

# CAPÍTULO IV

## MATERIAIS ISOLANTES

### 4.1 - Introdução

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

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

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

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

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

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

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

$$Q = C \cdot U \tag{4.1}$$

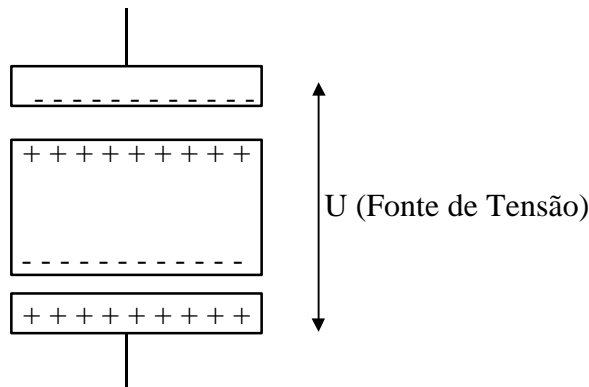


Fig. 4.1 - Polarização

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

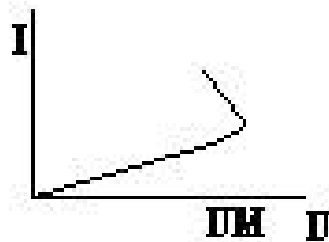


Fig. 4.2 - Lei de variação da corrente com a tensão nos dielétricos sólidos

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

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

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

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

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

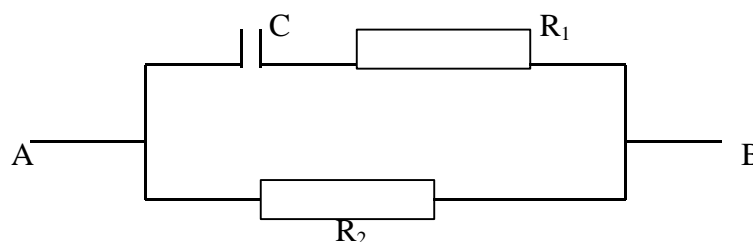


Fig. 4.3 - Circuito Equivalente de um dielétrico com perdas de energia e correntes de fuga.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### **4.3 - Materiais Isolantes**

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

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

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

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

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

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

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

*II - Líquidos:*

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

B - Dielétricos líquidos à prova de fogo: Askarel.

C - Óleos vegetais: Tung, linhaça.

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

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

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

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

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

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

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

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

*IV - Sólidos:*

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

B - Cerâmicos: porcelana, vidro, micalex.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

#### 4.3.1 - Isolantes gasosos

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

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

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

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

Peso molecular: 146,05

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

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

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

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

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

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

#### 4.3.2 - Isolantes líquidos

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

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

##### Óleo mineral

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



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

### Características

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

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

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

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

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

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

Tabela 4.2 - Características de óleo para papéis de cabos

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

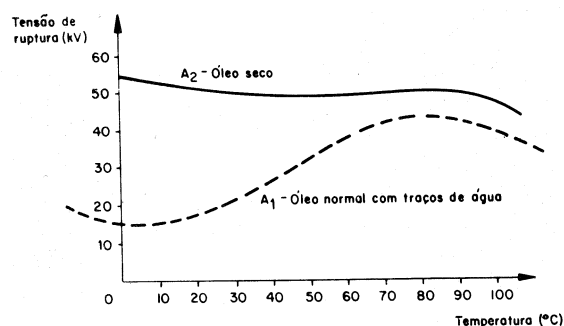


Fig. 4.4 - Variação das perdas dielétricas de óleos minerais em função do grau de pureza e do envelhecimento

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

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

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

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

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

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

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

### O askarel

No desenvolvimento de líquidos que possam ser substitutos do óleo mineral, encontramos o askarel, quimicamente se compõe de um pentaclorodifenil ( $C_6 H_2 Cl_3 C_6 H_2 Cl_3$ ) que se destaca sobretudo pelo fato de não ser inflamável, apresentando porém uma série de outros problemas e cuidados, que fazem com que hoje já se esteja a substituí-lo, provavelmente por um óleo à base de silicone. O askarel também não pode ser usado em aplicações onde se apresentam arcos voltaicos expostos, pois, nessas condições de temperatura, haverá rompimento da cadeia de HCl e desprendimento do cloro. Seu emprego, entretanto, já é mais recomendado em cabos e capacitores com isolamento em papel ( $\epsilon = 5$  a 6) pois o askarel ( $\epsilon = 5$ ), ao impregnar o papel confere-lhe uma característica mais homogênea e, conseqüentemente, uma distribuição de campo elétrico mais uniforme, do que se o impregnante fosse o óleo mineral ( $\epsilon = 2$ ). Com isto., a capacitância dos capacitores pode ser elevada em até 40%.

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

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

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

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

### Óleos de silicone

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

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

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

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

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

### *4.3.3 - Isolantes Pastosos e Ceras*

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

### Parafina

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

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

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

#### Pasta de silicone

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

#### Resinas

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

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

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

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

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

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

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

### Vernizes

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

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

### Vernizes de impregnação

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

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

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

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

### Vernizes de recobrimento

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

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

### Vernizes de colagem

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

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

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

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

#### *4.3.4 – Isolantes Sólidos*

##### Isolantes fibrosos

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

##### O papel

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

### Fibras Sintéticas

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

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

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

#### Fibras de poliamida

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

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

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

#### Fibras de vidro

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

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

#### Materiais Cerâmicos

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

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

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

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

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

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

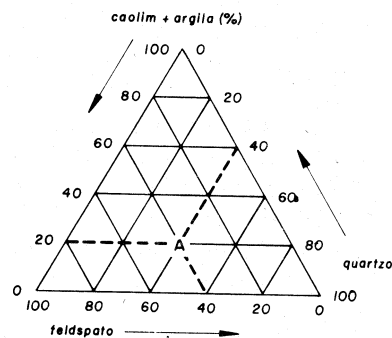


Figura 4.5 - Triângulo de composição da porcelana

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

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

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

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

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

## Vidro

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## Minerais

### Mica

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### Amianto

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

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

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

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

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

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

O amianto é usado nas formas enunciadas a seguir.

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

Tabela 4.4 - Características de Materiais Isolantes

Material	$F_g \times 10^{-4}$ a 60Hz e 20°C	Rigidez diel. $E_d$ (kV/mm)	Temperat. limite (°C)	Resistiv. transversal ( $\Omega \times \text{cm}$ ) <sup>90r</sup>	Constante dielétrica $\epsilon$	Densidade g/cm <sup>3</sup>
Óleo mineral	10	10 a 14	95	$25 \times 10^{12}$	2	0,8 – 0,9
Askarel	10 a 20	13 a 16	135	$10^{13}$ a $10^{14}$	5	1,3 . . 1,7
Óleo silicone	2 a 10	10 a 30	– 60 a 200	$7,9 \times 10^{14}$	2,1 a 2,8	0,5, a 1,0
Parafina	1 a 2	20 a 25	70	$> 10^{16}$	1,9 a 2,2	0,8 a 0,9
Goma-laca	100	20 a 30	70	$10^{15}$ a $10^{16}$	3,5	1,3 a 1,5
PVC	$10 \text{ a } 10^{-2}$	40 a 50	75	$10^{13}$ a $10^{16}$	3 a 4	1,2 a 1,4
Polietileno	2 a 5	30	85	$10^{16}$ a $10^{17}$	2,3 a 2,4	0,9
Polistírol	3 a 50	25 a 50	50 a 80	$10^{14}$ a $10^{18}$	2,5	1,05
Baquelite	100 a 400	20	150	$10^{12}$ a $10^{14}$	4 a 4,5	4 a 7
Betume	170	50 a 100	60	$10^{10}$	2,7	0,9 – 1,1
Papel para capacitores	20 a 30	35	100	$10^{18}$	3,7	1,5
Papel para cabos	100 a 200	8 a 10	100	$10^{16}$	3 a 3,5	0,8 a 0,9
Vidro e fibra de vidro	até 100	35 a 50	200 a 250	$10^{11}$ a $10^{17}$	5 a 8	2 a 6
Amianto	–	2 a 30	200 a 250	$10^{11}$ a $10^{17}$	5 a 8	2 a 6
Mica muscovita	0,5 a 3	5 a 40	500 a 600	$10^{15}$ a $10^{16}$	6 a 7	3
Flogopita	0,5 a 5	4 a 40	800 a 1000	$10^{13}$ a $10^{14}$	5 a 6	3

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



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

### Materiais da Classe da Borracha

Fundamentalmente podemos diferenciar entre borrachas naturais e artificiais ou sintéticas.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

#### **4.4 - Aplicações**

(Seminários e visitas na parte de laboratório)