



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**Faculdade de Engenharia Elétrica**

***Ciência e Tecnologia***  
***dos Materiais***

**Prof. Carlos Eduardo Tavares**

**2009**



## ÍNDICE

CAPÍTULO I .....	2
PROPRIEDADES GERAIS DOS MATERIAIS .....	2
1.1 Introdução .....	2
1.2 Ligações Químicas (Revisão) .....	3
1.2.1 Ligação Iônica.....	4
1.2.2 Ligação Covalente .....	5
1.2.3 Ligação Metálica.....	6
1.2.4 Ligações Secundárias.....	6
1.3 Propriedades Físicas.....	6
1.3.1 Massa, volume e densidade.....	6
1.3.2 Estado Físico.....	7
1.4 Propriedades Elétricas.....	8
1.4.1 Condutividade e Resistividade Elétrica .....	8
a) Condução nos sólidos .....	10
b) Condução nos líquidos.....	10
c) Condução nos gases .....	11
1.4.2 Resistência e Condutância Elétrica.....	12
1.4.3 Permissividade Dielétrica .....	12
1.4.4 Rigidez Dielétrica .....	13
1.5 Propriedades Magnéticas .....	14
1.5.1 Permeabilidade e Susceptibilidade Magnética.....	14
1.6 Propriedades Mecânicas.....	15
1.6.1 Deformação nos metais.....	15
1.6.2 Outras propriedades mecânicas.....	16
1.7 Propriedades Térmicas.....	17
1.8 Propriedades Químicas .....	18
1.8.1 Radiação.....	18
1.8.2 Oxidação .....	19
1.8.3 Corrosão.....	19
1.9 Propriedades Ópticas .....	21
1.9.1 Refração .....	21
1.9.2 Reflexão .....	22
1.9.3 Absorção .....	22
1.10 Bandas de Energia.....	23
1.11 Classificação dos Materiais Elétricos .....	23
CAPÍTULO II.....	24
MATERIAIS CONDUTORES.....	24
2.1 Introdução .....	24
2.2 Características dos Condutores .....	26
2.2.1 Variação da resistividade com a temperatura e a frequência.....	26
2.2.2 Resistência de contato nos metais.....	27
2.3 Materiais de elevada condutividade.....	27

---



2.3.1 Cobre e suas Ligas .....	28
2.3.2 Alumínio e suas Ligas.....	30
2.3.3 Chumbo (Pb).....	32
2.3.4 Estanho (Sn).....	32
2.3.5 Prata (Ag).....	33
2.3.6 Ouro (Au).....	34
2.3.7 Platina (Pt) .....	34
2.3.8 Mercúrio (Hg) .....	34
2.3.9 Zinco (Zn) .....	35
2.3.10 Cádmio (Cd).....	35
2.3.11 Níquel (Ni) .....	36
2.3.12 Cromo (Cr).....	36
2.3.13 Tungstênio (W) .....	37
2.3.14 Ferro (Fe) .....	37
2.3.15 Carvão, Carbono e Grafite .....	38
2.4 Materiais de elevada Resistividade.....	41
2.4.1 Ligas de Aquecimento .....	41
2.4.2 Ligas de Medição.....	41
2.4.3 Ligas de Regulação .....	41
2.5 Aplicações.....	42
2.5.1 Resistores .....	43
2.5.2 Fusíveis .....	47
2.5.3 Bimetais .....	50
2.5.2 Fios e cabos condutores .....	54
2.6 Supercondutores.....	55
CAPÍTULO III.....	60
MATERIAIS ISOLANTES .....	60
3.1 Polarização Dielétrica .....	60
3.2 Materiais Isolantes de Uso Industrial mais Freqüente .....	61
3.3 Aplicações.....	63
3.3.1 Capacitores.....	63
3.4 Comportamento dos dielétricos em Serviço .....	70
3.4.1 Resistência de Isolamento.....	70
3.4.2 Resistência Superficial.....	71
3.4.3 Rigidez Dielétrica .....	71
3.4.4 Rigidez Dielétrica Superficial.....	71
3.4.5 Ruptura dos Dielétricos.....	72
3.4.6 Efeito Corona.....	72
CAPÍTULO IV.....	73
MATERIAIS SEMICONDUTORES .....	73
4.1 Níveis de Energia.....	73
4.2 Valência .....	75
4.3 Bandas de Energia.....	76
4.4 Materiais Intrínsecos.....	76
4.5 Condução Elétrica nos Semicondutores.....	77
4.6 Semicondutores do Tipo N e P .....	77
4.7 Aplicações.....	78



---

4.7.1 Diodo Semicondutor .....	78
4.7.2 Transistor de Junção Bipolar .....	84
4.7.3 Transistor de Unijunção .....	87
4.7.4 Transistor de Efeito de Campo .....	88
4.7.6 Retificador controlado de silício .....	91
4.7.7 Termistores .....	91
4.7.8 Fotocondutores .....	92
4.7.9 Células Fotovoltaicas .....	94
CAPÍTULO V .....	96
MATERIAIS MAGNETICOS .....	96
5.1 Classificação dos Materiais Magnéticos .....	97
5.2 Características dos Materiais Magnéticos .....	99
5.2.1 Retentividade .....	99
5.2.2 Relutância .....	99
5.2.3 Permeância .....	99
5.2.4 Permeabilidade .....	100
5.2.5 Permeabilidade Relativa .....	100
5.2.6 Meios de Propagação do Fluxo Magnético .....	100
5.2.7 Intensidade de Campo Magnético .....	100
5.2.8 Densidade de Fluxo .....	102
5.2.9 Força Magnetomotriz .....	102
5.2.10 Curva de Magnetização ( $B \times H$ ) .....	103
5.2.11 Laço de Histerese .....	104
5.3 Lei de Faraday e Lei de Lenz .....	105
5.4 Circuitos Magnéticos Equivalentes .....	107
5.4.1 Circuito Magnético em Entreferro de Ar .....	108
5.5 Aplicações dos Materiais Magnéticos .....	110
5.3.1 Eletroímãs .....	111
5.3.2 Relés .....	112
5.3.3 Contatores .....	113
5.3.4 Disjuntores Termo-magnéticos .....	115
5.3.5 Campainha .....	119
5.3.6 Motores e Geradores Elétricos .....	119
5.3.7 Transformadores .....	121
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	123

---



## CAPÍTULO I

---

### PROPRIEDADES GERAIS DOS MATERIAIS

#### 1.1 Introdução

O objetivo da disciplina Ciência e Tecnologia dos Materiais é habilitar os estudantes de Engenharia 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

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 em função das características não adequadas em relação às propriedades, ou ainda, falta de segurança ou 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.

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



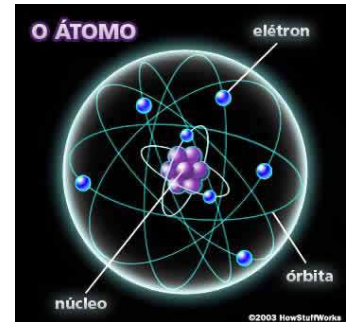
## 1.2 Ligações Químicas (Revisão)

O átomo é composto por um núcleo circundado por elétrons. O núcleo é composto por prótons e nêutrons. Os elétrons são partículas carregadas e com  $1/1836$  da massa de um nêutron.

A carga do elétron é convencionalmente negativa. Como os elétrons são componentes de todos os átomos, sua carga elétrica é freqüentemente 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 nêutrons em um núcleo circundado por elétrons. Como a massa de um elétron é  $0,0005$  da massa de um próton ou de um nêutron, a massa total de um átomo é aproximadamente proporcional ao número de prótons e nêutrons 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).



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

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.

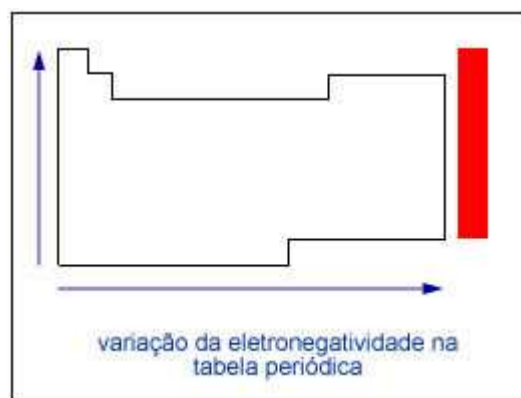
Os elétrons que circundam o núcleo do átomo não têm todos o mesmo nível energético, sendo divididos em vários níveis, com propriedades energéticas diferentes (quatro números quânticos).

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:

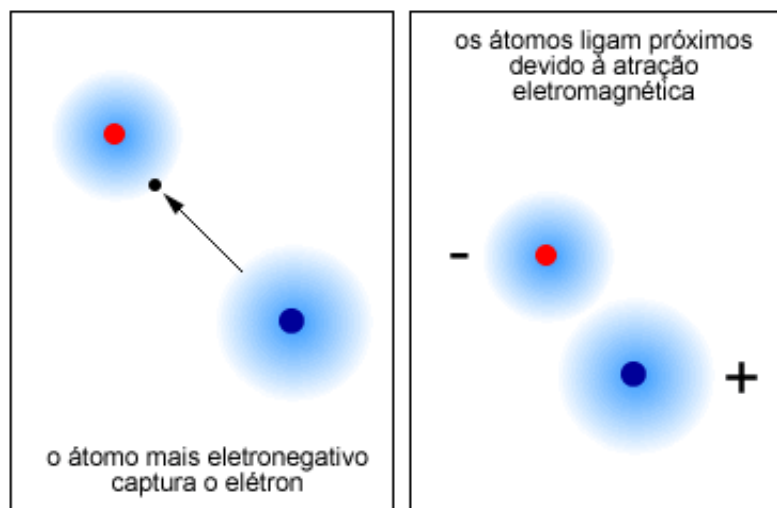
- recebendo elétrons,
- perdendo elétrons,
- compartilhando elétrons.

### 1.2.1 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. À "força" que o átomo tem de capturar elétrons dos outros (vencer o "cabo de guerra"), damos o nome de eletronegatividade. Assim um átomo é fortemente eletronegativo quando tem facilidade em "roubar" os elétrons dos outros.



Aproximando um átomo altamente eletronegativo de um de baixa eletronegatividade, ele captura elétrons tornando-se um íon negativo e tornando o outro um íon positivo. Como cargas elétricas opostas se atraem, eles ficarão ligados por atração eletromagnética e o tipo de ligação será chamada de ligação iônica.



Ligação iônica

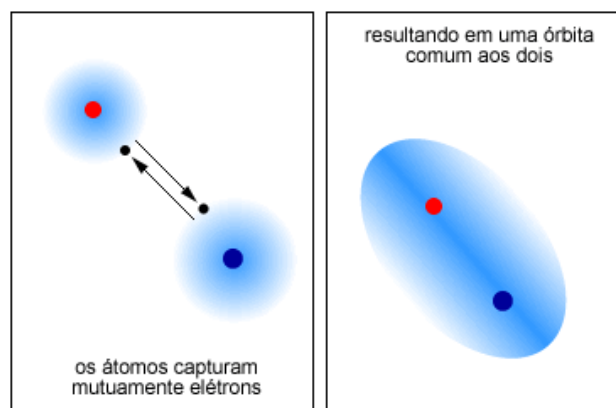
Na realidade uma carga negativa é atraída por todas as cargas positivas e uma carga positiva por todas as negativas. No sal de cozinha, por exemplo, as ligações entre os íons sódio e cloreto são iônicas. Conseqüentemente os íons de sódio ficam envolvidos por íons



cloreto, e os íons cloreto por íons de sódio. Geralmente ligações iônicas se formam entre um metal e um ametal. O átomo do ametal tem uma configuração eletrônica semelhante a de um gás nobre, quase totalmente preenchida de elétrons. Eles tem alta eletronegatividade, e facilmente ganham elétrons formando um íon negativo ou ânion. Os dois ou mais íons logo se atraem devido a forças eletrostáticas. Ligações desse tipo são mais fortes que ligações de hidrogênio, e têm força similar às ligações covalentes.

### 1.2.2 Ligação Covalente

Este é outro tipo de ligação forte. Se aproximarmos dois átomos de forte eletronegatividade, um não terá força para capturar o elétron do outro permanentemente. Ele captura o elétron, mas o outro consegue capturá-lo de volta e, além de retomá-lo, captura um elétron do outro. Esse “jogo” fica se repetindo fazendo com que o par de elétrons (um de cada átomo) fique orbitando pelos dois átomos. É importante perceber que nesse caso não há formação de íons. Esse tipo de ligação, onde não há transferência definitiva de elétrons, e sim compartilhamento do par, resultando em uma distribuição eletrônica mais estável, é designada por ligação covalente.



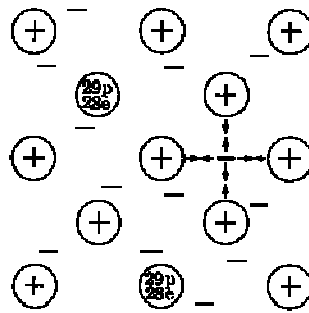
Ligação covalente

Ligações covalentes normalmente ocorrem entre átomos com eletronegatividades similares e altas (geralmente entre dois não-metais), dos quais remover completamente um elétron requer muita energia. Portanto, a ligação covalente implica em intensas forças de atração entre os átomos, o que é evidenciado, por exemplo no diamante, que é o material mais duro encontrado na natureza e inteiramente constituído por carbono. Outra demonstração da força desta ligação covalente (onde cada átomo compartilha seus 4 elétrons da camada de valência com 4 átomos adjacentes) também pode ser percebida pela temperatura extremamente elevada ( $>3000^{\circ}\text{C}$ ) a que pode ser aquecido antes da destruição da sua estrutura.



### 1.2.3 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 a seguir.



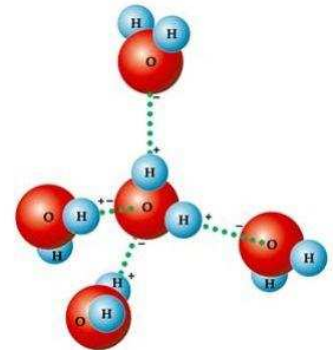
Ligação metálica

### 1.2.4 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. 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. Outro Exemplo de ligações secundárias são as forças de Van der Waals (forças devido a polarização das moléculas).



## 1.3 Propriedades Físicas

### 1.3.1 Massa, volume e densidade

A **densidade** ( $\rho$ ) corresponde à relação massa/volume de uma amostra de um material. Embora a massa e o volume sejam propriedades extensivas, a razão dos seus valores é constante para um determinado material, para um certo valor de temperatura. A densidade é,



portanto, uma propriedade característica de uma substância, sendo usada como indicativo do grau de pureza da substância de que é feito um dado material.

$$\text{densidade } (\rho) = \frac{\text{massa}}{\text{volume}}$$

No Sistema Internacional de Unidades, a densidade exprime-se em **kg m<sup>-3</sup>** (kg/m<sup>3</sup>). Contudo, no laboratório é usual exprimir a densidade em **g cm<sup>-3</sup>** (g/cm<sup>3</sup>). A determinação da densidade de uma substância passa, pois, pela determinação prévia da massa e do volume de uma amostra dessa substância, calculando-se em seguida o valor do quociente respectivo.

Densidade característica de algumas substâncias (a 4°C)	
Substância	Densidade (g cm <sup>-3</sup> )
Acetona	0,79
Antraceno	1,28
Ácido benzóico	1,07
Ciclohexano	0,79
Etanol	0,79
Ferro	7,8
Naftaleno	0,96
Cobre	8,9
Alumínio	2,7
Azeite	0,92

É comum encontrarmos o termo massa específica ( $\mu$ ) em lugar de densidade ( $\rho$ ).

Usa-se "densidade" para representar a razão entre a massa e o volume de objetos sólidos (ocos ou maciços), e "massa específica" para líquidos e substâncias.

### 1.3.2 Estado Físico

- a) **Estado sólido** é quando os átomos das moléculas constituintes da matéria estão em um estado de agitação baixo, podendo ser concentrados mais átomos em um mesmo espaço físico. A sua forma e volume são fixos. Em aplicações eletrotécnicas são usados como condutores na fabricação de fios, cabos e barramentos (cobre, alumínio e ligas metálicas), dielétricos em capacitores (mica, cerâmicas e plásticos), isoladores (porcelana, vidro e borracha), estrutura de suporte e núcleos magnéticos (ferro e suas ligas), entre outros.

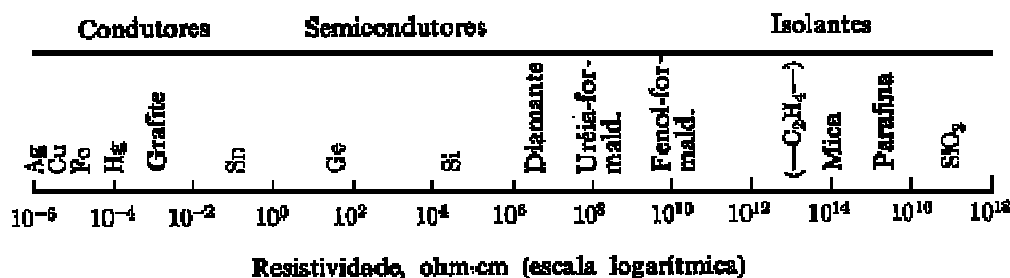


- b) **Estado líquido**, o corpo mantém a quantidade de matéria e aproximadamente o volume; a forma e posição relativa da partículas não se mantém. É particularmente estudado nas áreas da hidrostática e da hidrodinâmica. Em aplicações eletrotécnicas são usados em relés para contato (mercúrio) solução iônica em baterias (eletrólitos), como isolantes em transformadores (óleos minerais), tintas e vernizes isolantes, etc.
- c) **Estado gasoso**, o corpo mantém apenas a quantidade de matéria, podendo variar amplamente a forma e o volume. É particularmente estudado nas áreas da aerostática e da aerodinâmica. Em aplicações eletrotécnicas são usados principalmente em lâmpadas (neon, vapor de sódio, vapor de mercúrio e fluorescente – argônio + mercúrio), como meio isolante entre cabos aéreos (o ar) e cabos subterrâneos e disjuntores de potência (hexafluoreto de enxofre – SF<sub>6</sub>)

## 1.4 Propriedades Elétricas

### 1.4.1 Condutividade e Resistividade Elétrica

A carga elétrica pode ser conduzida por íons ou elétrons cuja mobilidade varia para os diferentes materiais formando um completo espectro de resistividade/condutividade, como mostrado na figura.



Espectro de resistividade

A **condutividade elétrica** quantifica a disponibilidade ou a facilidade de circular corrente elétrica em um meio material submetido a uma diferença de potencial. Sua definição física é dada por:

$$\sigma = n e \mu_n + p e \mu_p$$

onde:

$\sigma$  = condutividade elétrica do material (S/m, onde S= siemens; ou ainda  $\Omega^{-1}m^{-1}$ ;

$n$  = Concentração de elétrons livres do material ( $cm^{-3}$  ou  $m^{-3}$ )

$p$  = concentração de cargas livres positivas do material ( $cm^{-3}$  ou  $m^{-3}$ ), chamadas lacunas

$e$  = carga elétrica elementar =  $1,6022 \times 10^{-19}$  C (C= Coulombs)

$\mu_n, \mu_p$  = mobilidade dos elétrons livres e das lacunas ( $m^2/Vs$ )



Elétrons livres e lacunas são chamados portadores de carga livre, pois reagem a campos elétricos e magnéticos e podem se locomover facilmente pelo material com pouco fornecimento de energia. Estão presentes em todos os tipos de materiais, mas as lacunas apenas nos semicondutores. Portanto, a equação da condutividade para materiais condutores e isolantes é expressa apenas pela primeira parcela da equação anterior.

A **resistividade elétrica**  $\rho$  de um material pode ser entendida como a maior ou menor oposição que este material impõe a um fluxo de elétrons (corrente elétrica). Expressa, portanto, o inverso da condutividade e pode ser dada por:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{ne\mu_n + pe\mu_p}$$

Onde a unidade da resistividade  $\rho$  pode ser dada por  $\Omega\text{m}$ .

A resistividade elétrica depende da temperatura. Por exemplo, nos materiais condutores a resistividade aumenta com o aumento da temperatura e nos isolantes diminui. A tabela abaixo mostra a resistividade de alguns materiais a 20°C.

Material	Resistividade $\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )
<b>Condutores</b>	
Prata	$1,58 \times 10^{-8}$
Cobre	$1,67 \times 10^{-8}$
Alumínio	$2,65 \times 10^{-8}$
Tungstênio	$5,6 \times 10^{-8}$
Ferro	$9,71 \times 10^{-8}$
<b>Semicondutores</b>	
Carbono (grafite)	$(3 - 60) \times 10^{-5}$
Germânio	$(1 - 500) \times 10^{-3}$
Silício	0,1 - 60
<b>Isolantes</b>	
Vidro	$10^9 - 10^{12}$
Borracha	$10^{13} - 10^{15}$



A resistividade elétrica de um material pode também ser obtida numericamente através da medida da resistência entre os centros das faces opostas de um corpo de prova homogêneo do material, com dimensões unitárias, expressa por:

$$\rho = \frac{RA}{l}$$

Onde R é a resistência elétrica ( $\Omega$ ), A é a área da seção transversal do material ( $m^2$ ) e l é o comprimento do material (m).

A resistividade está diretamente relacionada com a perda de energia na forma de calor (efeito Joule) que ocorre em qualquer material percorrido por corrente elétrica devido ao choque dos elétrons com os seus átomos. Desta forma, quanto menor a resistividade do material menores serão as perdas de energia e melhor será o material para o transporte da corrente elétrica. Por isto, a importância de se considerar tais características ao se estudarem condutores e semicondutores visto que materiais isolantes e magnéticos não são usados para este fim.

Um elétron normal que se desloca pela rede cristalina de um condutor vai se chocando com os átomos da rede, perdendo energia e aquecendo o material. Isso é chamado de "efeito Joule" e ocorre em todo condutor normal.

### **a) Condução nos sólidos**

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 submetidos 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 elétrico, 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.

### **b) 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



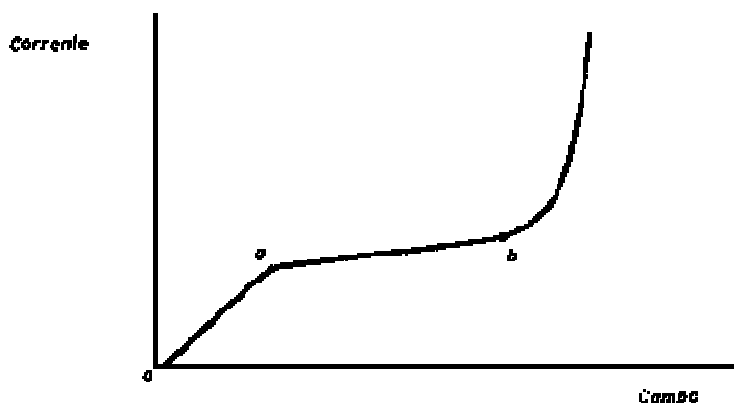
acelerações dos anions e cátions são diferentes porque dependem das suas massas e sua carga elétrica.

### c) *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 1.6.



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 freqüência 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.

### 1.4.2 Resistência e Condutância Elétrica

As cargas elétricas deslocam-se sob a forma de corrente elétrica através das diferentes substâncias, mas sob aspectos diversos. Chama-se de **resistência** a maior ou menor dificuldade que opõe um condutor à passagem de corrente elétrica, cuja unidade é o Ohm ( $\Omega$ ).

A resistência elétrica  $R$  obedece a lei de Ohm ( $V=RI$ ) e pode ser entendida como a avaliação quantitativa da resistividade, pois depende da geometria do material.

A resistência de um objeto é função da resistividade do seu material, da área da seção reta e do seu comprimento. Estes três parâmetros relacionam-se conforme a equação abaixo:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad \Omega$$

Onde:

$R$ : resistência da haste, em ohms

$\rho$ : resistividade do material, em ohms.m

$l$ : comprimento da haste, em m

$A$ : área da seção reta, em  $m^2$

**Condutância elétrica** é o inverso da resistência elétrica. A unidade derivada do SI de condutância é o siemens (símbolo  $S$ , igual a  $\Omega^{-1}$ ). Não deve ser confundida com condutividade elétrica, que é uma característica específica de um material e recíproca a resistividade elétrica.

### 1.4.3 Permissividade Dielétrica

Quando um material condutor isolado for mergulhado em um campo elétrico externo seus elétrons livres se reorganizam formando uma carga superficial de tal forma a anular o campo elétrico no seu interior. Se procedermos da mesma forma, porém, com um material isolante (dielétrico), devido a sua pequena concentração de elétrons livres, o campo elétrico no seu interior não será totalmente anulado. Isto ocorre devido à polarização das moléculas (dipolos elétricos) do material isolante formando também uma carga superficial.

A propriedade que representa a maior ou menor capacidade de um material em permitir um adensamento de um fluxo de campo elétrico por sua estrutura é chamada de permissividade dielétrica e é dada por  $\epsilon$ .

A permissividade do ar ou do vácuo é dada por:  $\epsilon_0 = 8,8541878176 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ .



Já o termo permissividade relativa do material  $\epsilon_r$  é dado por  $\epsilon / \epsilon_0$  é adimensional e também conhecida como a constante dielétrica k.

A permissividade dielétrica dos materiais depende das condições de trabalho e varia em função da temperatura e da frequência de utilização.

Material	Permissividade dielétrica (k)
Ar	~1
Mica	5 a 7,8
Vidros	5 a 10
Porcelana	5,1 a 5,5
PVC	2,6 a 6,5
EPR	2,6
Óleo de transformador	2,5
Papel encerado	3,1
Ebonite	2 a 2,8

#### 1.4.4 Rigidez Dielétrica

Corresponde ao valor limite de tensão aplicada sobre a espessura do material (kV/mm), sendo que, a partir deste valor, os átomos que compõem o material se ionizam e o material dielétrico deixa de funcionar como um isolante.

No caso do ar, sua rigidez dielétrica vale cerca de  $3 \times 10^6$  N/C, assim, quando um campo elétrico no ar ultrapassar esse valor, ele deixa de ser isolante e torna-se condutor.

O valor da rigidez dielétrica varia de um material para outro e depende de diversos fatores como:

- Temperatura.
- Espessura do dielétrico.
- Tempo de aplicação da diferença de potencial
- Taxa de crescimento da tensão.
- Para um gás, a pressão é fator importante.

Material	Rigidez dielétrica (kV/mm)
Ar	3
Mica	60
Vidros	7,5 a 30
Porcelana	100
PVC e EPR	50
Óleo mineral	15 a 280





## 1.5 Propriedades Magnéticas

Força magnética ou magnetismo é fundamental na geração e aproveitamento da corrente elétrica. Equipamentos como transformadores, motores, geradores, medidores mecânicos, instrumentos elétricos etc não existiriam se os fenômenos magnéticos não fossem compreendidos e dominados.

### 1.5.1 Permeabilidade e Susceptibilidade Magnética

Os materiais podem exibir, quando submetidos a um campo magnético qualquer, comportamentos diferentes quanto à concentração das linhas de fluxo magnético. Isto é, poderão atrair (concentrar), repelir ou nem mesmo perturbar o campo magnético. Por exemplo, quando colocados próximos ao pólo de um ímã certos materiais são:

- Fracamente atraídos (paramagnéticos);
- Fracamente repelidos (diamagnéticos);
- Fortemente atraídos (ferromagnéticos) ou
- Não exercem ação alguma sobre as linhas de fluxo magnético (indiferentes).

A propriedade dos materiais que descreve este comportamento é chamada permeabilidade magnética  $\mu$  e sua unidade é dada por H/m (H=Henry).

A permeabilidade magnética do vácuo  $\mu_0$  é igual a  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m.

De forma análoga à condutividade elétrica dos materiais, o termo permeabilidade relativa do material  $\mu_r$  é dado por  $\mu / \mu_0$  e é adimensional.

- Paramagnéticos possuem  $\mu_r$  ligeiramente maior que 1;
- Diamagnéticos possuem  $\mu_r$  ligeiramente menor que 1;;
- Ferromagnéticos possuem  $\mu_r$  muito maior que 1;
- Indiferentes possuem  $\mu_r$  igual a 1.

A magnetização  $M$  de um material representa o grau de polarização dos dipolos magnéticos do material quando o mesmo é atravessado por um campo magnético  $H$

$$M = (\mu_r - 1) H = \chi_m H \quad (\text{A/m})$$

Onde  $\chi_m$  é a susceptibilidade magnética.

Portanto, pode-se dizer que a susceptibilidade e, conseqüentemente, a permeabilidade é a medida da intensidade com que o material pode ser magnetizado. Refere-se à menor ou maior facilidade com que o material se deixa atravessar pelo fluxo magnético circulante.

Material	Permeabilidade magnética relativa $\mu_r$
Ar, cobre e madeira	1
Prata	1 a $-20 \times 10^{-6}$
Zinco	1 a $-10 \times 10^{-6}$
Alumínio	1 a $+22 \times 10^{-6}$
Ferro	5500
Aço	500 a 5000

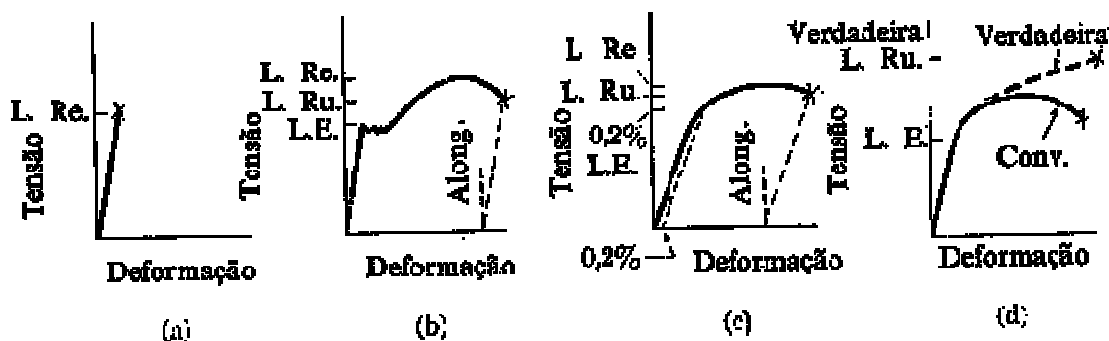
## 1.6 Propriedades Mecânicas

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.

### 1.6.1 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 figura a seguir mostra diagramas tensão x deformação típicos.



Curva tensão x deformação ideal

Conforme a figura, até o ponto L.E. 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 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, haja aumento da tensão. Além, do ponto L.E. a deformação será, em parte, elástica e, em parte, inelástica. Porém, o material não mais retornará às suas dimensões originais quando a força for 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.

Cabe ainda 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. (c)).



- **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.
- **Ductilidade:** 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.

$$\text{Estrição} = \frac{\text{área inicial} - \text{área final}}{\text{área inicial}}$$

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 dúcteis, 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.

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.

### 1.6.2 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.

## 1.7 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:

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

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:

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

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.

Dilatação linear: É importante no estudo de linha de transmissão onde o efeito da temperatura na dilatação de cabos aéreos deve ser considerado. Nos casos de união ou junção de materiais diferentes (ex: bimetais que são dois metais com diferentes coeficientes de dilatação térmica soldados por sintetização) este fator é importante para a avaliação da dilatação diferencial (a curvatura sofrida pelo bimetal devido a diferença de dilatação entre os dois metais. A dilatação linear pode ser obtida por:

$$\Delta L = L - L_0 = \alpha L_0 \Delta T$$

## 1.8 Propriedades Químicas

### 1.8.1 Radiação

No campo da engenharia também tem-se preocupado muito com 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.





### 1.8.2 Oxidação

Logo que se conheceu a estrutura dos átomos verificou-se que, quando um elemento ou uma substância combinava-se com o oxigênio, esta espécie química perdia elétrons.

Modernamente o termo oxidação significa perder elétrons, não necessariamente em presença de oxigênio (quando um elemento perde elétrons o seu estado de oxidação aumenta).

A Oxidação pode ocorrer em três circunstâncias:

1. quando se adiciona oxigênio à substância,
2. quando uma substância perde hidrogênio ou
3. quando a substância perde elétrons.

Exemplos:

As saladas de frutas tendem a se escurecer quando entra em contato com o ar, isso porque o oxigênio age com o ferro presente nas frutas, promovendo sua oxidação. Uma dica para que isso não ocorra é adicionar suco de limão ou laranja, pois a vitamina C - ácido ascórbico - presente nas frutas cítricas impede a ação oxidante do oxigênio sobre a salada.

O manuseio dos fios de cobre causa, além de perdas, sua oxidação diminuindo a vida útil do material.

Aço Corten aplicado na construção de um estúdio para um artista, localizado em New Jersey – EUA. Nas fotos ao lado pode-se perceber o aço antes e depois da oxidação. Este tipo de aço é muito utilizado na construção civil, apresenta em média 3 vezes mais resistência à corrosão que o aço comum além de minimizar os custos com manutenção e o impacto ambiental.



Na foto ao lado pode ser observada a oxidação e a corrosão em uma vela de automóvel. O material dos eletrodos oxidou, e quando a oxidação é pesada a superfície apresenta-se esverdeada.



### 1.8.3 Corrosão

É a transformação de um material pela sua interação química ou eletroquímica num determinado meio de exposição. Este processo resulta em alterações prejudiciais indesejáveis, sofridas pelo material, tais como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais.

Quase sempre, a corrosão metálica (por mecanismo eletroquímico), está associada à exposição do metal ou uma liga metálica a um meio com presença de moléculas de água, juntamente com o gás oxigênio ou íons de hidrogênio, num meio condutor. Porém, 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.

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 frequentemente 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 defini-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.

São medidas indicadas para se prevenir ou diminuir a ação corrosiva:

- 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 e 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. Também se podem usar como camadas protetoras materiais cerâmicos inertes;
- uso de materiais de nobrezas próximas: os metais selecionados, se possível, deverão estar localizados, na tabela de potenciais, o mais próximo possível;
- 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). Um aço contendo cromo é muito resistente à corrosão em condições oxidantes; entretanto, na ausência de oxigênio a reação pode ocorrer.



Em eletro-eletrônicos e computadores em geral a oxidação e a corrosão se iniciam naturalmente em função do acúmulo da umidade e do sal, provenientes do meio-ambiente. Mudanças físicas e químicas na superfície de conexões eletromecânicas, por exemplo, são a causa primária de degradação do desempenho em componentes e equipamentos.

Quando superfícies de contato são expostas à sujeira, fumaça, gases, fuligem e outros sólidos suspensos na atmosfera, "filmes" não metálicos se formam, inibindo a condutividade.

A oxidação é a reação mais comum, e causa a formação do óxido. A maresia corrói a maioria dos metais, formando uma fina camada clorídrica. Umidade, condensação, sais, enxofre e fumaça ácida são também causadores de ferrugem, corrosão e oxidação.

O aumento da resistência e a fricção entre superfícies metálicas também causa ruídos, travamentos e em alguns casos, aumento no consumo de energia.

## 1.9 Propriedades Ópticas

### 1.9.1 Refração

Fenômeno que ocorre quando os raios luminosos passam de um meio para outro e sofrem uma variação na velocidade de propagação e uma mudança na direção.

A relação entre a velocidade da luz no vácuo ( $c$ ) e a velocidade da luz em um material particular ( $V_p$ ); é chamado de índice de refração " $m$ " daquele material. Para alguns comprimentos de onda ( $\lambda$ ), o índice de refração depende mais do material. Então:

Para materiais que não tem a capacidade de absorver luz (não absorventes):

$$m = c/V_p$$

Para materiais que tem capacidade de absorver luz (absorventes):

$$m = m'(1 - ai)$$

Onde:

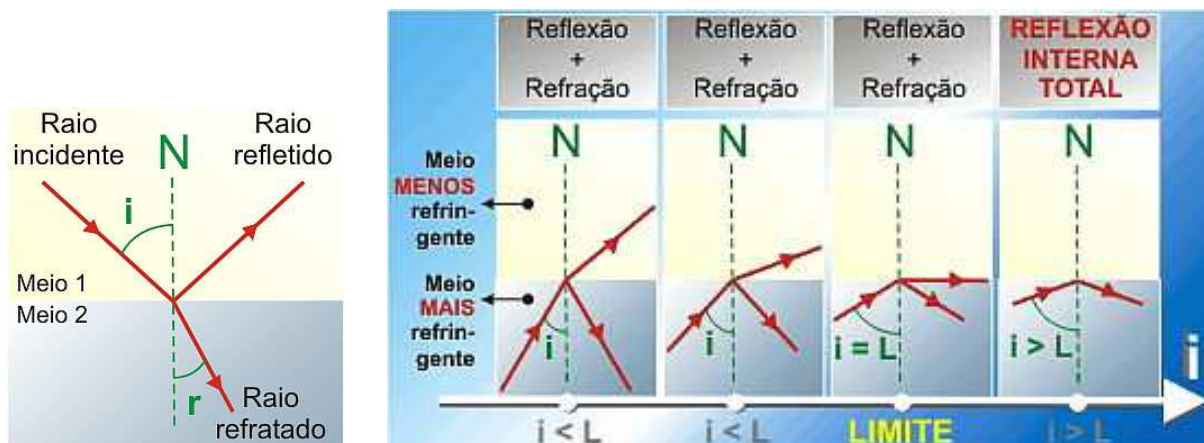
$m'$ : índice de refração real

$a$ : relacionado com o coeficiente de absorção do material.

$i$ :  $\sqrt{-1}$ , parte imaginária, número complexo

A parte imaginária do índice de refração é igual a zero para materiais não absorventes.





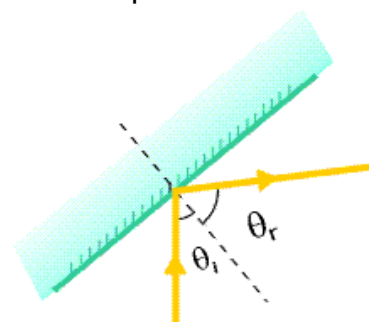
### 1.9.2 Reflexão

O fenômeno da reflexão consiste na mudança da direção de propagação dos raios luminosos. Consiste no retorno da energia incidente em direção à região de onde ela é oriunda, após entrar em contato com uma superfície refletora.

A energia pode tanto estar manifestada na forma de ondas como transmitida através de partículas. Por isso, a reflexão é um fenômeno que pode se dar por um caráter eletromagnético, óptico ou sonoro.

A reflexão pode ser explicada totalmente com base em apenas duas leis, de cunho geral:

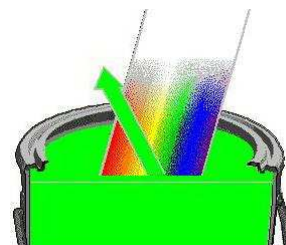
1. O raio incidente, a reta normal e o raio refletido são coplanares, ou seja estão no mesmo plano.
2. O ângulo de incidência com a reta normal é igual ao ângulo de reflexão com a reta normal.



Sendo a **normal** a semi-reta que se origina a partir da superfície refletora, situando-se perpendicularmente a esta; **ângulo de incidência** aquele que a direção de deslocamento da energia faz com a normal e **ângulo de reflexão** aquele definido pela direção que a energia que é refletida faz com a normal.

### 1.9.3 Absorção

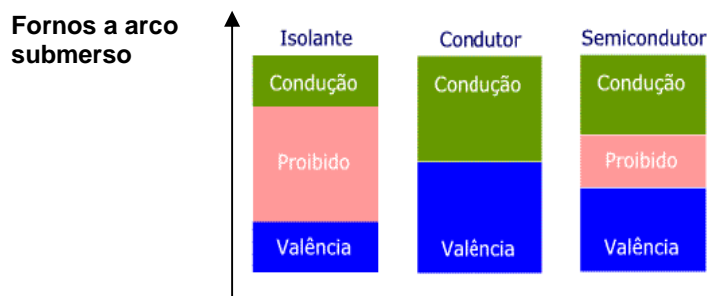
Existem superfícies que absorvem a maior parte das radiações luminosas que chegam até elas. Geralmente, tais objetos são de cor preta. Outros tipos de superfícies e objetos absorvem só uma determinada gama de comprimentos de onda refletindo o resto, o que vai definir a cor da superfície que observamos.





## 1.10 Bandas de Energia

Quando os átomos não estão isolados, mas juntos em um material sólido, as forças de interação entre eles são significativas. Isso provoca uma alteração nos níveis de energia acima da valência. Podem existir níveis de energia não permitidos, logo acima da valência.



Para que um material conduza eletricidade, é necessário que os elétrons de valência, sob ação de um potencial elétrico aplicado, saltem do nível de valência para um nível ou banda de condução.

Conforme figura acima, em um material condutor quase não existem níveis ou banda de energia proibidos entre a condução e a valência e, portanto, a corrente flui facilmente sob a ação do campo elétrico. Um material isolante apresenta uma banda proibida de grande extensão entre a valência e condução. Por isso, dificilmente há condução da corrente.

Os semicondutores possuem bandas proibidas com larguras intermediárias. Isso significa que podem apresentar alguma condução, melhor que a dos isolantes, mas pior que a dos condutores.

## 1.11 Classificação dos Materiais Elétricos

Os materiais elétricos são, basicamente, classificados sob dois pontos de vista:

- a) **elétrico**, recebendo os nomes de condutores, isolantes e semicondutores;
- b) **magnético**, dividindo-se em: materiais ferromagnéticos, diamagnéticos e paramagnéticos.



## CAPÍTULO II

### MATERIAIS CONDUTORES

#### 2.1 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 outro metal ou uma liga, que, apesar de eletricamente menos vantajoso, satisfaz as demais condições de utilização.

Em um átomo neutro o número de elétrons é igual ao número de prótons. Quando há um desequilíbrio, dizemos que o átomo está ionizado. Se apresentar elétrons em excesso, o átomo estará ionizado negativamente, se apresentar falta de elétrons estará ionizado positivamente.

É importante observar que o número de prótons é constante, o que se altera é o número de elétrons, isto é, para ionizar o átomo negativamente colocamos elétrons a mais, e se quisermos ionizar o átomo positivamente, retiramos elétrons.

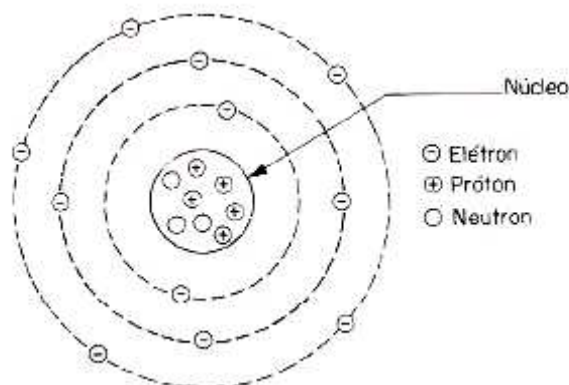
Do ponto de vista macroscópico, dizemos que o corpo está eletrizado quando houver um desequilíbrio entre o número de prótons e o número de elétrons dos átomos deste corpo.

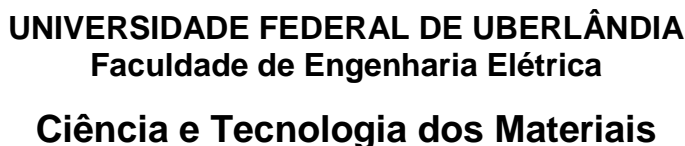
A quantidade de carga adquirida pelo corpo depende do número de elétrons retirados ou colocados no corpo.

Em alguns tipos de átomos, especialmente os que compõem os metais - ferro, ouro, platina, cobre, prata e outros -, a última órbita eletrônica perde um elétron com grande facilidade. Por isso seus elétrons recebem o nome de elétrons livres.

Estes elétrons livres se desgarram das últimas órbitas eletrônicas e ficam vagando de átomo para átomo, sem direção definida. Mas os átomos que perdem elétrons também os readquirem com facilidade dos átomos vizinhos, para voltar a perdê-los momentos depois. No interior dos metais os elétrons livres vagueiam por entre os átomos, em todos os sentidos.

A condução do fluxo de elétrons livres, ou a circulação de uma corrente elétrica é notada tanto em materiais sólidos quanto nos líquidos, e, sob condições favoráveis, também nos gasosos.





No grupo dos líquidos, vale mencionar os metais em estados de fusão, eletrólitos e as soluções de ácidos, de bases e de sais. Destaca-se o caso particular do mercúrio, único metal que, à temperatura ambiente, se encontra no estado líquido e solidifica-se apenas a  $-39\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Outro exemplo: em uma solução de água com sal ( $\text{NaCl}$ ), haverá uma dissociação da molécula de cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ) em íons  $\text{Na}^{+}$  e  $\text{Cl}^{-}$ , que ficam livres para se movimentar pelo interior da solução.

Exemplos de bons condutores:

- Metais (como o cobre, alumínio, ferro, etc.) usados para enrolamentos de máquinas elétricas e transformadores, etc.
- Ligas metálicas usadas para fabricação de resistências, aparelhos de calefação, filamentos para lâmpadas incandescentes, etc.
- Grafite
- Soluções aquosas (de sulfato de cobre, de ácido sulfúrico. etc.)
- Água da torneira, água salgada, água ionizada (como, por exemplo, as das piscinas);
- Corpo humano;
- Ar úmido.

	1A																										8A																								
																											(0)																								
I	H 1	2A																									He 2																								
II	Li 3	Be 4																B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10																												
III	Na 11	Mg 12	3B	4B	5B	6B	7B	8B				2B	1B	Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18																																
IV	K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36																																	
V	Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54																																	
VI	Cs 55	Ba 56	*	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86																																	
VII	Fr 87	Ra 88	**	Rf 104	Db 105	Sb 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Uun 110	Uuu 111	Uub 112	Uuq 114																																						
<table><tr><td>* Série dos Lantanídeos</td><td>La 57</td><td>Ce 58</td><td>Pr 59</td><td>Nd 60</td><td>Pm 61</td><td>Sm 62</td><td>Eu 63</td><td>Gd 64</td><td>Tb 65</td><td>Dy 66</td><td>Ho 67</td><td>Er 68</td><td>Tm 69</td><td>Yb 70</td><td>Lu 71</td></tr><tr><td>** Série dos Actínídeos</td><td>Ac 89</td><td>Th 90</td><td>Pa 91</td><td>U 92</td><td>Np 93</td><td>Pu 94</td><td>Am 95</td><td>Cm 96</td><td>Bk 97</td><td>Cf 98</td><td>Es 99</td><td>Fm 100</td><td>Md 101</td><td>No 102</td><td>Lr 103</td></tr></table>																				* Série dos Lantanídeos	La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71	** Série dos Actínídeos	Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103
* Série dos Lantanídeos	La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71																																				
** Série dos Actínídeos	Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103																																				

**LEGENDA**

- Hidrogênio
- Metais
- Semi-metais
- Não metais
- Gases Nobres
- Lantanídeos
- Actinídeos



## 2.2 Características dos Condutores

### 2.2.1 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 a seguir:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A}$$

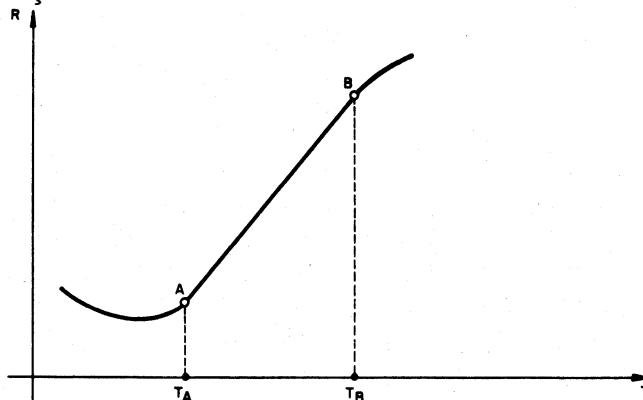
onde:

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

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

$l$  - comprimento do condutor (em 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 Figura a seguir, nota-se que ela não obedece em toda sua extensão a uma relação constante de ordenadas e abscissas.



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

$$\text{tg } \alpha = \frac{\Delta R}{\Delta T}$$

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

Nesse caso:

$$R_{T_1} = R_{20} [1 + \alpha_{20} (T_2 - 20)]$$



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.

### **2.2.2 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 mm, 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. Chama-se 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.

Pode-se 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).

## **2.3 Materiais de elevada condutividade**

Os materiais condutores caracterizam-se por uma elevada condutividade elétrica. Possuem também grande capacidade de deformação, moldagem e condutividade térmica. Com exceção do mercúrio e dos eletrólitos, que são condutores líquidos, e do plasma (gás ionizado) que é gasoso, os materiais condutores são geralmente sólidos e, neste caso, incluem-se os metais, suas ligas e não-metais como o carvão, carbono e grafite.

Os metais são elementos químicos que formam sólidos opacos, lustrosos, bons condutores de eletricidade e de calor e, quando polidos, bons refletores de luz. A maioria dos metais é forte, dúctil, maleável e, em geral, de alta densidade. Vejamos alguns dos metais mais utilizados na área de Engenharia Elétrica:





### 2.3.1 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 termo-resistividade vale:  $\alpha = 0.00393/^\circ\text{C}$ .

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 empecilho 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 nu 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 considerar também os 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. A tabela abaixo apresenta as características das 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.

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 às das dos aços inoxidáveis, além da possibilidade de poderem ser obtidas mais facilmente, por fundição em areia ou em moldes metálicos; ligas cobre-cromo, etc.

### 2.3.2 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.

Vejamos uma comparação de algumas características entre o cobre e o alumínio na tabela apresentada na sequência.

Característica física	Alumínio (duro)	Cobre (duro)	Padrão IACS*
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 ( $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ )	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.

### Aplicações das 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 a seguir:

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	$2,4 \times 10^{-3}$	



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

### **2.3.3 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).

### **2.3.4 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.



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**Faculdade de Engenharia Elétrica**  
**Ciência e Tecnologia dos Materiais**

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 a seguir.

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 laminado e recosido – 20 a 26 encruado – 35 a 45	35 – 40 35 – 40 2 – 6	8,3 a 8,9	1083	2360	3,82 – 4,30	0,0169 0,0179 0,0182
Alumínio	recosido – 3,5 – 6 encruado – 11 – 13	40 – 50 4 a 5					0,0262 0,0295
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

### 2.3.5 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. anterior, 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 parte 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 (lixa, limas, etc).



### **2.3.6 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 tabela anterior.

### **2.3.7 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.

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.

### **2.3.8 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.



### 2.3.9 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 num 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.

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 intercristalinas 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/□mm<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.

### 2.3.10 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 no mais suas propriedades são bem semelhantes a este. Por seu brilho metálico, tem sido usado





como metal de revestimento, 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.

### **2.3.11 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 500oC. 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 1100oC, 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 356oC (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 900oC. Outro setor onde o níquel é usado é o dos termoelementos, em substituição ao par platina - platina-sódio, para temperaturas até 1200oC. Combinado com o ferro, leva a liga magnéticas apropriadas.

### **2.3.12 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 500oC, 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. 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.

### **2.3.13 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 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.

### **2.3.14 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 ligas 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.

Alguns materiais não-metálicos como o carvão, carbono e grafite também apresentam qualidades condutoras.

### **2.3.15 Carvão, Carbono e Grafite**

O carbono (do latim carbo, carvão) é um elemento químico, símbolo C de número atômico 6 (6 prótons e 6 elétrons) e sólido a temperatura ambiente.

Dependendo das condições de formação pode ser encontrado na natureza em diversas formas alotrópicas: carbono amorfo e cristalino em forma de grafite ou de diamante. O diamante não é condutor de eletricidade.





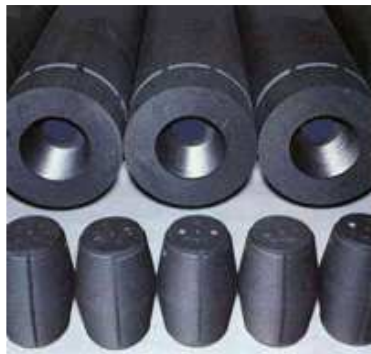
O grafite é muito mais denso, melhor condutor de eletricidade, um tanto oleoso e menos sensível aos agentes químicos que os carbonos amorfos. Enquanto as propriedades do grafite são bem definidas, as dos carbonos amorfos dependem da sua origem e das condições de formação.

O grafite pode ser natural ou sintético. O natural ocorre na natureza e, na maioria das vezes, necessita de purificação e classificação granulométrica para ser utilizado comercialmente. O sintético é produzido a partir de outras formas de carbono como coque e antracita (forma amorfa do carvão, caracterizada pelo agrupamento caótico e aleatório dos seus átomos). Estes materiais são reduzidos a pó e compactados, às vezes com a presença de aglomerantes. Posteriormente são submetidos a altas temperaturas (em torno de 2200°C), geralmente através da passagem de corrente elétrica. Este processo recebe o nome de grafitização. Ao produto assim obtido dá-se habitualmente o nome de carvão eletrografítico.

O grafite e o carvão eletrografítico são muito utilizados na tecnologia de resistores, de potenciômetros de carvão e na produção de eletrodos para fornos elétricos. Eles apresentam propriedades lubrificantes, pois oferecem um baixo coeficiente de atrito em contatos de peças deslizantes. Desta forma são utilizados como comutadores em escovas coletoras de motores.

Outras aplicações:

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

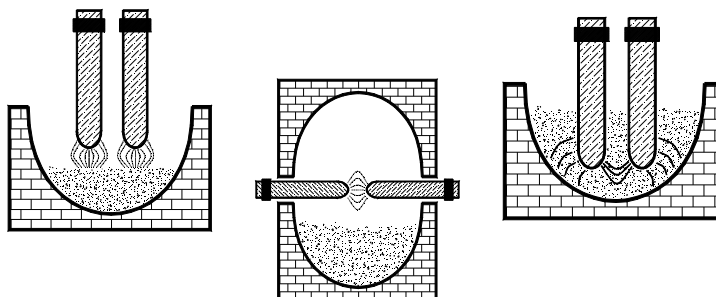




### Eletrodos de grafite para forno elétrico a arco

#### TIPOS DE FORNOS A ARCO:

Fornos a arco direto



Fornos a arco indireto

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.

Veja na tabela as propriedades de algumas variedades do carbono:

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



## 2.4 Materiais de elevada Resistividade

As ligas metálicas resistivas são utilizadas com três finalidades básicas:

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

### 2.4.1 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.

### 2.4.2 Ligas 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.

### 2.4.3 Ligas 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.

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.

## 2.5 Aplicações

Conforme apresentado anteriormente, os materiais condutores de corrente elétrica são classificados em dois grandes grupos:

- Materiais de elevada condutividade
- Materiais de elevada resistividade





Ao primeiro grupo destinam-se todas as aplicações em que a corrente elétrica deve circular com menores perdas de energia possíveis (tal como elementos de ligação entre aparelhos, dispositivos, etc.), ou ainda como elementos de circuitos que devem dar origem a uma segunda forma de energia por transformação elétrica (tal como em bobinas eletromagnéticas).

Os materiais do segundo grupo destinam-se, por um lado, à transformação da energia elétrica em térmica (tal como em fornos elétricos) e, por outro lado, para criar num circuito elétrico certas condições destinadas a provocar quedas de tensão e limitação de corrente para se obter um ajuste às condições adequadas ao circuito.

Neste tópico serão abordadas as aplicações especiais destes materiais em Engenharia Elétrica.

### 2.5.1 Resistores

Resistores são componentes capazes de transformar a energia elétrica em energia térmica, diminuir a tensão e limitar a corrente em vários pontos de um circuito.



Resistor elétrico



Resistor de lâmpada



Resistor de Chuveiro

Existem muitos tipos de resistores, porém em sua grande maioria são pequenos demais para se escrever o valor no corpo do mesmo. Desta forma, os fabricantes utilizam de um código de cores, que informa o seu valor.

Os resistores menores ainda, que são soldados diretamente na superfície da placa, nem sempre têm o valor impresso no seu corpo, sendo necessário recorrer ao manual técnico do equipamento para saber o valor correto.

Os resistores possuem pequenas variações na fabricação que fazem com que cada um deles apresente valor diferente do outro, mesmo que a aparência seja idêntica e que os valores nominais sejam iguais. Devido a isto, além do valor nominal do resistor, na superfície do mesmo vem impressa a tolerância, ou seja, quanto o valor daquele resistor pode variar acima e abaixo do valor nominal. Os resistores mais comuns são fabricados dentro da com tolerância de 5 ou 10% e possuem 4 faixas coloridas, enquanto os resistores mais precisos, com tolerância de 2, 1% ou menos, são marcados com 5 faixas coloridas para permitir um dígito a mais de precisão. Quando não apresentam a quarta faixa têm tolerância de 20%.

#### a) Como ler um resistor de 4 faixas

Para ler um resistor de 4 faixas coloridas deve-se prestar atenção ao seguinte: há uma cor que está mais próxima do extremo. Esta é a primeira cor a ser considerada na leitura.



A primeira cor deste extremo representa o primeiro dígito do valor. A segunda cor representa o segundo dígito. A terceira cor representa o fator exponencial multiplicativo. Por exemplo:

Marrom = 1

Preto = 0

Vermelho = 2

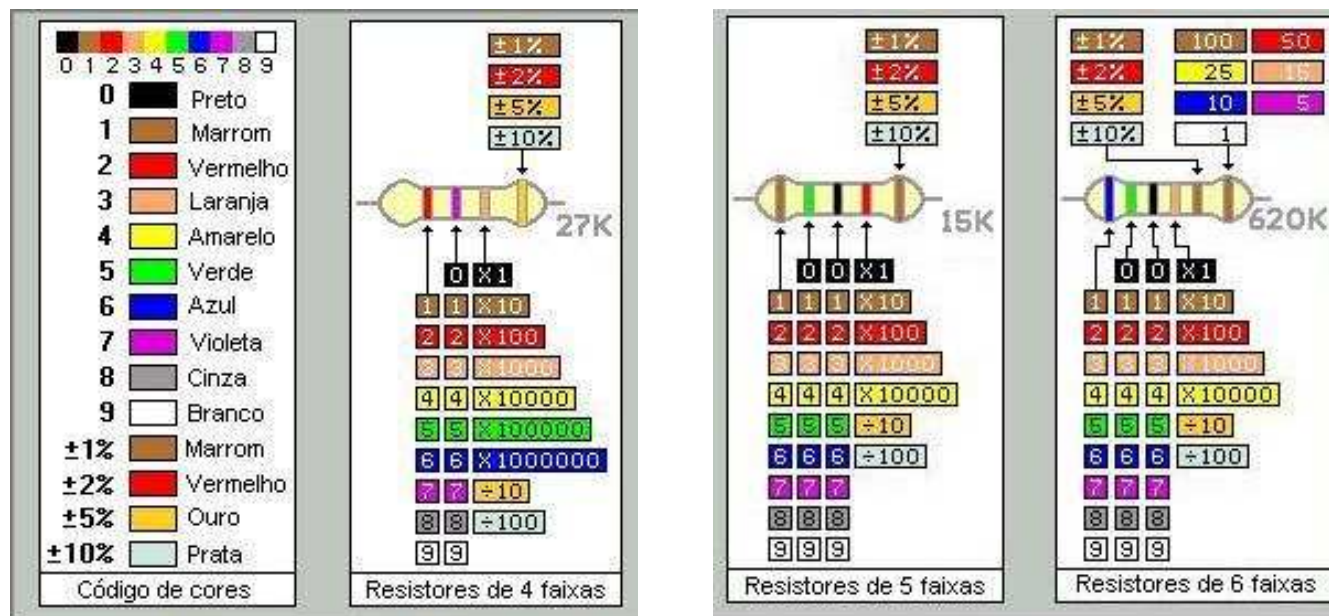
O valor deste resistor será  $10 \times 10^2$ , ou seja, igual a  $1000\Omega$ .

### b) Como ler um resistor de 5 ou 6 faixas

Quando o resistor é de precisão, apresenta 5 faixas coloridas. Como a última faixa destes resistores normalmente é marrom ou vermelha, pode haver uma confusão a respeito de onde é o lado certo para iniciar a leitura, já que a primeira faixa que representa o valor do resistor também pode ser marrom ou vermelha. Sendo assim, a exemplo do resistor de 4 listras coloridas, o melhor a fazer é observar a faixa que está mais próxima do extremo do resistor. Esta será a primeira faixa, por onde se deve iniciar a leitura. Outra dica é verificar a faixa que está mais afastada das outras. Esta é a última faixa de cor.

A leitura nestes resistores é semelhante à dos resistores com 4 cores, mas é adicionada mais uma cor no início, fazendo existir mais um algarismo significativo na medição. Assim, os três primeiros dígitos são os algarismos significativos, o que confere maior precisão na leitura. O quarto é o elemento multiplicador. O quinto dígito é a tolerância e o sexto dígito (quando existir) fará referência ao coeficiente de temperatura, ou seja, como a resistência varia de acordo com a temperatura ambiente. Este último valor é dado em PPM/°C (partes por milhão por graus Celsius).

A tabela de cores dos resistores pode ser vista abaixo.







Exemplos



1º Faixa - Vermelho=2

2º Faixa - Vermelho=2

3º Faixa - Fator Multiplicativo - Marrom= $10 \times 1 = 10$

4º Faixa - Tolerância - Ouro = 5%

Valor do Resistor =  $22 \times 10 = 220 \Omega$  5%



1º Faixa - Amarelo=4

2º Faixa - Violeta=7

3º Faixa - Fator Multiplicativo - Vermelho= $10^2 = 100$

4º Faixa - Tolerância - Ouro = 5%

Valor do Resistor =  $47 \times 100 = 4700 \Omega$  ou  $4,7K \Omega$  ou  $4K7 \Omega$



1º Faixa - Vermelho=2

2º Faixa - Vermelho=2

3º Faixa - Fator Multiplicativo - Amarelo= $10 \times 10^4 = 10000$

4º Faixa - Tolerância - Ouro = 5%

Valor do Resistor =  $22 \times 10000 = 220000 \Omega$  ou  $220K \Omega$

Calculo Resistores 5 Faixas Cores

Tipo Resistor 5 Faixa

Resistor 5 Faixas

Valor 14  $\Omega$

Tolerancia  $\pm 2$  %

N/A	Preto
	Marrom
	Vermelho
	Laranja
	Amarelo
	Verde
	Azul
	Violeta
	Cinza
	Branco
N/A	Ouro
N/A	Prata

Calculo Resistores 6 Faixas Cores

Tipo Resistor 6 Faixa

Resistor 6 Faixas

Valor 2.32M  $\Omega$

Tolerancia  $\pm 1$  %

Coefficiente Temperatura 50 PPM/ $^{\circ}C$

N/A	Preto
	Marrom
	Vermelho
	Laranja
	Amarelo
	Verde
	Azul
	Violeta
	Cinza
	Branco
N/A	Ouro
N/A	Prata

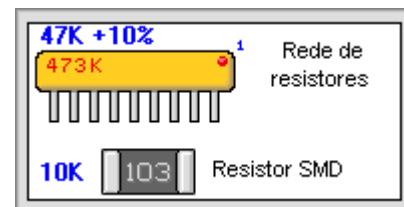
Outros exemplos podem ser calculados em um simulador disponível no site:

<http://www.rmeletronica.com.br/attachments/File/resistor/index.html>

### Resistores SMD

À medida que o tempo passa, menores são os equipamentos e, naturalmente, os componentes internos também acompanham esta diminuição do tamanho. Hoje, dentro desta filosofia, são encontrados facilmente resistores SMD nos aparelhos eletrônicos. Estes resistores são soldados na superfície da placa e, por serem muito pequenos, possuem números impressos no corpo, obedecendo à mesma idéia de contagem, porém com números ao invés de cores.

As redes de resistores (vários resistores dentro de um mesmo encapsulamento) também obedecem a esta metodologia.



### Tipos de Resistores

Os resistores dividem-se basicamente em três tipos:

#### **1) Fixos:**

São aqueles de dois terminais, de valor ôhmico fixo. Os mais comuns são fabricados em película de carbono, sua potência varia de 1/8W até 2,5W e são identificados pelo código de cores. Outros, com potência acima de 5W são de fio, geralmente são fabricados em níquel-cromo e os valores da resistência, potência e tolerância vêm impressos em seu corpo.



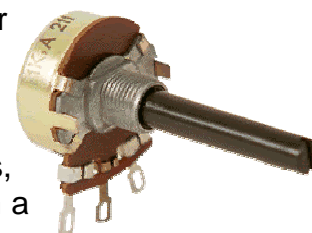
#### **2) Ajustáveis:**

São aqueles de três terminais, sendo o terminal central (cursor) móvel, permitindo ajuste por parafuso ou dispositivo semelhante. São normalmente utilizados para fazer ajustes finais na operação dos circuitos. Tais ajustes não sofrem controle externo ao circuito. São conhecidos como trimpots.



#### **3) Variáveis:**

Também possuem três terminais, onde o cursor móvel pode ser deslocado continuamente por ação de um eixo, variando a resistência entre os terminais fixos e móvel. São usados para controle externo de um determinado parâmetro do circuito. São conhecidos como potenciômetros. Assim como os resistores fixos, os potenciômetros são fabricados em carbono ou fio de acordo com a



potência. Os potenciômetros, segundo a variação da resistência, podem ser lineares ou logarítmicos. Também podem ser com chave ou sem chave. A chave geralmente impõe uma resistência infinita entre dois de seus terminais no fim do curso da variação da resistência. Aplicados em circuitos limitadores de corrente, divisores de tensão, atenuadores resistivos, etc.

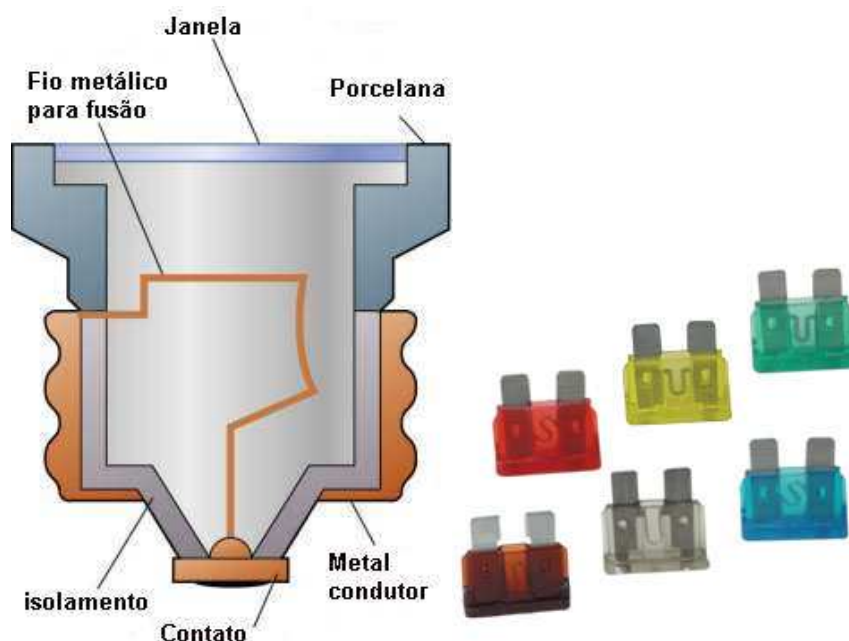
### 2.5.2 Fusíveis

Em eletrônica e em engenharia elétrica fusível é um dispositivo de proteção contra sobrecorrentes e curtos-circuitos. Sobrecorrente ocorre quando o equipamento ou sistema elétrico passa a requerer, por alguma razão, uma corrente maior que a especificação normal, evento que pode ocorrer por tempo prolongado. Curto-circuito define-se como a especial e elevada corrente, cuja duração é inferior ao segundo, originada em decorrência de um defeito na instalação, circuito ou equipamento.

Consiste de um filamento ou lâmina de um metal ou liga metálica de baixo ponto de fusão que se intercala em um ponto determinado de uma instalação elétrica para que se funda, por efeito Joule, quando a intensidade de corrente elétrica superar, devido a um curto-circuito ou sobrecarga, um determinado valor que poderia danificar a integridade dos condutores com o risco de incêndio ou destruição de outros elementos do circuito.

Fusíveis e outros dispositivos de proteção contra sobrecorrente são uma parte essencial de um sistema de distribuição de energia para prevenir incêndios ou danos a outros elementos do circuito.

São dimensionados para suportar continuamente a corrente máxima do circuito ou aparelho protegido.



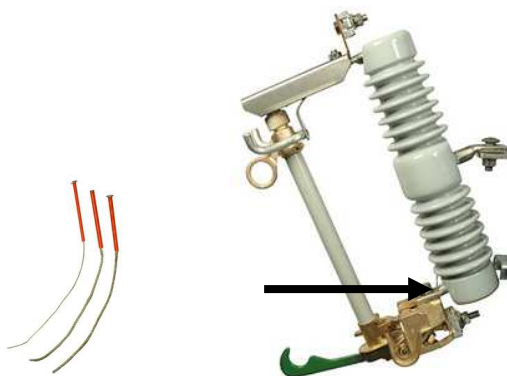
O funcionamento do fusível baseia-se no princípio segundo o qual uma corrente que passa por um condutor gera calor proporcional ao quadrado de sua intensidade. Quando a corrente atinge a intensidade máxima tolerável, o calor gerado não se dissipa com rapidez suficiente, derretendo um componente e interrompendo o circuito.



O tipo mais simples é composto basicamente de um recipiente tipo soquete, em geral de porcelana, cujos terminais são ligados por um fio curto, que se derrete quando a corrente que passa por ele atinge determinada intensidade. O chumbo e os estanho são dois metais utilizados para esse fim. O chumbo se funde a  $327^{\circ}\text{C}$  e o estanho, a  $232^{\circ}\text{C}$ . Se a corrente for maior do que aquela que vem especificada no fusível: 10A, 20A, 30A, etc, o seu filamento se funde (derrete).

Quanto maior for a corrente especificada pelo fabricante, maior a espessura do filamento. Assim, se a espessura do filamento do fusível suporta no máximo uma corrente de 10A e por um motivo qualquer a corrente exceder esse valor, a temperatura atingida pelo filamento será suficiente para derretê-lo, e desta forma a corrente é interrompida.

O fusível de cartucho, manufaturado e lacrado em fábrica, consiste de um corpo oco não condutivo, de vidro ou plástico, cujo elemento condutor está ligado interiormente a duas cápsulas de metal, os terminais, localizados nas extremidades.



### Tipos de Fusíveis

Os fusíveis podem ser:

- 1) **Fusível de Rolha:** é o mais comum nas instalações domiciliares, utilizado normalmente em circuitos de iluminação e força com valores nominais de: 6-10-15-20-25-30A e tensão máxima de trabalho de 205V.
- 2) **Fusível de Cartucho:** Possuem elo fusível laminar ou cilíndrico. É utilizado em circuitos de correntes mais elevadas, principalmente de





iluminação e força com valores nominais de corrente de: 10-15-20-25-30-40-50-60-100A e tensão máxima de 250V.

- 3) **Fusível tipo Faca:** Usado principalmente em circuitos de força, para correntes muito elevadas. O elo fusível é forma de lâmina e apresenta redução de seção em alguns lugares para localizar a área de fusão. Valores nominais de corrente de: 80-100-150-200-250-300-400-500-600A e tensão máxima de 500V.



- 4) **Fusível Diazed:** O elo fusível é uma chapa vazada com furos, utilizado em circuitos de força e iluminação, sendo produzidos tanto do tipo de fusão rápida quanto fusão lenta. Os de ação rápida são destinados a circuitos predominantemente resistivos enquanto que os de ação lenta (retardados) são indicados para proteção de motores, e cargas de altas correntes transitórias de energização, que não justificam a interrupção do circuito. Apresentam areia em seu interior para atenuar os efeitos da pressão, temperatura e arco durante a fusão do elo. Apresentam uma pedra colorida (chamada espoleta) que se desprende de sua posição quando o fusível é queimado. Valores nominais de corrente de: 6-10-15-20-25-30-60A (rápidos) e de 80-100-125-160-200A (retardados) com tensão máxima de até 500V. Também são encontrados os de alta capacidade, conhecidos por “tipo NH” que utilizam cerâmica como isolador.



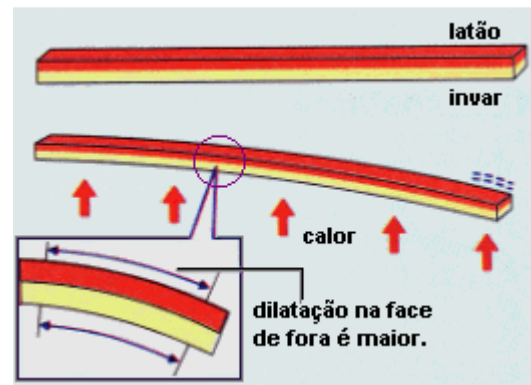
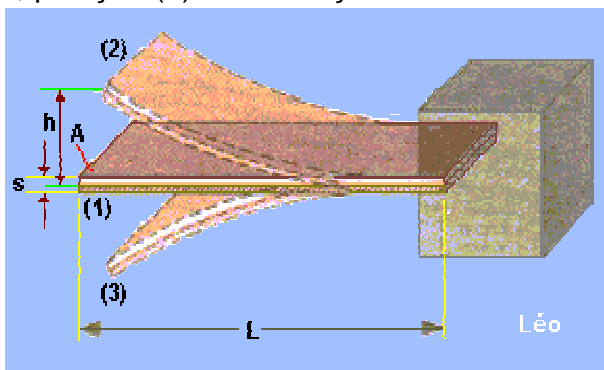
- 5) **Fusível de Cartucho para altas tensões:** Empregado para correntes elevadas e em circuitos de média e alta tensão. É construído com invólucros isolantes de alta rigidez dielétrica, como a porcelana. Elo fusível: fio.
- 6) **Fusível para circuitos eletroeletrônicos:** Em formato de cartucho com invólucro de vidro ou cerâmico contem um filamento de liga de cobre ou prata. Usado para baixos valores de corrente com grande aplicação em proteção de aparelhos eletroeletrônicos.

### 2.5.3 Bimetais

Os bimetais consistem em chapas compostas de duas folhas de metais diferentes passadas no laminador a temperatura bastante elevada para que elas sejam fortemente aderidas uma à outra. Às vezes, ao invés da técnica do laminador, as duas folhas são justapostas e soldadas à ponto.

As lâminas de bimetal são fabricadas para diversos fins; por exemplo: para unir, a resistência mecânica de uma folha, com a elevada resistência à corrosão de outra; ou mesmo para aproveitar os efeitos dos diferentes coeficientes de dilatação térmica.

Se unirmos duas tiras metálicas que têm coeficientes de dilatação lineares  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  muito diferentes, a deformação provocada pelos diferentes alongamentos, ou contrações, das partes sob a ação de uma variação de temperatura, pode ser usada para diversas aplicações. À certa temperatura (de repouso) as duas tiras têm o mesmo comprimento e a lâmina se apresenta plana, posição (1) na ilustração abaixo.



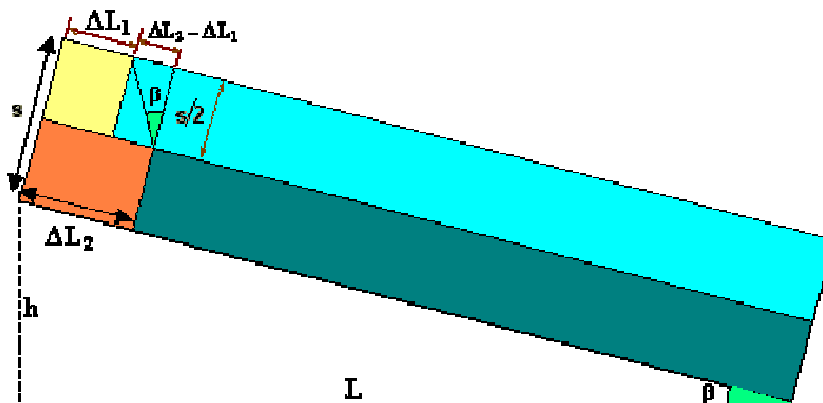
Um aumento de temperatura provoca nela a uniforme flexão no sentido do comprimento de modo que o metal A, menos sensível às variações térmicas, permanece no interior da concavidade - posição (2), ou seja, na face côncava.

Uma diminuição de temperatura provoca a deformação inversa - posição (3) ficando o material A (menor coeficiente de dilatação linear) na face convexa.

Os materiais usados correntemente são ligas de ferro e níquel cujos coeficientes de dilatação linear dependem fortemente da porcentagem de níquel; se esta porcentagem é de 36% obtém-se a liga **invar** que possui um  $\alpha$  extremamente pequeno (daí seu nome, **invariável**). O latão e o **invar** constituem um bom par para a lâmina bimetálica.

Para uma lâmina como a da ilustração acima pode-se assumir  $h$  como a medida da deformação provocada por uma variação de temperatura  $\Delta\theta$  em relação à de repouso: em primeira aproximação a deformação é dada por:





$$\frac{h}{L} = \frac{\Delta L_2 - \Delta L_1}{s/2}$$

$$sh = 2L(\Delta L_2 - \Delta L_1) = 2L\Delta L_2 - 2L\Delta L_1 = 2L^2\alpha_2\Delta\theta - 2L^2\alpha_1\Delta\theta$$

$$sh = 2L^2\Delta\theta(\alpha_2 - \alpha_1) = 2L^2\Delta\alpha\Delta\theta$$

$$h = (2L^2/s)\Delta\alpha\Delta\theta$$

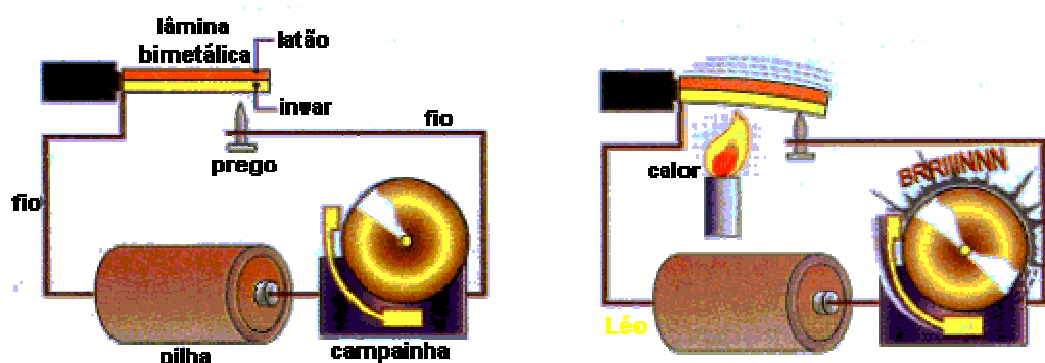
onde: **L** é o comprimento natural da lâmina, **s** é sua espessura e **Δα** é a diferença entre os coeficientes de dilatação linear dos dois materiais.

Para uma lâmina ferro-invar com **L** = 30 mm, **s** = 0,5 mm e para **Δθ** = 1 °C, resulta **h** ≈ 0,04 mm.

As dimensões das lâminas bimetálicas dependem das características de robustez, de sensibilidade e de rapidez requeridas para as suas diversas aplicações; a espessura é geralmente compreendida entre 0,05 a 5 mm.

Nos dispositivos com lâmina bimetálica uma extremidade da lâmina é mantida fixa e é usado o deslocamento da extremidade livre para efetuar alguma ação. Tal deslocamento, eventualmente ampliado, pode ser transmitido a um indicador móvel sobre uma escala graduada: o dispositivo, uma vez calibrado, constitui um termômetro bimetalico (muito comum em tampas de fornos dos fogões a gás).

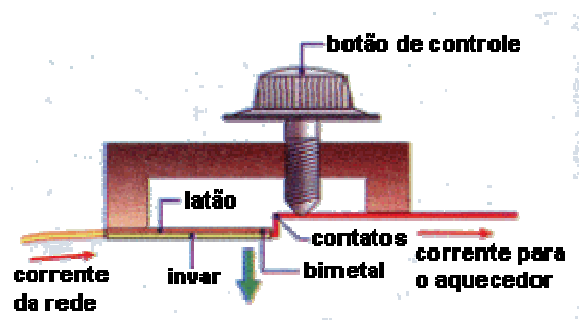
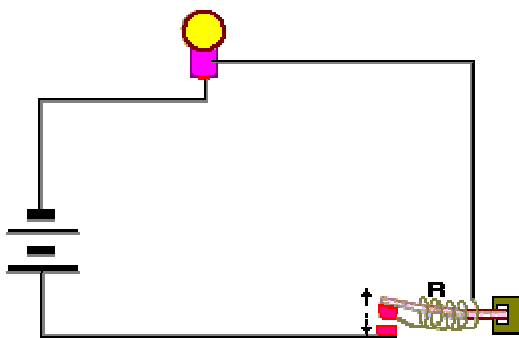
Mais freqüente é o uso de lâminas bimetálicas em aparelhos que efetuam automaticamente a abertura e o fechamento de um circuito elétrico onde a comutação pode ocorrer para valores pré-estabelecidos de temperatura. Eis uma ilustração didática para um alarme contra incêndio:



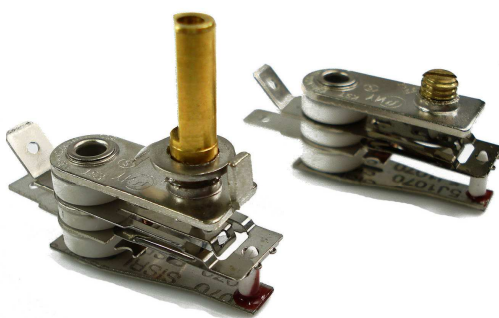


Aplicações típicas e muito difundidas são constituídas pelos interruptores de pulsação automática (intermitentes) nos quais o ligar e desligar de uma ou mais lâmpadas são comandados por uma lâmina bimetálica aquecida por um resistor de resistência  $R$  em série com a lâmpada.

Os termo-reguladores ou termostatos e os interruptores automáticos de sobrecarga funcionam sob este princípio básico das lâminas bimetálicas (abaixo, à direita). Nas decorações de árvores de natal mediante pequenas lâmpadas, uma das lâmpadas usa o próprio calor dissipado em seu funcionamento para acionar um interruptor bimetálico, em série (abaixo, à esquerda).



### Termostatos de Lamina



Termostatos bimetálicos de lamina são amplamente utilizados com o objetivo de regular ou proteger o equipamento de um superaquecimento. Feito com bimetálicos snp-action e com disco cerâmicos de ótima qualidade garantindo ciclos e vida de até 50.000 operações. Devido ao bimetal estar plenamente em contato com a superfície a ser controlada possui um ótimo grau de precisão de acionamento. Bastante utilizado em aplicações acima de 200°C, possui dois modos de ajuste, com pino de regulagem e parafuso fixo na temperatura. Disponível numa faixa de temperatura de -0° C até 300°C, com capacidade de corrente de até 15A.

#### Algumas aplicações

- Fornos elétricos
- Estufas e esterilizadores
- Autoclaves
- Máquinas de fumaça
- Fritadeiras
- Máquinas de Estampas

#### Benefícios e Vantagens

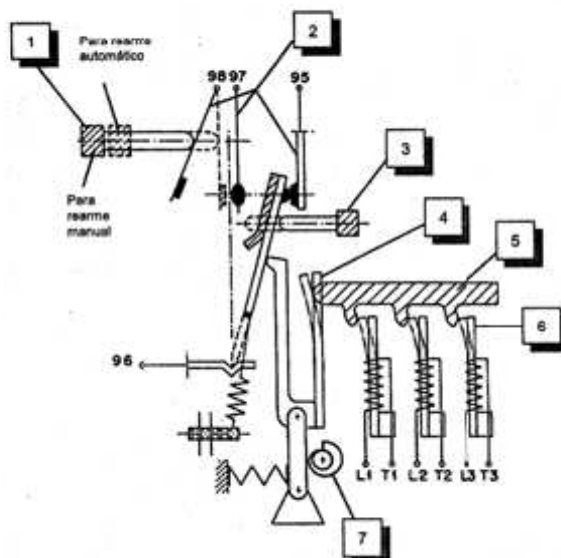
- » Rápida Resposta
- » Pode ser customizado
- » Baixo custo / Alto Benefício
- » Evita queima do equipamentos que causam grandes prejuízos

## Relés de sobrecarga bimetálicos

O relé de sobrecarga bimetálico é constituído de um par de lâminas metálicas (um por fase), com metais de dilatação térmica linear diferente e por um mecanismo de disparo, contidos num invólucro isolante com alta resistência térmica.

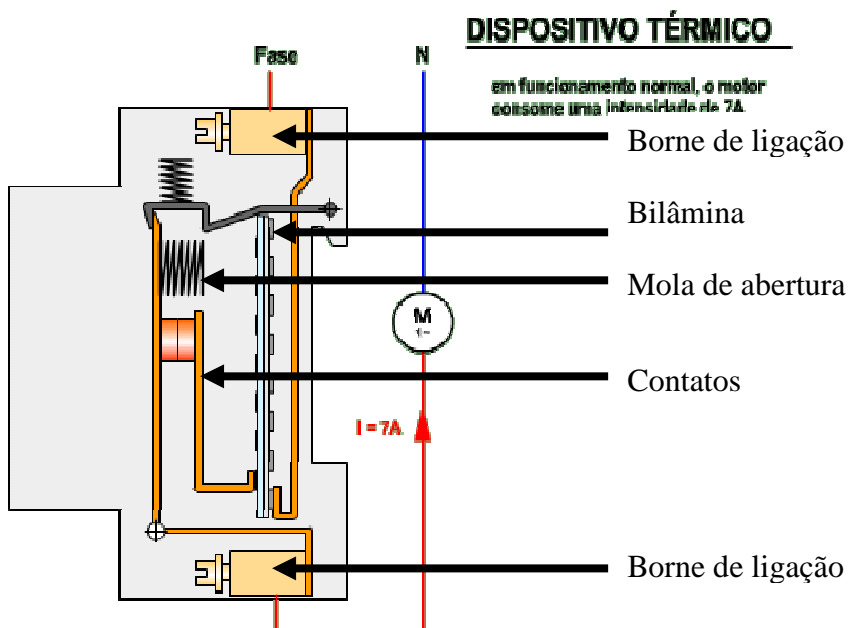


Princípio construtivo



- 1 - Botão de rearme
- 2 - Contatos auxiliares
- 3 - Botão de teste
- 4 - Lâmina bimetálica auxiliar
- 5 - Cursor de arraste
- 6 - Lâmina bimetálica principal
- 7 - Ajuste de corrente

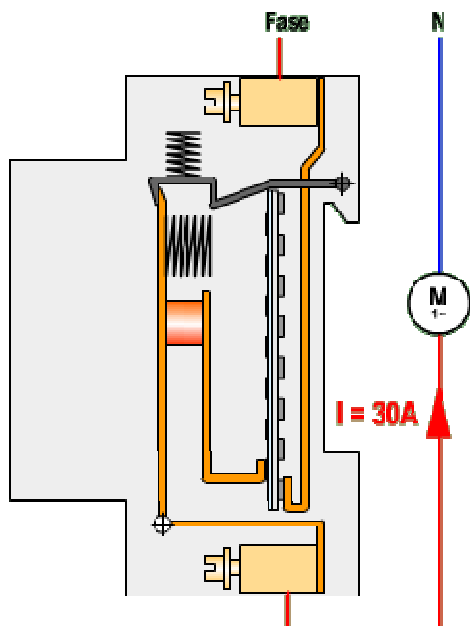
## Disjuntores Termo-magnéticos



Um disjuntor é um aparelho de corte, comando e proteção. É um daqueles dispositivos que todos temos (vários) no quadro elétrico situado à entrada de nossas casas. A sua função é proteger os circuitos no interior destas. Cada um dos disjuntores é responsável por proteger uma parte da nossa instalação elétrica (iluminação, tomadas, máquina de lavar roupa, etc.).

Os disjuntores protegem os circuitos contra sobrecarga (acionamento térmico) e curto-circuito (acionamento magnético que será visto mais adiante), disparando quando se verifica uma destas situações e prevenindo assim danos na instalação que podem levar até ao incêndio.

### DISPOSITIVO TÉRMICO

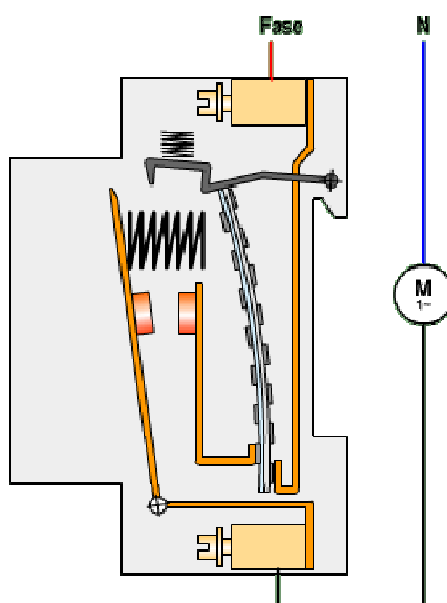


em funcionamento normal, o motor consome uma intensidade de 7A

Suponhamos que um objecto encrava a cadeira de movimento e que o motor entra em pane.

Estamos em situação de **SOBRECARGA**.

A **bilâmina**, deformando-se com o calor devido ao **efeito de Joule**, vai provocar a abertura do circuito.



### DISPOSITIVO TÉRMICO

em funcionamento normal, o motor consome uma intensidade de 7A

Suponhamos que um objecto encrava a cadeira de movimento e que o motor entra em pane.

Estamos em situação de **SOBRECARGA**.

A **bilâmina**, deformando-se com o calor devido ao **efeito de Joule**, vai provocar a abertura do circuito.

O circuito, encontrando-se aberto, a bilâmina vai arrefecer e retornar a sua posição de origem.

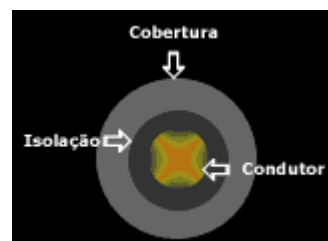
## 2.5.2 Fios e cabos condutores

Um fio é um segmento fino, cilíndrico, flexível e alongado de um certo material de acordo com sua função. São usados fios distintos para transportar tanto energia elétrica quanto informação. São feitos de metal, em geral cobre ou alumínio, revestido de plástico ou borracha isolante.

Basicamente, o que diferencia um fio de um cabo é a flexibilidade, suas características elétricas (capacidade de condução de corrente, resistência da isolação, etc.) são as mesmas. Os fios são feitos de um único e espesso filamento, e por isso são rígidos. Os cabos são feitos por diversos filamentos finos, o que lhes dá maleabilidade e facilitando seu manuseio.

São constituídos, fundamentalmente, por três partes distintas:

- CONDUTOR
- ISOLAÇÃO
- COBERTURA



Cada fio ou cabo deve conter as seguintes informações gravadas de forma contínua: bitola - isolamento - temperatura - nome do fabricante.

Um cabo condutor elétrico pode ser constituído por uma quantidade variável de fios, desde um único fio até centenas deles.

#### CABOS DE ALUMÍNIO:



- Cabo Nú : Obtido através da reunião de vários fios dispostos concenticamente em torno de um fio central. Este fio central pode ser de alumínio (cabo CA) ou de aço (caboCAA).
- Multiplex: Os cabos multiplexados para 0,6/1KV são constituídos a partir da reunião de um, dois ou três condutores fases isolados ao redor de um condutor neutro de sustentação. A isolação é constituída por composto extrudado de polietileno termoplástico (PE) para temperaturas de operação do condutor de 70°C, ou por composto termofixo e polietileno reticulado (XLPE) para temperaturas de operação de condutor 90°C. O condutor neutro de sustentação pode ser formado por fios de alumínio sem alma de aço (tipo CA), ou com alma de aço (tipo CAA)

## 2.6 Supercondutores

Um metal a temperatura ambiente tem resistência elétrica pequena, porém não nula. Quanto menor a temperatura, menor a resistência do material.

Supercondutores são materiais que não oferecem resistência à passagem de corrente elétrica.

A supercondutividade só se verifica abaixo de uma determinada temperatura para cada tipo de material, chamada temperatura crítica. Quanto maior for esta temperatura para um dado material, maior será seu potencial para aplicações práticas.

O holandês Heine Kammerlingh-Onnes achava que a resistência deveria diminuir cada vez mais, chegando a zero no zero absoluto. Ele argumentava que as vibrações dos átomos do metal, que dificultam o deslocamento dos elétrons e causam a resistência, deveriam cessar no zero absoluto. Nesse caso, a resistência elétrica cairia a zero gradualmente.



Kelvin previa que os próprios elétrons deveriam se "congelar" no zero absoluto. Assim, a resistência elétrica na temperatura zero seria infinita. Para resolver esse debate só medindo a resistência dos metais em baixíssimas temperaturas.

No início do séc. XX, Kammerlingh-Onnes, começou então a medir a resistividade de metais em baixíssimas temperaturas. De início, o metal escolhido por ele foi o mercúrio que tinha a vantagem de poder ser altamente purificado. O resultado da experiência foi surpreendente. Ao atingir 4,2 Kelvins (-268,95 °C) a resistência elétrica do fio de mercúrio caiu subitamente a zero! Não foi caindo gradualmente, como pensava Onnes, nem foi para infinito, como queria Kelvin. Como o próprio Onnes disse:

"o mercúrio a 4,2 K entra em um novo estado, o qual, devido a suas propriedades elétricas, pode ser chamado de estado de supercondutividade".

Este resultado foi apresentado por Onnes em um artigo publicado em uma revista científica holandesa em Maio de 1911, com o título "Sobre a variação da resistência elétrica de metais puros em temperaturas muito baixas. O desaparecimento da resistência do mercúrio".

Nos anos seguintes, a supercondutividade foi verificada em vários metais e ligas, mas, sempre, em temperaturas muito baixas.

Em 1956, o físico americano Leon Cooper mostrou que os elétrons que transportam a "supercorrente" se associam em pares enquanto se deslocam pelo material. Estes pares, chamados "pares de Cooper" poderiam ser os responsáveis pela corrente supercondutora em materiais a baixas temperaturas. Normalmente, dois elétrons com carga negativa, não podem chegar perto um do outro por causa da forte repulsão coulombiana. No entanto, Cooper sugeriu que, dentro de um sólido metálico, dois elétrons poderiam vencer essa repulsão mútua com a ajuda de uma excitação da rede cristalina do material, comumente chamada de "fônon".

Um fônon é uma excitação mecânica que se propaga pela rede cristalina de um sólido. Normalmente, essa excitação, que se desloca como uma onda pelo material, é causada pela agitação natural existente em todo sistema sujeito a uma temperatura finita. Ela consiste de pequenos deslocamentos dos átomos da rede. É claro que, quanto maior a temperatura maior o número de fônons, e esses fônons se propagam em todas as direções dentro do material.

Os átomos da rede cristalina de um metal não são eletricamente neutros. Normalmente, eles perderam elétrons e se tornaram positivamente carregados. São os elétrons perdidos que transportam corrente elétrica pelo sólido. Um elétron que se desloca através do material vai perturbando os átomos da rede, atraindo-os por força coulombiana. Essa perturbação é um fônon que sai, de algum modo, na rasteira do elétron, como uma turbulência que segue um carro.

O fônon gerado pela passagem de um elétron, sendo uma onda de átomos positivos deslocados, pode capturar outro elétron que esteja por perto. Isso forma o par de Cooper: dois elétrons ligados através de um fônon da rede. O fônon formado de cargas positivas deslocadas permite que os elétrons, que normalmente se repelem, viajem em conjunto pelo sólido. Em temperatura alta, a agitação térmica é tão forte que um par de Cooper não consegue se manter vivo e logo se quebra. Em baixas temperaturas, no entanto, as chances melhoram.





Em 1957, Cooper, juntamente com John Bardeen, Robert Schrieffer propuseram uma teoria (a Teoria BCS, das iniciais dos autores) que explicava o fenômeno da supercondutividade através da análise detalhada dos pares de Cooper. Neles, os elétrons têm energia ligeiramente inferior à energia dos elétrons individuais. Em termos técnicos, diz-se que existe um "gap" de energia separando os elétrons emparelhados dos elétrons normais.

Quando um elétron, em um condutor normal, interage com os átomos da rede, dá-se uma troca de energia. Nesta interação, o elétron pode transferir energia para os átomos, como uma bola de sinuca se chocando com outra, e, no processo, os átomos são "excitados". Esta vibração nos átomos das redes provoca o aquecimento do material.

No entanto, se dois elétrons já estiverem ligados em um par de Cooper, essa interação com outros átomos da rede só será possível se a energia trocada for igual ou maior que a energia do "gap". Quando a temperatura é alta, há muita disponibilidade de energia térmica para isto, e os pares de Cooper nem conseguem se formar, ou, quando se formam, são logo aniquilados. No entanto, baixando-se a temperatura, pode-se chegar a um valor no qual a energia disponível para trocas térmicas é menor que a energia do "gap". Assim, alguns pares de Cooper não são aniquilados pela agitação térmica. Mesmo que os elétrons de um par se choquem com átomos da rede, não haverá troca de energia entre eles.

Em processos quânticos, como são esses choques, só pode haver troca de energia se o "gap" for vencido. Não pode haver troca parcial de energia. O choque, se houver, será "elástico", sem perda de energia pelos elétrons.

A temperatura crítica (TC) do material é uma medida do tamanho do "gap" de energia. Em um supercondutor típico, como o mercúrio utilizado nas pesquisas, por exemplo, a energia do "gap" é bem pequena, da ordem de 0,01 elétron-volt. Por isso, as temperaturas críticas desses supercondutores são tão baixas.

Nos anos seguintes à descoberta da supercondutividade por Onnes, muitos materiais supercondutores foram encontrados, quase todos metálicos. No entanto, todos tinham temperaturas críticas baixíssimas. Até o início da década de 80, o recorde era o nióbio ( $\text{Nb}_3\text{Ge}$ ), com TC perto de 23 K (-250 °C).

A teoria BCS indicava que dificilmente supercondutores com temperaturas críticas acima de 25 K seriam encontrados em virtude da energia do "gap". Porém, em 1986, dois físicos que trabalhavam no laboratório da IBM em Zurich, na Alemanha mudaram o rumo das pesquisas neste tema. Descobriram que um material cerâmico à base de óxido de cobre, bário e lantânio, ficava supercondutor a 30K.

Em Abril de 1986, Georg Bednorz e Alex Mueller sintetizaram uma cerâmica com fórmula  $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ . Esse material é uma cerâmica do tipo perovskita que, na forma de silicatos, é abundante na crosta terrestre, a areia. É perceptível pela fórmula que eles partiram de um composto normal, de óxido de cobre com bário e lantânio, e foram retirando oxigênio em várias proporções.

Vários outros compostos desta mesma família foram descobertos por laboratórios de todo o mundo, com temperaturas críticas cada vez mais elevadas. Até que, em Janeiro de 1987, Paul Chu, da Universidade de Houston, mostrou que o  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  é supercondutor com uma incrível temperatura crítica acima de 90 K.



Hoje, são conhecidos supercondutores com temperatura crítica acima de 130 K.





O nitrogênio é o elemento mais abundante de nossa atmosfera (~80%) e é relativamente barato e fácil de liquefazer ( $T_C = 77\text{ K}$ ).

Vale salientar que quando se fala de supercondutores de alto  $T_C$ , estamos falando em temperaturas críticas ainda muito baixas, da ordem de  $-150^\circ\text{C}$ .

A maioria dos supercondutores de alto  $T_C$  consiste de cerâmicas com estrutura de perovskita modificada. O curioso é que tais materiais são maus condutores de eletricidade na temperatura ambiente.

Ainda está a surgir uma teoria satisfatória para explicar o mecanismo da supercondutividade nestas cerâmicas. A teoria BCS não funciona a contento para estes supercondutores. Por outro lado, parece que existem pares de Cooper nos supercondutores de alto  $T_C$ . Não se sabe ao certo se o mecanismo de formação desses pares é o mesmo que nos supercondutores tradicionais. Isto é posto em dúvida através das evidências de atuação dos spins no acoplamento de elétrons. Como disse Sir Nevil Mott, decano da Física do Estado Sólido, o número de teorias "explicando" a supercondutividade das cerâmicas é igual ao número de teóricos.

Outros materiais estão em teste, entre eles: supercondutores orgânicos, fulerenos, rutenatos, além de um novo interesse nos velhos metais. Há pouco foi descoberto que o  $\text{MgB}_2$ , composto aparente inócuo que estava esquecido nas prateleiras dos químicos, fica supercondutor a  $40\text{ K}$ . Como é um material mais fácil de manusear que as cerâmicas, renovou-se a esperança de achar metais ou similares com altas temperaturas críticas.

Existem dois tipos de supercondutores:

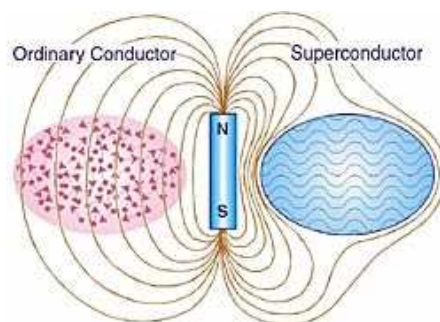
- **tipo I** - Estes supercondutores são, além de condutores perfeitos, diamagnéticos perfeitos (fluxo magnético nulo no interior), ou seja, neles, o efeito Meissner é total.

#### **EFEITO MEISSNER:** descoberto em 1933 por W. Meissner

Em um condutor elétrico comum, elétrons desordenados e incoerentes permitem a penetração de um campo magnético externo.

Em um supercondutor, o funcionamento coletivo coerente dos elétrons espontaneamente exclui um campo magnético externo e mantém sua condição de impenetrabilidade.

A demonstração clássica deste efeito consiste em fazer um ímã permanente flutuar sobre a superfície de um supercondutor. As linhas do campo magnético são impedidas de penetrarem no supercondutor e tomam uma forma semelhante a que teriam se houvesse outro ímã idêntico dentro do material supercondutor. Desta forma, o ímã sofre uma repulsão que compensa seu peso e o faz "levitar" sobre o supercondutor.





- **tipo II** - há uma pequena penetração das linhas de campo magnético para dentro do material. Estes costumam suportar correntes mais fortes do que os do tipo I, sem perder a condição de supercondutor. Suas temperaturas críticas são mais elevadas, logo, são mais promissoras para possíveis aplicações.

As aplicações são várias, como construção de bobinas com fios supercondutores, que possibilitam gerar campos magnéticos intensos, os quais seriam impraticáveis se fossem utilizados fios comuns, como exemplo, fios de cobre. Estas bobinas podem ser usadas na construção de Maglev, trens que levitam; aparelhos de ressonância magnética nuclear, que geram um campo magnético homogêneo na região onde o paciente é colocado e um sensor capta informações que formarão as imagens e, por fim, sensores SQUID (Superconducting Quantum Interference Device), que permitem realizar medidas magnéticas extremamente sensíveis.



O Maglev (Magnetic Levitation) japonês.

### ***Plásticos SUPERcondutores!***

A revista Nature divulgou a obtenção de um material plástico que, sob baixas temperaturas, não imprime resistência alguma à passagem de elétrons, o que o torna um supercondutor. Os plásticos podem conduzir eletricidade: foi justamente este o tema para o último prêmio Nobel em Química.

O que os pesquisadores do Bell Labs criaram foi o primeiro supercondutor plástico, um material relativamente barato quando comparado aos supercondutores atuais. Estes materiais terão grandes aplicações futuras, como em computadores quânticos e eletrônica de supercondutividade. O grupo desenvolveu uma técnica especial para "arrancar" elétrons de uma amostra sólida de um polímero (politiofeno). A amostra é uma fina camada do polímero, onde as cadeias poliméricas estão emparelhadas lado a lado, sem entrelaçamento. Eles, então, removem elétrons desta amostra, por um método desenvolvido e patenteado no Bell Labs. Este polímero, a temperaturas abaixo de  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , se torna, então, supercondutor. "With the method we used, many organic materials may potentially be made superconducting now", profetiza a química Zhenan Bao. Ou, como resumiu o físico Ananth Dodabalapur, "A new window into nature has opened up".

## CAPÍTULO III

### MATERIAIS ISOLANTES

São chamados isolantes os materiais de baixa condutividade. Apresentam os elétrons de valência rigidamente ligados aos seus átomos, não permitindo a passagem de corrente elétrica. Tais materiais têm a propriedade da alta rigidez dielétrica e por isso, são também chamados materiais dielétricos.

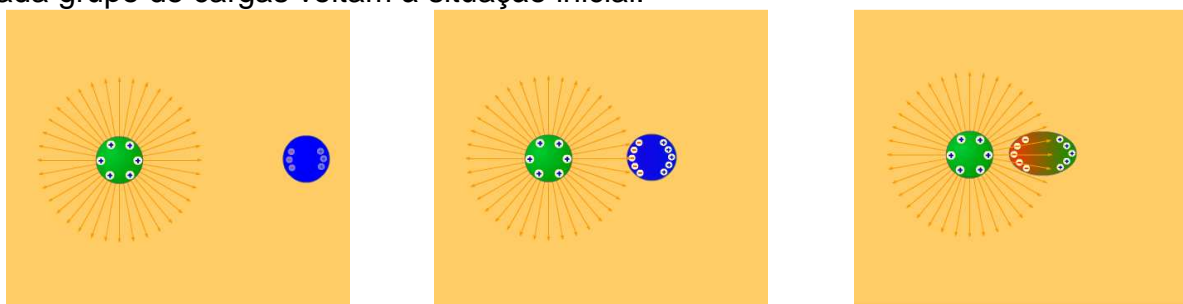
Quando um campo elétrico é aplicado a um material isolante as cargas são ligeiramente deslocadas e os elétrons são movidos para posições diferentes das suas posições de equilíbrio, ocorrendo uma polarização, chamada de polarização dielétrica.

#### 3.1 Polarização Dielétrica

Uma propriedade fundamental dos materiais dielétricos é a polarização de suas partículas elementares, quando sujeitas à ação de um campo elétrico. Define-se por **polarização** um deslocamento reversível dos centros das cargas positivas e negativas na direção do campo elétrico externo aplicado. Por ser reversível, esta direção acompanha, ou pelo menos tende a acompanhar, a própria orientação do campo elétrico aplicado.

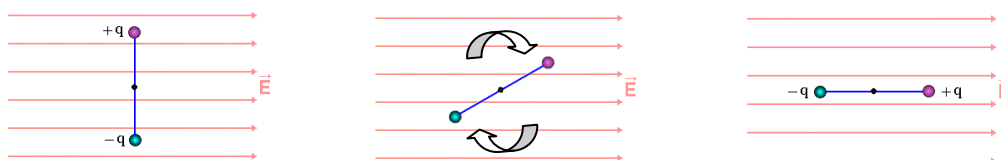
A polarização de um dielétrico pode ocorrer das duas maneiras:

- 1) Se o isolante é constituído de átomos, que não apresentam momento dipolar, então o deslocamento dos núcleos das cargas positivas e negativas sob a ação de campos externos é tanto maior, quanto mais elevada a intensidade do campo que é aplicada e com ele, a ação de força deste campo. Uma vez eliminado o campo externo, os átomos voltam à sua posição inicial, a polarização desaparece, pois os centros de cada grupo de cargas voltam à situação inicial.



- 2) Se o dielétrico for constituído de partículas elementares (elétrons, prótons, etc.) que por si só já são dipolos (por exemplo, moléculas) que, devido à sua constituição química já são dotados de cargas positivas e negativas, a ação do campo elétrico externo tenderá a orientar as partículas de acordo com a própria orientação do campo externo. Quanto mais intenso é o campo, tanto mais elevado é o trabalho de

orientação das partículas elementares, observando-se de modo mais acentuado a elevação de temperatura, devido à transformação do trabalho de orientação em calor. Dependendo da estrutura do dielétrico, pode ocorrer uma polarização mesmo com total ausência de energia externa.



### 3.2 Materiais Isolantes de Uso Industrial mais Frequente

Exemplos de materiais isolantes:

- a) **gasosos:**
- i. ar – amplamente utilizado como isolante em redes elétricas de transmissão e distribuição;
  - ii. hexafluoreto de enxofre ( $\text{SF}_6$ ) – usado em isolamentos de cabos subterrâneos e disjuntores de alta potência (subestações);
- b) **fibras naturais:** papel impregnado em resinas ou óleos, algodão, seda – usados em suportes isolantes e em revestimentos de cabos, capacitores e bobinas;



- c) **cerâmicas:** óxido de alumínio, titanato de bário, porcelana, etc. – utilizadas basicamente em isoladores de baixa, média e alta tensão, e em capacitores de baixa e alta tensão (elevada constante dielétrica);





- d) **resinas plásticas:** Poliéster, polietileno, PVC (Poli Cloreto de Vinila), Teflon, etc. – aplicados em revestimentos de fios e cabos, capacitores e peças isolantes;



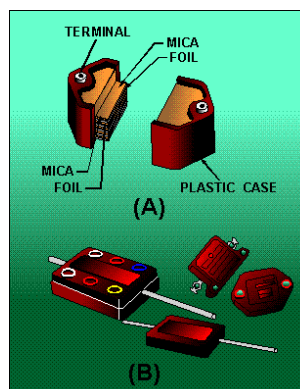
- e) **líquidos:** Óleos (mineral, ascarel, óleo de silicone – atuam nas áreas de refrigeração e isolação em transformadores e disjuntores a óleo. Também empregados para impregnar papéis usados como dielétricos em capacitores.
- f) **tintas e vernizes:** compostos químicos de resinas sintéticas – Têm importante emprego na tecnologia de isolação de componentes eletrônicos como: esmaltação de fios e cabos condutores, isolação de laminados ferromagnéticos, circuitos impressos e proteção geral de superfícies;



- g) **borrachas sintéticas:** neoprene, EPR (Epileno Propileno), XLPE (Polietileno Reticulado) e borracha butílica –usados como capa protetora de cabos;



- h) **mica:** material mineral usado em capacitores e em ligações entre transistores de alta potência;



- i) **vidro:** principal emprego em isoladores de linhas de transmissão. As fibras de vidro são usadas no lugar dos papéis em algumas aplicações.



- j) **madeira:** grande utilização em cruzetas dos postes de distribuição.



### 3.3 Aplicações

Conforme apresentado anteriormente, os materiais isolantes podem ser usados na fabricação de diversos equipamentos e dispositivos elétricos/eletrônicos. Alguns deles veremos mais detalhadamente na seqüência.

#### 3.3.1 Capacitores

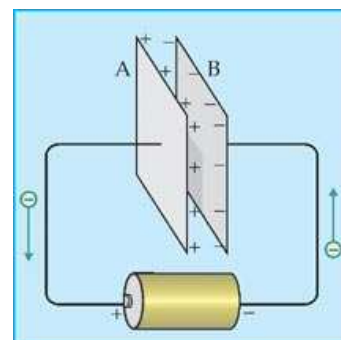
Capacitores são dispositivos destinados a armazenar cargas elétricas.

São constituídos por dois condutores separados por um isolante. Os condutores são chamados armaduras (ou placas) do capacitor e o isolante é o dielétrico do mesmo. Tal dielétrico pode ser um isolante qualquer como o vidro, a parafina, o papel e, muitas vezes, o próprio ar.

Podem ser esféricos, cilíndricos ou planos, de acordo com a forma de suas armaduras. Quando eletrizadas, as armaduras armazenam cargas elétricas de mesmo valor absoluto, porém de sinais contrários.

Na figura ao lado, a armadura A tem, inicialmente, potencial elétrico nulo e está conectada ao terminal positivo da pilha; logo, os elétrons migram da armadura para a pilha. Já a armadura B, que também tem potencial elétrico nulo, está conectada ao terminal negativo da pilha, e assim elétrons migram do terminal da pilha para a armadura B.

Acontece que, enquanto a armadura A está perdendo elétrons, ela está se eletrizando positivamente e seu potencial elétrico está aumentando. O mesmo ocorre na armadura B, só que ao contrário, ou seja, B está ganhando elétrons, eletrizando-se negativamente, e seu potencial elétrico está diminuindo.



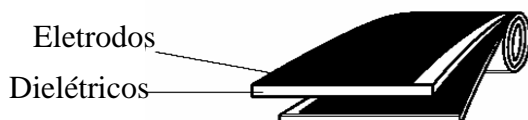




Este processo cessa ao equilibrarem-se os potenciais elétricos das armaduras com os potenciais elétricos dos terminais do gerador (pilha), ou seja, quando a diferença de potencial elétrico (ddp) entre as armaduras do capacitor for igual à ddp nos terminais da pilha dizemos que o capacitor está carregado com carga elétrica máxima.

Num circuito, só há corrente elétrica no ramo que contém o capacitor enquanto este estiver em carga ou em descarga.

Os capacitores são constituídos por uma composição de eletrodos (armaduras ou placas) e dielétricos.

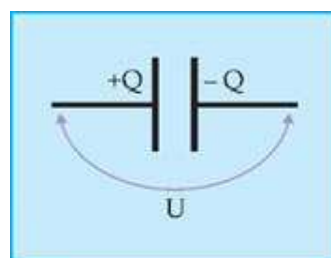


### CAPACITÂNCIA

O capacitor tem inúmeras aplicações na elétrica e na eletrônica, podendo servir para armazenar energia elétrica, carregando-se e descarregando-se muitas vezes por segundo.

A quantidade de carga armazenada na placa de um capacitor é diretamente proporcional à diferença de potencial entre as placas.

A propriedade que estes dispositivos têm de armazenar energia elétrica sob a forma de um campo eletrostático é chamada de capacitância (C) e é medida pelo quociente da quantidade de carga (Q) armazenada pela diferença de potencial (U) que existe entre as placas:



$$C = \frac{Q}{U}$$

A unidade de capacidade eletrostática, no SI, é o Farad (F).

### FATORES QUE AFETAM A CAPACITÂNCIA

**Dimensões**

Quanto maior a placa, maior a capacitância;

**Afastamento**

Quanto mais distante a placa menor a capacitância;

**Material**

Dependendo dos materiais utilizados, a capacitância pode ser maior ou menor. Isto se dá em função da constante dielétrica ( $\epsilon$ ) do material utilizado como isolante. Na tabela ao lado pode-se perceber a variação desta grandeza para cada material.

Material	$\epsilon_r$
vácuo	1
ar	1,0006
alumínio	8,1 - 9,5
esteatita (MgO-SiO2)	5,5 - 7,2
mica	5,4 - 8,7
óleo	4
papel	4 - 6
papel parafinado	2,5
plástico	3
polistireno	2,5 - 2,6
porcelana	6,0
pyrex	5,1
sílica fundida	3,8
Titanatos	50 - 10000
vidro de cal de soda	6,9

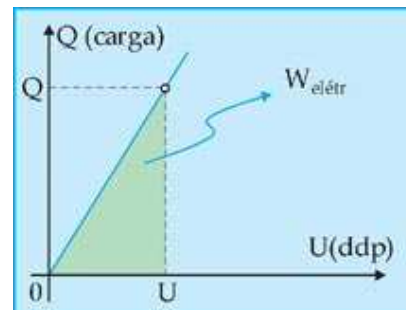


### ENERGIA ARMAZENADA

O gráfico ao lado representa a carga elétrica  $Q$  de um capacitor em função da ddp ( $U$ ) nos seus terminais.

Como, neste caso,  $Q$  e  $U$  são grandezas diretamente proporcionais, o gráfico corresponde a uma função linear, pois a capacidade eletrostática  $C$  é constante.

Considerando que o capacitor tenha adquirido a carga  $Q$  quando submetido à ddp ( $U$ ) do gráfico, a energia elétrica  $W_{\text{elétr}}$  armazenada no capacitor corresponde à área do triângulo hachurado.



$$W_{\text{elétr}} = \frac{Q \cdot U}{2} \quad \text{e como } Q = C \cdot U, \text{ então:} \quad W_{\text{elétr}} = \frac{C \cdot U \cdot U}{2} \Rightarrow W_{\text{elétr}} = \frac{C \cdot U^2}{2}$$

### Exercícios Resolvidos

01. Carrega-se um capacitor de capacidade eletrostática  $5 \mu\text{F}$  com carga elétrica de  $20 \mu\text{C}$ . Calcule a energia potencial elétrica armazenada no capacitor.

*Resolução*

Calculando a ddp  $U$  nos terminais do capacitor:

$$C = \frac{Q}{U} \Rightarrow U = \frac{Q}{C} \quad U = \frac{20 \mu\text{C}}{5 \mu\text{F}}$$

$$U = \frac{20 \cdot 10^{-6} \text{C}}{5 \cdot 10^{-6} \text{F}} \quad U = 4 \text{V}$$

Calculando a energia elétrica armazenada:

$$W_{\text{elétr}} = \frac{Q \cdot U}{2} \Rightarrow W_{\text{elétr}} = \frac{20 \cdot 10^{-6} \cdot 4}{2}$$

$$W_{\text{elétr}} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ J}$$



02. Um capacitor armazena  $8 \cdot 10^{-6}$  J de energia elétrica quando submetido à ddp U. Dobrando-se a ddp nos seus terminais, a energia armazenada passa a ser:

*Resolução*

Sendo:

$$W_{elétr} = \frac{C \cdot U^2}{2} \Rightarrow \frac{W_{elétr}}{U^2} = \frac{C}{2} = \text{constante},$$

$$\text{então: } \frac{W'}{(2U)^2} = \frac{W}{U^2}$$

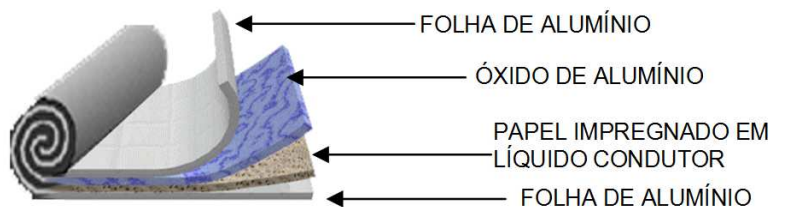
$$\frac{W'_{elétr}}{4 \cdot U^2} = \frac{8 \cdot 10^{-6}}{U^2} \Rightarrow W'_{elétr} = 32 \cdot 10^{-6} \text{ J}$$

Os capacitores são amplamente utilizados em rádios, gravadores, televisores, circuitos elétricos de veículos, etc.

Os capacitores podem ser de valores de capacitância fixos ou variáveis. Dentre os **capacitores fixos** ressaltam-se os seguintes:

#### a) Capacitores Eletrolíticos

São formados por uma folha fina de alumínio (placa positiva) recoberta por uma camada finíssima de óxido de alumínio que atua como um dielétrico (o óxido de alumínio é um excelente dielétrico, com  $\epsilon = 10$ ). Sobre a camada de óxido é colocada uma tira de papel impregnado com um líquido condutor chamado eletrólito, ao qual se sobrepõe uma segunda lâmina de alumínio (placa negativa) em contato elétrico com o papel.



O “sanduíche” assim formado é enrolado e colocado no interior de uma “caneca” de alumínio, vedada por uma espécie de tampão de borracha.

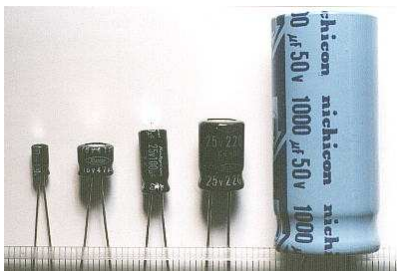
Grandes valores de capacitância podem ser obtidos em comparação com o tamanho do capacitor devido à pequena espessura do dielétrico ser extremamente fina.

Uma das principais características de um capacitor eletrolítico é que eles têm polaridade (terminal positivo e terminal negativo). Isso significa que deveremos ter cuidado ao conectá-los ao circuito.

Se o capacitor for submetido a uma tensão maior que a de trabalho ou se a polaridade for invertida ele pode ser danificado (ou até mesmo explodir !). Além disso este tipo de capacitor não é adequado para operar em elevados níveis de frequência.

Geralmente em um diagrama o lado positivo é indicado com um "+" (mais), mas pode ser que o terminal com indicação seja o negativo.

A faixa de valores pode variar de  $1\mu\text{F}$  a milhares de  $\mu\text{F}$ . Esse tipo de capacitor é usado principalmente em fontes de alimentação, para diminuir o efeito *ripple*, que representa uma oscilação de tensão ocorrida nos terminais de uma ponte retificadora a diodos. A figura a seguir mostra alguns modelos encontrados no comércio.



Na Figura, da esquerda para a direita temos:

$1\mu\text{F}$  (50V) diâmetro 5 mm, altura 12 mm  
 $47\mu\text{F}$  (16V) diâmetro 6 mm, altura 5 mm  
 $100\mu\text{F}$  (25V) diâmetro 5 mm, altura 11 mm  
 $220\mu\text{F}$  (25V) diâmetro 8 mm, altura 12 mm  
 $1000\mu\text{F}$  (50V) diâmetro 18 mm, altura 40 mm

## b) Capacitores de Tântalo

Capacitores de tântalo são capacitores eletrolíticos que usam um material chamado de tântalo para os eletrodos. Grandes valores de capacitância podem ser obtidos, similares aos de alumínio. Contudo, os capacitores de tântalo são superiores no que se refere à temperatura e frequência de operação, sendo, portanto, um pouco mais caros e mais recomendados para aplicações em que se deseja que o valor da capacitância seja constante com a temperatura e frequência. Usualmente o símbolo "+" é usado para indicar o pólo positivo.

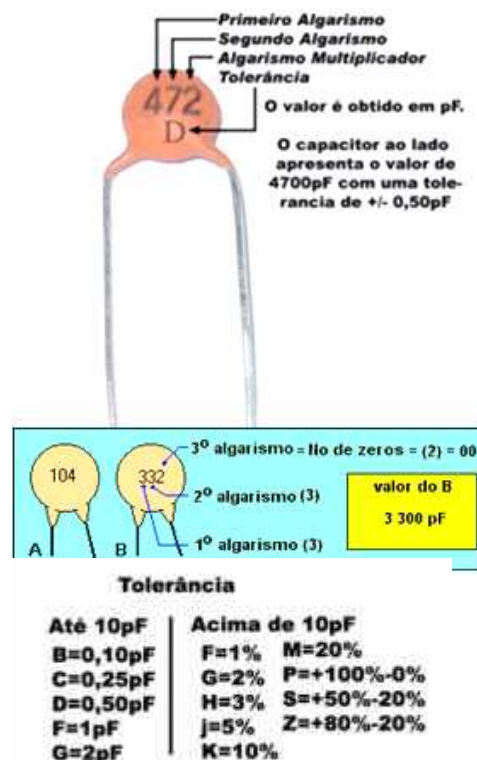


## c) Capacitores Cerâmicos

Internamente estes capacitores não têm estrutura de bobinas, por isso mesmo podem ser usados em circuitos que aterram sinais de alta frequência. Estes capacitores têm a forma de um disco.

Os capacitores cerâmicos apresentam impressos em seu corpo, um conjunto de três algarismos e uma letra, conforme a figura ao lado.

Para se obter o valor do capacitor (geralmente expresso em pF), os dois primeiros algarismos, representam os dois primeiros dígitos do valor do capacitor e o terceiro algarismo, chamado multiplicador, representa o número de zeros à direita. A letra representa a tolerância (faixa de valores em que a capacitância poderá variar), que pode ser omitida. Esta última, para os capacitores cerâmicos até 10pF é expressa em pF e para aqueles acima de 10pF é expressa em



porcentagem. Por exemplo um capacitor com 224F impresso no próprio corpo, possuirá uma capacitância de 220000pF com uma tolerância de  $\pm 1\%$  (seu valor pode ser um por cento a mais ou a menos desse valor.)

**d) Capacitores de Filme de Poliestireno**

Nestes capacitores, um filme de poliestireno é usado como dielétrico. Este tipo de capacitor não pode ser usado em circuitos de altas frequências, pois eles são construídos com estruturas de bobinas. São usados em circuitos de filtro e circuitos de tempo que operem até algumas centenas de KHz ou menos.



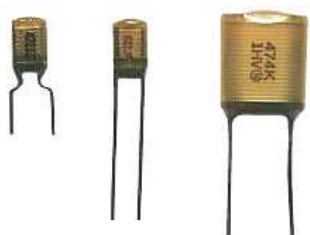
**e) Capacitores de Filme de Poliéster**

Estes capacitores usam um fino filme de poliéster como dielétrico, sua tolerância é de cerca  $\pm 5\%$  to  $\pm 10\%$ . Não têm polaridade.



**f) Capacitores de Polipropileno**

São usados quando houver necessidade de pequena tolerância. A capacitância destes capacitores praticamente não muda. Estes capacitores têm uma tolerância de  $\pm 1\%$ .



**g) Capacitores de Mica**

Nestes capacitores a mica é usada como dielétrico. Apresentam boa estabilidade em função do seu pequeno coeficiente de temperatura. Têm excelentes características de frequência, sendo usados em circuitos ressonantes e filtros de alta frequência. Por possuírem boa isolamento, são ideais para circuitos tensão mais elevadas. Não têm polaridade e não possuem grandes valores de capacitância.





## h) Capacitores de Papel

Capacitores de filtro com dielétrico de papel são volumosos e seu valor é em geral limitado a menos do que 10  $\mu\text{F}$ . Eles não são polarizados e podem suportar altas tensões. São fabricados enrolando-se uma ou mais folhas de papel entre folhas metálicas. Todo o conjunto é envolvido em resina termoplástica. Esse tipo de componente é barato e é aplicado em usos gerais.

Para melhorar as características o papel pode ser impregnado com óleo, o que ocasiona:

- Aumento da rigidez dielétrica.
- Aumento da margem de temperatura de aplicação do capacitor.
- Aplicação de altas tensões.

## i) Capacitores Variáveis

Outra categoria importante é a dos **capacitores variáveis**. Estes dispositivos são compostos por um conjunto de placas fixas intercalado com um de placas móveis que podem girar em torno de um eixo comum. Assim, pode-se controlar a área das superfícies condutoras submetidas ao campo elétrico, controlando assim, a capacitância.

Foi bastante empregado na sintonia dos receptores de rádio com válvulas, com o ar como dielétrico. Porém, com o advento dos transistores, surgiu a necessidade da redução do seu tamanho, o que foi obtido através da utilização de filme plástico como dielétrico ao invés do ar.

Com construção similar, porém com apenas duas placas, podemos citar pequenos capacitores ajustáveis normalmente utilizados em rádios portáteis e em diversos dispositivos eletrônicos que têm capacitâncias máximas em torno de 500 pF. O valor exato da capacitância é ajustado na fábrica, durante as fases de montagem e calibração daqueles aparelhos; assim, os capacitores ajustáveis em geral ficam dentro do equipamento, fora do alcance do usuário.

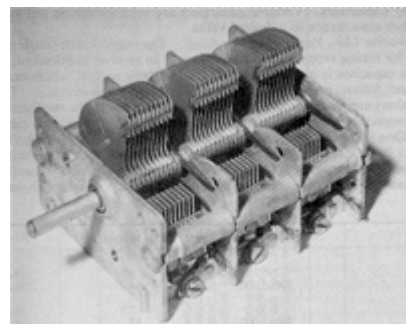
Estes pequenos capacitores recebem o nome de:

### 1. *Trimmer*

Também conhecido como CAPACITOR COMPENSADOR. Normalmente utiliza dielétricos como a mica e o próprio ar.

É constituído por duas lâminas metálicas (armaduras), uma fixa e outra móvel, separadas por uma fina folha de mica. O espaçamento entre as armaduras pode ser controlado por meio de um parafuso de ajuste:

- Com o parafuso totalmente apertado = lâminas próximas, a capacitância é máxima;
- Com o parafuso totalmente desapertado = lâminas separadas, a capacitância é mínima.



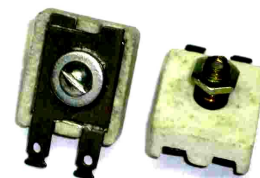


Capacitores  
Trimmers



## 2. Padder

Também conhecido como capacitor corretor de rateio tem sua construção semelhante à do Trimmer. É constituído por dois conjuntos de placas metálicas, entrelaçadas e separadas por folhas de mica. Em alguns tipos, a capacitância pode ser ajustada desde 120 pF até 550 pF; em outros, de 300 pF até 600 pF.



## 3.4 Comportamento dos dielétricos em Serviço

Uma vez que uma certa porção de isolamento apresenta uma dada resistência, podemos falar em resistividade do material. Esta geralmente é 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. Vejamos algumas destas propriedades.

### 3.4.1 Resistência de Isolamento

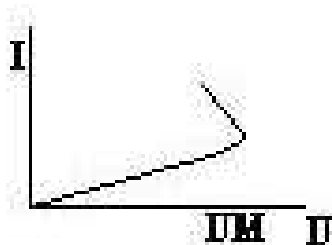
O dielétrico impede a passagem da corrente elétrica enquanto o campo elétrico nele estabelecido não ultrapassar um determinado valor que depende da natureza do dielétrico e das suas condições físicas.

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 figura abaixo.



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.

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.

### 3.4.2 Resistência Superficial

No caso dos isolantes sólidos de grande resistividade, a resistência através da sua massa é também elevada, sendo muito pequena a corrente que os atravessa. Contudo, 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 a resistência 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.

### 3.4.3 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.

Esta grandeza 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, por 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.

### 3.4.4 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.



### 3.4.5 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 conseqüências 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 fenômeno não repetir, a sua única conseqüência é o aparecimento de partículas carbonizadas no seio do fluido.

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

### 3.4.6 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.

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 ao 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.

