentar  $H$  em sentido contrário até  $0c'$ , obtendo-se o ramo  $b'c'$  da curva.

Continuando-se a fazer variar  $H$  até  $-H_{max}$  tem-se o ramo  $c'd'$ . Fazendo-se variar  $H$  de  $-H_{max}$  até zero, em seguida até  $H_{max}$  e continuando deste modo, obtém-se sucessivamente os pontos  $e' - f' - a'' - b'' - c'' - d'' - e'' - f'' - \dots$

$0a'$  é a curva de magnetização crescente.

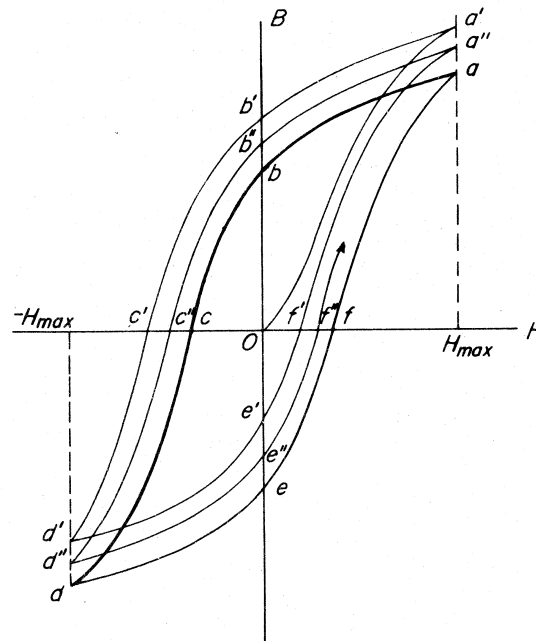


Fig. 2.5 - Curva da Magnetização

A densidade de fluxo  $B = 0b'$  que permanece quando se anula a força magnetizante  $H$  é o magnetismo remanescente. Repetindo-se a operação acima descrita (variação de  $H$  entre  $H_{max}$  e  $-H_{max}$ ) um número suficiente de vezes, obtém-se uma curva fechada que se repete; o material terá então atingido o estado de magnetização cíclica simétrica (curva  $abcdefg$  na Fig. 2.5). A esta curva fechada que se obtém quando o material se acha em estado de magnetização cíclica dá-se o nome de laço de histerese.

Para um mesmo exemplar de material ferromagnético submetido a ensaio o laço de histerese depende do valor máximo que se dá à força magnetizante  $H$ ; a Fig. 2.6 apresenta vários laços de histerese correspondentes a valores máximos diversos de  $H$ .

Em qualquer dos laços os valores de  $B$  são maiores no ramo descendente que no ascendente; a substância ferromagnética tende a conservar o seu estado de magnetização, isto é, tende a se opor às variações de fluxo. Essa propriedade tem o nome de histerese.

A curva na Fig. 2.6, que se obtém ligando os vértices dos laços de histerese simétricos, correspondentes a uma determinada substância ferromagnética é a curva normal de magnetização; e é geralmente empregada no cálculo de aparelhos e máquinas elétricas.

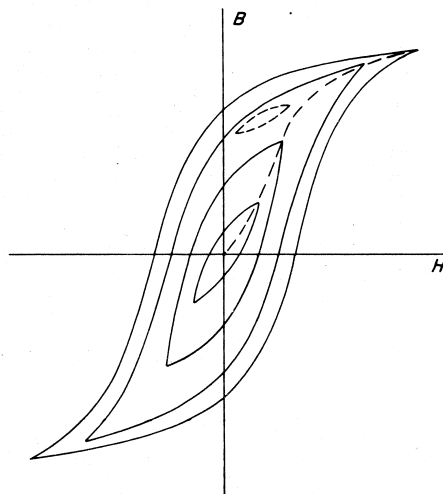


Fig. 2.6 - Laços de Histerese em Função de  $H_{\max}$

Observações sobre as curvas B-H:

- Quando o material se acha em estado de magnetização cíclica, o magnetismo remanescente (densidade de fluxo que permanece quando a força magnetizante  $H$  é removida) tem o nome de densidade residual de fluxo ou indução residual; e o valor  $0c'$  da força magnetizante, necessário para anular densidade de fluxo, é a força coercitiva;
- Ao aumentar progressivamente a força magnetizante  $H$ , aumenta a densidade de fluxo  $B$ , cuja expressão é

$$B = \beta + \mu_0 \cdot H \quad (2.2)$$

Para valores relativamente fracos de  $H$ , a densidade intrínseca de fluxo  $\beta$  aumenta muito mais que o termo  $\mu_0 \cdot H$ ; a indução  $B$  é então praticamente igual a  $\beta$ . Ao se elevar a intensidade da força magnetizante  $\beta$  tende para um limite, que define a saturação magnética; atingida esta, ao aumentar  $H$ ,  $\beta$  permanece constante, enquanto que  $\mu_0 \cdot H$  continua a aumentar segundo uma lei linear. Este comportamento pode ser observado nas curvas da Fig. 2.7.

- Para um material inicialmente não magnetizado  $\mu$  apresenta um certo valor, que cresce rapidamente até um máximo para depois decrescer (para o ferro na Fig. 2.8).
- Envelhecimento - as propriedades das substâncias ferromagnéticas em geral variam com o tempo. A densidade de fluxo  $B$  que se pode obter com um determinado valor da força magnetizante  $H$  tende a diminuir com o tempo ( $\mu$  tende a diminuir); as perdas de histerese (ver item 2.2.4) tendem a aumentar. As ligas de ferro-silício utilizadas na construção de aparelhos elétricos são muito menos sujeitas ao envelhecimento que o ferro e o aço.
- Magnetostricção - nos materiais ferromagnéticos observa-se o fenômeno da magnetostricção, que consiste na variação de volume conseqüente à variação do estado de magnetização. Este fenômeno causa a vibração dos núcleos ferromagnéticos de aparelhos de corrente alternada, com o dobro da frequência da corrente. A magnetostricção é utilizada na produção e na detecção de ultrassons.

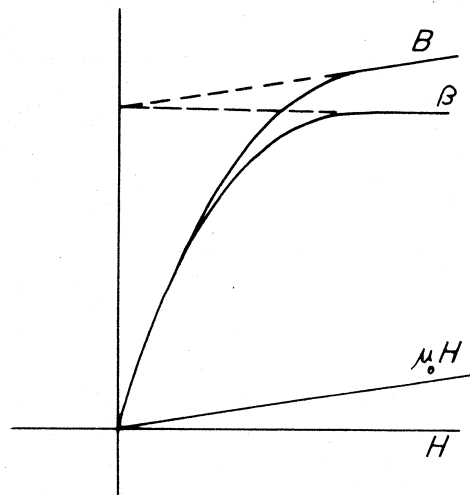
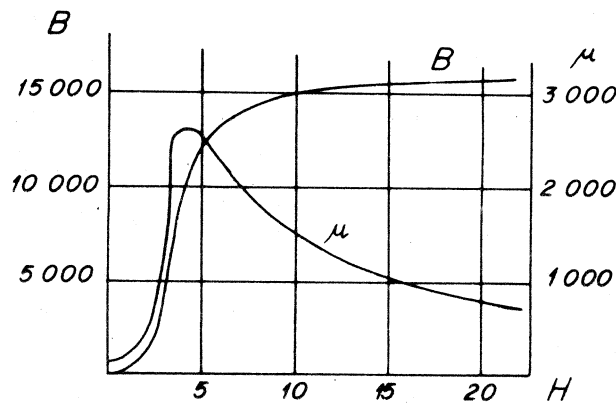


Fig. 2.7 - Composição da Eq. 2.2

Fig. 2.8 - Variação de  $\mu$ 

- A temperatura também influencia nas características dos materiais ferromagnéticos. Isto pode ser compreendido se lembrarmos que um aumento de temperatura num sólido resulta em um aumento na magnitude das vibrações térmicas dos átomos e a livre rotação dos momentos magnéticos torna seu alinhamento aleatório. A magnetização de saturação é máxima a 0 K, diminui gradualmente com o aumento de temperatura até cair abruptamente a zero na chamada “temperatura de Curie” ou “ponto de Curie”. Vejamos o valor do ponto de Curie de algumas substâncias: ferro - 775° C; níquel - 360° C; cobalto - 1110° C. A fig. 2.9 mostra a curva de saturação para o ferro puro e o  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  em função da temperatura.

- Em conformidade com o fim a que se destinam, os diferentes materiais deverão possuir em maior ou menor escala determinadas propriedades. Vejamos alguns exemplos:

- para a fabricação de ímãs permanentes interessam materiais com grande remanência e alta força coercitiva;

- para algumas aplicações, normalmente blindagens para desviar campos muito fracos, interessa utilizar materiais com uma grande permeabilidade inicial;



- para a construção de máquinas interessa, geralmente, que a intensidade do campo de saturação seja tão elevada quanto possível e esta qualidade associada a uma resistividade também o mais elevada possível para que as correntes induzidas no seio do material, nas peças que fazem parte dos circuitos magnéticos, sejam mínimas;
- para a construção de eletroímãs, isto é, quando queremos exercer ações magnéticas sob o comando de correntes elétricas, interessa usar materiais de pequena remanência e pequena força coercitiva;
- nas peças sujeitas a magnetização alternada, convém que o ciclo histerético do seu material seja de pequena área porque, como adiante se verá, as perdas por histerese são proporcionais à área do ciclo, por unidade de volume do material.

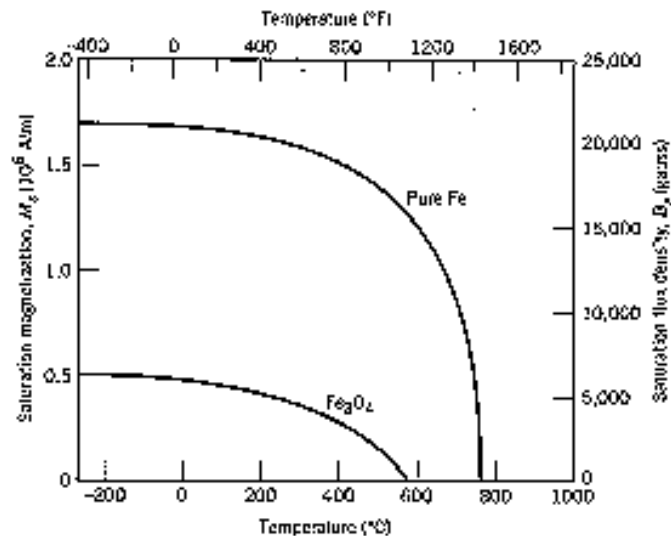


Figura 2.9 – Saturação Magnética em Função da Temperatura

### 2.2.3- Classificação dos Materiais Quanto à Permeabilidade

Os diferentes meios são caracterizados, do ponto de vista magnético, pela sua permeabilidade magnética ( $\mu$ ).

É costume considerar uma permeabilidade absoluta e uma relativa, sendo esta o quociente daquela pela permeabilidade do vácuo ou do ar:

$$\mu_{\text{abs}} = \mu_{\text{rel}} \times \mu_0 \quad (2.3)$$

De acordo com sua permeabilidade, podemos distinguir três tipos de meios: ferromagnéticos, paramagnéticos e diamagnéticos.

Estes dois últimos distinguem-se do primeiro por um comportamento inteiramente diferente, motivo pelo qual recebem, no seu conjunto, a designação de materiais não ferromagnéticos. Nos meios não ferromagnéticos, a permeabilidade relativa é muito aproximadamente igual à unidade, podendo ser superior ou inferior a esta; para cada caso, recebe as designações respectivas de paramagnético e diamagnético. Entretanto e como já se disse, a permeabilidade destes meios é muito próxima da unidade em ambos os casos. Por exemplo, a permeabilidade da platina, que é uma substância muito paramagnética, é de 1.00036 e a do bismuto, substância muito diamagnética, é 0.99983. A Fig. 2.10 ilustra esquematicamente a dependência  $B \times H$  para materiais com comportamento magnético diferente.

As substâncias paramagnéticas mais usadas em eletrotecnia são as seguintes:

- metais: platina, potássio, sódio, alumínio, cromo, manganês, etc;
- ligas: contendo cromo, manganês, vanádio ou cobre;
- gases: oxigênio, ozônio, óxido azótico, etc.

As substâncias diamagnéticas também mais empregadas são:

- metais: ouro, prata, mercúrio, cobre, chumbo, etc.
- todos os metalóides, à exceção do oxigênio;
- quase todas as substâncias orgânicas.

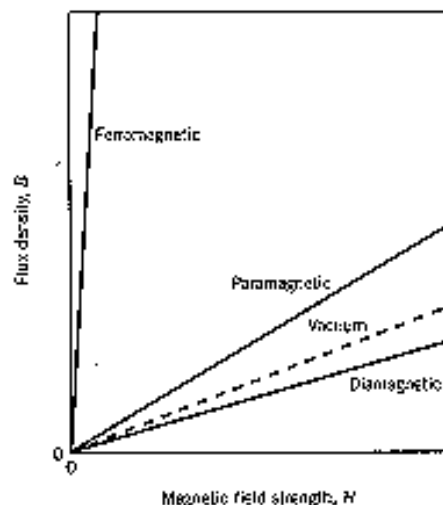


Fig 2.10 – Representação BxH para materiais diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos.

#### 2.2.4 - Perdas por Histerese e Correntes Parasitas

Quando uma substância ferromagnética é sujeita a uma magnetização alternada há uma perda de energia que se transforma em calor e que é, por unidade de volume, proporcional à área do ciclo histerético cada vez que este é percorrido.

A potência perdida será proporcional à frequência da corrente magnetizante. Por outro lado, a área do ciclo é aproximadamente proporcional ao valor máximo do campo magnético atingido ( $B_m$ ) elevado a uma potência que depende do tipo de material.

Para os materiais atualmente usados a expressão das perdas por histerese será::

$$P_h = K' \cdot f \cdot B_m^2 \quad (2.4)$$

Sendo que a constante  $K'$  depende essencialmente da qualidade do ferro.

À circulação de corrente alternada em enrolamentos cujos núcleos são de material metálico, correspondem correntes circulantes na própria massa metálica, conseqüentes a forças eletromotrizes induzidas nessa mesma massa. A essas correntes correspondem perdas de acordo com a lei de Joule. A fim de reduzi-las, não se empregam núcleos maciços e sim laminados nos aparelhos de corrente alternada. As chapas laminadas são dispostas de modo a reduzir as forças eletromotrizes induzidas e a intensidade das correntes.

Em um certo volume de material metálico situado em um campo magnético alternado e formado de chapas laminadas, tem-se que:

- a força eletromotriz induzida na chapa (de valor instantâneo  $e = -d\phi/dt$ , valor médio quadrático  $E$ ) é proporcional à espessura  $d$  da chapa, ao valor máximo  $\phi_m$  do fluxo e à frequência  $f$ ;
- a perda por efeito Joule ( $I^2R$ ) nas chapas é proporcional ao quadrado da espessura, ao quadrado da densidade máxima de fluxo e ao quadrado da frequência;
- a perda total é proporcional ao volume do conjunto de chapas,  $V$ .

Tem-se então:

$$P_F = Kd^2 \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot V \quad (2.5)$$

O valor de  $K$  sendo determinável experimentalmente, dependendo evidentemente da resistividade do material.

As considerações acima apresentadas aplicam-se a núcleos formados de chapas delgadas e não a núcleos maciços, nos quais as correntes de Foucault podem distorcer fortemente o fluxo magnético.

### **2.3 - Núcleos Magnéticos Laminados ou Compactados**

Como mencionado anteriormente, nos materiais magnéticos ocorre perda de energia cada vez que o material é submetido a um ciclo de histerese. A perda é separada em perda por correntes de Foucault e perda por histerese; a primeira componente é provocada pela perda  $I^2R$  de correntes que circulam no material, tendendo a se opor à variação da indução magnética; a segunda componente corresponde à energia despendida em orientar os domínios magnéticos do material na direção do campo.

As perdas dependem da metalurgia do material, particularmente da percentagem de silício, da frequência, da espessura do material em um plano normal ao campo, e da indução magnética máxima.

A idéia é construir o núcleo de transformadores e máquinas rotativas de um material cujas moléculas tenham a maior facilidade possível em reverter sua posição quando o campo magnético reverte sua posição. As perdas por histerese são minimizadas através de tratamento térmico apropriado nas chapas de ferro-silício. As chapas são assim construídas de maneira a terem propriedades magnéticas melhores segundo uma direção preferida. Sua permeabilidade magnética nesta direção pode ser cerca de duas vezes maior que nas chapas de tipo clássico, sendo as perdas no ferro reduzidas. Tais chapas são do tipo grão “orientado”. A estrutura cristalina dessas chapas é orientada de modo que a direção de mais fácil magnetização seja sensivelmente paralela à direção de laminação. Para obter chapas de cristais orientados a mesma é submetida, quando à temperatura de recozimento, a um campo magnético que tem a virtude de orientar os pequenos cristais que a constituem. Este tratamento é normalmente aplicado em chapas com percentagem de silício superior a 3%, mas não muito superior, visto esta técnica dispensar o emprego de elevadas percentagens por chegar, por outra via, aos mesmos ou melhores resultados.

Vejamos alguns valores de perdas, para efeito de comparação:

- chapas de cristais não orientados, de 0,18 mm e 2,7% de silício: perdas a 400 Hz; 1,3T = 7,5W/kg;
- chapas de cristais orientados, de 0,1 mm e 3,1% de silício: perdas a 400 Hz; 1,3T = 2W/kg;

As chapas sem silício ou com pequenas percentagens de silício, laminadas a frio, podem ser fornecidas apenas semi-recozidas, com a vantagem de permitirem cortes mais perfeitos e com maior duração da respectiva ferramenta. Depois de feitos os recortes, torna-se necessário dar às chapas um recozimento completo, para retirar do material as tensões resultantes da operação de laminação que sofreu, bem como das operações de recorte, para desenvolver uma estrutura de grão maior e mais uniforme e, conseqüentemente, alcançar as melhores propriedades magnéticas.

Cerca de 25% da energia elétrica gasta no Brasil é em motores elétricos industriais. Em 1989 o PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica) realizou um projeto de avaliação do desempenho dos motores elétricos trifásicos e concluiu que os motores apresentam elevadas perdas em vazio. Tais perdas correspondem em média a 35% em relação à perda total média no motor. Nos Estados Unidos este percentual varia de 15 a 20%.

Discute-se que as elevadas perdas em vazio dos motores nacionais são provocadas pelo uso de chapas não qualificadas metalurgicamente, pelo processamento mecânico e térmico inadequado na operação de montagem ou em decorrência do projeto elétrico do motor. Pesquisas demonstram que o tratamento térmico de descarbonetação, crescimento de grão e alívio de tensões em materiais ferromagnéticos reduz de forma significativa as perdas em vazio dos motores elétricos. Os materiais ferromagnéticos nacionais após tratamento térmico apresentam perdas eletromagnéticas e características metalúrgicas compatíveis com os materiais utilizados nos motores elétricos importados.

As correntes de Foucault por sua vez são minimizadas construindo os núcleos com chapas finas e isolando-as, aumentando a resistência no caminho das correntes e portanto, reduzindo sua magnitude e conseqüentemente as perdas. Se as lâminas não forem colocadas apropriadamente elas tenderão a vibrar, contribuindo também para os ruídos do transformador ou motor. A espessura das chapas deverá ser tanto menor quanto maior for a frequência da variação do fluxo ou, o que é o mesmo, quanto maior for a frequência da corrente criadora deste fluxo. A espessura atualmente mais empregada para as chapas magnéticas é de 0,35 mm, empregando-se, no entanto, chapas de até 0,6 mm.

O isolamento entre as chapas pode ser feito com papel, verniz, ou por oxidação. No caso do papel é utilizado papel de seda, muito fino mas bastante resistente. As espessuras comuns são da ordem 0.025 a 0.04 mm. Quando o verniz é utilizado o mesmo pode ser aplicado através de máquinas especiais que permitem uma camada de espessura regular entre 0.004 a 0.01 mm, dependendo da viscosidade do verniz aplicado. Uma terceira possibilidade é a utilização de uma camada de óxido que serve de isolante entre as chapas. Normalmente esta opção é empregada apenas em transformadores pequenos, devido à fragilidade da camada de óxido. A camada pode se formar naturalmente ou a oxidação pode ser obtida por processos químicos, molhando as lâminas com um composto ácido que ataque o metal.

Já a adição de silício ao ferro permite além de aumentar a resistividade, reduzindo assim as perdas por correntes de Foucault, redução das perdas por histerese e do envelhecimento (aumento das perdas com o tempo). Maiores detalhes serão vistos na próxima seção.

Em alguns casos, ao invés de serem montados com chapas, às quais nem sempre podem ser dadas a configuração ideal, devido à própria limitação mecânica de corte e a problemas de montagem, os núcleos compactados são fabricados com pós metálicos e aditivos colocados em moldes adequados, que lhe dão a necessária configuração.

Esses pós metálicos apresentam características de resistividade bastante elevada, o que reduz ao nível necessário as correntes parasitas. São, em outras palavras, praticamente isolantes elétricos com características ferromagnéticas.

Os núcleos compactados, portanto, não exigem a prévia laminação do ferro, o corte da chapa em perfis e os diversos processos para corrigir problemas daí resultantes, como, por

exemplo, o recozimento. Existe, entretanto, ainda hoje, uma limitação técnica de fabricação de tais núcleos, aliada a uma limitação econômica, devido ao processo que precisa ser colocado em prática durante sua fabricação.

O núcleo compactado, também chamado de ferrite, é conseqüente da compactação de pós, de composição previamente estabelecida. Esta compactação é realizada através de um aquecimento a temperaturas de aproximadamente  $1/2$  e  $2/3$  da temperatura de fusão, situação em que os grãos de material adquirem o estado plástico em sua capa externa.

Aplicando-se, nessas condições, uma pressão adequada sobre o pó, e deixando-se esfriar o corpo considerado, obteremos uma “colagem” entre os grãos do pó, que vão conferir ao corpo a necessária resistência mecânica. Observe que os pós, sem essa compactação, não têm forma própria, não podendo, portanto, serem usados como núcleo, destinado a receber ainda enrolamentos em torno dele.

Existe, porém, um problema de fabricação. A compactação referida, função de temperatura e pressão, se reduz com aumento de profundidade. Se esta for grande, os pós não são suficientemente compactados, pois, tanto pressão quanto temperatura são insuficientes para obtê-la. Para eliminar esse problema, teriam de ser adotados processos de fabricação especiais, de elevadíssimas pressões e de aquecimento, o que encareceria o processo. Por essas razões, a técnica de fabricação de núcleos de ferrite se aplica somente a peças de pequeno e médio volume. Não resta dúvida, porém, que, sob o ponto de vista técnico, é um processo em franco desenvolvimento, devendo substituir gradativamente o dos núcleos laminados, devido aos maiores recursos que oferece.

## **2.4 - Materiais Magnéticos**

### *2.4.1 - Introdução*

Existem, fundamentalmente, duas razões pelas quais se recorre a materiais para aproveitamento das suas propriedades magnéticas na eletrotecnia.

A primeira é a permeabilidade elevada dos materiais ferromagnéticos, que permite a realização de circuitos magnéticos de baixa relutância nos quais se pode estabelecer um fluxo apreciável à custa de uma força magnetomotriz relativamente baixa.

A segunda é a remanência, ou seja, a memória de acontecimentos ocorridos, conseqüente do fenômeno da histerese magnética.

Os elementos ferromagnéticos são o ferro, o níquel e o cobalto, que industrialmente nunca são utilizados em seu estado puro, e sim sob a forma de ligas. Destas existem tipos com propriedades muito diferentes, e que determinam o seu emprego na indústria. Tais propriedades dependem não só da constituição das ligas como dos tratamentos térmicos a que são submetidas. Nos meios ferromagnéticos, o valor da permeabilidade relativa pode tomar valores muito diferentes da unidade e, além disso, é variável com o valor do campo magnético a que o material está sujeito.

Na Fig. 2.11 são apresentadas curvas típicas de magnetização dos elementos ferromagnéticos e de algumas de suas ligas. De modo geral as ligas ferromagnéticas podem ser classificadas em:

- ligas de ferro-silício (baixas perdas, alta permeabilidade);
- ligas para ímãs permanentes (força coercitiva elevada);

- ligas para aplicações especiais.

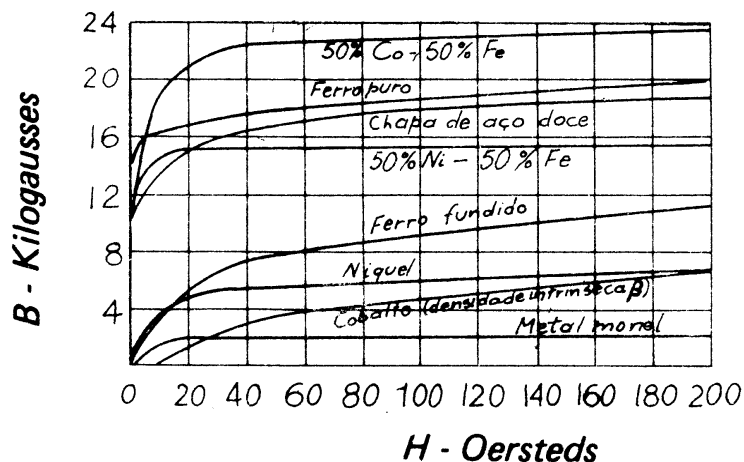


Fig. 2.11 - Curva de magnetização de diversos materiais ferromagnéticos

Pode-se observar que a liga 50% Co - 50% Fe apresenta permeabilidade magnética mais elevada que qualquer dos dois metais puros que a constituem. A liga 50% Ni - 50% Fe permite obter uma densidade de fluxo  $B$  praticamente constante para valores de força magnetizante  $H$  superiores a 20 Oersteds. Propriedade semelhante apresenta o metal monel (aproximadamente 67% Ni, 28% Cu e 5% de outros metais, inclusive Fe, Mn, Si).

De todos os elementos ferromagnéticos, o mais importante e mais largamente empregado é o ferro, constituinte essencial de todos os circuitos magnéticos das máquinas elétricas (sob a forma de ligas de ferro-silício) e de todas as peças estruturais das mesmas (aço fundido ou laminado, ferro fundido).

O níquel e o cobalto têm seu maior emprego como constituintes auxiliares de ligas a base de ferro.

Vários elementos não ferromagnéticos são utilizados para melhorar as qualidades das ligas de ferro (alumínio, arsênico, cério, cromo, molibdênio, silício, tório, titânio, tungstênio).

O ferro é sujeito ao envelhecimento, do qual são praticamente isentas as ligas que contém 1,5% de silício ou mais.

#### 2.4.2 - Ferro

O ferro puro é um material ferromagnético de boa permeabilidade, ciclo histerético estreito e baixa resistividade.

Tais propriedades conferem-lhe boas características para a constituição de circuitos magnéticos, apenas com o inconveniente de permitirem elevadas correntes de Foucault quando em regime de magnetização variável, portanto, perdas de um certo modo elevadas nestas circunstâncias, particularmente nas de magnetização alternada.

Existem vários processos tecnológicos para a obtenção do ferro puro, quer como material de primeira fusão, quer por afinação num forno Siemens-Martin, quer, ainda, por processo eletrolítico. Em qualquer dos casos, as propriedades magnéticas podem ser melhoradas por intermédio de um recozimento, tendo a respectiva temperatura importante influência no valor das características do material.

O ferro puro para aplicações industriais contém sempre pequenas percentagens de outros elementos: carbono, manganês, silício e, mesmo, cobre e alumínio, os quais afetam mais ou menos as suas propriedades magnéticas.

Assim, a permeabilidade é reduzida pela presença destes elementos, especialmente do carbono e, em menor medida, do cobre e do silício. No que respeita à área do ciclo histerético, o carbono alarga-a enquanto que o silício provoca uma alteração muito pequena.

Apesar das suas boas características magnéticas, o ferro puro não tem uma larga aplicação na eletrotécnica.

Os aços são definidos como ligas ferro-carbono impuras e de baixo teor de carbono. A maioria deles contém de 0,1 a 1,5% em peso, todos os aços comerciais têm também outros elementos metálicos e não-metálicos, alguns resultantes de adições intencionais e outros provenientes do minério de origem ou, ainda, absorvidos durante o processo de fabricação.

#### 2.4.3 – Diagrama de Fases do Ferro – Carbetto de Ferro ( $Fe - Fe_3C$ )

O Ferro puro, quando aquecido, experimenta duas mudanças em sua estrutura cristalina antes de se fundir. Na temperatura ambiente sua forma estável é cúbica de corpo centrada (CCC) e chamada de ferrita ou ferro  $\alpha$ . A  $912^\circ C$  a ferrita sofre uma mudança polimórfica para a estrutura cúbica de face centrada (CFC) e passa a se chamar austenita ou ferro  $\gamma$ . A austenita persiste até a temperatura de  $1394^\circ C$ , a partir da qual a estrutura volta a ser CCC e se chama  $\delta$  ferrita, a qual finalmente se funde na temperatura de  $1538^\circ C$ . Todas estas mudanças podem ser observadas no eixo vertical esquerdo na figura 2.12. O percentual de carbono no eixo da composição nesta figura vai até 6,7 % (no peso) de Carbono.

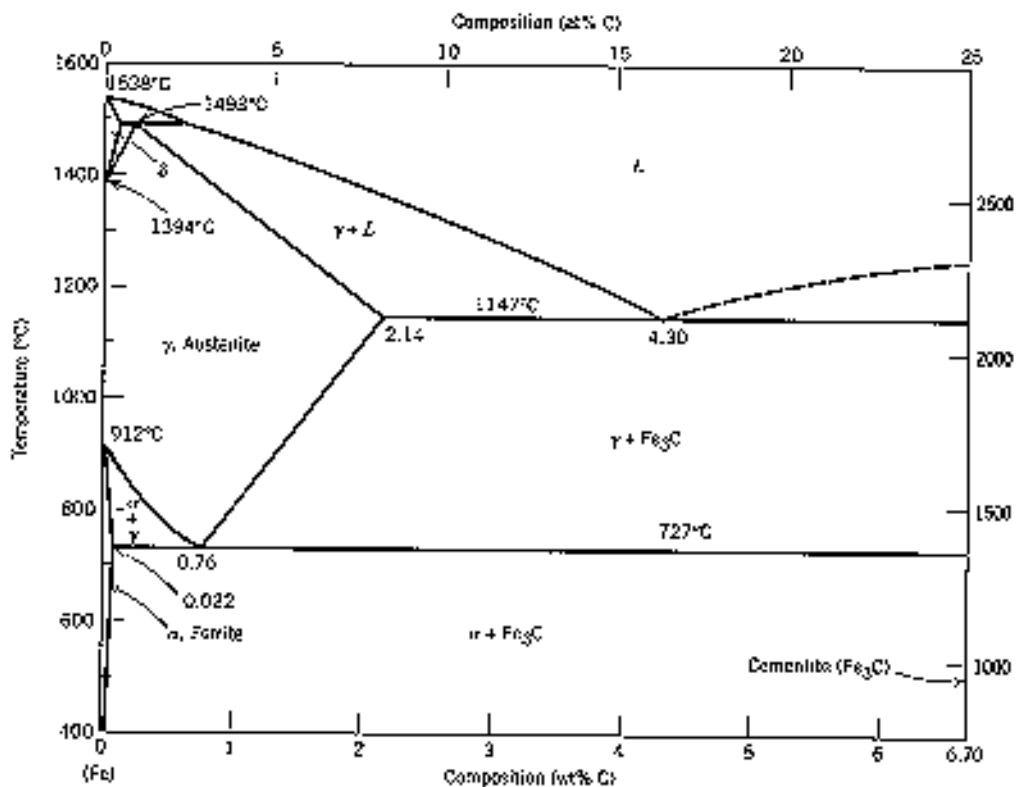


Figura 2.12 – Diagrama de fases do Fe – Fe<sub>3</sub>C

O carbono é uma impureza intersticial no ferro e forma uma solução sólida tanto com a ferrita  $\alpha$  quanto com a  $\delta$ , além de com a austenita. Na ferrita  $\alpha$ , CCC, somente pequenas quantidades de carbono são solúveis (máximo de 0.022 % em peso a 727° C). O baixo limite de solubilidade pode ser explicado pela forma e tamanho dos espaços intersticiais, que dificultam a acomodação de átomos de carbono. Mesmo em baixos percentuais a presença de carbono influencia significativamente as propriedades mecânicas da ferrita.

Já a solubilidade máxima do carbono na austenita (ou ferro  $\gamma$ ) é de 2,14 % em 1147° C. Esta solubilidade maior é explicada pelos maiores interstícios nesta faixa de temperatura, o que deve ser lembrado nos tratamentos térmicos dos aços. Vale lembrar que a austenita é não magnética.

Quando o limite de solubilidade do carbono no ferro  $\alpha$  é excedido, há a formação de cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Como indicado na figura 2.12, a cementita também irá coexistir com a fase  $\gamma$  na faixa de temperaturas entre 727 e 1147° C. Mecanicamente a cementita é muito dura e quebradiça. No diagrama de fases da figura 2.12 também pode ser observado que a mistura eutética ocorre a 1147° C para 4,3% de C. Quando esta mistura se solidifica, haverá a formação de duas fases, austenita e cementita. Subseqüente resfriamento levaria a novas mudanças de fase.

Ligas de ferro-carbono entre 0.0008 e 2.14% de peso de carbono são classificadas como aços. A microestrutura da maioria dos aços se constitui de ferro  $\alpha$  e cementita. Na prática o percentual de carbono nos aços raramente excede 1%.

#### 2.4.4 - Ligas de Ferro-Silício

Estas ligas contêm até 6,5% de silício e algumas impurezas (carbono, enxofre, fósforo, manganês) associadas ao ferro, que é o principal constituinte. Suas propriedades magnéticas e sua resistividade dependem da constituição e dos tratamentos térmicos.

A adição de silício ao ferro permite aumentar a resistividade (reduzindo as perdas pelas correntes de Foucault), reduzir as perdas de histerese e o envelhecimento.

Estas ligas são geralmente fabricadas sob a forma de tiras ou chapas. O percentual de silício depende da aplicação, já que a presença do silício tem o inconveniente de encarecer o ferro e de o tornar quebradiço, sendo este o fato que limita a percentagem de silício empregada. Nos transformadores, que são máquinas estáticas, usam-se as percentagens mais altas e nos motores e geradores, máquinas rotativas, valores mais baixos.

Com processamento adequado, na laminação e no tratamento térmico, são produzidas chapas com propriedades magnéticas melhores segundo uma direção preferida. Sua permeabilidade magnética nessa direção pode ser cerca de duas vezes maior que nas chapas de tipo clássico, e as perdas no ferro muito menores.

#### 2.4.5 - Ímãs Permanentes

Os ímãs permanentes devem apresentar um elevado magnetismo residual, o que é típico de materiais magnéticos ditos duros. O laço de histerese deve ser largo e bastante alto. Além disso, devem manter por um tempo suficientemente longo o magnetismo residual (Br), sem alterá-lo sensivelmente perante variações de temperatura e ação de forças mecânicas.

Existem atualmente diversos materiais utilizados na fabricação de ímãs permanentes. A Tabela 2.1 apresenta alguns exemplos, que incluem algumas ligas metálicas e uma ferrite.



Tabela 2.1 - Materiais Empregados na Fabricação de Ímãs Permanentes

Material	Composição aproximada	Força coerciva $H_c$	Indução residual $B_R$	Produto energético máximo $(BH)_{max}$
		Ae/m	teslas	joules/m <sup>3</sup>
Aço carbono temperado	Fe-C-Mn 98-1-1	4 200	0,8	1 200
Aço tungstênio	Fe-C-Mn-W 93-1-0,5-5	4 800	1,18	2 550
Aço cromo-tungstênio-cobalto	Fe-C-Cr-W-Co 85-1-5-5-4	9 500	1	4 000
Alnico (12% Co)	Fe-Al-Ni-Co-Cu 55-10-22-12-2	48 000	0,75	14 400
Ticonal	Fe-Ti-Co-Ni-Al-Cu 34-5-35-14-8-4	120 000	0,85	36 000
Vicalloy	Fe-V-Co 35-13-52	38 000	1,05	27 000
Ferrite de bário	6Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .BaO	135 000	0,21	8 000
Platina-cobalto	Pt-Co 77-23	330 000	0,63	72 000
Manganês-bismuto	Mn Bi	290 000	0,48	41 000
Silmanal	Ag-Mn-Al 86-9-5	44 000	0,06	800

Os núcleos de ferrite são formados sinterizando misturas de óxidos metálicos ( $XO + Fe_2O_3$ , X podendo ser qualquer dos elementos Mn, Zn, Ba, Mg, Co, Cu). Os valores característicos variam com o tratamento.

As ferrites assemelham-se a materiais cerâmicos, não sendo metálicas, apresentam resistividade muito alta (da ordem de um milhão de vezes a dos materiais metálicos). Os núcleos de ferrite são usados para altas frequências (a resistividade é de enorme importância para permitir o funcionamento com as elevadas frequências). Alguns tipos de ferrite, como as de Mn-Mg, apresentam laço de histerese quase retangular, tendo larga aplicação como memórias de computador.

#### 2.4.6 - Ligas Ferromagnéticas Diversas

As ligas de ferro-níquel apresentam larga variedade de propriedades magnéticas. Partindo do teor do níquel igual a zero, a permeabilidade aumenta ligeiramente à medida que aumenta a percentagem de níquel, para depois cair a zero (material não-magnético) quando a liga contém 30% de níquel.

Continuando a aumentar a percentagem deste metal, a permeabilidade cresce novamente até cerca de 70%, para depois tornar a cair. Algumas dessas ligas têm aplicação em telefonia e rádio.

As ligas Fe-Ni com 78,5% Ni (permalloy) desenvolvidas nos laboratórios Bell, apresentam alta permeabilidade e baixa perda de histerese com forças magnetizantes fracas.

A liga Fe-Ni com 48% de Ni (deltamax, orthonic) convenientemente tratada possui alta permeabilidade laço de histerese retangular na direção de laminação.

Ligas Fe-Ni com 40 a 55% Ni possuem permeabilidade magnética moderada, mas praticamente constante para uma larga faixa de densidade de fluxo (isoperm, conpernik).

Perminvar é o nome de uma série de ligas Co-Ni-Fe que apresentam também essa característica de permeabilidade constante.

Para a maior parte das aplicações convém que as propriedades magnéticas dos materiais variem pouco com a temperatura. Há porém casos particulares em que interessa obter, pelo contrário, a variação de uma característica magnética do material com a temperatura para efeitos de correção (shunts termomagnéticos) ou para efeitos de comando (relés termomagnéticos).

São também as ligas ferro-níquel ou ferro-cobalto que exibem estas propriedades.

## **2.5 - Problemas Típicos**

- 1) Por quê alguns materiais são magnéticos e outros não? Cite materiais magnéticos puros.
- 2) As perdas por histerese e por correntes de Foucault introduzem limitações no desempenho de equipamentos elétricos. Outros problemas são o envelhecimento do material magnético e mudanças nas propriedades magnéticas devido ao processo de fabricação. Fale sobre as formas que você conhece para minimizar cada um destes problemas, destacando suas vantagens e limitações
- 3) Explique em uma curva de histerese o que é magnetismo residual e força coercitiva. Como devem ser estes valores para materiais que se destinam a fabricação de ímas permanentes? Idem para eletroímãs.

# CAPÍTULO III

## MATERIAIS CONDUTORES

### 3.1 - Introdução

No primeiro capítulo vimos que tanto os íons quanto os elétrons podem ser responsáveis pelo processo de condução de eletricidade, que sempre envolve a noção de movimentação de cargas.

Os materiais condutores são caracterizados por diversas grandezas, dentre as quais se destacam: condutividade ou resistividade elétrica, coeficiente de temperatura, condutividade térmica, potencial de contato, comportamento mecânico, etc. Estas grandezas são importantes na escolha adequada dos materiais, uma vez que das mesmas vai depender se estes são capazes de desempenhar as funções que lhe são atribuídas. A escolha do material condutor mais adequado, nem sempre recai naquele de características elétricas mais vantajosas, mas sim, em um outro metal ou uma liga, que, apesar de eletricamente menos vantajoso, satisfaz as demais condições de utilização.

Os principais materiais de elevada condutividade elétrica são os metais nobres, acrescidos de alguns de outros grupos, e de suas ligas. Os metais de alta condutividade se empregam como condutores, enrolamentos de máquinas elétricas e transformadores, etc. Por outro lado, em determinadas aplicações, também há interesse em materiais, normalmente ligas, de alta resistência, para fins de fabricação de resistências, aparelhos de calefação, filamentos para lâmpadas incandescentes, etc.

Outros materiais que oferecem interesse especial são os supercondutores, que também serão vistos neste capítulo.

### 3.2 - Algumas características dos materiais condutores.

#### *3.2.1 - Variação da resistividade com a temperatura e a frequência*

A resistência elétrica de uma dada peça de determinado material (unidade:  $\Omega$ ) é dada pela equação (3.1) a seguir:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad (3.1)$$

onde:

$\rho$  - resistividade elétrica do material ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )

$A$  - seção transversal (em  $\text{cm}^2$ )

$l$  - comprimento do condutor (em  $\text{cm}$ )

Quando a temperatura em um material condutor é aumentada, as partículas vibram interferindo nos movimentos dos elétrons. Uma tal influência causa perdas nos deslocamentos dos elétrons e, conseqüentemente, aquecimento do corpo condutor. Traçando-se a curva

característica temperatura-resistência, indicada na Fig. 3.1, nota-se que ela não obedece em toda sua extensão a uma relação constante de ordenadas e abscissas.

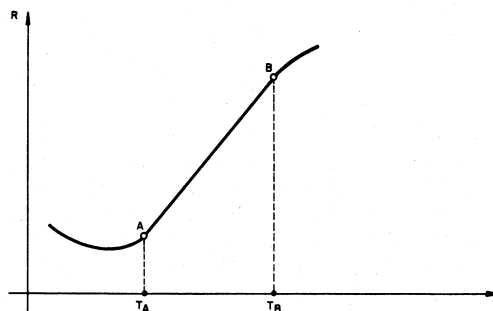


Fig. 3.1 - Representação da variação da resistência R em função da temperatura T

De interesse prático é o setor reto da característica (trecho AB), cuja inclinação é dada por:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta R}{\Delta T} \quad (3.2)$$

A relação  $\operatorname{tg} \alpha / R$  é o chamado coeficiente de temperatura da resistência e indicado por  $\alpha_{T1}$ . Normalmente a temperatura inicial, que serve de referência, é tomada como  $T_1 = 20^\circ\text{C}$ . Nesse caso:

$$R_{T2} = R_{20} [1 + \alpha_{20}(T_2 - 20)] \quad (3.3)$$

A condutividade térmica de metais e ligas também é de extrema importância pois ela demonstra a capacidade do material de liberar para o ambiente o aquecimento causado pelas perdas.

A distribuição uniforme de corrente através da seção de um condutor existe apenas para a corrente contínua. Com o aumento da frequência acontece uma distribuição não-uniforme de corrente, fenômeno este chamado de “efeito pelicular”, pois em um condutor circular a densidade de corrente geralmente aumenta do interior em direção a superfície. (Este assunto será estudado com detalhes em outras disciplinas do curso de engenharia elétrica.)

### 3.2.2. - Resistência de contato nos metais

Quando se aplica uma peça metálica sobre outra, com objetivo de contato elétrico, estas ficam na verdade separadas, qualquer que seja a pressão a que sejam submetidas, por uma distância relativamente grande, se comparada às dimensões do átomo.

Na verdade existem alguns pontos de contato perfeito e o resto dos pontos a distância da ordem de  $\mu\text{m}$ , de onde se entende a existência da resistência de contato.

A passagem de energia de uma peça a outra se dá por dois modos:

⇒ através de uma zona de contato íntimo, ou de condução;

⇒ através de uma zona de ruptura, onde o gradiente de potencial pode alcançar valores elevados, muito pouco inferiores a rigidez dielétrica do ar.

A partir do momento em que se apresentam ao mesmo tempo fenômenos condutores e disruptivos nos contatos, não é possível aplicar a estes a lei de Ohm.

Se chama de “resistência de contato”, no entanto, a relação entre a tensão nos bornes de um contato e a intensidade de corrente que o atravessa. Esta resistência não é constante e

depende da pressão a que estão submetidas as peças (pressão de contato), da composição destas, da sua forma, da sua seção, do sentido e intensidade da corrente, etc.

A prata, o cobre, o bronze, o latão e o tungstênio dão bons contatos, a resistência dos contatos de alumínio, entretanto, é muito elevada. O contato em corrente contínua apresenta uma resistência independente da intensidade de corrente.

Se pode considerar bom um contato quando resulta muito pequena a diferença de temperatura entre o mesmo e os pontos ao redor. No caso de contato entre metais, deve-se ficar atento a formação de pares galvânicos (em presença de um líquido condutor ou simplesmente da umidade).

### **3.3 - Materiais de Elevada Condutividade**

Os metais são elementos químicos que formam sólidos opacos, lustrosos, bons condutores de eletricidade e calor e, quando polidos, bons refletores de luz. A maioria dos metais é forte, dútil, maleável e, em geral, de alta densidade.

#### *Cobre e Suas Ligas*

O cobre apresenta as vantagens a seguir, que lhe garantem posição de destaque entre os metais condutores.

- ◇ Pequena resistividade. Somente a prata tem valor inferior, porém o seu elevado preço não permite seu uso em quantidades grandes,
- ◇ características mecânicas favoráveis,
- ◇ baixa oxidação para a maioria das aplicações. O cobre oxida bem mais lentamente, perante elevada umidade, que diversos outros metais; esta oxidação entretanto, é bastante rápida quando o metal sofre elevação de temperatura;
- ◇ fácil deformação a frio e a quente: é relativamente fácil reduzir a seção transversal do cobre, mesmo para fios com frações de milímetros de diâmetro.

O cobre tem cor avermelhada característica, o que o distingue de outros metais, que, com exceção do ouro, são geralmente cinzentos, com diversas tonalidades.

O valor da condutividade informa sobre o grau de pureza do cobre. A máxima pureza é encontrada no cobre obtido em ambiente sem oxigênio, quando se aproxima da condutividade do cobre eletrolítico. Destaque-se então que a condutividade elétrica do cobre é muito influenciada na presença de impurezas, mesmo em pequenas quantidades.

A resistividade do cobre a 20°C é de:  $\rho_{cu} = 1,7241 \mu\Omega\text{cm}^2/\text{cm}$  e seu coeficiente de termoresistividade vale:  $\alpha = 0.00393/^\circ\text{C}$ . Estas e outras propriedades podem ser observadas na Tabela 3.4.

O cobre resiste bem à ação da água, de fumaças, sulfatos, carbonatos, sendo atacado pelo oxigênio do ar, e em presença deste, ácidos, sais e amoníaco podem corroer o cobre.

O cobre é obtido em forma eletrolítica, fundido e transformado em lingotes. Na transformação subsequente aos perfis e peças desejadas, quando não se usa a fusão e sim uma transformação mecânica por laminação e estiramento, efetua-se primeiramente um aquecimento do lingote para facilitar a transformação bruta, até temperaturas de 920-980°C.

Na laminação a frio, o cobre se torna mais duro e elástico, e reduz sua condutividade. É o estado de cobre encruado. Essa modificação de características pode representar um impedimento ao uso do metal e, nesse caso, se faz o seu recozimento a uma temperatura de 500-560°C.

### Aplicações do Cobre:

Em função de suas propriedades, o cobre nas suas diversas formas puras tem determinadas suas aplicações. O cobre encruado ou duro é usado nos casos em que se exige elevada dureza, resistência à tração e pequeno desgaste, como no caso de redes aéreas de cabo nú em tração elétrica, particularmente, para fios telefônicos, para peças de contato e para anéis coletores. Em todos os demais casos, principalmente em enrolamentos, barramentos e cabos isolados, se usa o cobre mole ou recozido. Casos intermediários precisam ser devidamente especificados. Em muitos casos, porém, o cobre não pode ser usado na forma pura, quando então as ligas de cobre passam a ser encontradas. Essas ligas são feitas com metais escolhidos de modo a compensar ou melhorar alguma das propriedades do cobre, cabendo destacar porém, que, geralmente, assim procedendo, estamos prejudicando outras propriedades.

### Ligas de Cobre:

A escolha de uma liga deve levar também em conta aspectos econômicos. A adição de certos elementos (por exemplo o níquel e o estanho) pode aumentar o preço da liga, aumentando certas propriedades, ao passo que, a presença de outros elementos (zinco, chumbo) permite abaixar o preço sem redução notável de características técnicas.

Tabela 3.1 - Características da Ligas de Cobre

<i>Liga</i>	<i>Tratamentos</i>	<i>Condutividade, em relação ao cobre (%)</i>	<i>Resistência à tração, em kg/mm<sup>2</sup></i>	<i>Alongamentos, (%)</i>
Cu + Cd (0,9 Cd)	recozido	95	até 31	50
	encruado	83-90	até 73	4
Bronze 0,8 Cd + + 0,6 Sn Cu > 60%	recozido	55-60	29	55
	encruado	50-55	até 73	4
Bronze 2,5 Al + 2 Sn	recozido	15-18	37	45
	encruado	15-18	até 97	4
Bronze fosforoso 7Sn + 1P	recozido	10-15	40	60
	encruado	10-15	105	3
Latão 30 Zn	recozido	25	32-35	60-70
	encruado	25	até 88	5
Bronze BI 0,1% Mn, o resto Cu	—	82	50-52	—
BII 0,8 Mn ou 1% Sn + + 1 Cd	—	60	56-58	—
BIII 2,4% Sn ou 1,2 Sn + + 1,2 Zn	—	31	66-74	—

Um exemplo de liga de cobre são os bronzes. As ligas de cobre e estanho podem suportar adições mais ou menos importantes de chumbo, de zinco e as vezes de níquel. O bronze apresenta a característica de ser resistente ao desgaste por atrito, fácil usinagem e são ligas elásticas. Suas aplicações principais são em rolamentos, partes de máquinas, engrenagens, trilhos de contato, molas condutoras, fios finos e peças fundidas. As propriedades variam de acordo com o percentual de estanho (ver Tabela 3.1)

Já os latões tradicionais são ligas de cobre e zinco, às quais se adiciona um pouco de chumbo ou alumínio. Em princípio o uso de latões comuns não é aconselhável quando existirem problemas de corrosão. Porém este não é o mesmo caso quando são empregados latões de alta resistência (55-70% Cu, 20-35% Zn + Al, Mn, Fe, Ni, Sn, etc.), os quais são possuidores de excelentes propriedades mecânicas e de notável resistência à corrosão em determinados ambientes.

Outras ligas de cobre seriam: cobre alumínio (8 a 12% de alumínio) que têm propriedades comparáveis àquelas dos aços inoxidáveis, além da possibilidade de poderem ser obtidas mais facilmente, por fundição em areia ou em moldes metálicos; ligas cobre-cromo, etc.

### *Alumínio e Suas Ligas*

No global de suas propriedades, o alumínio é o segundo metal mais usado na eletricidade, havendo nos últimos anos uma preocupação permanente em substituir mais e mais as aplicações do cobre pelo alumínio, por motivos econômicos.

Alguns aspectos, baseados principalmente no custo (mesmo levando em conta compensações no dimensionamento das partes condutoras) e produção nacional maior do alumínio, têm levado a crescente preferência pelo alumínio, cujo maior problema é a sua fragilidade mecânica e sua rápida, porém não profunda, oxidação.

A Tabela 3.2 apresenta uma comparação de algumas características do cobre e o alumínio.

Tabela 3.2 - Comparação de características físicas entre cobre e alumínio.

<i>Característica física</i>	<i>Alumínio (duro)</i>	<i>Cobre (duro)</i>	<i>Padrão IACS*</i>
Densidade a 20 °C (g/cm <sup>3</sup> )	2,70	8,89	8,89
Condutividade mínima percentual a 20 °C	61	97	100
Resistividade máxima a 20 °C (Ωmm <sup>2</sup> /m)	0,0282	0,0177	0,0172
Relação entre os pesos de condutores de igual resistência em corrente contínua e igual comprimento	0,48	1,03	1,00
Coefficiente de variação da resistência por °C a 20 °C	0,0040	0,0038	0,0039
Calor específico (cal/g °C)	0,214	0,092	0,092
Condutividade térmica (cal/cm <sup>3</sup> .s. °C)	0,48	0,93	0,93
Módulo de elasticidade do fio sólido (kgf/mm <sup>2</sup> )	7.000	12.000	—
Coefficiente de dilatação linear/°C	$23 \times 10^{-6}$	$17 \times 10^{-6}$	$17 \times 10^{-6}$

\* Padrão IACS: Padrão Internacional do cobre recosido, tomado como referência de 100% de condutividade.

Mesmo considerando a necessidade de condutores de alumínio com diâmetro maior que seria necessário se o material fosse cobre, o fio de alumínio ainda tem aproximadamente a metade do peso do de alumínio, o que reduz o custo dos elementos de sustentação envolvidos, dado importante na construção de linhas de transmissão. O uso do alumínio adquiriu, por essas razões importância especial nas instalações elétricas em aviões.

Outro aspecto é o comportamento oxidante, já mencionado. O alumínio apresenta uma oxidação extremamente rápida, formando uma fina película de óxido de alumínio que tem a propriedade de evitar que a oxidação se amplie. Entretanto, esta película apresenta uma resistência elétrica elevada com uma tensão de ruptura de 100 a 300V, o que dificulta a soldagem do alumínio, que por essa razão exige pastas especiais.

A corrosão galvânica é uma situação particular, própria entre metais afastados na série galvânica dos elementos. Devido ao grande afastamento e à conseqüente elevada diferença de potencial entre o cobre o alumínio, essa corrosão se apresenta sempre que o contato entre Cu e Al ocorre num ambiente úmido. Por essa razão, os pontos de contato Al-Cu precisam ser isolados contra a influência do ambiente.

Tabela 3.3 - Características de ligas de alumínio

Composição	Tipo	Resist. tração (kg/mm <sup>2</sup> )	Dureza Brinell (kg/mm <sup>2</sup> )	Condut. elétrica (Ωmm <sup>2</sup> /m)	Coefficiente de temperatura $\alpha_T(1/^{\circ}\text{C})$	Características
AlCuMg Duralumínio	ligas normais: mole encruado	< 25 40	< 60 100	28 20	$3,5 \times 10^{-3}$ $2,1 \times 10^{-3}$	para construção de peças; sofrem corrosão
	ligas com elevada resistência: encruado encruado e laminado a frio	40 30 ... 50	110 120	— —	— —	
Al Mg Si	mole. duro. laminado a frio. laminado a quente	8	35	30	$3,5 \times 10^{-3}$	resistência mecânica média, boa deformabilidade boa estabilidade química
		16	55	26	$3,5 \times 10^{-3}$	
		10	60	27	$2,8 \times 10^{-3}$	
		20	80	27	$2,8 \times 10^{-3}$	
Al Mg Si ( Aldrey )	mole encruado	10	30	30	$3,6 \times 10^{-3}$	usado em cabos
		30	80	33	$3,6 \times 10^{-3}$	
Al Mg (valores médios)	mole meio mole duro	22	55	20	$2,4 \times 10^{-3}$	estável contra água do mar não suporta soluções alcalinas. Quanto maior % Mg maior dificuldade para soldagem
		28	70	17	$2,1 \times 10^{-3}$	
		30	90	15	$1,8 \times 10^{-3}$	
Al Mn	mole meio mole duro	7	20	25	$2,7 \times 10^{-3}$	Melhor estabilidade que Al, boa capacidade de soldagem
		12	30	24	$2,7 \times 10^{-3}$	
		15	40	23	$2,7 \times 10^{-3}$	
Al Mg Mn	mole meio mole duro	15	40	23	$2,4 \times 10^{-3}$	Estabilidade média perante sais e ácidos.
		20	50	22	$2,4 \times 10^{-3}$	
		25	60	21	$2,4 \times 10^{-3}$	

Aplicações e Ligas do Alumínio: O alumínio puro apenas é usado nos casos em que as solicitações mecânicas são pequenas. Tal fato ocorre, por exemplo, nos cabos isolados e em capacitores. Entretanto, é bastante grande o número de ligas de alumínio usadas eletricamente, nas quais este é associado principalmente a Cu, Mg, Mn e Si, que, com exceção do silício, formam sistemas cristalinos mistos, sensivelmente dependentes das condições de temperatura em que a liga é processada. Alguns exemplos de ligas de alumínio, assim como suas características, são apresentados na Tabela 3.3.



O pequeno peso específico das ligas de alumínio leva, na área eletrotécnica, às seguintes aplicações principais:

- ♦ em equipamento portátil, uma redução de peso;
- ♦ em partes de equipamento elétrico em movimento, redução de massa, da energia cinética e do desgaste por atrito;
- ♦ de peças sujeitas a transporte, maior facilidade nesse transporte, extensiva à montagem dos mesmos;
- ♦ em estruturas de suporte de materiais elétricos (cabos, por exemplo) redução do peso e conseqüente estrutura mais leve;
- ♦ em locais de elevada corrosão, o uso particular de ligas com manganês

Tabela 3.4 - Características de metais condutores

Metal	Resistência à tração (kgf/mm <sup>2</sup> )	Alongamentos %	Peso específico a 20 °C (g/cm <sup>3</sup> )	Tempe- ratura de fusão (°C)	Tempe- de eva- poração (°C)	Coefficiente de tem- peratura da resis- tência $\alpha_T$ a 20 °C (1/°C) $\times 10^{-3}$	Resistividade a 20 °C ( $\Omega$ mm <sup>2</sup> /m)
Cobre	fundido — 15 a 20	35 — 40	8,3 a 8,9	1083	2360	3,82 — 4,30	0,0169
	laminado e	35 — 40					0,0179
	recosido — 20 a 26	2 — 6					0,0182
Alumínio	encruado — 35 a 45	40 — 50	2,7	658	2270	4,20 a 4,30	0,0262
	recosido — 3,5 — 6	4 a 5					0,0295
	encruado — 11 — 13						
Chumbo	1,6	55	11,4	327	1560	4,10	0,20 a 0,22
Estanho	1,5 — 4,0	—	7,3 a 7,8	232	2360	4,40	0,114
Prata	16 — 30	50	10,5	960	1918	3,60 a 4,00	0,0162
Ouro	27	—	19,3	1063	2700	3,70	0,021 — 0,024
Platina	20 — 40	3 — 45	21,4	1773	4300	30,7	0,10
Mercurio	—	—	13,55	solidif. — 39	357	0,9	0,95 — 0,96
Zinco	3 — 36	0,5 a 50	7,14	419	900	3,5 a 4,7	0,06
Cádmio	6	—	8,6	321	767	—	—
Níquel	40 — 45	25 a 30	8,9	1450	3147	5 a 6	0,07 — 0,09
Cromo	—	100 — 10 <sup>-7</sup>	7,2	1920	2660	—	0,7 — 0,8
Tungstênio	400	1 — 4	19 — 20	3400	5000 — 6000	5,2	0,05 — 0,06
Molibdênio	180 — 200	2 — 5	10,2	2630	3600	4,8	0,0477

### *Chumbo (Pb)*

O chumbo é um metal de coloração cinzenta, com um brilho metálico intenso quando não oxidado. Sua oxidação superficial é porém bastante rápida.

Apresenta elevada resistência contra a ação da água potável, devido à presença de carbonato de chumbo, sal, ácido sulfúrico. Não resiste a vinagre, materiais orgânicos em apodrecimento e cal. O chumbo é atacado pela água destilada. O chumbo é venenoso. Permite sua soldagem.

Nas aplicações elétricas, é freqüentemente encontrado, reduzido a finas chapas ou folhas, como nas blindagens de cabos com isolamento de papel, acumuladores de chumbo-ácido e paredes protetoras contra a ação de raios X. Ainda o chumbo é encontrado em elos fusíveis e em material de solda. Nas ligas, o chumbo é encontrado junto com antimônio, telúrio, cádmio, cobre e estanho, adquirindo assim elevada resistência mecânica e à vibração, ficando porém prejudicada a resistência a corrosão.

Uma das ligas mais freqüentemente encontradas é a do chumbo com antimônio, onde o antimônio eleva a dureza. Já 1,5% de Sb duplicam esse valor. Suas aplicações mais comuns, além das já citadas, são na indústria química e de papel, nas tubulações de águas salinas, mancais anti-fricção, projéteis de armas, usinas de energia nuclear e elemento-liga de latões, bronzes e aços (para melhorar a usinabilidade).

### *Estanho (Sn)*

O metal é branco prateado, mole, porém mais duro que o chumbo. Nota-se que a resistividade do estanho é elevada, o que faz esperar um elevado aquecimento perante a passagem de corrente.

Utilizado em temperaturas inferiores a 18° C, o metal apresenta manchas cinzentas, que desaparecem se o metal é novamente aquecido. Ao contrário, se aquecido acima de 160 °C, o material se torna quebradiço e se decompõe na forma de pequenos cristais.

À temperatura ambiente normal, o estanho não se oxida, a água não o ataca e ácidos diluídos o atacam apenas lentamente. Por isso o estanho é usado para revestimento e está presente em ligas, como no bronze.

A exemplo do chumbo, o estanho é encontrado como material de solda. Em algumas aplicações é reduzido a finas folhas. O minério de estanho já está se tornando bastante raro. Suas características físicas vêm indicadas na Tabela 3.4.

### *Prata (Ag)*

É o metal nobre de maior uso industrial, notadamente nas peças de contato. A cor prateada brilhante é característica, escurecendo-se devido ao óxido de prata ou sulfeto de prata que se forma em contato com o ar. Sua obtenção resulta freqüentemente de minérios combinados de prata, cobre e chumbo.

A prata, devido às suas características elétricas, químicas e mecânicas, cujos valores numéricos estão indicados na Tab. 3.4, é usada em forma pura ou de liga, cada vez mais em partes condutoras onde uma oxidação ou sulfatação viria criar problemas mais sérios. É o caso de peças de contato, notadamente nas partes em que se dá o contato mecânico entre duas peças e, onde, além de um bom material condutor, é conveniente ter-se um metal que não influa negativamente devido a transformações metálicas. No caso da prata, no seu estado puro, encontra o seu uso nas pastilhas de contato, para correntes relativamente baixas; quando essa

solução não é adequada, usam-se pastilhas de liga de prata, onde o Ag é misturado com níquel e cobalto, paládio, bromo e tungstênio.

A prateação, numa espessura de alguns micrometros, é usada para proteger peças de metal mais corrosível.

Um comportamento especial da prata, em peças de contato, é a eliminação automática de óxidos de prata, por decomposição em prata pura e liberação do oxigênio, à temperatura de 200 a 300 °C.

Na limpeza de contatos de prata, não usar material abrasivo (lixas, limas, etc).

#### *Ouro (Au)*

Esse metal, que apresenta uma condutividade elétrica bastante boa, destaca-se pela sua estabilidade química e pela conseqüente resistência a oxidação, sulfatação, etc. Também suas características mecânicas são adequadas para uma série de aplicações elétricas, havendo porém a natural limitação devido ao seu preço.

O ouro é encontrado eletricamente em peças de contato na área de correntes muito baixas, casos em que qualquer oxidação poderia levar à interrupção elétrica do circuito. E o caso de peças de contato em telecomunicações e eletrônica. Seu uso nesse caso é feito na forma pura, não sendo encontrado em forma de liga, pois esta somente eliminaria as propriedades vantajosas que o ouro apresenta. Consulte suas características na Tab. 3.4.

#### *Platina (Pt)*

Ainda na família dos metais nobres, encontramos a platina, que também é bastante estável quimicamente. É relativamente mole, o que permite uma deformação mecânica fácil, bem como sua redução a folhas, com espessuras de até 0,0025mm, ou a fios finos, com diâmetro de até 0,015mm ou ainda menores através de processos especiais. Suas principais características vêm indicadas na Tab.3.4.

Devido às suas propriedades antioxidantes o seu uso elétrico é encontrado particularmente em peças de contato, anodos, fios de aquecimento. É o metal mais adequado para a fabricação de termoelementos e termômetros resistivos até 1000°C, pois até essas temperaturas não sofre transformações estruturais, fazendo com que a resistividade varie na mesma proporção da temperatura.

Termômetros resistivos são particularmente usados perante pequena variação de temperatura, casos não mais registrados por termoelementos. Sua única desvantagem é de apresentarem uma certa dilatação, o que dificulta a leitura de temperaturas em dado ponto. Na faixa de - 200 a + 500°C, a platina permite a leitura mais exata da temperatura do que outros metais.

#### *Mercúrio (Hg)*

É o único metal líquido, à temperatura ambiente. Aquecido, oxida-se rapidamente em contato com o ar. É usado em termômetros resistivos para leituras entre 0 e 100°C, bem como para chaves basculantes usadas conjuntamente com sistemas mecânicos, sobretudo de relógios, em retificadores, lâmpadas (vapor de mercúrio). Quase todos os metais (com exceção do ferro e do tungstênio) se dissolvem no mercúrio. Os vapores de mercúrio são venenosos. Na área dos retificadores, seu uso caiu acentuadamente com a evolução do retificador de silício. Demais características na Tab.3.4.

### *Zinco (Zn)*

É um metal branco-azulado, que tem o maior coeficiente de dilatação entre os metais. É quebradiço à temperatura ambiente, estado que muda entre 100-150°C, quando se torna mole e maleável, o que permite sua redução a finas chapas e fios. Acima de 200°C, volta a ser quebradiço, podendo ser reduzido a pó a 250°C.

A resistência à tração varia entre limites amplos, em função do processo usado na fabricação das peças. O valor mais baixo se aplica a peças fundidas; quando se aplica um processo de laminação, o valor se eleva em aproximadamente 10 a 12 vezes. Da mesma maneira se eleva o alongamento, porém numa proporção diferente, bem maior.

O zinco é estável quimicamente no ar, após se recobrir com uma fina película de óxido ou carbonato de zinco. É atacado rapidamente por ácidos e bases. Consulte a Tab.3.4, que contém os valores numéricos de suas características.

Em contato com outros metais e na presença de umidade, existe facilidade de formação de elementos galvânicos, que corroem ou dissolvem o zinco. O metal que menos corroe o zinco é

o aço, o qual pode, assim, ser usado para recobrimento e proteção do zinco. O zinco é ainda usado para revestimento - a zincagem - através de zincagem a fogo (imersão em estado de fusão), aplicação por pulverização, ou zincagem eletrolítica.

Ligas de zinco - resultam sobretudo da união de zinco com alumínio e cobre, a fim de elevar sua resistência à tração e demais propriedades mecânicas. Ligas cristalinas Zn-Al-Cu levam a cristais mistos, que se transformam com o tempo, conseqüentemente apresentam o chamado envelhecimento, que se faz notar inclusive por uma elevação do volume, com conseqüente redução das características mecânicas do alongamento, etc. Acrescentam-se ainda corrosões intermetalicas pela ação da umidade e do calor. Nesse sentido, destaca-se a ação do alumínio, de modo negativo. Caso tal comportamento comprometa a peça, deve-se acrescentar magnésio e lítio, que reduzem o efeito corrosivo. O combate ao envelhecimento é obtido, de um lado, usando-se zinco com pureza 99,99%, e do outro, pelo acréscimo de pequena quantidade de magnésio (0,1%).

As ligas de Al-Zn não apresentam envelhecimento, além de se destacarem por uma dilatação mínima. Para a fusão sobre pressão, as ligas com 4% de Al, 0,6% de Cu, 0,05% de Mg e o resto de zinco, têm apresentados os melhores resultados.

Nas aplicações elétricas, o zinco predominante usado tem pureza 99,99%, em forma de liga com 0,9% de Al, 0,5% de Cu, com uma condutividade elétrica de 16 a 17 m/Ωmm<sup>2</sup> e uma resistência à tração de 18 a 20 kgf/mm<sup>2</sup> perante um alongamento de 40-55%. Essa liga é de fácil soldagem. Comparado com o cobre, a seção transversal de tais fios deve ser 3,3 vezes maior. A diferença entre os coeficientes de dilatação dessa liga e do material dos conectores, pode fazer com que o contato se solte, depois da passagem da corrente.

Uma eventual camada de óxido de zinco é bem mais mole e, por isso, de remoção mais fácil que a do cobre. O uso do zinco com metal condutor é limitado a elementos galvânicos (pilha de Leclanché) e a certos elementos de ligação em forma de fios e contatos.

### *Cádmio (Cd)*

O cádmio é um acompanhante constante dos minérios de zinco e assim se constitui num subproduto do mesmo. O cádmio é mais mole que o zinco, porém não mais suas propriedades são bem semelhantes a este. Por seu brilho metálico, tem sido usado como metal de recobrimento, na proteção contra a oxidação. Por ser mais caro que o zinco essa aplicação de cádmio hoje é quase que totalmente substituída pela zincagem. Assim o seu uso fica

condicionado à fabricação das baterias de Ni-Cd. O cádmio é venenoso. Consulte também a Tab.3.4.

### *Níquel (Ni)*

É um metal cinzento claro, com propriedades ferromagnéticas. Puro, é usado em forma gasosa em tubos e para revestimentos de metais de fácil oxidação. É resistente a sais, gases, materiais orgânicos sendo porém sensível à ação do enxofre. Aquecido ao ar, não reage com o mesmo até 500°C. Assim, seu uso está difundido na indústria química, particularmente em aplicações sobre o ferro, pois ambos têm o mesmo coeficiente de dilatação e temperatura de fusão.

A deformação a quente é processada a 1100°C, devido à sua elevada dureza. Frequentemente, porém, essa deformação é feita a frio, permitindo obter fios de até 0,03mm de diâmetro. O níquel se caracteriza ainda por uma elevada estabilidade de suas propriedades mecânicas, mesmo a temperaturas bem baixas. Magneticamente, o níquel pode ser magnetizado fracamente, não sendo mais magnético acima de 356°C (temperatura de Curie).

Seu uso resulta assim para fios de eletrodos, anodos, grades, parafusos, etc. É de difícil evaporação no vácuo. A emissão de elétrons é elevada pelo acréscimo de cobre até 3,5%. Fios de níquel podem ser soldados a outros de cobre sem problemas. Nas lâmpadas incandescentes, fios de níquel são usados como alimentadores do filamento de tungstênio (W) devido ao seu comportamento térmico. O seu elevado coeficiente de temperatura o recomenda para termômetros resistivos. Encontramos seu uso nos acumuladores de Ni-Cd e nas ligas de Ag-Ni para contatos elétricos. Aliás, todas as ligas de níquel se identificam por serem resistentes, mecanicamente, e contra a corrosão e por suportarem bem o calor. Sua presença em ligas Ni-Cu já altera a cor típica do cobre, tornando-se praticamente igual à prata com 40% de Ni. A condutividade elétrica do cobre cai rapidamente na presença do níquel, chegando ao seu valor mínimo a 50% de Ni. Assim, ligas de níquel são adequadas na fabricação de resistores, a exemplo do Konstantan. Monel, e outros. A liga Ni - Cr (ou nicrom), eventualmente com pequenos acréscimos de ferro manganês, suporta bem, em particular, o calor, reduzindo a possibilidade de oxidação do níquel, sobretudo acima dos 900°C. Outro setor onde o níquel é usado é o dos termoelementos, em substituição ao par platina - platina-sódio, para temperaturas até 1200°C. Combinado com o ferro, leva a liga magnéticas apropriadas.

### *Cromo (Cr)*

É um metal de brilho prateado-azulado, extremamente duro. O cromo não se modifica em contato com ar, e permite bom polimento. Possui elevado coeficiente de reflexão (65%). Somente sofre oxidação a temperaturas superiores a 500°C, sendo mais sensível à ação de enxofre e de sais. Quando imerso de uma solução salina, se recobre com uma camada de óxido que o protege contra outros ataques. Seus valores numéricos vêm indicados na Tab. 3.4.

O cromo é por isso usado para proteger outros metais que oxidam com maior facilidade.

Aliando sua baixa oxidação à elevada estabilidade térmica e à alta resistividade elétrica, resulta ampla utilização do cromo na fabricação de fios resistivos, em forma pura ou como liga.

### *Tungstênio (W)*

O tungstênio é obtido por um processamento quimicamente complexo, na forma de pó, e comprimido em barras a pressões de 2000 atm. Por ser um metal com temperaturas-limite muito elevadas, todo seu processo de manufatura e obtenção de produtos elétricos é

extremamente difícil e de custo elevado. A própria compactação dos grãos do pó é complexa, resultando daí pequena aderência entre cristais e, assim, peças quebradiças. Modificando-se porém a disposição cristalina, através de um processo especial, fazendo com que passem a uma disposição linear, podem ser fabricados fios ou filamentos cuja resistência à tração se eleva com redução do diâmetro, de 5 a 7 vezes.

Uma vez que o tungstênio não permite corte, usinagens ou furação convencionais, devido a sua dureza e ao fato já mencionado de ser quebradiço, o método indicado é usado para fabricar os filamentos de lâmpadas incandescentes, que operam a temperaturas em torno de 2000°C, situação em que a resistividade se eleva até próximo de  $1\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ , e assim 20 vezes superior àquela à temperatura ambiente. Na proteção contra as radiações X, usa-se uma liga de 93% de W, 5% de Ni e 2% de Cu.

O tungstênio ainda é usado em ligas sujeitas a temperaturas elevadas, como por exemplo, contatos com arcos voltaicos intensos. Veja os valores numéricos do tungstênio na Tab.3.4.

### *Ferro (Fe)*

O ferro se conhece à tempos remotos, havendo dado o nome a toda uma época pré-histórica, denominada idade do ferro. A princípio crê-se que o ferro utilizado na fabricação de utensílios, era obtido de meteoritos que a 50.000 anos devem ter caído com mais frequência na superfície terrestre.

No Egito a 7.000 anos A.C. encontrou-se amuletos de ferro que provavelmente provinham de minérios beneficiados. Já na Índia a 912 anos A.C. encontrou-se uma coluna de ferro que media 7 m de altura e 40 cm de diâmetro com peso de 6 toneladas e que resistia perfeitamente aos agentes oxidantes, crê-se que esta coluna tenha sido derivada de um ferro pureza extraordinária.

A fabricação do aço partindo do ferro também é muito antiga, os Gregos, 500 anos A.C. já obtinham o aço (temperado). Crê-se que por uma maneira casual ao deixar alguma sobra de ferro com carvão de lenha, em contato com o carbono desprendido do mesmo, obteve-se um outro tipo de ferro com maior dureza.

Na verdade, a época que marcou a utilização do ferro foi nos anos de 1800, quando houve uma grande explosão industrial, esta beneficiada com o surgimento dos processos de obtenção do ferro de melhores qualidades.

As causas desta explosão foram:

- ⇒ abundância de ferro na superfície terrestre;
- ⇒ alto teor de ferro nos minérios;
- ⇒ baixo ponto de fusão;
- ⇒ bom condutor de calor e eletricidade;
- ⇒ dúctil e maleável;
- ⇒ magnetizável;
- ⇒ boas propriedades mecânicas;
- ⇒ podemos alterar suas propriedades através de tratamentos;
- ⇒ forma lixos de excelentes características;
- ⇒ etc.

A resistividade do ferro ou do aço é 6 a 7 vezes a do cobre, ou mesmo mais. Além de terem aplicação como materiais estruturais e magnéticos, o ferro e o aço são também largamente empregados como condutores elétricos, estando algumas aplicações listadas a seguir.

- ⇒ circuitos de tração elétrica: nas estradas de ferro o circuito de retorno para a corrente elétrica é geralmente formado pelos próprios trilhos, soldados entre si ou ligados por curtos cabos de cobre. Nos sistemas em que se utiliza um terceiro trilho para condução da corrente elétrica (em lugar de uma linha aérea), empregam-se para o terceiro trilho aços doces, com resistividade de 7 a 9 vezes a do cobre.
- ⇒ ligas de ferro para resistências elétricas: a grande maioria das resistências para aquecimento elétrico, ou para a confecção de reostatos, é manufaturada com ligas de ferro;
- ⇒ linhas aéreas: nestas são utilizados freqüentemente tanto como condutores (eletrificação rural, aço galvanizado) como alma de cabos de alumínio, para aumentar a resistência mecânica.

### **3.4 - Materiais de Elevada Resistividade**

As ligas metálicas resistivas são utilizadas com três finalidade básicas:

- ◆ ligas para fins térmicos ou de aquecimento;
- ◆ ligas para fins de medição;
- ◆ ligas para fins de regulação.

#### *Ligas de aquecimento:*

Tais ligas precisam ter uma elevada estabilidade térmica, tendo um bom comportamento corrosivo ou químico à temperatura local. Cada liga desse tipo possui uma temperatura máxima de serviço, que não pode ser ultrapassada, referida ao ambiente de serviço, geralmente em contato com o ar. Essas ligas possuem, muitas vezes, a propriedade de

recobrirem-se por fina película de óxido, a qual protege o restante do metal contra a ação do

ambiente. Tal película, porém, poderá romper-se se houver freqüentes aquecimentos e resfriamentos, ou seja, freqüentes ligações e desligamentos da rede elétrica, reduzindo assim a durabilidade do componente. Na escolha dos componentes da liga, também podem ser de importância sua capacidade de dilatação e de irradiação.

Deve-se ter dados exatos de variação da resistência entre a temperatura ambiente e a máxima temperatura de serviço.

#### *Ligas para fins de medição*

Resistores para instrumentos de precisão admitem um coeficiente de temperatura máximo de  $2,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , uma pequena tensão de contato com relação ao cobre e uma resistência praticamente constante. Tais ligas sofrem geralmente deformação a frio, o que pode acarretar “envelhecimento” sensível após algum uso. Por essa razão é comum aplicar-se um processo de envelhecimento artificial, para estabilizar o material, através de um tratamento térmico controlado, que elimina tensões internas, estabiliza e homogeneiza os cristais. Os tipos usados para resistências-padrão são muito diversos dos empregados para reostatos de partidas de motores, ou para regulação de aparelhos.

As ligas de níquel-cromo apresentam elevada resistividade e baixo coeficiente de temperatura para a resistência; por exemplo *Nichrome V*. As ligas de ferro-níquel, de custo muito menor que as de níquel-cromo, apresentam menor resistividade que essas e menor resistência à corrosão, por exemplo *Nilvar*. As ligas de cobre-níquel têm resistividade ainda menor, não resistem tão bem às altas temperaturas quanto as de níquel-cromo, porém apresentam coeficientes de temperatura praticamente desprezíveis, por exemplo *Advance*.

#### *Ligas para fins de regulação:*

Nesse caso a faixa de temperatura se move entre 100 e 200°C.

As ligas ternárias de ferro, níquel e cromo são as que melhor satisfazem às condições de resistividade elevada, pequena variação da resistividade com a temperatura, grande resistência química aos agente oxidantes, carburantes ou sulfurantes e têm propriedades mecânicas capazes de permitirem um funcionamento prolongado a alta temperatura, sem deformação excessiva.

A presença de cromo melhora a resistência às ações químicas da liga e confere-lhe boas características mecânicas.

Há umas cinco ligas que habitualmente se empregam na resolução de problemas diversos, tais como: fabricação de reostatos, resistências de aquecimento para fornos, aquecedores e aparelhos de laboratório, etc.

Os fios resistentes são normalmente revestidos de uma película impermeável e isolante de óxido, a qual permite bobinar resistências com as espiras encostadas, desde que a diferença de potencial entre os pontos vizinhos não exceda qualquer coisa como 2V.

Isto permite fabricar reostatos de variação dita contínua, com um contato deslizantes. Estes reostatos suportam geralmente temperaturas da ordem dos 600°C.

As ligas habitualmente empregadas são as seguintes:

- \* Liga A: 12Ni + 12Cr + 76Fe. Aplicada em resistências de aquecimento a temperatura moderada e reostatos de arranque de motores.
- \* Liga B: 36Ni + 11Cr + 53Fe. Aplicada em resistências de aquecimento a temperatura moderada. Aquecimento doméstico. Reostatos de motores de tração.
- \* Liga C: 48Ni + 22Cr + 30Fe. Aplicada na fabricação de radiadores, fornos de tratamento a altas temperaturas e em aparelhos de medida.
- \* Liga D: 60Ni + 15Cr + 25Fe. Aplicações análogas às da anterior.
- \* Liga E: 80Ni + 20Cr. Aplicável em radiadores luminosos, fornos de tratamento a altas temperaturas, aparelhos de laboratório e resistências de medidas.

Já vimos que as ligas com níquel e cromo têm elevada resistividade e baixo coeficiente de termorresistividade, associados a uma alta resistência à oxidação e à alteração a altas temperaturas.

As ligas cobre-níquel têm menor resistividade que as de níquel-cromo e resistem pior às altas temperaturas, mas têm um coeficiente de termorresistividade praticamente nulo às temperaturas normais, o que é importante para a construção de aparelhos de medida de precisão.

As ligas de cobre, níquel e zinco ou níquel e prata foram primitivamente utilizadas para aplicações elétricas, mas foram sendo preteridas em favor das anteriormente mencionadas.



### Carbono e Grafite (C)

O carbono é um corpo simples de que se conhecem algumas variedades.

Quando cristalizado no sistema cúbico, o diamante não é condutor de eletricidade. As outras variedades, que são mais ou menos negras, são condutoras ou, pelo menos, adquirem esta propriedade quando são submetidas a uma temperatura adequada ( $600^{\circ}\text{C}$ ).

Podem ser classificadas em grafites e carbonos amorfos. Enquanto que a grafite existe em estado natural, os carbonos amorfos provêm principalmente da pirogenização de matérias orgânicas contendo carbono.

As variedades negras cristalizam no sistema hexagonal mas, enquanto que se podem encontrar grandes cristais de grafite natural bastante pura, os carbonos amorfos contêm pequenos cristais agrupados em desordem.

Por outro lado, enquanto que as impurezas existentes na grafite se encontram sob a forma de inclusões, os carbonos amorfos contêm impurezas, especialmente metalóides como o oxigênio, o enxofre, o boro e o azoto, que incluem na sua própria rede cristalina.

De tudo isto resulta que a grafite é muito mais densa, melhor condutora de eletricidade, um tanto oleosa e menos sensível aos agentes químicos que os carbonos amorfos.

A ação da temperatura elevada favorece a recristalização destes, fazendo sair as impurezas, de maneira que as suas propriedades evoluem no sentido de uma aproximação das da grafite, aproximação essa que será maior ou menor conforme a origem dos carbonos.

Este tratamento, feito habitualmente por aquecimento elétrico, chama-se grafitização.

Enquanto que as propriedades da grafite são bem definidas, as dos carbonos amorfos dependem da sua origem e das condições de formação.

A palavra carvão serve para designar os carbonos amorfos aglomerados e que não constituem, portanto, grafite natural ou artificial.

Obtenção da Grafite :A grafite natural contém habitualmente impurezas de que tem de ser libertada.

Os carvões amorfos apresentam-se habitualmente sob uma forma dividida e porosa, pelo que sua utilização para fins elétricos necessita de um trabalho da aglomeração.

As matérias-primas mais freqüentemente utilizadas são vários tipos de coque, negro de fumo e grafites naturais que começam por ser moídas, peneiradas e adicionadas de um ligante. A pasta assim obtida é homogeneizada e metida em moldes ou passada por fieiras e bem compactada.

O material é então cozido lentamente, sob a proteção de pó de coque, até uma temperatura de pelo menos  $1000^{\circ}\text{C}$  para completa eliminação das partículas voláteis do ligante e para transformação em coque das restantes.

Os grãos de carbono encontram-se assim ligados por coque, por força da retração que se verifica, obtém-se um carvão homogêneo, compacto e bom condutor de eletricidade.

Este carvão diz-se amorfo, se a matéria-prima era carbono amorfo, ou grafítico, se se tratava de grafite.

O carvão grafítico tem propriedades intermédias entre o amorfo e a grafite propriamente dita.

Se levar-se o carvão amorfo a temperaturas acima  $2200^{\circ}\text{C}$ , produz-se uma modificação cristalina e uma purificação. Daí uma evolução das propriedades do carvão no sentido das do grafite: aumento de densidade, de condutibilidade eléctrica e térmica e do seu carácter refratário.

Ao produto assim obtido dá-se habitualmente o nome de carvão electrografítico.

No quadro seguinte comparam-se as principais propriedades de algumas variedades mais correntes de carbono.

Tabela 3.5 - Propriedades de algumas variedades do carbono

	RESISTIVIDADE $\mu\Omega\cdot\text{cm}$	DENSIDADE -
Carbono amorfo	3200 a 6500	1,98 - 2,10
Carvão electrografítico	800 a 1200	2,20 - 2,24
Grafite natural	50 a 400	2,25

Coefficiente de Termoresistividade: Enquanto que o cristal de grafite apresenta, tal como os metais, um coeficiente de termoresistividade positivo, no carvão amorfo ou no grafítico dá-se o contrário.

O respectivo valor depende do tipo de carvão, mas está habitualmente compreendido entre:  $-1.10^{-4}^{\circ}\text{C}^{-1}$  e  $5.10^{-4}^{\circ}\text{C}^{-1}$

Isto é assim até determinados limites de temperatura pois, a partir de  $1500^{\circ}\text{C}$ , começa a produzir-se a grafitização, a qual dá lugar a um abaixamento irreversível da resistividade.

Há, no entanto, outras formas de comportamento como, por exemplo, no carvão electrografítico empregado em eléctrodos e cujo coeficiente é negativo até cerca de  $400^{\circ}\text{C}$  e se torna positivo daí para cima, de forma que a resistividade a  $1500^{\circ}\text{C}$  volta a ser correspondente à que se verifica a frio. Na sua fase positiva, o coeficiente avizinha-se de  $2,50.10^{-4}^{\circ}\text{C}^{-1}$ .

O carvão é muito refratário, mantendo-se perfeitamente rígido até  $2000^{\circ}\text{C}$  e, se bem que se torne ligeiramente plástico a partir de  $2600^{\circ}\text{C}$ , resiste bem aos reforços que lhe possam ser pedidos até aos  $3500^{\circ}\text{C}$ , podendo ser, por isso, empregado como elemento de resistências eléctricas, electrodos, cadinhos, guarnição de fornos, etc.

A volatilização só se começa a fazer sentir a partir dos  $2800^{\circ}\text{C}$  à pressão normal.

Estas qualidades fazem com que o carvão tenha larga utilização como electrodo de suporte de arco voltaico, tanto mais que, verificando-se que a condutibilidade calorífica decresce rapidamente com o aumento da temperatura, as pontas dos eléctrodos ficam muito quentes e fixam bem o arco.

Por outro lado e algo aparentemente contraditório, o carvão é usado em contactos onde se pretende evitar a existência de arco eléctrico; com efeito, ele favorece menos o estabelecimento do arco que qualquer metal, pois não funde e dá apenas lugar a óxidos voláteis.

Quando o contacto é deslizante, revela-se ainda outra propriedade importante do carvão, que é a sua autolubrificação, devida à sua estrutura cristalina lamelar que, à medida que se gasta, dá lugar ao aparecimento de uma fina poeira condutora.

Tem o carvão um poder irradiante apreciável e uma boa resistência química a agentes não oxidantes, dentro de certos limites de temperatura.

São variadas as aplicações do carvão em eletrotecnia: elementos de resistências, resistências fixas elevadas, eletrodos para fornos de arco, eletrodos para arcos de iluminação, carvões para soldadura, carvões para contatos elétricos.

Elementos de resistência: As qualidades refratárias do carvão e a sua perfeita resistência ao choque térmico, aliados a um grande poder irradiante, tornam este material muito conveniente para a fabricação de resistências para altas temperaturas. As resistências de carvão apresentam-se sob a forma de barras de seção circular, cheias ou tubulares, toros, anéis, etc. A ligação do circuito às resistências de carvão exige precauções especiais, conseguindo-se, no entanto, um bom contato com o cobre.

Resistências fixas elevadas: Para a obtenção de resistividades mais elevadas que as do carbono ( $6000 \mu\Omega\text{cm}^2/\text{cm}$ ) podem empregar-se aglomerados de carbono com uma base isolante mineral e um ligante orgânico que constituirão elementos de resistência elevada com bom poder de dissipação e um coeficiente de termorresistividade negativo.

Eletrodos para fornos de arco: O eletrodo para forno elétrico constitui a forma em que maiores quantidades de carvão se consomem em eletrotecnia, podendo considerar-se dois grupos fundamentais: os de carvão amorfo e os de carvão eletrografítico, sendo muito raro o emprego da grafite natural.

Comparativamente com os de carvão amorfo, os eletrodos de carvão eletrografítico apresentam o seguinte conjunto de vantagens:

- ⇒ têm maior condutibilidade, o que reduz as perdas por efeito Joule e permite maiores densidades de corrente;
- ⇒ têm menor suscetibilidade às ações químicas, queimando-se e desagregando-se menos;
- ⇒ são mais puros, nomeadamente nos teores de ferro, silício e enxofre.

Em contrapartida, têm menor condutibilidade térmica, pelo que dão lugar a maiores perdas e são mais caros.

O problema das impurezas é importante, pois vão influir na qualidade dos produtos fundidos, e daí as precauções necessárias na seleção dos eletrodos, especialmente nos de carvão amorfo.

Outro problema é o da ligação elétrica dos eletrodos, a qual exige precauções e técnica adequada por forma a manter sua continuidade.

### **3.5 - Aplicações Especiais**

#### Ligas Fusíveis

Para construção de fusíveis são necessários materiais que se fundam entre 60 e 200°C. Essas ligas são conhecidas sob nomes comerciais; sobre suas propriedades especiais (as vezes o nome do respectivo inventor) devem ser consultados os fabricantes ou os manuais especializados. São empregadas na proteção de circuitos elétricos, tendo como constituintes principais: bismuto, cádmio, chumbo, estanho. A Tabela 3.6 apresenta algumas composições típicas. Em certos fusíveis especiais são utilizados outros metais, como a prata.

Tabela 3.6 - Ligas Fusíveis

Composição					Ponto de Fusão
Bi	Pb	Sn	Cd	Hg	°C
20	20	---	---	60	20
50	27	13	10	---	72
52	40	---	8	---	92
53	32	15	---	---	96
54	26	---	20	---	103
29	43	28	---	---	132
---	32	50	18	---	145
50	50	---	---	---	160
15	41	44	---	---	164
33	---	67	---	---	166
20	---	80	---	---	200

Quando um condutor é aquecido por uma corrente eléctrica e atinge uma temperatura estável, a energia transformada em calor por efeito Joule ( $I^2R$ ) é igual ao calor que deixa a superfície do condutor por convecção e radiação. A corrente necessária para fundir um fio de um determinado metal é calculável pela fórmula de Preece:

$$I = a.d^{3/2} \quad (3.4)$$

onde  $a$  é o coeficiente de Preece e depende do material, sendo alguns dos seus valores apresentados na Tab. 3.7 a seguir.

Uma dada intensidade de corrente permanecendo um tempo indispensável provocará a fusão do fio do fusível e, assim, abrir-se-á o circuito eléctrico logo que se extinga o arco eléctrico resultante.

Tabela 3.7 - Coeficiente de Preece para Alguns Materiais

Material	Diâmetro do fio (em polegadas)	Diâmetro do fio (em milímetros)
cobre	10244	80
alumínio	7585	59,3
liga cobre-níquel(60:40)	5680	44,4
prata alemã	5230	40,9
platina	5172	40,4
ferro	3148	24,6
estanho	1642	12,83
chumbo	1379	10,77
liga chumbo-estanho (2:1)	1318	10,30

### 3.6 - Supercondutores

Um supercondutor pode conduzir eletricidade sem resistência elétrica a temperaturas acima do zero absoluto. Este fenômeno tem sido estudado desde 1911, quando foi descoberto por cientistas holandeses. Além de conduzirem eletricidade sem perdas, supercondutores também transportam quantidades muito grandes de corrente em condutores de pequena seção transversal. A passagem da condutividade elétrica normal para supercondutividade ocorre abruptamente em uma temperatura crítica  $T_c$  (ver Fig. 3.2)

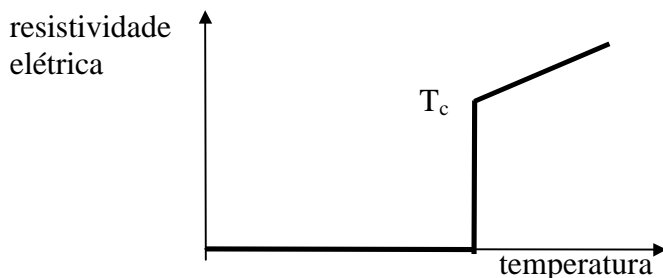


Fig. 3.2 - Temperatura Crítica

As temperaturas críticas  $T_c$  de alguns supercondutores selecionados estão listadas na Tabela 3.8. A fim de que estes materiais superconduzam, eles precisam ser mantidos a temperaturas extremamente baixas. O hélio líquido, com um ponto de fusão de 4 Kelvin (-269 °C) é usado para refrigerar vários materiais supercondutores. O nitrogênio líquido, com um ponto de fusão de 77 Kelvin (-196 °C), pode ser utilizado para empregar alguns supercondutores cerâmicos.

A magnitude do campo magnético e de corrente elétrica fluindo através do material também afeta sua habilidade de se tornar supercondutor. Um material pode exibir supercondutividade somente abaixo sua temperatura crítica  $T_c$ , seu campo magnético crítico  $H_c$  e sua densidade de corrente crítica  $J_c$ .

As qualidades dos supercondutores criou sonhos de equipamentos de potência revolucionários e sistemas de transmissão que operariam com eficiência incrível. Entretanto os primeiros supercondutores eram praticamente impossíveis de resfriar e a supercondutividade não pode ser comercializada em equipamentos de aplicações de potência.

Os primeiros supercondutores foram os chamados supercondutores de baixa temperatura, os quais exibiam suas propriedades de não apresentarem perdas apenas abaixo da temperatura crítica de 8K, ou seja, apenas oito graus acima do zero absoluto. Bobinas destes supercondutores são geralmente resfriadas com hélio líquido, uma substância cara e difícil de lidar. O custo deste processo impediu aplicações práticas, apesar que deva se notar que foram construídos protótipos de cabos, motores, geradores e limitadores de corrente de falta. Estes supercondutores acharam aplicação nos aparelhos médicos de ressonância magnética.

A descoberta, em 1986, de materiais cuja perda de resistência se dava em temperaturas bem mais altas do que nos supercondutores de baixa temperatura, criou novo interesse na supercondutividade para aplicações em potência. A temperatura crítica dos chamados supercondutores de alta temperatura fica acima da temperatura de fusão do nitrogênio líquido (77K), substância relativamente barata e comum. Logo estes supercondutores resolveram o problema do custo de refrigeração. No entanto, um outro problema surgiu: todos os supercondutores de alta temperatura conhecidos são cerâmicas frágeis, difíceis de colocar na forma de fios para aplicações de potência.

Tabela 3.8 - Temperatura Crítica de Alguns Supercondutores

Material	T <sub>c</sub> (Kelvin)
Tipo 1 - Supercondutores Metálicos	
W	0.015
Al	1.18
Sn	3.72
Tipo 2 - Supercondutores Metálicos/Intermetálicos	
Nb	9.25
Nb <sub>3</sub> Sn	18.05
GaV <sub>3</sub>	16.80
Tipo 3 - Supercondutores Cerâmicos	
(La,Sr) <sub>2</sub> CuO <sub>4</sub>	40
Yba <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7-x</sub>	93
TlBa <sub>2</sub> Ca <sub>3</sub> Cu <sub>4</sub> O <sub>11</sub>	122

O desafio de produzir fios de supercondutores de alta temperatura que possam ser usados está sendo alcançado pelo processo de pó em tubo. Neste processo um fio flexível é construído a partir de um material quebradiço da mesma forma que fibras óticas são feitas a partir do vidro: através da formação de filamentos finos.

Supercondutores são realmente sem perdas apenas sob condições de corrente contínua. Em condições de corrente alternada supercondutores dissipam potência através da magnetização e desmagnetização do material, em um processo análogo à histerese no aço magnético. Estas perdas são muito menores que as perdas resistivas nos condutores de cobre de igual capacidade, mas como são dissipadas em um ambiente criogênico, sua remoção tem alto custo. Muito trabalho tem sido feito para reduzir as perdas AC em semicondutores de alta temperatura, a fim de torná-los práticos para aplicações de potência:

- ✓ Supercondutores de alta temperatura para cabos de transmissão: podem oferecer benefícios significativos na transmissão de potência sem perdas, aumentando a capacidade de transmissão e substituindo os fluidos dielétricos utilizados atualmente nos cabos de cobre pelo ecologicamente aceito nitrogênio líquido;
- ✓ Supercondutores de alta temperatura para motores: esta tecnologia pode ser aplicada à máquinas rotativas a fim de produzir aparelhos mais compactos, poderosos e eficientes;
- ✓ Supercondutores de alta temperatura para limitadores de corrente de falta: estes dispositivos operarão por um curto período para limitar a corrente de curto e proteger equipamentos valiosos. Neste caso não existe equivalente para este equipamento com a tecnologia convencional. Os limitadores de corrente de falta irão economizar gastos com atualização de equipamentos em condições de demanda crescente e maiores correntes de falta, sendo considerados equipamentos de qualidade;
- ✓ Supercondutores de alta temperatura para transformadores de potência: A fiação com supercondutores possibilitará a redução no tamanho e no peso dos transformadores pela metade, além de reduzirem as perdas também à metade. O fluido dielétrico utilizado para refrigerar transformadores convencionais seria substituído por nitrogênio líquido, eliminando ainda riscos de incêndio e outros problemas existentes atualmente. Como os transformadores convencionais já são os equipamentos mais eficientes da rede (perdas menores que 0,5%), os

transformadores com supercondutores serão práticos apenas em grandes capacidades, provavelmente acima de 10MVA.

As perspectivas de comercialização de equipamentos empregando supercondutores de alta temperatura são grandes. Progressos significativos têm sido alcançados e após anos de protótipos apenas em escala de laboratórios, protótipos de grande escala tem sido produzidos para uma variedade de tipos de equipamentos elétricos e se espera que os primeiros modelos comerciais estejam no mercado antes da virada do século. Esta nova geração de equipamento de sistemas de potência marcará o avanço mais significativo na indústria elétrica em décadas e promete revolucionar a maneira como a energia elétrica é gerada, transmitida e utilizada.

# CAPÍTULO IV

## MATERIAIS ISOLANTES

### 4.1 - Introdução

Quando se trata de campos eletrostáticos, o meio no qual os mesmos existem deverá ter resistividade muito alta, ou seja, deverá opor-se tanto quanto possível, à passagem de corrente elétrica de condução, motivo pelo qual recebe o nome de dielétrico. O material que o constitui é designado por isolante.

O papel dos dielétricos na eletrotecnia é muito importante e tem dois aspectos:

- realizam o isolamento entre os condutores, entre estes e a massa ou a terra, ou, ainda, entre eles e qualquer outra massa metálica existente na sua vizinhança;
- modificam, em proporções importantes, o valor do campo elétrico existente em determinado local.

O processo principal, característico para qualquer dielétrico, que se produz quando sobre ele atua uma tensão elétrica, é a *polarização*, ou seja, o deslocamento limitado de cargas ou a orientação das moléculas dipolares.

Os fenômenos devidos a polarização de um dielétrico podem ser julgados através do valor da *constante dielétrica* e pelos *ângulo de perdas* dielétricas, se a polarização vem acompanhada de dissipação de energia que provoca o aquecimento do dielétrico. Neste aquecimento tomam parte as poucas cargas livres que existem no material, as quais determinam o aparecimento de uma corrente de fuga, que passa através do dielétrico e sua superfície.

A maioria dos dielétricos se caracteriza por um deslocamento elétrico das cargas como uma função linear do campo elétrico que se cria no dielétrico.

Todo dielétrico inserido em um circuito elétrico pode ser considerado como um capacitor de capacidade determinada (Fig. 4.1). Como sabemos, a carga em um capacitor qualquer é dada por:

$$Q = C \cdot U \quad (4.1)$$

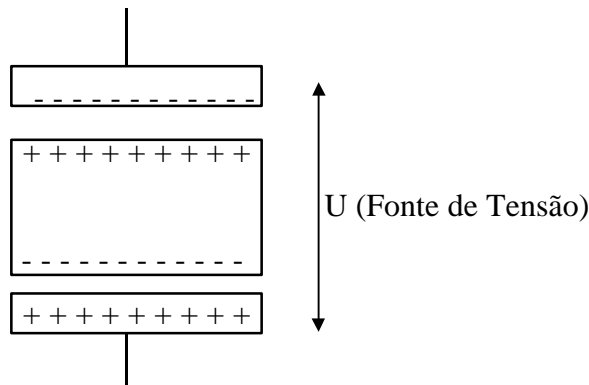


Fig. 4.1 - Polarização



Onde  $C$  é a capacitância do capacitor e  $U$  a tensão aplicada. A quantidade de carga  $Q$ , para um dado valor da tensão aplicada, é a soma de duas componentes:  $Q_0$ , que é a carga que existiria se os eletrodos estivessem separados pelo vácuo, e  $Q_d$ , que é devida a polarização do dielétrico que na verdade separa os tais eletrodos.

$$Q = Q_0 + Q_d \quad (4.2)$$

Uma das características mais importantes de um dielétrico é sua permissividade relativa ou constante dielétrica  $\epsilon$ . Esta magnitude é razão entre a carga  $Q$ , obtida com uma determinada tensão no capacitor que contém um dado dielétrico e a carga  $Q_0$ , que poderia obter-se com um capacitor das mesmas dimensões, com a mesma tensão, se entre os eletrodos existisse vácuo.

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_0} = 1 + \frac{Q_d}{Q_0} \quad (4.3)$$

Da expressão 4.3 se deduz que a permissividade relativa de qualquer substância dielétrica é maior que a unidade. A constante dielétrica  $\epsilon$  também pode ser determinada pela razão entre a capacitância de um capacitor com o dado dielétrico e a capacitância de outro capacitor com as mesmas dimensões cujo dielétrico seja o vácuo.

Voltando ao estudo do fenômeno da polarização, deve-se distinguir os tipos fundamentais de polarização:

- Ao primeiro tipo de polarização pertencem as polarizações *eletrônica* e *iônica* que ocorre de um modo praticamente instantâneo sob a ação de um campo elétrico e sem dissipação de energia, se caracterizando por um deslocamento elástico de íons ou elétrons ligados ao núcleo de um átomo. A polarização eletrônica diminui com o aumento da temperatura, devido a dilatação do dielétrico e conseqüente diminuição do número de partículas por unidade de volume. Já a polarização iônica é intensificada com o aumento da temperatura, uma vez que se debilitam as forças elásticas interiônicas quando aumentam as distâncias entre os íons quando o corpo se dilata;
- A *polarização dipolar* difere da eletrônica e da iônica com relação ao movimento térmico das partículas. As moléculas dipolares, que se encontram em movimento térmico caótico, se orientam parcialmente pela ação do campo, o qual é a causa da polarização. A polarização dipolar é possível se as forças moleculares não impedirem os dipolos de se orientarem de acordo com o campo. Ao aumentar a temperatura se enfraquecem as forças moleculares e diminui a viscosidade da substância, de forma que se intensifica a polarização dipolar. No entanto, ao mesmo tempo aumenta a energia dos movimentos térmicos das moléculas, o que faz que diminua a influência orientadora do campo. De acordo com isto, a polarização dipolar aumenta a princípio com o aumento da temperatura, enquanto que o enfraquecimento das forças moleculares influencia mais que a intensificação do movimento térmico caótico. Depois, quando esta última se intensifica, a polarização dipolar cai a medida que aumenta a temperatura;
- A polarização estrutural aparece apenas em corpos amorfos e em sólidos cristalinos polares como no caso do vidro, onde um corpo amorfo é parcialmente constituído de partículas de íons. A polarização estrutural vem a ser a orientação de estruturas complexas de material, perante a ação de um campo externo, aparecendo devido a um deslocamento de íons e dipolos, na presença de aquecimento devido a perdas Joule. Quanto a sua dependência com a temperatura têm comportamento semelhante à polarização dipolar.

As particularidades da polarização permitem dividir todos os dielétricos em vários grupos.

Ao primeiro grupo podem pertencer os dielétricos que possuem somente a polarização eletrônica, por exemplo as substâncias sólidas não polares ou debilmente polares em estado cristalino ou amorfo (parafina, enxofre, poliestireno), assim como os líquidos e gases não polares ou debilmente polares (benzeno, hidrogênio e outros).

Ao segundo grupo pertencem os dielétricos que possuem ao mesmo tempo polarização eletrônica e dipolar. São estas as substâncias polares (dipolares) orgânicas, semilíquidas e sólidas (algumas resinas, celulose, alguns hidrocarbonetos cloretados, etc).

Ao terceiro grupo pertencem os dielétricos inorgânicos sólidos com polarização eletrônica, iônica e íon-eletrônica dipolar. Este grupo pode ser dividido no subgrupo 1) com polarização eletrônica e iônica ao qual pertencem principalmente as substâncias cristalinas com empacotamento denso de íons (quartzo, mica, sal e óxido de alumínio) e o subgrupo 2) com polarização eletrônica, iônica de dipolar ao qual pertencem os materiais que contem fase vítrea (porcelana) e os dielétricos cristalinos com empacotamento não denso.

A um quarto grupo pertencem os componentes ferroelétricos, que se caracterizam por ter polarização espontânea (nos campos elétricos alternados, os materiais com polarização espontânea se caracterizam por uma considerável dissipação de energia), eletrônica e iônica combinadas. Seriam estes materiais o sal de Seignette e o de Rochelle, titanato de Bário e outros.

Esta classificação dos dielétricos permite que suas propriedades elétricas sejam até certo ponto pré-determinadas.

#### **4.2 - Comportamento dos Dielétricos em Serviço**

Uma vez que uma certa porção de isolamento apresenta uma dada resistência, podemos falar em resistividade do material, se bem que esta seja influenciada por uma diversidade de fatores. Por exemplo, a temperatura afeta sensivelmente o valor da resistividade e, de uma maneira geral, o aumento da temperatura provoca uma diminuição da resistividade dos materiais isolantes.

*Resistência de Isolamento* - O dielétrico impede a passagem da corrente elétrica enquanto o campo elétrico nele estabelecido não ultrapassar um determinado valor que depende da natureza do dielétrico e das suas condições físicas.

Este impedimento porém, não é total pois, se uma determinada porção do isolante estiver submetida a uma tensão  $U$ , ela será atravessada por uma corrente  $I$ , sendo o quociente entre  $U$  e  $I$  designado por resistência de isolamento.

A resistência de isolamento não é constante, isto é, os isolantes não obedecem, de uma forma geral, à lei de Ohm. No caso do comportamento dos gases, já vimos que só para valores baixos de tensão estes obedecem àquela lei. No caso dos dielétricos sólidos, a curva de variação da corrente com a tensão já tem um aspecto diferente, sendo de uma forma geral do tipo da apresentada na Fig. 4.2.

A primeira parte da curva corresponde aproximadamente a uma proporcionalidade entre a intensidade de corrente e a tensão, a partir de um determinado valor de tensão, o crescimento de corrente acentua-se e ao atingir-se um valor  $U_M$  da tensão, a corrente cresce rapidamente mesmo que se faça descer o valor de tensão.

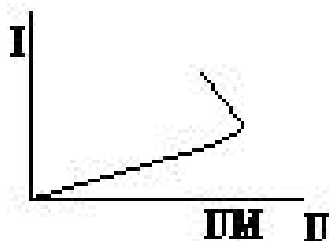


Fig. 4.2 - Lei de variação da corrente com a tensão nos dielétricos sólidos

Esta última parte da curva corresponde à perfuração do isolamento ou, pelo menos, antecede-a de um pequeno intervalo de tempo, pois a libertação de calor engrandecida pelo aumento da corrente vai rapidamente provocar a perfuração.

**Resistência Superficial** - No caso dos isolantes sólidos de muito grande resistividade, a resistência através da sua massa é também elevada, sendo muito pequena a corrente que os atravessa. Ora acontece que, pela acumulação de poeira e umidade na superfície das peças isoladoras, se forma um novo caminho para a passagem da corrente elétrica, o qual se diz ser superficial.

Isto acontece especialmente nas peças isoladoras expostas ao tempo, como por exemplo, os isoladores de linhas de transmissão aéreas. À resistência do novo circuito é dado o nome de resistência superficial e, neste caso, a resistência de isolamento é dos dois circuitos em paralelo, superficial e de massa. (Ver Fig. 4.3)

O aumento da temperatura faz atenuar a importância da resistência superficial, pois a de massa decresce em relação àquela.

**Rigidez Dielétrica** - Para poder exprimir numericamente a capacidade de um determinado material isolante suportar tensões elevadas, define-se uma grandeza a que se dá o nome de rigidez dielétrica e que é definida como sendo o valor do campo elétrico para o qual se dá a ruptura do isolante.

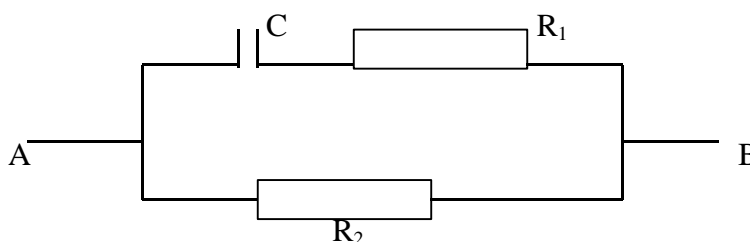


Fig. 4.3 - Circuito Equivalente de um dielétrico com perdas de energia e correntes de fuga.

Esta grandeza está longe de ser constante para cada material, pois depende de muitos fatores, tais como a espessura do isolante, as dimensões e forma dos eletrodos utilizados para a aplicação da tensão, a frequência da tensão aplicada, o número de aplicações de tensão na unidade do tempo (fadiga do material), a temperatura, grau de umidade, etc.

Como é difícil conhecer o valor do campo no momento da ruptura, visto ele não ser normalmente uniforme, é costume definir-se a rigidez dielétrica (RD) simplesmente pelo quociente da tensão aplicada no momento da ruptura pela espessura do isolamento e como a R.D.

varia com a espessura do isolante é costume indicar esta ao referir aquela. Por exemplo para a mica a RD varia de 600 a 750 kV/cm, medida para espessura de 1mm.

*Rigidez dielétrica superficial* - No caso dos isolantes sólidos, pode acontecer que o arco disruptivo, em vez de atravessar a sua massa, salte pela sua superfície.

Ao quociente da tensão pela distância entre os condutores é dado o nome de rigidez dielétrica superficial. Esta depende, evidentemente, da forma do isolante e do estado da sua superfície.

*Perdas nos dielétricos* - Nos dielétricos sujeitos a uma tensão contínua verifica-se uma perda por efeito Joule tal como nos condutores. A corrente de perdas, se bem que muito limitada, dá lugar a um certo aquecimento. Estas perdas não têm importância a não ser quando dão lugar a um aquecimento permitindo, por consequência, maior corrente e maiores perdas.

Nos dielétricos sujeitos a uma tensão alternada dá-se, da mesma forma, a perda por efeito Joule, mas surge um outro fenómeno que origina perdas e que tem o nome de histerese dielétrica. A energia perdida é também transformada em calor. O nome deste fenómeno é dado pela analogia existente com a histerese magnética. A explicação física das perdas por histerese dielétrica é dada por consideração da falta de homogeneidade do dielétrico.

*Ângulo e Fator de Perdas* - Quando um dielétrico está sujeito a um campo elétrico alternado, a corrente que o atravessa deveria estar avançada de  $\pi/2$  em relação à tensão, mas pelo fato de existir uma queda ôhmica através da massa do isolante, haverá uma componente da corrente que fica em fase com a tensão e o ângulo de diferença de fase será  $(\pi/2 - \delta)$ , sendo  $\delta$  chamado ângulo de perdas. Este valor pode ir de poucos minutos, se o dielétrico for bom, até a alguns graus, se for de má qualidade.

À  $\text{tg}\delta$ , que pode tomar igual ao ângulo expresso em radianos (por se tratar de ângulos muito pequenos) é dado o nome de fator de perdas. A potência perdida no dielétrico será dada por:

$$P = U.I.\cos(\pi/2 - \delta) = U.I.\text{sen}\delta \approx U.I.\delta \quad (4.4)$$

Cada material é caracterizado por um certo fator de perdas, o qual, contudo, depende das condições físicas a que o mesmo se encontra submetido, principalmente a temperatura.

*Ruptura dos Dielétricos* - Quando o campo elétrico a que um dado dielétrico está sujeito ultrapassa um determinado valor se dá a ruptura do dielétrico. A maneira como esta se produz e as suas consequências são porém, diferentes conforme o tipo de dielétrico.

Assim, é compreensível que, se a ruptura se produzir num dielétrico fluido, a matéria atingida pela descarga é logo substituída por outra e, se o fenómeno não repetir, a sua única consequência é o aparecimento de partículas carbonizadas no seio do fluido.

No caso dos dielétricos sólidos já assim não acontece, pois a descarga implica a sua destruição no ponto em que a ruptura se verifica.

*Efeito Corona* - Se, entre dois condutores, existir uma grande diferença de potencial, junto às suas superfícies poderá surgir um campo elétrico de valor tal que o gás ou o ar, no meio do qual se encontram seja ionizado.

Se isto acontecer, o efeito obtido é equivalente ao aumento das dimensões dos condutores, visto o gás ou o ar ionizado se tornar condutor também. Nessas condições, dá-se como que uma aproximação dos condutores e um aumento da sua superfície. Estes dois fatores que se verificam tendem a modificar o campo nos dois sentidos, prevalecendo um ou outro conforme as circunstâncias.

De uma maneira geral, podemos dizer que, se os condutores forem de pequena seção e estiverem bastante afastados, o efeito da ionização traduz-se por uma diminuição do campo na zona circunvizinha. Desta forma, ionizada a primeira camada que envolve os condutores, a ionização não prossegue nas camadas seguintes e o fenômeno não progride.

A ionização limita-se como que a uma bainha à volta dos condutores, visível sob o aspecto de uma luz azulada e sensível pelo cheiro a ozônio. Esta situação é aquilo a que chamamos de efeito coroa ou corona.

Se a forma e a distância dos condutores forem outras, pode dar-se o contrário, isto é, o campo ir mantendo nas camadas sucessivas valores suficientemente altos para provocarem a ionização até o ponto de se estabelecer um caminho de gás ou ar ionizado entre os condutores.

As cargas elétricas deixam de encontrar resistência e passam em grande quantidade de um condutor para o outro, sob a forma de um arco. É a *descarga elétrica*.

### **4.3 - Materiais Isolantes**

Conforme a aplicação, alguns isolantes apresentam, em certos casos, nítida superioridade sobre outros, sendo inteiramente inadequados em casos diferentes.

O exemplo da porcelana é típico: sendo material excelente para isolamento de linhas aéreas, pelas suas propriedades dielétricas, químicas e mecânicas, é inteiramente inadequada aos cabos isolados, pela falta de flexibilidade.

A borracha apresenta excelentes qualidades químicas, mecânicas e elétricas, de modo que é geralmente utilizada nos fios e cabos, mas não é completamente à prova de água, não resiste a temperaturas elevadas, é atacável pelos óleos e pelo ozona.

O fato de um material apresentar propriedades elétricas muito superiores a outros (alta rigidez dielétrica, alta resistividade, baixas perdas) não é suficiente para determinar o seu emprego se as qualidades mencionadas não forem acompanhadas de propriedades químicas e mecânicas adequadas. Assim, às boas propriedades elétricas pode corresponder uma redução de espessura do isolante a empregar nos condutores das máquinas elétricas; é porém necessário que o material seja suficientemente forte para resistir aos esforços mecânicos durante a construção e o funcionamento.

Muitas das substâncias industrialmente empregadas como isolantes não são inteiramente homogêneas - especialmente as de origem orgânica como o algodão, seda, madeira, óleos, etc - sendo além disto em geral deterioráveis.

Uma primeira classificação dos isolantes pode ser feita de acordo com o seu estado:

*I - Gases:* Ar, anidrido carbônico, azoto, hidrogênio, gases raros, hexafluoreto de enxofre.

*II - Líquidos:*

A - Óleos minerais: óleos para transformadores, interruptores e cabos.

B - Dielétricos líquidos à prova de fogo: Askarel.

C - Óleos vegetais: Tung, linhaça.

D - Solventes: (empregados nos vernizes e compostos isolantes) Álcool, tolueno, benzeno, benzina, terebentina, petróleo, nafta, acetatos amílicos e butílicos, tetracloreto de carbono, acetona.

*III - Sólidos aplicados em estado líquido ou pastoso:*

A - Resinas e plásticos naturais: resinas fósseis e vegetais, materiais asfálticos, goma laca.

B - Ceras: cera de abelhas de minerais, parafina.

C - Vernizes e lacas: preparados de resinas e óleos naturais, produtos sintéticos, esmaltes para fios, vernizes solventes, lacas.

D - Resinas sintéticas: (plásticos moldados e laminados) resinas fenólicas, caseína, borracha sintética, silicones.

E - Compostos de celulose: (termoplásticos) acetato de celulose, nitrocelulose.

F - Plásticos moldados a frio: cimento portland empregado com resinas ou asfaltos.

*IV - Sólidos:*

A - Minerais: quartzo, pedra sabão, mica, mármore, ardósia, asbesto.

B - Cerâmicos: porcelana, vidro, micalex.

C - Materiais da classe da borracha: borracha natural, guta-percha, neoprene, buna.

D - Materiais fibrosos (tratados e não tratados): algodão, seda, linha, papel, vidro, asbesto, madeira, celofane, rayon, nylon.

Além desta classificação cujo critério é a natureza dos materiais isolantes, estes podem ser classificados visando a sua aplicação, especialmente na construção de máquinas e aparelhos elétricos, cuja temperatura é limitada não pelos materiais condutores ou magnéticos (que são metálicos) e sim pelos isolantes. A durabilidade destes depende de fatores diversos, entre os quais predomina a temperatura, como mostrado na tabela a seguir.

A duração dos materiais utilizados para isolamento de máquinas e aparelhos elétricos depende de vários fatores, tais como a temperatura, os esforços elétricos e mecânicos, as vibrações, a exposição a produtos químicos, umidade e a sujeira de qualquer espécie.

Tabela 4.1 - Classificação dos materiais isolantes em relação à sua estabilidade térmica em serviço (NBR 7034)

Classe	Temperatura máxima admissível em serviço
Y (O)	90°C (algodão, seda e papel sem impregnação)
A	105°C (idem impregnados)
E	120°C (alguns vernizes, esmaltes e fibras)
B	130°C (mica, asbesto com aglutinante, EPR)
F	155°C (mica, fibra de vidro com aglutinante)
H	180°C (elastômeros de silicato)
C	> 180°C (porcelana, vidro, quartzo, cerâmicas)

Reconhece-se que os materiais isolantes poderão não suportar as temperaturas a eles atribuídas na classificação se estas forem mantidas durante tempo ilimitado. Essas temperaturas

todavia são tais que permitirão uma duração adequada do material se forem mantidas durante longos períodos de tempo com temperatura mais baixa.

As normas de equipamento elétrico especificam geralmente a elevação de temperatura permissível acima do ar ambiente ou de outro meio refrigerante.

#### 4.3.1 - Isolantes gasosos

O isolante gasoso de maior uso é sem dúvida o ar, excetuando-se algumas aplicações de gases especiais, notadamente o SF<sub>6</sub>, hexafluoreto de enxofre.

O ar, como isolante, é amplamente usado entre todos os condutores sem isolamento sólido ou líquido, como, por exemplo, nas redes elétricas de transmissão e eventualmente de distribuição, onde os condutores são fixados a certa altura através de cruzetas, ou de braços, os quais, fixos a postes ou torres, são equipados com isoladores (de porcelana, vidro ou resina com borracha). Entre esses condutores nus, o isolamento é somente o ar, de tal modo que o afastamento entre os fios ou cabos é, entre outros fatores, consequência da rigidez dielétrica do ar. Esse valor varia acentuadamente com as condições de umidade, impurezas e temperatura. Seu valor a seco e limpo, a 20°C, é de 45kV/mm; decresce, entretanto, rapidamente, a 3kV/mm, sob ação da umidade, de contaminações provenientes de poluição, da pressão atmosférica e da temperatura, fatores normais no ambiente externo e, conseqüentemente, esse valor precisa ser considerado nos projetos.

O afastamento entre condutores não é, porém, apenas função das características elétricas, mas também das mecânicas e de agentes, tais como ventos e outros, que vão determinar, em conjunto, a menor distância entre dois cabos.

Outro gás de uso bastante recente é o já mencionado hexafluoreto de enxofre, cujas características são apresentadas a seguir:

Peso molecular: 146,05

Condutividade térmica à pressão atmosférica: 1,4W/cmK a 40°C

Viscosidade (em CP) à pressão atmosférica: 0,015 a 25°C

Capacidade de ruptura: 100A à 1 atm. de pressão

Fator de perdas:  $\text{tg } \delta < 10^{-3}$  a - 50°C

$\text{tg } \delta < 2 \times 10^{-7}$  a 25°C

Tensão de ruptura: 125kV a 2 atmosferas de pressão com afastamento de 10mm.

#### 4.3.2 - Isolantes líquidos

Os isolantes líquidos atuam geralmente em duas áreas, ou seja a refrigeração e a isolamento. Seu efeito refrigerante é o de retirar o calor gerado internamente ao elemento condutor, transferindo-o aos radiadores de calor, mantendo, assim, dentro de níveis admissíveis o aquecimento do equipamento.

No uso diário destacam-se os isolantes líquidos enunciados a seguir.

##### Óleo mineral

Obtenção: obtém-se o óleo mineral a partir do petróleo e, eventualmente, também de outros produtos sedimentares, sendo constituído basicamente de misturas de hidrocarbonatos, gorduras e outras deposições. Seu cheiro é desagradável, de coloração preto-azulada ou marrom, com uma composição dependente do local em que é encontrado. Fundamentalmente se compõe de:

- metana, ou óleos parafinados do qual se extrai 3 a 8% de parafina sólida;
- nafta;
- mistura de dois anteriores.

#### Características

- Ponto de chama: aquecendo-se o óleo gradativamente até temperaturas mais elevadas, começam a aparecer vapores. Por ponto de chama se caracteriza uma certa temperatura, à qual os vapores formam uma chama, se desses vapores aproximarmos uma chama de ignição. A chama formada nos vapores porém, se extingue imediatamente após o afastamento da chama de ignição.
- Ponto de queima: esse é um ponto térmico superior ao anterior, no qual a chama já não se extingue mais, após afastada a chama de ignição. Seu valor costuma ser 30 a 50 °C superior ao ponto de chama.
- Ponto de ignição: é o valor de temperatura, no qual os vapores se incandescem por si mesmos.
- Ponto de solidificação: é o valor de temperatura, em que o óleo deixa de escorrer sob a ação do seu peso próprio, tornando-se denso. O ponto de solidificação é um valor característico a baixas temperaturas.
- Viscosidade: entende-se por viscosidade a resistência existente entre duas camadas adjacentes de um líquido. O uso dos óleos para determinadas aplicações técnicas depende acentuadamente do seu valor de viscosidade. Assim, devem ser pouco viscosos, os óleos destinados a máquinas leves e de alta velocidade, bem como os óleos para transformadores e dispositivos de comando (disjuntores, interruptores). Já em equipamentos que trabalham com pressões elevadas, é necessário o uso de óleos pesados (ou de maior viscosidade). Óleos para máquinas de refrigeração e óleos isolantes, usados em equipamentos ao ar livre, precisam ainda ter adequada viscosidade quando da queda da temperatura ambiente.
- Coeficiente de acidez e de neutralização: É a medida para ácidos orgânicos livres, existentes no óleo, indicando a quantidade de KOH por miligrama (mg) que é necessária para neutralizar a acidez de 1 g de óleo.
- Coeficiente de saponificação: Indica a quantidade de KOH (em mg) necessária para eliminar ácidos e ésteres livres ligados a ácidos, para cada grama de óleo (1 g óleo). O número de saponificação é uma referência para determinar o envelhecimento ocorrido no óleo, ou senão, pode servir para constatar a existência de óleos gordurosos no óleo mineral.
- Coeficiente de oxidação: É outro valor indicativo do envelhecimento. Seu valor não deve ultrapassar 0,1%. O coeficiente de oxidação depende do regime térmico em que o óleo vai trabalhar, da ação de metais sobre as características do óleo e de outros agentes.

Os óleos minerais isolantes são processados através de uma rigorosa purificação. Seu uso está concentrado nos transformadores, cabos, capacitores e chaves a óleo. Estes óleos devem ser altamente estáveis, ter baixa viscosidade (serem bastante líquidos), pois, além de sua função dielétrica de impregnação, devem também transmitir o calor. Este é um dos problemas típicos de transformadores, onde o óleo transfere para as paredes do tanque, o calor gerado nos enrolamentos. Óleos mais densos não podem atender a essas condições. No caso dos dispositivos de comando, o óleo deve fluir rapidamente entre os contatos entreabertos, para extinguir rapidamente o arco voltaico. Em cabos e capacitores, o óleo deve também fluir com facilidade, para impregnar totalmente o papel isolante empregado, deslocando e eliminando assim a presença de água e de bolsas de ar em produtos fibrosos, como é o caso dos papéis. Para esse problema, a



tensão superficial do líquido também deve ser suficientemente baixa, tensão essa cujo valor depende do grau de purificação. Quanto maior o grau de purificação, maior a tensão superficial.

A viscosidade recomendada em cada aplicação consta de normas técnicas, devidamente relacionada com a temperatura, sobretudo a temperatura máxima admissível. Assim, o ponto de chama varia de 130 a 145°C.

No caso de óleo para cabos, distinguem-se os papéis impregnados com óleo (óleos grossos) e os cabos em óleo fluido (O.F.) (óleos finos). A Tab. (4.2) apresenta alguns valores característicos desses óleos.

O fator de perdas de bons óleos isolantes, a 20°C, é de aproximadamente 0,001, dependendo porém acentuadamente da temperatura. Para os cabos, o  $\tan \delta$  deve ser baixo, para não provocar aquecimento excessivo da isolação do cabo. O mesmo vale para capacitores.

Tabela 4.2 - Características de óleo para papéis de cabos

Características	Óleo fino	Óleo grosso
Peso específico a 20°C (g/cm <sup>3</sup> )	0,86 a 0,88	0,92 a 0,94
Ponto de solidificação (°C)	- 30	- 5
Ponto de inflamação (°C)	150 - 170	250 a 270
Resistividade (x cm)		
óleo novo a 100°C,	$> 25 \times 10^{12}$	$> 0,5 \times 10^{12}$
após 40 horas a 120°C	$> 2,5 \times 10^{12}$	$> 1,7 \times 10^{12}$
Fator de perdas		
óleo novo a 100°C,	$\leq 5 \times 10^{-3}$	$\leq 40 \times 10^{-3}$
após 40 horas a 120°C	$\leq 30 \times 10^{-3}$	$\leq 70 \times 10^{-3}$

Ao lado do fator de perdas ( $\tan \delta$ ), também a rigidez dielétrica ou a tensão de ruptura obtida em um equipamento de ensaio padronizado, são fatores importantes. Esse valor é de aproximadamente 200 kV/cm para óleos para óleos secos e novos na faixa de temperatura de - 40°C a + 50°C, destinados a transformadores, e destinados a transformadores, e de 120 kV/cm para óleo de disjuntores. Esses valores, porém devem ser usados com cuidado, face às influências dos campos elétricos entre os eletrodos de ensaio, devido à possível variação de seus formatos (planos, esféricos, etc.) e que, devido às diferentes configurações do campo elétrico, levam a campo heterogêneos com número variável de linhas por centímetro quadrado, e conseqüentemente, darão diferentes valores de ruptura, para mesmo afastamento (ou seja, diferentes valores de rigidez dielétrica).

A tensão de ruptura dielétrica mínima varia também com a classe de tensão em que o óleo é usado, bem como do equipamento onde é empregado.

Valores médios nesse sentido se situam entre 80 kV/cm até 140 kV/cm (na faixa de classes de tensão de 34,5 a 220 kV) para transformadores para redes e para instrumentos, e com valores de 40 kV/cm a 80 kV/cm (para classes de tensão de 34,5 a 69 kV) para dispositivos de comando.

No uso de equipamentos possuidores de óleo mineral, uma das providências de rotina é uma sistemática verificação da tensão de ruptura ou da rigidez dielétrica, face à constatação de um envelhecimento relativamente rápido e inexequível para diversas dessas aplicações. Como resultado, os próprios sistemas de manutenção prevêem a retirada periódica de amostras de óleo,

e a verificação de suas características isolantes. Nota-se perfeitamente após um período por vezes relativamente curto (2 a 3 anos) que o óleo perdeu sensivelmente suas propriedades isolantes, reduzindo, por exemplo, em algumas vezes sua rigidez dielétrica. Dependendo do valor obtido, é necessário aplicar processos de purificação ou filtragem ou, em caso extremo, fazer a substituição do óleo envelhecido por outro novo.

A oxidação do óleo é um dos fatores que sempre estão presentes, e que se fazem sentir devido à presença do oxigênio do ar e da elevação de temperatura.

Em grau menor, a luz do dia pode atuar no mesmo sentido, razão pela qual o óleo deve ficar protegido de seus raios de luz. O tipo de cadeia de carbono que está presente também tem sua influência: certas ligações de cadeias de carbono se oxidam com maior facilidade. Como resultado, aparecem diversos ácidos orgânicos, além de água e materiais voláteis. Sob a ação do campo elétrico ou perante descargas internas, poderão acontecer decomposições moleculares, de modo que os produtos ácidos da oxidação se transformam em matérias com cadeia molecular extensa, devido à polimerização ou policondensação progressiva.

O início do envelhecimento do óleo é sempre caracterizado pelo aumento do coeficiente de acidez, apesar de que o grau de envelhecimento não pode ser avaliado com segurança pelo valor numérico desse coeficiente pois, os produtos ácidos que se formam, sofrem novas transformações, deixando de apresentar, assim, um comportamento ácido.

Além da própria contaminação do óleo e da perda parcial de suas propriedades, é importante analisar também as conseqüências da acidez do óleo sobre os demais materiais usados no equipamento. A celulose do papel, por exemplo, tem a tendência de absorver certos tipos de moléculas remanentes nas impurezas do óleo, deslocando este de sua impregnação no papel, ou senão de ser atacado por certas formações moleculares específicas.

Aliás, esse mesmo problema ocorre ao incidir água sobre um papel impregnado com óleo: água desloca o óleo e, sendo o primeiro um mau isolante, cria locais de isolamento deficiente.

Além da rigidez dielétrica, outro fator que pode caracterizar o envelhecimento é a variação do fator de perdas ( $\tan \delta$ ) perante diferentes frequências. A Fig. (4.4) demonstra tal situação, no caso perante uma frequência industrial de 60 Hz. Nota-se que, ao longo do tempo (no caso, praticamente três anos), o óleo corretamente purificado não alterou seu  $\tan \delta$ , o mesmo já não acontecendo com os outros dois. Pela configuração das curvas, é possível concluir ainda sobre os tipos de produtos de oxidação que se apresentaram, e daí escolher a melhor maneira de eliminá-los.

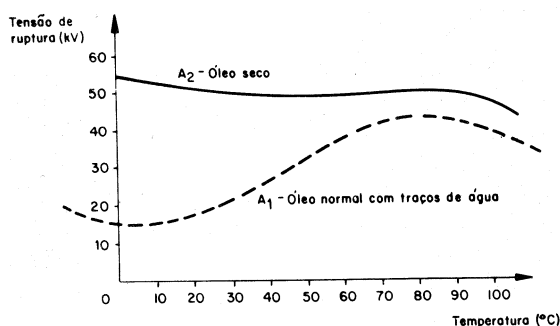


Fig. 4.4 - Variação das perdas dielétricas de óleos minerais em função do grau de pureza e do envelhecimento

Os produtos de oxidação que se formam em uso, geralmente influem menos sobre o valor da rigidez dielétrica do que a presença de certos gases ou água no óleo.

A umidade presente no óleo provém, geralmente do ar; mesmo porque, no processo de fabricação do equipamento, todos os cuidados são tomados para eliminar a umidade, a qual penetra no equipamento em uso, devido à variação das pressões internas: um equipamento ligado se aquece, dilata-se o óleo e o ar interno é expulso do tanque; quando o equipamento é desligado, ocorre um esfriamento de todas as partes, conseqüentes contração, e um vácuo relativo na parte onde o ar foi expulso.

Daí, pela diferença entre pressões, a maior pressão externa forçará a entrada do ar externo. possuidor de certo grau de umidade, que vai se condensar internamente ao tanque, após o que escorre pelas paredes e entra em contato com o óleo.

Conforme já vimos anteriormente, os produtos de oxidação reduzem a tensão superficial do óleo, aumentando a capacidade de associação entre água e óleo, que assim fica em estado de emulsão dentro do óleo. Essa água, mesmo em pequenas quantidades (o óleo a 60 °C absorve 2% de água) irá influir de modo acentuado sobre a rigidez dielétrica do óleo. Problema semelhante ocorre se o óleo absorve gases, os quais também apresentam características isolantes inferiores às dos óleos, podendo levar assim a problema de baixa isolamento.

Observa-se, em resumo, que a deterioração do óleo mineral pode ocorrer por diversas razões, externas e internas, devidas ao próprio processo de obtenção do óleo, ao contato com outros componentes (particularmente metálicos) e com elementos resultantes do ambiente em que o óleo vai operar. De todos estes, resultam produtos líquidos, sólidos e, eventualmente, gasosos, que influem negativamente sobre o óleo, e que assim, precisam ser eliminados. Surgem daí diversos processos de purificação como a eliminação de impurezas sólidas através de filtro-prensa ou centrifugação e eliminação da água em câmara a vácuo aquecida.

Outro problema apresentado pelos óleos minerais é a sua inflamabilidade, motivado não pelo contato direto com uma chama, mas sim devido à combustão espontânea quando sobre aquecido, colocando em risco o pessoal e os equipamentos próximos.

Por essa razão, equipamentos que usam óleos minerais dispõe de controladores temperatura (termômetros com contatos), que numa primeira etapa, ligam um alarme comunicando que o óleo atingiu seu valor máximo admissível; se nenhuma providência for tomada para reduzir a temperatura (redução de carga, aumento da velocidade de retirada de calor por refrigeração intensa, etc.), então, numa segunda etapa, é acionado o disjuntor de entrada, que assim desliga o equipamento.

### O askarel

No desenvolvimento de líquidos que possam ser substitutos do óleo mineral, encontramos o askarel, quimicamente se compõe de um pentaclorodifenil ( $C_6H_2Cl_3$   $C_6H_2Cl_3$ ) que se destaca sobretudo pelo fato de não ser inflamável, apresentando porém uma série de outros problemas e cuidados, que fazem com que hoje já se esteja a substituí-lo, provavelmente por um óleo à base de silicone. O askarel também não pode ser usado em aplicações onde se apresentam arcos voltaicos expostos, pois, nessas condições de temperatura, haverá rompimento da cadeia de HCl e desprendimento do cloro. Seu emprego, entretanto, já é mais recomendado em cabos e capacitores com isolamento em papel ( $\epsilon = 5$  a 6) pois o askarel ( $\epsilon = 5$ ), ao impregnar o papel confere-lhe uma característica mais homogênea e, conseqüentemente, uma distribuição de campo elétrico mais uniforme, do que se o impregnante fosse o óleo mineral ( $\epsilon = 2$ ). Com isto,, a capacitância dos capacitores pode ser elevada em até 40%.

Os askaréis se caracterizam ainda pela ausência de envelhecimento e da formação de subprodutos durante o seu uso. Com isso, varia pouco o valor da rigidez dielétrica de askaréis

novos e em uso, não havendo necessidade de sistemas de purificação. Além disso, esse valor de rigidez dielétrica costuma ser mais elevado que o dos óleos isolantes. Sua temperatura de serviço é um pouco superior à do óleo, se localizando a 110°C.

Os askaréis se distinguem ainda dos óleos minerais, no seu manuseio. Enquanto os óleos são neutros, pouco ou nada reagindo com os materiais elétricos convencionais, os askaréis, devido à presença do cloro, são quimicamente ativos, atacando o sistema respiratório e visual dos que o manuseiam, ataque que se estende a alguns produtos dos componentes. Dessa forma, além de certas medidas de prevenção contra intoxicação orgânica, o uso dos askaréis exige uma verificação de seu comportamento com os materiais com os quais ficará em contato.

Alguns nomes comerciais do askarel são Clophen, Inerteen, Aroclor. O preço do askarel, é geralmente dez vezes superior ao do óleo mineral, o que também limita seu uso.

### Óleos de silicone

Os óleos de silicone (cadeias Si - O - Si associado a grupos metílicos e fenólicos) são líquidos incolores e transparentes com uma gama bastante ampla de viscosidades e pontos de ebulição, caracterizando-se por um ponto de chama bastante elevado (300°C e acima) e baixo ponto de solidificação (- 100°C); como consequência, sua faixa de emprego se situa entre 200°C

e - 60°C, faixa essa que ainda pode ser ampliada, sob certas condições. Mesmo variando a temperatura, a viscosidade não se modifica na mesma proporção, dentro de valores bem menores que os óleos minerais. São recomendados como lubrificantes em máquinas que trabalham a temperaturas muito altas ou baixas.

Utilizando-se das características básicas do silício, os silicones permanecem neutros perante a grande maioria dos elementos, o que lhes confere uma elevada estabilidade química e conseqüente ausência de envelhecimento. Ainda, se apresentam repelentes à água, evitando assim perda de características isolantes, e serviço. Consulte os valores numéricos das características elétricas, térmicas e químicas na Tab. 4.4.

Em áreas paralelas, graxas e óleos de silicone são preferidos como elemento de separação entre a massa de um molde e o molde propriamente dito, nas aplicações de injeção em plástico.

Silicones líquidos encontram ainda extensa aplicação em numerosos processos e produtos industriais tais como acréscimos de tintas e vernizes, lubrificantes e outros. São solúveis em benzol, toluol, éter e álcoois de grau superior, sendo insolúveis em óleos minerais e álcoois de grau inferior. O preço do óleo de silicone é, comparativamente muito alto em relação ao óleo mineral.

### *4.3.3 - Isolantes Pastosos e Ceras*

As pastas ou ceras utilizadas eletricamente se caracterizam por um baixo ponto de fusão, podendo ter estrutura cristalina, baixa resistência mecânica e baixa higroscopia.

### Parafina

É o material pastoso não-polar mais usado e mais barato. É obtido de uma das fases de decomposição do petróleo, com elevado teor de metana, através de uma destilação adequada.

Após o esfriamento desse destilado, a pasta de parafina se separa do volume restante de material; a parafina assim obtida passa por processo de purificação subsequente, para eliminar restos de óleo e de materiais residuais de fácil oxidação. Uma parafina de boa qualidade se apresenta com os valores numéricos da Tab.(4.4) com aparência branca, livre de ácidos, de bolhas impurezas. A constante dielétrica ( $\epsilon$ ) se reduz com elevação de temperatura, mudando bruscamente seu valor quando passa do estado sólido ao líquido. É altamente anti-higroscópio ou repelente à água, o que mantém elevada sua rigidez dielétrica e a resistividade superficial e transversal, e o recomenda como material de recobrimento de outros isolantes.

A baixa estabilidade térmica - veja seu ponto de fusão na tabela - representa vantagem e desvantagem. Se um lado, esse valor demonstra a desnecessidade de calor elevadas para liquefazer a parafina durante um processo de impregnação ou recobrimento, facilitando assim o seu emprego, essa mesma propriedade limita seu uso para os casos em que o nível de aquecimento do componente se mantém baixo. Esse último caso praticamente só ocorre na área das baixas perdas Joule às baixas correntes circulantes, situação encontrada particularmente nos componentes eletrônicos. Assim, a importante característica de repelência à água, muito procurada para componentes eletrotécnicos usados ao ar livre, não pode ser satisfatoriamente resolvida com a parafina.

#### Pasta de silicone

Com uma estrutura molecular semelhante à dos óleos de silicone, e guardando também basicamente as mesmas propriedades, as pastas de silicone são usadas mais com finalidades lubrificantes do que elétricas, quando frequentemente recebem o acréscimo de pó de grafita para melhorar suas características antifricção. São usadas, eletricamente, para proteção de partes onde se deve reduzir a oxidação, tal como peças de contato, em articulações condutoras e outras, e também são usadas como pastas de recobrimento de partes isolantes expostas que devem manter elevada resistividade superficial. Neste último caso, prevalece a característica da pasta de silicone de ser repelente à água.

#### Resinas

Um verniz é aplicado na forma líquida, e solidifica durante a sua aplicação, passando ao estado sólido em sua fase final. Assim, o verniz não é propriamente um isolante líquido, apesar de ser adquirido nesse estado físico. Um verniz é constituído de um solvente e uma matéria-prima capaz de formar uma película, um filme geralmente representado por uma resina.

Define-se resina como uma família bastante grande, frequentemente ampliada, de matérias-primas que, apesar de origens e características diferentes possuem composição química ou propriedades físicas semelhantes. São misturas estruturalmente complexas, de elevado número molecular e elevado grau de polimerização. Perante baixas temperaturas, as resinas são massas vitrificadas, amorfas. A maioria das resinas se apresenta quebradiça à temperatura ambiente, dependendo da maior espessura da camada em que se encontram. Em camadas finas se tornam flexíveis. Quando aquecidas, podem amolecer dentro de certos intervalos de temperatura, se tornam plásticas e podem chegar ao estado líquido. Geralmente as resinas não se caracterizam por um certo ponto de fusão.

As resinas podem ser classificadas em naturais e sintéticas. Resinas naturais são de origem animal (como a goma-laca) ou vegetal (Kopal). São obtidas na forma final, bastando-lhes aplicar um processo relativamente simples de purificação.

Já as resinas sintéticas, em número maior e sempre crescente, são obtidas por complexos processos químicos, reunindo diversas matérias-primas. Dentro desse grupo se destacam geralmente, as resinas polimerizadas, as condensadas e as à base de celulose.

As resinas podem ainda ser classificadas em termofixas (termoestáveis) ou termoplásticas. Essa classificação se baseia na produção fundamental de plásticos, onde a resina, ao lado de outras matérias-primas, é aquecida até sua plastificação, estado em que é colocada em moldes que lhe conferem a forma final de uso, sendo posteriormente esfriada até a temperatura ambiente, na qual se apresenta sólida. Ambos os tipos, os termofixos e termoplásticos, têm, até esse ponto, comportamento geral parecido.

Se agora, após a solidificação, aplicarmos novamente a temperatura de plastificação a ambas as resinas, vamos notar que a resina termoplástica novamente amolece, enquanto a termofixa se mantém sólida. Continuando o aquecimento da termofixa, atingiremos uma mudança do seu estado apenas a temperaturas bem mais elevadas, nas quais se carboniza sem amolecer.

Em relação às famílias de resinas antes mencionadas, vamos notar que uma grande parte das resinas polimerizadas pertence aos termoplásticos, enquanto que as condensadas podem tanto ser termofixas quanto termoplásticas. As que têm origem na celulose são termoplásticas.

### Vernizes

Os vernizes são produtos resultantes de resinas com um solvente, este último eliminado na fase final do processo. Usando resinas, como as analisadas no capítulo anterior, os vernizes mantêm na forma final as propriedades das resinas, classificando-se em três grupos, a saber:

- a) vernizes de impregnação,
- b) vernizes de colagem,
- c) vernizes de recobrimento.

### Vernizes de impregnação

É o tipo geralmente encontrado em associação com papéis, tecidos, cerâmicas porosas e materiais semelhantes. Sua função é preencher o espaço deixado internamente a um material, com um isolante de qualidade e características adequadas, evitando a fixação de umidade, que seria prejudicial às características elétricas.

O seu processo de aplicação é o seguinte: o material isolante fibroso ou poroso é colocado numa estufa, para dele se retirar toda ou quase toda a umidade, que ocupou os interstícios do material devido à sua presença no ar circundante. Esta eliminação é feita em estufa, regulada para o material que se deseja secar, para evitar que a temperatura presente venha a prejudicar as características do material. Uma vez eliminada a umidade, o material é colocado em contato direto com o verniz de impregnação, seja através da imersão em recipientes contendo o verniz seja na forma de injeção do verniz sobre o material, sob pressão. Com o fechamento de poros e vazios dentro do material, eleva-se acentuadamente a condutividade térmica e a rigidez dielétrica e reduz-se higroscopia, o que beneficia ainda mais as características do isolante impregnado.

Uma vez impregnado, o verniz é seco em estufa, eliminando-se o solvente. Essa eliminação pode eventualmente ser feita ao ar livre, sem estufa; observa-se, entretanto, que vernizes que secam ao ar livre apresentam geralmente elevado grau de envelhecimento.

Além da melhoria das propriedades elétricas e térmicas, observa-se também uma melhoria das propriedades mecânicas, uma vez que, com a complementação do volume por um material sólido, a transferência de tensões mecânicas se faz em toda a seção aplicada, o que reduz a concentração de esforços e eleva os valores que podem ser aplicados.

### Vernizes de recobrimento

Se destinam a formar sobre o material sólido de base, uma camada de elevada resistência mecânica, lisa, e à prova de umidade e com aparência brilhante. Sua aplicação, assim é especialmente necessária em corpos isolantes porosos e fibrosos, bem como na cobertura de metais (fios esmaltados). No caso particular de seu uso com isolantes porosos e fibrosos a sua ação se faz sentir por uma elevação da resistência superficial de descarga e conseqüente tensão de descarga externa.

Eleva-se a resistência à penetração de umidade, apesar de que, para proteger neste sentido, o isolamento também deveria ser impregnado, pois qualquer fissura ou remoção da camada de verniz de cobertura pode colocar o isolamento em perigo. Sendo a superfície lisa, torna-se mais difícil a deposição de poeiras e outros detritos, além de facilitar a limpeza.

### Vernizes de colagem

Diversos isolantes quando purificados, perdem consistência devido à eliminação de materiais de colagem entre suas diversas porções. Em outros casos, o próprio isolamento, em geral sintético, não apresenta a necessária consistência ou coeficiente de atrito, para permitir seu uso em eletricidade. Como exemplo do primeiro caso, podemos citar a mica, que ao ser purificada, se desmancha grande número de pequenas lâminas, sem possibilidade de se formar um sólido de dimensões definidas e fixas. Outro caso, como exemplo da segunda hipótese, é o da fibra de vidro. As fibras em si são lisas, não se estabelecendo entre elas, mesmo formando um tecido, a necessária consistência para que o tecido de fibra de vidro possa ser usado tecnicamente na área elétrica.

Note-se que, em ambos os casos, não se trata da necessidade de um verniz que se impregne no sólido, pois os sólidos em si são bastante compactos; por outro lado, também não é o caso de um recobrimento. Portanto, nessas condições, o necessário é um verniz que cole entre si as diversas partes do isolamento: é o verniz de colagem.

Uma outra aplicação desse tipo de verniz é também a colagem de isolantes sobre metais. Distinguem-se tais vernizes por baixa higroscopia e boas características isolantes.

Na prática, uma verniz não apresenta unicamente uma dessas propriedades. Todos eles possuem uma certa predominância de alguma das três propriedades indicadas, vindo porém acompanhadas de mais ou duas outras propriedades.

### *4.3.4 – Isolantes Sólidos*

#### Isolantes fibrosos

Fibras isolantes podem ser orgânicas e inorgânicas. As orgânicas mais encontradas são a celulose, o papel, o algodão, a seda e outras fibras sintéticas ou naturais. Já as inorgânicas são representadas sobretudo pelo amianto e fibra de vidro.

#### O papel

A matéria-prima básica do papel é a celulose. Uma celulose praticamente pura é obtida a partir do algodão, sobretudo usando aquelas fibras que não são usadas para finalidades têxteis. Entretanto, a maior parte da celulose provém de árvores, de mais diferentes tipos.

É muito freqüente até os dias atuais o uso de papel para finalidades elétricas, sobretudo devido à grande flexibilidade, capacidade de obtenção em espessuras pequenas, preço geralmente razoável e estabilidade térmica em torno de 100°C, o que é também razoável. O maior problema

do papel está em sua elevada higroscopia, o que condiciona seu uso na eletrotécnica e uma impregnação adequada com óleos ou resinas.

Essa elevada higroscopia é consequência da disposição irregular e cruzada das fibras, deixando grande número de aberturas ou interstícios no seu interior, que na impregnação, são ocupados por isolante adequado. Geralmente apenas 40% do volume do papel é de fibras, o restante são espaços livres.

Além das favoráveis propriedades elétricas do papel, ele se destaca por uma elevada resistência mecânica, tanto ao longo da fibra quando transversalmente. Esse comportamento é importante, por exemplo, no uso do papel como isolante de cabos, onde, tanto na fabricação quanto no uso, os papéis ficam sujeitos a acentuados esforços de tração e de compressão, quando o cabo é tracionado e dobrado. A tração é mais acentuada durante a própria aplicação do papel como camada isolante sobre o material condutor. Nesse processo, aplica-se uma acentuada força de tração, para se evitar ao máximo a existência de bolhas de ar entre o condutor e o papel e entre as camadas de papel entre si.

O papel também permite um dobramento acentuado sem “quebrar” suas fibras, característica importante quando o diâmetro da peça a ser isolada é pequeno ou quando existem ângulos de pequeno valor.

O comportamento térmico do papel é outro aspecto. Nesse sentido, a propriedade de suportar ou não certos níveis de temperatura depende acentuadamente da natureza da fibra. Celulose sulfitada não pode ser solicitada, por exemplo, a 100°C por um tempo razoavelmente longo, ao contrário de celulose sulfatada, que não apresenta maior modificação de propriedades quando exposta a 100°C, durante uma semana. O envelhecimento da fibra desse papel de celulose ainda é mínimo a 120°C se forem aplicados durante 48 horas, ou 135°C durante algumas horas. Acima desses valores, procede-se uma modificação molecular da celulose devido à ação do vapor de água e de outros gases prejudiciais.

Pelas razões expostas, um papel ao ser utilizado eletricamente, deve ser seco a vácuo, quando então fica livre da umidade que penetra no material durante o seu próprio manuseio na fabricação das camadas isolantes.

Papéis são utilizados ainda hoje em grande número de casos, apesar de ser um produto em uso desde longa data e dos problemas e cuidados que devem ser tomados. Observa-se porém, que a tendência é substituí-lo por materiais fibrosos sintéticos, que permanentemente estão sendo desenvolvidos e produzidos.

O papel na forma mais simples isola espiras de fios, caso em que vem impregnado com óleo ou vernizes. Este é basicamente o caso de capacitores, onde o papel isola entre si as placas condutoras.

Em outra forma, o papel que é flexível por natureza, é impregnado com verniz que ao secar, se torna rígido; é o caso de placas usadas como base de suporte de outros componentes ou mesmo como separadores dielétricos, no caso de barramentos ou de base de suporte de núcleos de transformadores ou dos enrolamentos de motor, dentro da ranhura.

### Fibras Sintéticas

Grande parte dos produtos fibrosos naturais, como o algodão e a seda natural, estão sendo sistematicamente substituídos por fibras sintéticas, de variedade cada vez maior, sempre que o preço e suas propriedades justificarem essa substituição. Em uma primeira fase, a seda artificial encontrou aplicação; hoje porém, já substituída por fibra de vidro ou fibras de poliamida ou outros sintéticos. Esses materiais, em geral, melhoraram as características elétricas, mecânicas



e químicas (envelhecimento) dos produtos em que são usados, sempre que uma produção em grande escala se justificar, para poder economicamente competir com as fibras existentes.

Diversos poderiam ser os produtos aqui mencionados. Vamos, porém, nos limitar aos dois exemplos dados a seguir.

#### Fibras de poliamida

São fibras usadas freqüentemente como reforços mecânicos de cabos de utilização especial, sempre que as condições de uso exigem um material resistente à ação do fogo, elevada flexibilidade e capaz de suportar elevados esforços de tração.

Sendo fibras sintéticas, por natureza de massa compacta e não porosa como as fibras de celulose e, além disso, tendo em geral uma superfície externa lisa, com baixo coeficiente de atrito, torna-se imprescindível a aplicação de um verniz de colagem, capaz de conferir ao tecido assim fabricado, a necessária consistência mecânica, o que, por sua vez, garante manter a continuidade de uma camada elétrica isolante.

Essas fibras são manufaturadas e consumidas em forma de fitas isolantes, que suportam até 2000 kgf/cm<sup>2</sup>, com espessura em torno de 0,5 a 1,5 mm.

#### Fibras de vidro

Derivada do vidro isolante, a fibra de vidro é obtida com espessura de 5 a 10 µm (micrometros). A matéria-prima deve ser vidro livre de álcalis, para evitar o aparecimento de fissuras capilares tendentes a reter a umidade, prejudicando assim a propriedade de resistência superficial. Logo após sua fabricação, recomenda-se envolver a fibra de vidro com uma camada protetora contra ação do ambiente.

A fibra de vidro se caracteriza por uma estabilidade térmica sensivelmente mais elevada do que a de outras fibras. Por essa razão, fibras de vidro adequadamente associadas a resinas da família dos epoxes, são freqüentemente encontradas quando se trata de utilizar um material isolante capaz de suportar temperaturas de 200-300°C ou mais. Casos típicos são as câmaras de extinção do arco voltaico, sobretudo em disjuntores de média e alta-tensão com reduzido volume de óleo. A exemplo dos comentários anteriormente feitos para a fibra de poliamida, a fibra de vidro também necessita um tratamento com verniz de colagem, para fornecer produtos elétrica e mecanicamente adequados.

#### Materiais Cerâmicos

Reúne-se sob a designação de cerâmicas um grupo de materiais de elevado ponto de fusão, que em geral, são manufaturados a frio na forma plástica e que sofrem processos de queima até temperaturas de 2000°C. Apenas após a queima, o material adquire as características que permitem seu uso técnico. Cerâmicas são matérias-primas de uso bastante antigo, inicialmente apenas como utensílio doméstico, mas até hoje com utilização elétrica bastante importante.

As matérias primas mais importantes são o quartzo, o feldspato, o caolim e a argila, havendo ainda uma série de aditivos em menor porcentagem mas de influência sensível no produto resultante. O caolim é formado de microcristais do tipo folheado, resultante da composição de granito e feldspato, devido à ação da água, ácido carbônico e outros gases ácidos.

Materiais cerâmicos se caracterizam geralmente pelo preço baixo, por um processo de fabricação relativamente simples, e devido às características elétricas, térmicas e físicas vantajosas que podem apresentar, quando o processo de fabricação é bem cuidado.

Os componentes básicos mencionados têm, cada um, sua influência predominante no aspecto térmico, mecânico ou dielétrico. Assim, fazendo-se a análise em termos gerais, tem-se:

- a) aspecto térmico - o componente que influi termicamente é o quartzo; portanto, quanto maior sua porcentagem, maior é a temperatura suportada por essa porcelana;
- b) aspecto dielétrico - é o feldspato o componente que define o comportamento isolante, ou seja, os valores de rigidez dielétrica, o fator de perdas, etc;
- c) aspecto mecânico - a exemplo da grande maioria dos demais materiais isolantes, os esforços melhor suportados pelos mesmos, são os de compressão, apresentando perante essas solicitações, valores dez vezes superiores aos de tração. Esses valores são consequência da porcentagem de argila e caolim presentes na massa cerâmica.

Os três grupos mencionados compõem basicamente uma porcelana, sem prejuízo de acréscimos outros bastante importantes mas de porcentagem menor. Portanto, para o preparo da massa a ser trabalhada, deve-se estabelecer primeiramente a aplicação que a porcelana terá, para então, em função das condições elétricas ou dielétricas, mecânicas e térmicas que o material deve suportar, estabelecer a porcentagem de cada um. Essa composição é representada graficamente no triângulo de composição, indicado na Fig. (4.5).

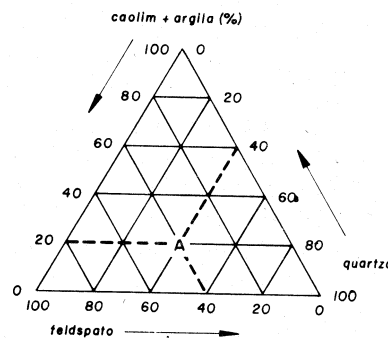


Figura 4.5 - Triângulo de composição da porcelana

Caolim + argila: propriedade mecânicas.  
 feldspato: propriedades elétricas  
 quartzo: propriedades térmicas  
 Exemplo: Ponto A: 20% caolim + argila  
 40% feldspato  
 40% quartzo.

A porcelana, até aqui referida, é apenas um exemplo de produto cerâmico, apesar de que, em tese, o processo de fabricação dos demais é semelhante, variando apenas a composição. Condensado na Tab. (4.3), podemos destacar os produtos relacionados a seguir:

1. Porcelana de isoladores Destinada a fabricação de isoladores de baixa, média e alta-tensão, para redes elétricas, dispositivos de comando, transformadores, etc. Deve apresentar comportamentos elétrico e mecânico adequado.
2. Cerâmica de capacitores. Distingue-se pela elevada constante dielétrica, aplicando-se em capacitores de baixa e alta-tensão. Não são solicitados por esforços mecânicos elevados.
3. Cerâmica porosa. Próprios para receber fios resistivos destinados à fabricação de resistores de fornos elétricos e de câmaras de extinção.

Tabela 4.3 - Classificação de materiais isolantes cerâmicos de acordo com suas fases cristalinas

Nomes	Componentes Principais	Composição química	Principais características
Porcelana de isoladores	Argila Caolim Quartzo Feldspato	$3 \text{ Al}_2\text{O}_3$ $2 \text{ SiO}_2$	Pequeno coeficiente linear de dilatação.
Porcelana de alta frequência	Argila Caolim Bário	$3 \text{ Al}_2\text{O}_3$ $2 \text{ SiO}_2$ ----- $\text{BaOAl}_2\text{O}_3$ $\cdot 2\text{SiO}_2$	Pequeno coeficiente de dilatação e baixas perdas dielétricas.
Ultraporcelana	Argila Caolim	$3 \text{ Al}_2\text{O}_3$ $2 \text{ SiO}_2$	Elevada resistência mecânica Baixas perdas dielétricas.
Esteatite	Talco Argila Magnesita	$\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ e $2 \text{ MgO} \cdot \text{SiO}_2$ e $2 \text{ MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ $\cdot 5\text{SiO}_2$	Elevada resistência mecânica Baixas perdas dielétricas Baixo coeficiente de dilatação
Titanatos	Dióxido de Titânio	$\text{TiO}_2$	Elevada constante dielétrica Coeficiente de temperatura negativo.
	Dióxido de Titânio e Calcita	$\text{CaTiO}_3$	Elevada constante dielétrica Coeficiente de temperatura negativo.
	Titanato de zircônio	$\text{TiO}_2 \cdot \text{ZrO}_2$	Coeficiente de temperatura praticamente igual zero.
	Titanato de bário	$\text{BaO} \cdot 4\text{TiO}_2$ e $\text{BaO} \cdot 5\text{TiO}_2$	Coeficiente de temperatura praticamente igual a zero
	Titanato de magnésio	$\text{Mg TiO}_3$	Coeficiente de temperatura positivo próximo a zero.

## Vidro

O vidro é a solução mais moderna para diversos problemas anteriormente só resolvidos com porcelana, e que hoje já encontram também soluções mediante o uso de resinas (epoxe) e aglomerados de resina com borracha. O vidro é encontrado em duas formas: a normal e a temperada.

Seguindo a classificação do material segundo seu estado físico, o vidro é incluído tanto no estado sólido quanto no líquido, uma vez que sua forma estrutura e as leis da deformação que obedece são as próprias do estado líquido, enquanto que a sua forma estável o classifica como sólido. O estado vítreo é particular de uma longa série de produtos orgânicos e inorgânicos, incluindo-se nesta última o produto que tecnicamente conhecemos por vidro.

O vidro é basicamente composto de óxido de silício e de boro, nas formas  $\text{SiO}_2$  e  $\text{B}_2\text{O}_3$ ; acrescentam-se a esses dois uma grande série de aditivos, tais como os óxidos alcalinos  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$ , que influem sobretudo no valor da temperatura de fusão do material. Vidros técnicos normais, dependendo das porcentagens  $x$ ,  $y$ , e  $z$  de cada um, apresentam-se, assim, como composição do tipo  $x\text{Na}_2\text{O} \cdot y\text{CaO} \cdot z\text{SiO}_2$  (vidro de sódio) ou  $x\text{K}_2\text{O} \cdot y\text{CaO} \cdot z\text{SiO}_2$ . Outros aditivos, geralmente ainda na forma de óxidos, são o magnésio, o zinco, o antimônio, o chumbo e outros.

Assim os vidros são classificados em um dos grupos dados a seguir:

1. Vidros sódio-cálcicos, com a fórmula básica  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2$ , com pequenos acréscimos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{MgO}$  e outros. São empregados em vidraças, garrafas e outros casos não-elétricos. Apresentam baixo ponto de fusão
2. Vidros cálcio-cálcicos com fórmula  $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2$ , apresentando alto ponto de fusão e boa resistência química.
3. Vidros de cálcio-chumbo, com fórmula  $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{PbO} \cdot 6\text{SiO}_2$  e acréscimos do tipo  $\text{CaO}$  e  $\text{BaO}$ . Tem baixo ponto de fusão, apresentam elevado índice de refração perante a luz. Seu uso é encontrado em vidro óptico e cristal de chumbo.
4. Vidro de silicato de boro e alumínio, com acréscimos de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), bário ( $\text{BaO}$ ), cálcio ( $\text{CaO}$ ) e outros. Apresentam bom comportamento químico e térmico. São apropriados para termômetros e finalidades químicas diversas.
5. Espécies, como por exemplo, vidro de quartzo que deixa passar as radiações ultravioletas e é insensível a variações de temperatura.

Sendo um produto resultante de composição porcentual variável, diversos componentes, variam suas características em função dessa composição. Também tratamentos térmicos posteriores (têmpera) influem acentuadamente em particular no que se refere a suas características mecânicas, podendo-se, porém caracterizar o vidro sob os aspectos vistos a seguir.

1. Suportar temperaturas elevadas - a temperatura de serviço normal se localiza em torno de 200-250°C, ocupando assim posição dentro do grupo dos isolantes de elevada estabilidade térmica.
2. Peso específico relativamente baixo, apresentando, em geral, valor em torno de 2,5g/cm<sup>3</sup>, dependendo, porém, da composição.
3. Permite um tratamento térmico que eleva em muito as suas propriedades mecânicas. A têmpera do vidro adquire importância particular nas áreas dos isolantes, tipo disco e pedestal, devido à presença de esforços mecânicos acentuados.
4. Possui elevada estabilidade térmica. Entende-se por estabilidade térmica, o comportamento do material em suportar bruscas variações de temperatura. Esse comportamento é função do coeficiente linear de dilatação, da condutividade térmica e da resistência mecânica.

5. Geralmente possui acentuada estabilidade perante a umidade, dependendo porém de sua composição. Sendo freqüentemente um silicato, e tendo o silício a propriedade de ser repelente à água, justifica-se esta propriedade. Quando se eleva a porcentagem de materiais alcalinos, observa-se uma redução dessa propriedade. Atinge-se uma situação em que, no caso de vidros compostos apenas de  $\text{Na}_2\text{O}$  ou  $\text{K}_2\text{O}$ , e perante elevação de pressão e temperatura, o vidro se torna totalmente solúvel em água.

Apresenta elevadas perdas dielétricas, de modo geral, que ainda se elevam com elevação de temperatura. Essa propriedade torna pouco recomendável o uso do vidro perante frequência elevadas, pois poderá ocorrer destruição térmica. O valor das perdas depende de sua composição, notando-se uma redução das mesmas na presença de óxido de metais pesados ou óxido de cálcio.

### Minerais

#### Mica

A mica é um mineral cristalino, que se apresenta em forma de pequenas lamelas ou lâminas, devido à baixa força de coesão entre os diversos planos cristalinos. Em termos de composição química, a mica é um silicato de alumínio. Dos diversos tipos de mica existentes, dois têm aplicação elétrica mais freqüente, a muscovita que tem a composição  $\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , e a flogopita com a fórmula  $\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{MgO} \cdot 12\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Caracteriza-se pelas propriedades enunciadas a seguir.

1. É encontrado com relativa facilidade, o que faz desse isolante um dos mais antigos em uso. Na forma natural, se mantém em camadas facilmente divisíveis, permitindo obter lâminas ou lamelas de pequena espessura. No estado natural ainda, é encontrado associado a óxidos metálicos, que precisam ser eliminados antes da utilização elétrica, por meio de purificação.
2. Na purificação com eliminação conseqüente das impurezas, elimina-se também material de ligação entre as lâminas de mica, ficando o material sem meio aderente. Esse meio é restituído à mica em sua aplicação, através de um verniz de colagem. Por vezes, além do verniz, a mica recebe um esforço mecânico através de uma base de papel ou de tecido. Resulta, assim um produto conhecido comercialmente por micanite, onde a porcentagem de verniz de colagem atinge até 25% do volume; em geral, porém esse valor se situa em torno dos 5% do volume.
3. O produto da mica com verniz pode ser rígido ou flexível, dependendo das características do verniz usado. Vernizes rígidos dão como resultado produtos rígidos.
4. A mica é um dos produtos de mais elevada estabilidade térmica e maior temperatura de serviço, atingindo valores de até  $1000^\circ\text{C}$ . Como tal, é usado em numerosos casos de aquecimento elétrico. Sendo o produto de mica uma mistura de mica com verniz, a temperatura máxima admissível vai depender também do limite de temperatura do verniz, e que ainda se encontra em valores mais baixos. Assim, apesar de permitir uma temperatura muito alta, os produtos de mica têm sua temperatura limitada pelo valor máximo admissível tolerado pela resina do verniz.
5. Bom comportamento mecânico: a mica apresenta valores de resistência à tração e à compressão bastante altos: é, entretanto, sensível perante a flexão, o que faz da mica um material quebradiço no seu estado puro e em plaquetas grandes.
6. Apresenta ótimas características elétricas, variando esses valores com a espessura e a temperatura.
7. A mica é usada na forma de grandes lâminas, lamelas e pó, sempre reforçada por material de base e impregnado com vernizes, se assim se fizer necessário, para o seu uso correto.

8. A mica é relativamente higroscópica, devido à sua estrutura lamelar.
9. A cor da mica informa sobre sua qualidade. Essa coloração é sobretudo devido à presença de impurezas de difícil eliminação, de modo que, quanto mais incolor a mica, melhor é a sua qualidade. As cores geralmente encontradas são o amarelo, o esverdeado e o avermelhado.

Partindo da mica no estado puro, têm-se os produtos enunciados a seguir.

1. Placas de mica. São camadas com espessura superior a 0,05 mm, usados em equipamentos e componentes elétricos estáticos, como, por exemplo, em alguns tipos de capacitores, atualmente pouco freqüentes. Essas placas de mica são também usadas para aparelhos térmicos, tais como, aquecedores e ferros elétricos, onde um fio de aquecimento é envolto por placas de mica.
2. Lamelas ou lâminas de mica. Nesses casos, que são os mais comuns, a mica não apresenta forma própria, necessitando de aglomerante, e, eventualmente, também de um material de base. As lamelas de mica são coladas entre si, formando fitas, chapas, tubos, etc., de acordo com a necessidade. Incluem-se nesse caso, canaletas de papel, mica e verniz de colagem, usados para isolar ranhuras de máquinas, ou a isolamento entre as lâminas de um coletor.
3. Pó de mica, obtido por moagem de lamelas. Esse pó de mica pode ser usado como aditivo a outras massas e pós, ou, senão, na forma combinada com verniz de colagem, ser prensado em moldes, dando origem a peças de micanite.

Em todos os casos mencionados, seja devido à relativa higroscopia, seja por causa da necessidade de certas propriedades mecânicas no seu uso, a mica é geralmente associada a vernizes, e outros isolantes.

Assim, as características da mica pura não têm o mesmo significado como as de sua forma combinada. Assim, a rigidez dielétrica normalmente encontrada varia de 15 a 20kV/mm, havendo, porém casos em que atinge 40kV/mm.

Não resta dúvida de que, nas aplicações elétricas, a forma composta de mica, conhecida por micanite, é a mais importante, devido à grande variedade de produtos daí resultantes. A micanite é encontrada em fitas e em placas, na forma flexível e rígida, em diversos tamanhos. E existência, em número cada vez maior, de resinas e, conseqüentemente, de vernizes, confere à micanite papel de destaque entre os isolantes elétricos.

Enquanto a micanite é basicamente formada de lamelas, o produto usando pó de mica, por vezes conhecido por micalex, também tem ampla faixa de uso. O micalex é rígido, composto de pó de mica e vidro de baixo ponto de fusão.

### Amianto

É um material mineral fibroso, com brilho de seda, flexível, resultante da transformação de silicato de magnésio. A estrutura física é explicada pela forma cristalina que apresenta. Conforme se sabe, silicatos se apresentam numa estrutura tetraédrica de íons de  $\text{SiO}_4$ . Nos cantos dos tetraedros se encontra o átomo de oxigênio; no centro, o átomo de silício. Comparando com a mica, cuja estrutura tetraédrica é o tipo plano, no amianto essa estrutura é de tubos. Essas cadeias são em seguida ligadas entre si por íons de magnésio, formando os cristais de amianto. Dessa ligações, as de Si-O-Si são particularmente fortes, sendo as de Mg-O-Mg menos resistentes. Por essa razão, os cristais de amianto permitem uma divisão em filetes ou tubos. O amianto é encontrado na natureza dentro de pedras, em filetes, com espessura variável desde fiação de milímetros até alguns centímetros. Quanto maior o seu comprimento, maior é o valor do produto.

O amianto se destaca pela estabilidade térmica e alta temperatura de serviço, mantendo sua resistência mecânica e flexibilidade praticamente inalteradas perante temperaturas em que fibras orgânicas já estão sendo destruídas.

Na sua estrutura, que é  $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ; na forma mais comum, a água é libertada apenas perante 300 a 400°C, a partir da qual perde acentuadamente as suas propriedades mecânicas. A sua temperatura de fusão é cerca de 3 a 4 vezes mais elevada.

Suporta elevados esforços mecânicos, que se localizam numa taxa de torção de 350kgf/cm<sup>2</sup>, em média.

Apresenta higroscopia relativamente elevada, o que faz com que seja usado eletricamente com a devida impregnação com resinas, óleos ou massas isolantes. Dessa propriedade e da respectiva impregnação vão depender as características finais.

O amianto costuma vir acompanhado de impurezas, particularmente ferrosas, sendo, em especial, acentuada a influência negativa do  $\text{Fe}_2\text{O}_4$ . Essas impurezas são eliminadas por meio de ácidos.

O amianto é usado nas formas enunciadas a seguir.

- I. Pó. O pó de amianto é, em geral, o resultado da decomposição de fios muito curtos, que aliás são os mais frequentes. Esse pó é usado de diversas maneiras, como por exemplo.
  - a) recebendo como aditivo um verniz e aplicando a massa sobre papel isolante; o produto assim obtido é repelente à água, de elevada estabilidade térmica e resistente a ácidos, álcalis e solventes orgânicos (com exceção do benzol e seus derivados);
  - b) preenchimento de fusíveis do tipo encapsulado, atuando como elemento extintor, em substituição à areia (que também é um silicato).

Tabela 4.4 - Características de Materiais Isolantes

Material	$F_g \times 10^{-4}$ a 60Hz e 20°C	Rigidez diel. $E_d$ (kV/mm)	Temperat. limite (°C)	Resistiv. transversal ( $\Omega \times \text{cm}$ ) <sup>dr</sup>	Constante dielétrica $\epsilon$	Densidade g/cm <sup>3</sup>
Óleo mineral	10	10 a 14	95	$25 \times 10^{12}$	2	0,8 – 0,9
Askarel	10 a 20	13 a 16	135	$10^{13}$ a $10^{14}$	5	1,3 .. 1,7
Óleo silicone	2 a 10	10 a 30	– 60 a 200	$7,9 \times 10^{14}$	2,1 a 2,8	0,5 a 1,0
Parafina	1 a 2	20 a 25	70	$> 10^{16}$	1,9 a 2,2	0,8 a 0,9
Goma-laca	100	20 a 30	70	$10^{15}$ a $10^{16}$	3,5	1,3 a 1,5
PVC	$10 \text{ a } 10^{-2}$	40 a 50	75	$10^{13}$ a $10^{16}$	3 a 4	1,2 a 1,4
Polietileno	2 a 5	30	85	$10^{16}$ a $10^{17}$	2,3 a 2,4	0,9
Polistírol	3 a 50	25 a 50	50 a 80	$10^{14}$ a $10^{18}$	2,5	1,05
Baquelite	100 a 400	20	150	$10^{12}$ a $10^{14}$	4 a 4,5	4 a 7
Betume	170	50 a 100	60	$10^{10}$	2,7	0,9 – 1,1
Papel para capacitores	20 a 30	35	100	$10^{18}$	3,7	1,5
Papel para cabos	100 a 200	8 a 10	100	$10^{16}$	3 a 3,5	0,8 a 0,9
Vidro e fibra de vidro	até 100	35 a 50	200 a 250	$10^{11}$ a $10^{17}$	5 a 8	2 a 6
Amianto	–	2 a 30	200 a 250	$10^{11}$ a $10^{17}$	5 a 8	2 a 6
Mica muscovita	0,5 a 3	5 a 40	500 a 600	$10^{15}$ a $10^{16}$	6 a 7	3
Flogopita	0,5 a 5	4 a 40	800 a 1000	$10^{13}$ a $10^{14}$	5 a 6	3

- II. Fibras e respectivos tecidos. Nesta forma, obtêm-se fitas, simples e combinadas com papéis, devidamente aglutinadas por meio de um verniz de colagem. Comparativamente com fitas orgânicas, as de amianto são duras, grossas e mal-acabadas. Por vezes, opta-se por uma

mistura de fibras de amianto com fibras orgânicas, para se obter um tecido mais flexível e que mesmo assim ainda se destaque por um bom comportamento térmico. Mais recentemente, tem-se usado também a fibra de amianto misturada com a fibra de vidro. Para algumas aplicações elétricas especiais, usa-se o cimento de amianto, que substitui com vantagem mármore e produtos semelhantes. Nesse caso, fibras de amianto são misturadas com cimento e água, prensando-se a massa nas dimensões desejadas. Devido a elevada higroscopia, é necessário aplicar verniz. O cimento endurece e se liga rigidamente às fibras. Esse cimento, assim obtido, suporta bem o calor e elevadas solicitações mecânicas, o que leva a seu uso como base de chaves de manobra, câmaras de extinção do arco voltaico e paredes de separação de fase.

### Materiais da Classe da Borracha

Fundamentalmente podemos diferenciar entre borrachas naturais e artificiais ou sintéticas.

A borracha natural é obtida a partir do látex, que é o líquido retirado de certas plantas, e que, para seu uso industrial, sofre um tratamento com enxofre e outros aditivos, dando origem à vulcanização da borracha. Entretanto, com o desenvolvimento de borrachas sintéticas, a borracha natural perdeu sua importância, sendo que, para as aplicações elétricas, são válidas, hoje, praticamente apenas as borrachas sintéticas.

A borracha sintética se desenvolveu sobretudo no sentido de resolver alguns críticos da borracha natural, enumerados a seguir.

- ⇒ Rápido envelhecimento - a borracha natural se torna dura e quebradiça.
- ⇒ É extremamente sensível à gasolina e ao óleo, inchando acentuadamente.
- ⇒ É atacado pelo cobre e pelo manganês. Particularmente, quanto ao enxofre presente na borracha, este desencadeia uma reação inadmissível para finalidades elétricas. Lembrando o grande número de condutores em que se usa o cobre, já salta de imediato a importância dessa observação. A solução prática que se tem usado nesse caso é a estanhagem do condutor de cobre.
- ⇒ Não permite temperaturas de serviço acima de 75°C. Acima desse valor, a borracha perde sua elasticidade.
- ⇒ É também sensível à ação dos raios solares e da ozona.

A borracha sintética tem como elemento básico o isopreno, que foi substituído posteriormente pelo butadieno (bu), usando-se como catalisador o sódio (Na). Daí o fato de uma das primeiras borrachas sintéticas receber o nome de buna. Esse processo já sofreu um série de modificações, adequando-se às novas observações e descobertas feitas. Por meio de métodos adequados, esse mistura é plastificada, através de oxidantes e da elevação de temperatura.

As propriedades dos produtos prontos dependem acentuadamente do processo de preparo, aditivos plastificantes e outros materiais presentes. Com isso, podem ser adaptados às exigências que são feitas, inclusive preparando uma camada ou um tubo de borracha sintética com materiais diferentes na parte interna e na externa.

Observa-se, como regra geral, as borrachas sintéticas são inferiores às naturais, no que se refere aos reforços admissíveis de tração; entretanto, são sensivelmente melhores quanto ao envelhecimento, estabilidade térmica, resistência perante agentes químicos e perante ozona, e mais resistentes à abrasão.

Entre as borrachas artificiais, que pertencem ao grupo termofixos, destacam-se as conhecidas por EPR (borracha de etileno-propileno), o neoprene e a borracha butílica.



O neoprene é obtido por polimerização do clorobutadieno, que apresenta elevada velocidade de reação devido à presença do cloro. Resultam, assim cadeias de átomos intensamente interligados, de difícil manuseio. Esse produto, mediante o acréscimo de certos produtos, se transforma no que se chama de neoprene, que recebe também estabilizadores de reação, para evitar sua modificação perante a temperatura ambiente. Nesse estado, o neoprene se apresenta como uma massa dura, mal-cheirosa e escura, que não é inflamável. Aquecido a 60°C, perante uma compressão, a massa amolece e permite facilmente sua aplicação.

Apresenta a vantagem de não precisar de enxofre para sua polimerização, bastando aquecê-la a 130-170°C.

O enxofre, porém apresenta problemas de ordem química com o cobre; melhora no entanto as propriedades físicas da borracha e evita endurecimentos futuros do produto acabado.

O neoprene suporta 120°C e mais, apresentando, assim, uma estabilidade térmica e temperatura de serviço superior à da borracha natural. Suporta também a gasolina e o óleo. A resistência à tração é um pouco inferior à da borracha natural, sendo também inferior em elasticidade.

As propriedades elétricas também não são as melhores, devido aos átomos de cloro, que são grupos polares. Por essa razão, o neoprene tem importante aplicação como capa externa de cabos, mas não como isolamento dos mesmos.

A borracha butílica, que substitui com vantagens a borracha natural, também sob ponto de vista elétrico, se apresenta com grande flexibilidade, boa resistência contra agentes químicos e, assim, baixo envelhecimento. A presença de enxofre, que dá ao material uma maior estabilidade, cria porém um problema em contato com o cobre, com o qual reage. Por essa razão, os condutores isolados eletricamente com borracha butílica, devem ser estanhados. Sua temperatura limite de serviço é menor que a do neoprene, não devendo ultrapassar 80°C (max. 85°C).

A borracha de etileno-propileno (abreviamente EPR, ethylene propylene rubber), é atualmente a borracha mais moderna e de melhores características. Esse material termofixo apresenta uma rigidez dielétrica levemente superior à borracha butílica, inferior porém ao

polietileno reticulado, que é um plástico também termofixo, com características bem semelhantes ao EPR. Apresenta baixo fator de perdas e valor de constante dielétrica intermediária. Suporta temperaturas até 90°C em regime permanente. Quimicamente, o EPR é excelente perante a ação da ozona, e aos agentes químicos presentes no ar.

#### **4.4 - Aplicações**

(Seminários e visitas na parte de laboratório)

# CAPÍTULO V

## MATERIAIS SEMICONDUTORES

### **5.1 - Introdução**

Vimos no primeiro capítulo desta apostila uma maneira de classificar os materiais sólidos de acordo com sua facilidade de conduzir energia. Desta forma os materiais são classificados em três grupos: condutores, semicondutores e isolantes. Metais são bons condutores (condutividade da ordem de  $10^7 (\Omega.m)^{-1}$ ) e no outro extremo ficam os isolantes (condutividade entre  $10^{-10}$  e  $10^{-20} (\Omega.m)^{-1}$ ). Materiais com condutividades intermediárias (entre  $10^{-6}$  e  $10^4 (\Omega.m)^{-1}$ ) são denominados semicondutores.

A corrente elétrica resulta do movimento de partículas elétricas carregadas, em resposta a forças que atuam sobre as mesmas a partir de um campo elétrico aplicado externamente. Nos sólidos a corrente vem do fluxo de elétrons, e em materiais iônicos a corrente pode vir do movimento líquido de íons carregados.

No caso da condutividade eletrônica, a ser discutida neste capítulo, a sua magnitude depende fortemente do número de elétrons disponíveis para participar do processo de condução, já que nem todos elétrons de todos os átomos sofrerão aceleração na presença de campo elétrico.

### **5.2 – Estruturas de Bandas de Energia em Sólidos**

O número de elétrons disponíveis para a condução em um material específico está relacionado ao arranjo dos estados ou níveis energéticos ocupados por estes elétrons. Uma análise completa destes tópicos é complexa e envolve princípios de mecânica quântica que estão além do escopo desta disciplina. Portanto, certos conceitos serão omitidos e outros simplificados no desenvolvimento a seguir.

Para cada átomo existem níveis discretos de energia que são ocupados por elétrons arranjados em níveis ( $k, l, m, \dots$ ) e subníveis ( $s, p, d, f$ ). Para cada um dos subníveis  $s, p, d$  e  $f$  existem respectivamente um, três, cinco e sete estados. Na maioria dos átomos os elétrons preenchem apenas os níveis de energia mais baixa, no limite de dois elétrons com *spins* opostos por estado, de acordo com o princípio de exclusão de Pauli. Na figura 5.1 é apresentada uma representação esquemática da energia relativa dos elétrons para os vários níveis e subníveis para um átomo isolado.

Elétrons de valência são aqueles que ficam nas camadas ocupadas mais externas. Estes elétrons são extremamente importantes porque participam das ligações entre átomos e influenciam em várias propriedades físicas e químicas dos sólidos.

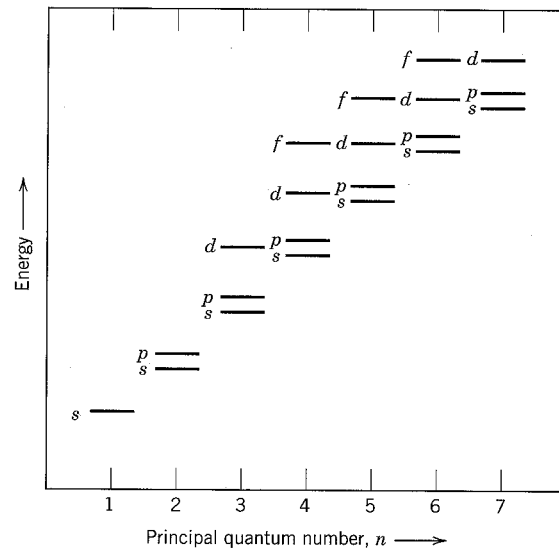


Fig. 5.1 – Níveis e subníveis energéticos

Quando vários átomos são aproximados para montar uma estrutura cristalina os elétrons de um átomo interagem com elétrons de átomos vizinhos, e esta influência é tal que cada estado atômico se divide em uma série de estados pouco espaçados, formando o que é chamado de *banda eletrônica de energia*. A extensão do número de divisões é dependente da separação interatômica (Fig. 5.2) e começa com os níveis mais externos, que são os mais perturbados pelos átomos vizinhos.

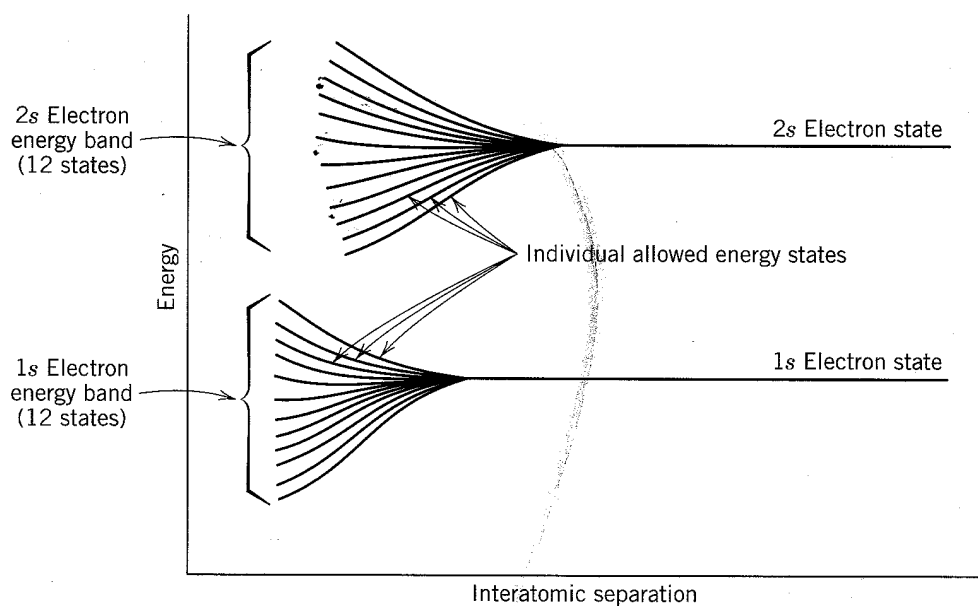


Figura 5.2 – Energia eletrônica versus separação interatômica para um conjunto de 12 átomos.

No espaçamento de equilíbrio, a formação de bandas não ocorre para níveis mais próximos ao núcleo, como ilustrado na figura 5.3. Nesta figura também podem ser observados os vazios entre bandas adjacentes, que normalmente não estão disponíveis para ocupação por elétrons.

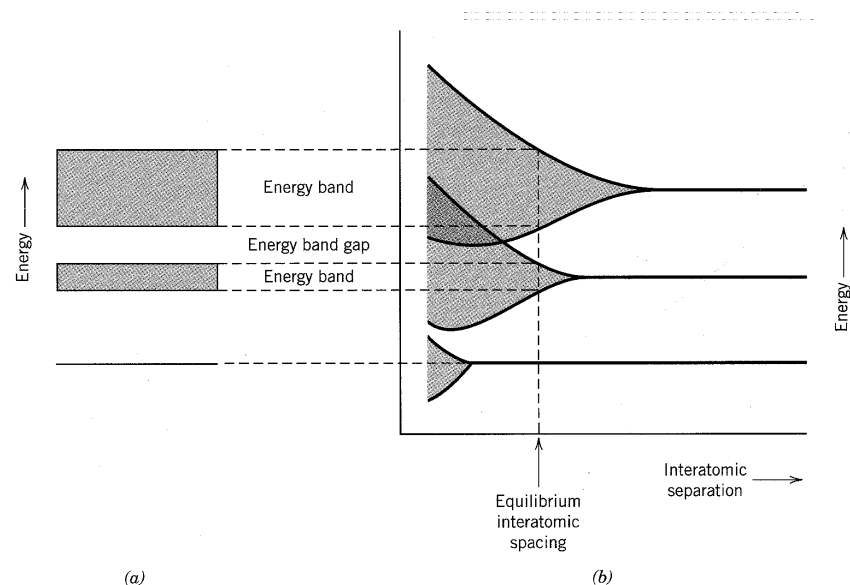


Figura 5.3 – (a) Representação da bandas de energia para espaçamento interatômico de equilíbrio. (b) Energia eletrônica versus separação de um conjunto de átomos.

Quatro estruturas diferentes de bandas eletrônicas são possíveis nos sólidos a 0K. Na primeira (Fig. 5.4.a) a camada mais externa é apenas parcialmente preenchida. A energia correspondente ao mais alto estado de energia ocupado a 0K é chamada de Energia de Fermi ( $E_f$ ), conforme indicado. Este tipo de estrutura é típica de alguns metais, em particular daqueles que tem um único elétron de valência em *s*, como o cobre. Cada átomo de cobre tem um elétron no nível 4*s*, entretando, para um sólido formado por *N* átomos a banda 4*s* é capaz de acomodar 2*N* elétrons. Logo, só metade das posições disponíveis é ocupada.

Para o segundo tipo de estrutura, também encontrada nos metais, há uma sobreposição de uma banda vazia para uma banda ocupada. O magnésio tem esta estrutura. Cada átomo isolado de magnésio tem 2 elétrons no nível 3*s*. Entretando, quando um sólido é formado as bandas 3*s* e 3*p* se sobrepõem.

As duas estruturas finais são semelhantes; uma banda (de valência) é completamente preenchida e é separada de uma banda (de condução) vazia. Um espaço ( banda proibida) separa as duas bandas. Elétrons não podem ficar neeste espaço. A diferença entre as estruturas (c) e (d) está na largura da banda proibida, que é maior em materiais isolantes que nos semicondutores.

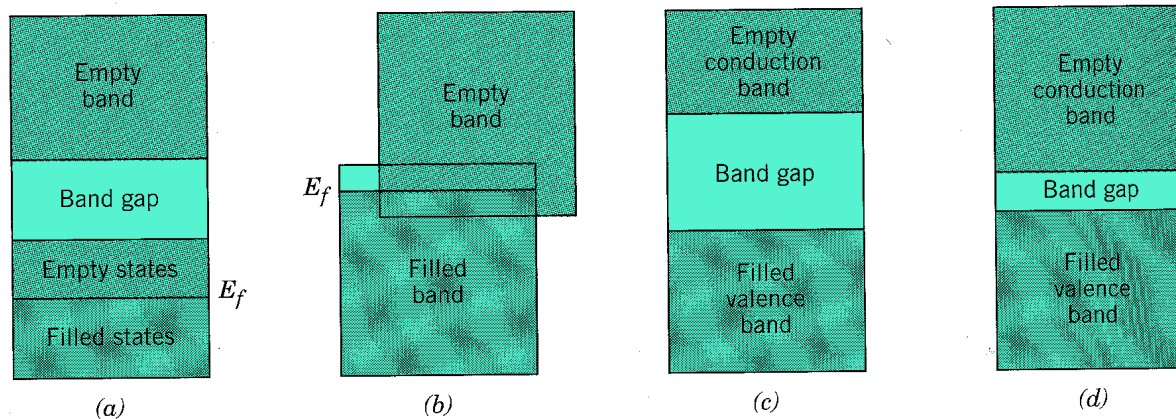


Figura 5.4 – Possíveis estruturas de bandas eletrônicas nos sólidos

### 5.3 – Condução em Termos de Bandas Eletrônicas

Somente elétrons com energia acima da de Fermi podem ser acelerados na presença de um campo elétrico. São esses elétrons, chamados livres, que participam do processo de condução. Outra carga eletrônica chamada *lacuna* ou *buraco*, participa do processo de condução em semicondutores. Buracos têm energia inferior a  $E_f$  e também participam do processo de condução.

Para um elétron se tornar livre ele precisa ser promovido para um dos níveis disponíveis com energia acima de  $E_f$ . Para os metais, que têm estruturas como em 5.4.a e 5.4.b, há estados energéticos disponíveis adjacentes ao mais alto estado preenchido  $E_f$ . Logo, pouca energia é requerida para promovê-los e a energia fornecida por um campo elétrico é suficiente para excitar um grande número de elétrons para o estado de condução.

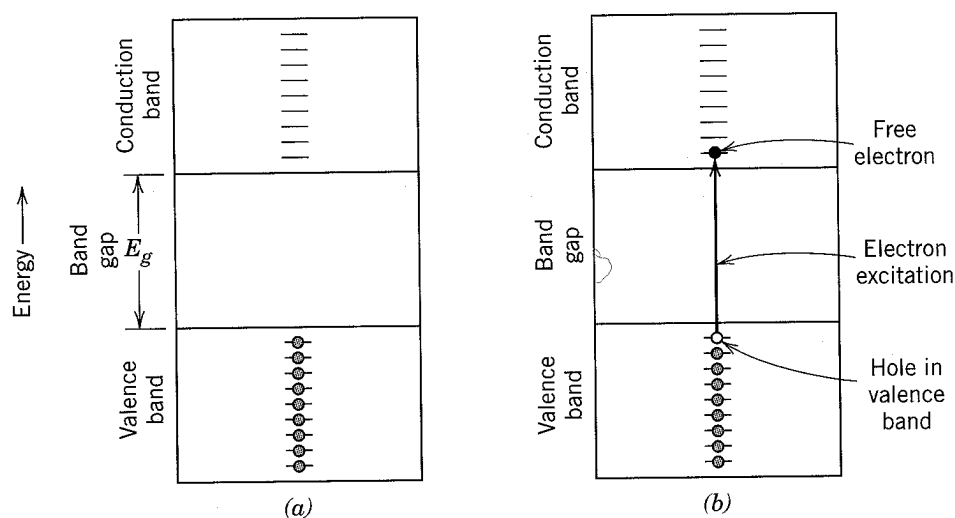


Figura 5.5 – Isolador ou Semicondutor. Elétron antes (a) e depois de ser excitado da camada de valência para a de condução.

Em isoladores e semicondutores os elétrons precisam receber uma maior energia para passar para a banda de condução (ver fig. 5.5). Esta energia é aproximadamente igual ao valor da banda proibida  $E_g$  e sua fonte pode ser elétrica, calor ou luz, por exemplo. O aumento de temperatura em semicondutores ou isoladores resulta em aumento da energia térmica disponível, o que diminui a resistividade dos mesmos.

Quando um campo elétrico é aplicado os elétrons livres experimentam uma aceleração em direção oposta a do campo, devido a sua carga negativa. Entretanto, devido a imperfeições nos cristais, presença de impurezas, vazios, etc.. o elétron neste movimento sofre várias mudanças de direção. Existe, contudo, um movimento líquido na direção oposta a do campo. A velocidade de deriva ( $v_d$ ) é a velocidade média do elétron na direção imposta pelo campo e depende da mobilidade do elétron ( $m^2/V.s$ ) e do campo aplicado ( $E$ ).

$$v_d = \mu_e \cdot E \quad (5.1)$$

A condutividade da maioria dos materiais pode ser expressa por:

$$\sigma = n \cdot |e| \cdot \mu_e \quad (5.2)$$

Onde  $n$  é o número de elétrons livres,  $|e|$  é a carga absoluta do elétron ( $1,6 \times 10^{-19}$  C) e  $\mu_e$  a mobilidade dos elétrons.

#### 5.4 – Semicondução Intrínseca

A banda proibida nos semicondutores (fig. 5.4.d) a 0 K é geralmente menor que 2eV. Os dois elementos semicondutores são o silício e o germânio, que tem a largura da banda proibida em 1.1 e 0.7 eV e ambos apresentam ligações covalentes. Alguns compostos também apresentam características semicondutoras, tais como o GaAs (arseneto de gálio). A tabela 5.1 apresenta algumas características destes semicondutores à temperatura ambiente.

Tabela 5.1 – Características de Alguns Materiais Semicondutores à Temperatura Ambiente

Material	Banda Proibida (eV)	Condutividade ( $\Omega.m$ ) <sup>-1</sup>	Mobilidade dos Elétrons ( $m^2/V.s$ )	Mobilidade das Lacunas ( $m^2/V.s$ )
Si	1.11	$4 \times 10^{-4}$	0.14	0.05
Ge	0.67	2.2	0.38	0.18
GaAs	1.42	$10^{-6}$	0.85	0.45

Em semicondutores intrínsecos, para cada elétron excitado para a banda de condução fica uma lacuna em uma ligação covalente (Fig. 5.6): ou, no conceito de bandas, um estado é deixado livre, como mostrado na figura 5.5.b. Sob influência de um campo elétrico há um movimento do elétron livre e de elétrons de valência em direções contrárias. O movimento dos elétrons nas ligações covalentes pode ser visto como um movimento da lacuna. A lacuna tem a mesma carga de um elétron, mas de sinal contrário.

Uma vez que existem dois tipos de portadores de cargas carregados em um semicondutores intrínseco, a expressão da condutividade elétrica deve ser modificada para considerar a contribuição da corrente de lacunas.

$$S = n \cdot |e| \cdot m_e + p \cdot |e| \cdot m_l \quad (5.3)$$

Onde  $p$  é o número de lacunas por metro cúbico e  $m_l$  é a mobilidade da lacunas, que é sempre inferior a mobilidade dos elétrons nos semicondutores. Nos semicondutores intrínsecos a concentração de elétrons livres é sempre igual a concentração de lacunas.

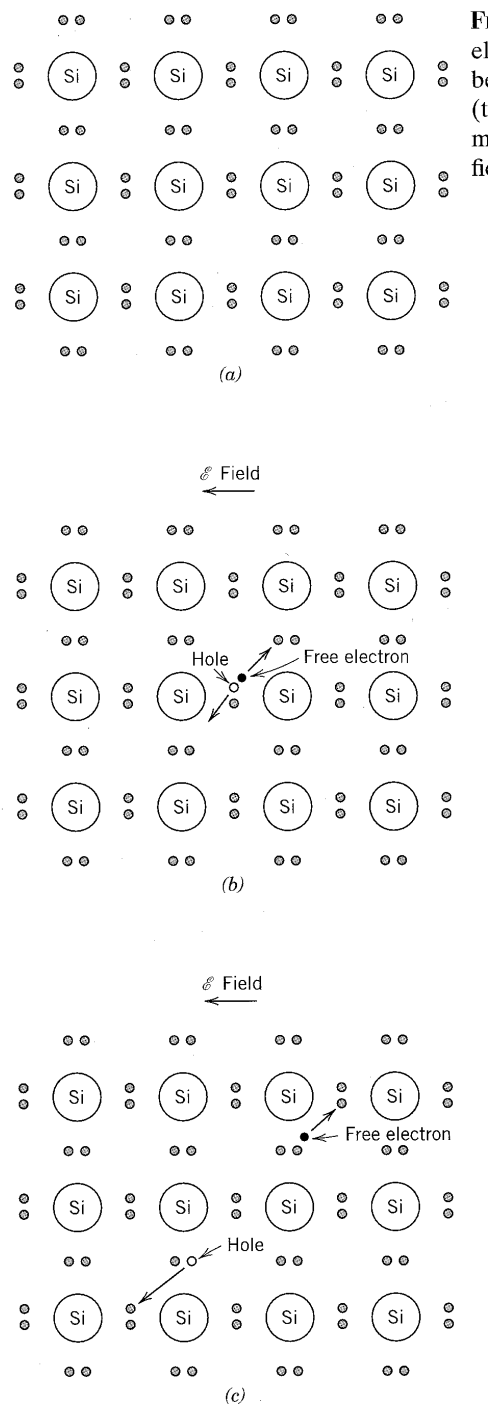


Fig 5.6 – Silício intrínseco. (a) antes da excitação (b) e (c) após excitação e subsequentes movimentos do elétron e da lacuna em resposta a campo eléctrico externo.

Uma análise através da mecânica quântica pode demonstrar que as concentrações de elétrons e lacunas em equilíbrio em um dado semiconductor estão relacionadas de tal maneira que o produto das concentrações de elétrons e lacunas em equilíbrio é função apenas da temperatura e independe das concentrações de impurezas doadoras e aceitadoras, ou seja:

$$n.p = f(T) \quad (5.4)$$

Por convenção, para semicondutores intrínsecos,  $n=p=n_i$  e a equação (5.4) pode ser reescrita como:

$$n.p = n_i^2(T) \quad (5.5)$$

Para temperatura de 300 K, estas concentrações  $n_i^2$  valem  $2.2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-6}$  para o silício e  $5.7 \times 10^{26} \text{ cm}^{-6}$  para o germânio.

## **5.5 – Semicondutores Extrínsecos**

Em semicondutores extrínsecos seu comportamento é determinado por impurezas, as quais, mesmo em pequenas concentrações, introduzem excesso de elétrons ou lacunas. Por exemplo, uma concentração de impurezas da ordem de um átomo por  $10^{12}$  é suficiente para tornar o silício extrínseco à temperatura ambiente.

### **5.5.1 – Semiconductor do tipo n**

Para ilustrar como a semicondução extrínseca é alcançada, considere um semiconductor de silício, o qual tem quatro elétrons na camada de valência, todos participando de ligações covalentes com quatro átomos adjacentes de silício. Suponha que uma impureza com 5 elétrons na camada de valência (Fósforo, por exemplo) é propositalmente colocada em substituição a um átomo de silício (Fig. 5.7.a). Como somente quatro elétrons podem participar das ligações covalentes, um ficará fracamente ligado ao núcleo da impureza e será facilmente removido, tornando-se um elétron livre (Fig 5.7.b e 5.7.c).



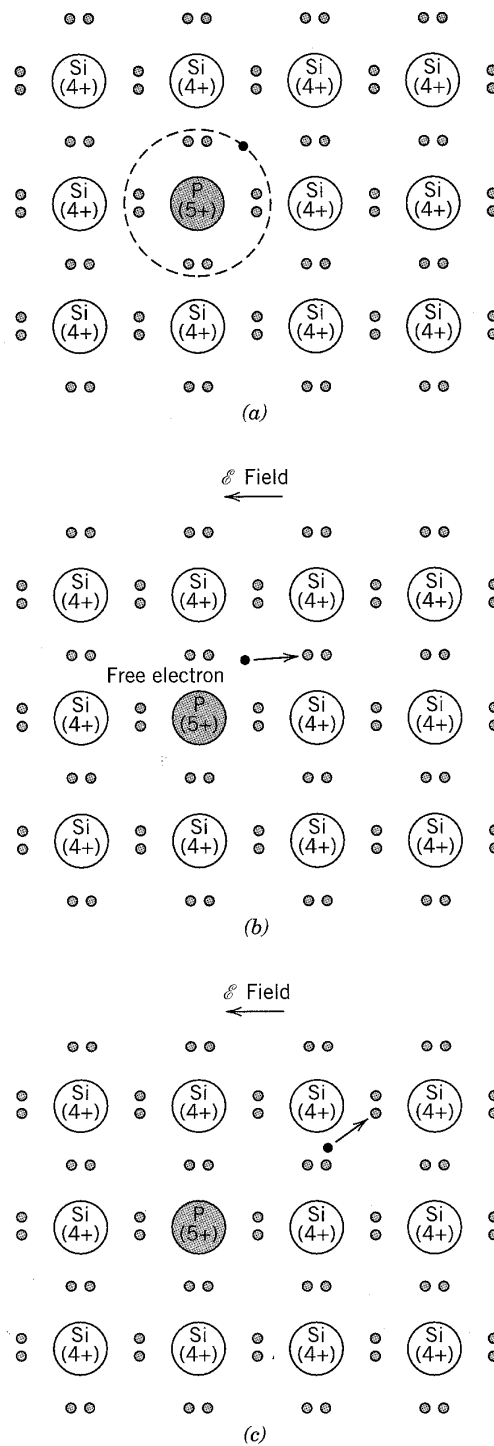


Figura 5.7 – Modelo de Semicondução Extrínseca. (a) uma impureza com 5 elétrons na camada de valência é introduzida substituindo um átomo de silício (b) um elétron se torna livre (c) elétron livre se movimenta de acordo com campo elétrico externo.

Na perspectiva das bandas de energia este elétron pode ser visto como um novo nível de energia, localizado dentro da banda proibida, logo abaixo da banda de condução. Portanto, a energia necessária para excitar este elétron é bem menor que a largura da banda proibida (ver Fig. 5.8).

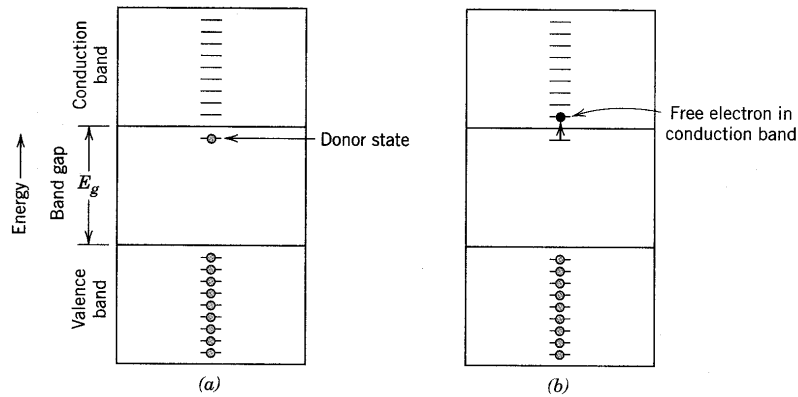


Figura 5.8 – Bandas de energia para elétron de impureza doadora.

Em um material deste tipo o número de elétrons livres (partículas carregadas negativamente) ultrapassa largamente o número de lacunas e a expressão para a condutividade pode ser aproximada por (5.2). Neste caso o material é dito ser do tipo  $n$ .

Considerando concentrações de impurezas doadoras ( $N_d$ ) suficientemente altas, podemos fazer a seguinte aproximação quanto às concentrações de portadores de carga:

$$\begin{aligned} n &\cong N_d \\ p &\cong \frac{n_i^2}{N_d} \end{aligned} \quad (5.6)$$

### 5.5.1 – Semicondutor do tipo $p$

Por outro lado se uma impureza substitucional com três elétrons na camada de valência (alumínio ou boro, por exemplo) é colocada na rede cristalina do silício ou do germânio, haverá deficiência de um elétron para compor as ligações covalentes com os quatro átomos vizinhos. Desta forma, que pode ser observada na Figura 5.9, uma lacuna é gerada.

Uma impureza deste tipo é dita *aceitadora* e apenas um portador de carga, uma lacuna, é criada quando um átomo deste tipo de impureza é introduzido. Neste tipo de semicondutores o número de lacunas (partículas carregadas positivamente) excede largamente o número de elétrons e o semicondutores é dito ser do tipo  $p$ .

Para semicondutores do tipo  $p$ , o nível de Fermi é posicionado dentro da banda proibida, próximo da banda de valência (ver Fig. 5.10).

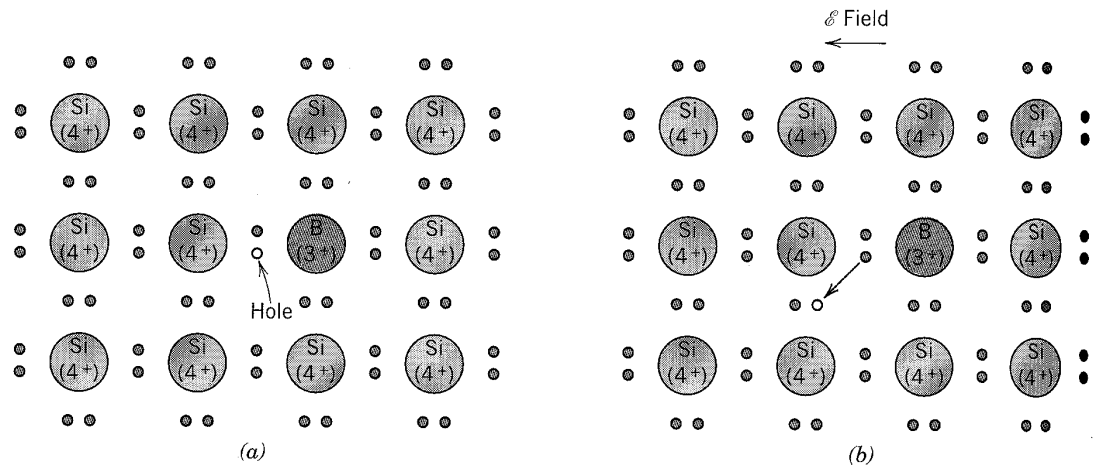


Figura 5.9 – Modelo de um semicondutores extrínseco do tipo p

Semicondutores extrínsecos, tanto do tipo *p* quanto do tipo *n*, são produzidos a partir de materiais que são inicialmente de pureza extremamente alta, normalmente com percentual de impurezas inferior a  $10^{-7}$  %. Concentrações controladas de impurezas específicas (doadoras ou aceitadoras) são então adicionadas intencionalmente, através de várias técnicas. Tal processo é chamado de *dopagem*.

Em semicondutores extrínsecos, grande número de portadores de carga (tanto elétrons quanto lacunas) são criados à temperatura ambiente através da energia térmica disponível. Como consequência, relativamente altas condutividades são obtidas em semicondutores extrínsecos. A maioria dos dispositivos eletrônicos são projetados para uso em temperatura ambiente. Em casos práticos, as concentrações de impurezas são suficiente altas para fazermos uma aproximação de:

$$p \cong Na \quad (5.7)$$

$$n \cong \frac{ni^2}{Na}$$

Onde  $Na$  é a concentração de impurezas aceitadoras.

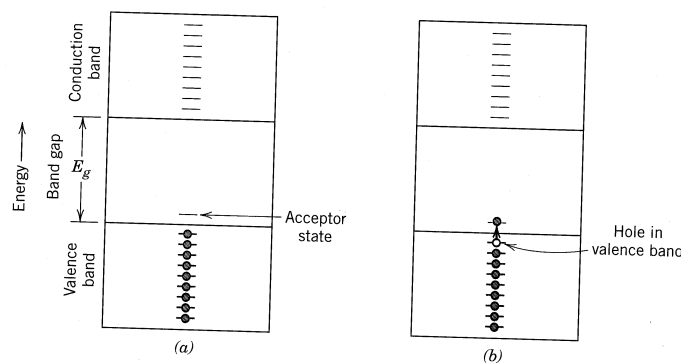


Fig. 5.10 – (a) Esquema de bandas de energia para uma impureza aceitadora. (b) Excitação de um elétron para o nível da impureza aceitadora, deixando um vazio na banda de valência.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, J. C.; Leaver, K. D. - *Materials Science*- Butler & Tanner, 1971.
- Brandão, D. P. L. - *Tecnologia da Eletricidade - Materiais usados em Eletrotecnia* - Fundação Calouste Gulbenkian (Lisboa).
- Bresciani Filho, E. - *Seleção de Materiais Metálicos* - Ed. Da Unicamp, 2<sup>a</sup>. Edição, 1988.
- Callister Jr., W. D. – *Materials Science and Engineering: An Introduction* – 5<sup>th</sup> Ed. ; John Wiley and Sons, USA, 2000.
- D'Ajuz, A et al. - *Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento - aplicação em sistemas de potência de alta tensão* - Ed. Universidade Federal Fluminense, 1987.
- Fitzgerald, A. E.; Kingsley Jr, C.; Kusko, A. - *Máquinas Elétricas*- Mc Graw Hill do Brasil, 1975.
- Gentil, V. - *Corrosão* - Ed. Guanabara S. A , 1987.
- Khalifa, M. – *High-Voltage Engineering: Theory and Practice* – Marcel Dekker, Inc., USA, 1990.
- Kindermann, G.; Campagnolo, J. M. - *Aterramento Elétrico* - SAGRA - D. C. LUZZATTO, 1995.
- Pansini, A. J. - *Basic Electrical Power Transformers*- Hayden Book Company Inc., 1976.
- Pavlik, B. L. - *Tecnologia da Ferragem para linhas de AT e EAT* - Ed. Gente, 1989.
- Ray, M. S. - *The technology and applications of engineering materials* - Prentice Hall, 1987
- Rezende, E. da M. - *Materiais Usados em Eletrotécnica* - Livraria Interciência Ltd., 1977.
- Rothery, W.H. - *Estrutura das Ligas de Ferro - Introdução Elementar*- Ed. Edgar Blücher Ltda, Ed. Da USP, 1968.
- Schmidt, W. - *Materiais Elétricos* - Vol I(Condutores e Semicondutores) e II (Isolantes e Magnéticos) Ed. Edgard Blücher, 1979.
- Van Vlack, L. H. - *Princípios de Ciência dos Materiais* - ed. Edgard Blücher Ltda,
- Anais do V SEMEL - Seminário de Materiais no Setor Elétrico*, 18 a 21 de Agosto de 1996, Curitiba, PR.