

CAPÍTULO 18

MATERIAIS DIELÉTRICOS

Sumário

Objetivos deste capítulo	503
18.1 Introdução	503
18.2 Conceitos gerais.....	505
18.3 Comportamento dos materiais isolantes	505
18.3.1 Capacitância	505
18.4 Dielétricos - descrição atômica	517
18.5 Polarização.....	518
18.5.1 Polarização eletrônica (dipolo induzido), P_e	520
18.5.2 Polarização por orientação de dipolos permanentes, P_o	523
18.5.4 Polarização de cargas espaciais, P_s	526
18.5.5 Polarização total.....	527
18.6 Dependência da polarização com a frequência e temperatura.....	527
18.7 Materiais ferroelétricos	532
18.8 Materiais antiferroelétricos	538
18.9 Materiais piezoelétricos.....	538
18.10 Propriedades de materiais dielétricos (isolantes).....	539
18.10.1 A constante dielétrica de gases, líquidos e sólidos	539
18.11 Tipos de dielétricos	541
18.12 Materiais dielétricos de maior utilização, e suas constantes dielétricas.....	541
18.13 Outros Materiais dielétricos e suas aplicações	542
18.13.1 Vernizes isolantes	542
18.13.2 Compostos isolantes.....	542
18.13.3 Tintas isolantes	542
18.13.4 Diluentes e solventes	542
18.13.5 Gases isolantes.....	543
18.13.5.1 O ar atmosférico.....	543
18.13.5.2 Nitrogênio	543
18.13.5.3 O gás SF_6	543

18.14	Aplicação dos dielétricos.....	544
18.15	Materiais isolantes sólidos	544
18.15.1	Propriedades dos materiais isolantes	545
18.15.2	Resistência de isolamento	545
18.15.3	Medida da resistência de isolamento	546
18.15.4	Valores da resistência de isolamento.....	546
18.16	Ensaio de absorção dielétrica	547
18.17	Tipos de materiais isolantes e sua classificação pela temperatura	549
18.18	Materiais isolantes.....	550
18.18.1	Mica e produtos de mica	550
18.18.2	Asbestos (material inorgânico).....	550
18.18.3	Vidro.....	551
18.18.4	Fibra e tira de vidro	551
18.18.5	Composição mica + vidro	552
18.18.6	Porcelana	552
18.19	Comportamento eletromagnético dos materiais cerâmicos	552
18.20	Isolantes sólidos usados na fabricação de transformadores	553
18.20.1	Papel.....	553
18.20.2	Fenolite	555
18.20.3	Presspan	556
18.20.4	Permawood	556
18.21	Referência bibliográfica do capítulo	556
	Exercícios.....	556

18 MATERIAIS DIELÉTRICOS

Objetivos deste capítulo

- Finalizado o capítulo o aluno será capaz de:
- Entender o comportamento dos materiais dielétricos na presença de um campo;
 - Conhecer conceitos básicos tais como polarização, capacitância, constante dielétrica, rigidez dielétrica e outros;
 - Classificar os materiais dielétricos baseando-se nas aplicações.

18.1 Introdução

Vimos em capítulos anteriores que sólidos cuja banda de valência está totalmente preenchida e que possuem “gap” de energia proibida largo ($\gg 1$), se comportam como isolantes elétricos. A resistividade de tais materiais varia entre $10^8 \Omega \cdot m$ e $10^{22} \Omega \cdot m$ (ou seja, que a temperatura ambiente, pouquíssimos elétrons podem ser ativados).

Entre as várias aplicações desses materiais, as mais comuns são como elementos capacitivos em circuitos eletrônicos e como isolantes elétricos. Nessas aplicações, as propriedades de maior interesse são a resistividade elétrica (a maior oposição possível à passagem de corrente $\rho = \frac{m_e v_{med}}{ne^2 \lambda}$), e a constante dielétrica (mede a capacidade de armazenamento de carga $K = \epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$, e é uma das primeiras características a ser considerada num projeto), o fator de perda (quanto a polarização está atrasada com relação à intensidade do E, se a polarização vem acompanhada de dissipação de energia que provoca o aquecimento do dielétrico) e a rigidez dielétrica (perdas por efeito Joule, capacidade de suportar tensão sem ruptura).

Essas propriedades dependem tanto das características do material (tipo de ligação, estrutura do cristal, constituição das fases, defeitos estruturais do cristal) como da temperatura, frequência de tensão aplicada e tempo em que a tensão é aplicada, fatores este que afetam a resposta dos dipolos induzidos ou intrínsecos.

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

- realizar 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;
- modificar, 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. Assim, eles podem ser fabricados para apresentar a estrutura de dipolo por separação de cargas a nível atômico ou molecular.

Muitos materiais poliméricos e cerâmicos são materiais isolantes à temperatura ambiente e, além disso, tem estrutura de banda de energia similar àquela representada na Figura 18.1. Assim, à temperatura ambiente, pouquíssimos elétrons podem ser excitados através do gap pela energia térmica disponível, ocasionando os quase ínfimos valores de condutividade destes materiais nessa condição. O número de elétrons na banda de condução de um dielétrico é extremamente baixo se comparado a um condutor. Normalmente em dielétricos a barreira de energia ou “gap” entre as bandas de valência e condução é da ordem de 4 eV a 8 eV, que é suficientemente grande para manter a maior parte dos elétrons presos numa banda de energia mais baixa. Assim quando um campo elétrico é aplicado num material dielétrico, poderá surgir uma condução muito pequena conhecida como perda dielétrica. Este fenômeno pode ser causado por um número finito de elétrons livres em adição a outros portadores de carga livres, quando há contaminação por impurezas, ou acúmulo de cargas na interface de materiais diferentes ou fases. As perdas por orientação dipolar são comuns em moléculas polares sujeitas a campos alternados.

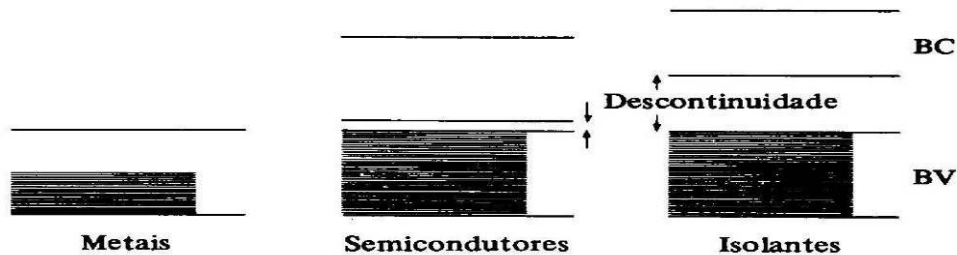


Figura 18.1 - Diagramas esquemáticos de bandas de energia de um condutor metálicos (a) semicondutor (b) e isolante (c).

Na Tabela 18.1, é fornecida a condutividade elétrica de diversos destes materiais. Observe a queda em aproximadamente 20 vezes em relação aos condutores, como o cobre por exemplo, $\sigma_{\text{Cobre}}, 58,0 \times 10^6 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$. Por isso, muitos destes materiais são utilizados como materiais de base em isolamento elétrico quando uma elevada resistividade é desejável. Os polímeros são muito usados como dielétricos devido ao seu baixo custo e facilidade de processamento. Materiais cerâmicos, por sua vez, são mais resistentes às condições ambientais (particularmente a alta temperatura) e são menos deformáveis.

Tabela 18.1 - Condutividade elétrica de alguns materiais não-metálicos.

Material	Condutividade elétrica $(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$	Material	Condutividade elétrica $(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$
Cerâmicas		Polímeros	
Al ₂ O ₃	10 ⁻¹⁰ - 10 ⁻¹²	Fenol-formaldeído	10 ⁻⁹ - 10 ⁻¹⁰
Porcelana	10 ⁻¹⁰ - 10 ⁻¹²	Nylon 6,6	10 ⁻⁹ - 10 ⁻¹²
Vidro (soda-lime)	< 10 ⁻¹⁰	Polimetilmetacrilato	< 10 ⁻¹²
Mica	10 ⁻¹¹ - 10 ⁻¹⁵	Polietileno	10 ⁻¹³ - 10 ⁻¹⁷
Outro		Poliestireno	< 10 ⁻¹⁴
Grafite	10 ⁵	Politetrafluoretileno	< 10 ⁻¹⁶

18.2 Conceitos gerais

Capacitância: é a propriedade de um capacitor ou de um sistema de condutores e dielétricos que permite armazenar cargas separadas eletricamente, quando existem diferenças de potencial entre os condutores.

Capacitor: é um dispositivo constituído por dois condutores, cada um tendo uma determinada superfície exposta ao outro, separados por um meio isolante. Uma diferença de potencial entre os dois condutores acarreta em armazenamento de cargas iguais em intensidade e de polaridades opostas. Os dois condutores são chamados eletrodos.

Dielétrico: é o meio no qual é possível produzir e manter um campo elétrico com pequeno ou nenhum suprimento de energia de fontes externas. A energia requerida para produzir o campo elétrico pode ser recuperada, no total ou em parte, quando o campo elétrico é removido.

Dielétrico perfeito: é um dielétrico no qual toda a energia requerida para estabelecer um campo elétrico no mesmo é recuperada quando o campo ou a tensão aplicada é removida. Desta forma, possui condutibilidade nula.

Dielétrico imperfeito: é aquele no qual uma parte da energia requerida para estabelecer um campo elétrico no dielétrico não retorna ao sistema elétrico quando o campo é removido. A energia é dissipada no dielétrico, em forma de calor.

Absorção dielétrica: é o fenômeno que ocorre em dielétricos imperfeitos pelo qual cargas positivas e negativas são separadas e estão acumuladas em certas regiões dentro do volume do dielétrico. Este fenômeno se manifesta, por si próprio, como uma corrente que decresce gradualmente com o tempo, após a aplicação de uma corrente contínua e constante.

Corrente de condução: a corrente de condução através de uma superfície em um dielétrico imperfeito é aquela proporcional ao gradiente de potencial. Ela não depende do tempo durante o qual o campo elétrico é aplicado ao dielétrico.

Constante dielétrica: a constante dielétrica (relativa) de qualquer meio é a razão entre a capacitância de uma dada configuração de eletrodos, tendo tal meio como dielétrico, para a capacitância da mesma configuração, considerando-se o vácuo como dielétrico.

18.3 Comportamento dos materiais isolantes

Como mencionado, um material dielétrico é eletricamente isolante e apresenta, ou pode ser feito para apresentar, uma estrutura de dipolo elétrico, ou seja, há uma separação de entidades eletricamente carregadas positiva e negativamente, num nível atômico ou molecular. Como resultado destas interações entre o dipolo e campo elétrico, os materiais dielétricos são utilizados em capacitores. Um capacitor é um dispositivo largamente utilizado em circuitos eletrônicos capazes de armazenar cargas elétricas.

18.3.1 Capacitância

Quando uma voltagem é aplicada através de um capacitor (tipo placa), constituído de duas placas condutoras paralelas de área A separadas por uma distância L onde existe o vácuo (Figura 18.2a), uma das placas torna-se positivamente carregada, e a outra negativamente, com o correspondente campo

elétrico aplicado dirigido do terminal positivo para o negativo. Uma carga Q_0 é acumulada em cada placa do capacitor e é diretamente proporcional à tensão aplicada e a área das placas e inversamente proporcional à distância entre elas,

$$Q_0 = \epsilon_0 \frac{A}{l} V = C_0 V \quad (18.1)$$

aqui o parâmetro ϵ_0 é chamado de permissividade do vácuo (ou constante dielétrica do vácuo) é uma constante universal tendo o valor $8,885 \times 10^{-12} \text{ F/m}^1$. C_0 é a capacitância do sistema cujas unidades são Coulombs por Volt, ou Farads (F).

Um material contendo cargas altamente polarizáveis quando colocado entre as placas de um capacitor na presença de um campo elétrico, influenciará acentadamente as cargas que estão entre as placas. Com este material dielétrico inserido na região entre as placas (como óleo mineral ou plástico) mantendo-se a mesma tensão aplicada V , o que acontece então com a capacitância? Alguma polarização pode ocorrer no material permitindo um adicional de cargas armazenadas no mesmo.

A variação na capacitância C é o reflexo direto da constante dielétrica do material.

$$C = Q / V \quad (18.2)$$

onde Q é a carga armazenada (em Coulombs) e V é a voltagem através dos condutores (ou placas).

Assim com o material dielétrico uma carga maior Q , é acumulada entre as placas, neste caso,

$$Q = \epsilon_d \frac{A}{l} V = CV \quad (18.3)$$

ϵ_d é a permissividade do meio dielétrico e será maior em magnitude que ϵ_0 . A relação entre as capacitâncias do sistema com o vácuo e com o dielétrico será

$$\frac{C}{C_0} = \frac{\epsilon_d (A/L)V}{\epsilon_0 (A/L)V} = \frac{\epsilon_d}{\epsilon_0} \Rightarrow C = \epsilon_r C_0 \quad (18.4)$$

A relação ϵ_d/ϵ_0 é a permissividade relativa ϵ_r , que freqüentemente é chamada constante dielétrica (k)², é maior que a unidade, para qualquer dielétrico $\epsilon_r > 1$ e representa o incremento na capacidade de armazenamento de carga pela inserção de um meio dielétrico entre as placas. A constante dielétrica, k , é uma propriedade

¹ $\epsilon_0 = 885 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{J.m}$; $F=C/V$; $V=J/C$

² Em 1837, Michael Faraday – a quem se deve todo o conceito de capacitância e, por isso, teve seu nome escolhido como unidade SI de capacitância, usando aparatos simples verificou que a capacitância de um capacitor completamente preenchido por um dielétrico aumentava por um numérico k , que ele chamou de constante dielétrica do material introduzido. A constante dielétrica do vácuo, por definição, é igual a (01) um. A medida da constante dielétrica do ar é apenas um pouco maior que 1 (um); geralmente a diferença é insignificante. Isto se deve ao fato de ser o ar, essencialmente um vazio do ponto de vista de um dielétrico. Para o ar seco a 0 °C e pressão atmosférica normal k é 1,0006.

do material e, deve ser uma das primeiras características a serem consideradas no projeto de um capacitor.

A Tabela 18.3 fornece os valores típicos de ϵ_r para alguns materiais a 20 °C.

Tabela 18.3 - Valores de ϵ_r para alguns materiais a 20°C.

Cristais inorgânicos	ϵ_r	Cerâmicas	ϵ_r
NaCl (seco)	5,5	Alumina	8,1-9,5
		Porcelana	6,0-8,0
CaCO ₃	9,15	Enstatita	5,5-7,5
Al ₂ O ₃ , MgO	10,0; 8,2	Forsterita	6,2
		Silicato de Alumínio	4,8
TiO ₂	100	Titanatos	50
BaTiO ₃	4100	Zirconia	8-10,5
Vidros	ϵ_r	Mica	5,4-8,7
Sílica fundida	3,8	Resinas poliméricas polares	ϵ_r
Pirex	5,1	Poli(cloreto de vinila)	3,2-3,6
Vidro soda-lime	6,9	Acetato de polivinil	3,2
Resinas poliméricas não polares	ϵ_r	Nylon 6,6	4,0-3,6
Polietileno	2,3	Polietileno tereftalato	3-2,5
Polipropileno	2,5-2,6	Epoxy	3,0-4,5
politetrafluoretileno	2,1	Policarbonato	2,9-3,0

A constante dielétrica, k (ou ϵ_r) do material compara a capacidade de armazenamento de cargas do material com aquela do vácuo entre as placas de mesma geometria sob a ação de um campo elétrico aplicado de mesma intensidade e indica quantas vezes a capacidade do sistema foi aumentada com a introdução do dielétrico entre as placas do capacitor.

O valor de k depende não só da pureza do material, mas das condições ambientais, da frequência e da intensidade da tensão aplicada. Como sugerido pela Equação 18.2, a capacitância de todos os tipos de capacitores pode ser escrita sob a forma

$$C = \epsilon (L) \quad (18.5)$$

onde L, que tem dimensão de comprimento, depende da geometria das placas do capacitor. De acordo com a descoberta de Faraday, para um capacitor completamente preenchido por um dielétrico, a Equação 18.5 torna-se então:

$$C = K \epsilon_0 L = K C_{ar} \quad (18.6)$$

onde C_{ar} é o valor da capacitância, com o ar preenchendo o espaço entre as placas. Na Tabela 18.4 são apresentadas as fórmulas para o cálculo de algumas capacitâncias.

Tabela 18.4 - Capacitância.

Capacitor	Capacitância
Placas paralelas	$\epsilon_0 \frac{A}{d}$
Cilíndrico	$2\pi\epsilon_0 \frac{L}{\ln(b/a)}$
Esférico	$4\pi\epsilon_0 \frac{ab}{\ln(b-a)}$
Esfera isolada	$4\pi\epsilon_0 R$

O armazenamento de carga pode ser ilustrado conforme as Figuras 18.2 e 18.3. Na Figura 18.2a, na situação de vácuo, uma carga $+Q_0$ está armazenada na placa superior, e uma carga $-Q_0$ na placa inferior. Quando um dielétrico é introduzido e um campo elétrico é aplicado, o sólido introduzido dentro das placas torna-se polarizado (Figura 18.2b). Como resultado desta polarização, há um acúmulo adicional de carga negativa de magnitude $-Q'$ na superfície do dielétrico próxima da placa positivamente carregada, e de forma similar, uma carga adicional $+Q'$ na superfície adjacente à placa negativa. Para a região do dielétrico mais distante destas superfícies, os efeitos de polarização não são importantes. Assim se cada placa e suas superfícies adjacentes do dielétrico forem consideradas como uma simples entidade, a carga induzida pelo dielétrico ($+Q'$ ou $-Q'$) pode ser considerada como anulando alguma das cargas que originalmente existiam na placa para a condição de vácuo ($+Q_0$ ou $-Q_0$). Da fonte, elétrons são obrigados a fluir para a placa negativa de forma a restabelecer a voltagem. E assim a carga em cada placa é agora $Q_0 + Q'$, tendo sido incrementada de um montante Q' . A densidade de carga superficial, D , ou quantidade de carga por unidade de área da placa do capacitor (C/m^2).

A densidade de carga superficial, ou quantidade de carga por unidade de área da placa do capacitor (C/m^2) também pode ser obtida, é proporcional ao campo elétrico e é representada na Figura 18.2. Quando o vácuo está presente,

$$D_0 = \epsilon_0 E \quad (18.7)$$

A constante de proporcionalidade sendo ϵ_0 . Além disso, uma expressão análoga existe para o caso dielétrico, que é

$$D = \epsilon E \quad (18.8a)$$

$$D = \epsilon KE \quad (18.8b)$$

Algumas vezes D é também chamado de deslocamento dielétrico.

Na presença de um dielétrico, a densidade de carga superficial nas placas do capacitor pode ser representada por

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (18.9)$$

onde P é a polarização, ou o incremento de densidade de carga acima do vácuo, devido à presença do dielétrico. Para muitos materiais dielétricos a polarização, P , que pode ser alcançada no material, é proporcional a E através da relação

$$P = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) E \quad (18.10a) \quad \text{ou}$$

$$P = \epsilon_0 (k - 1) E \quad (18.10b)$$

Neste caso ϵ_r ou k é independente da magnitude do campo elétrico. A polarização P pode ser considerada como o momento dipolar total por unidade de volume do material dielétrico, ou como uma polarização do campo elétrico dentro do dielétrico, que resulta de um alinhamento mútuo de muitos dipolos atômicos ou moleculares com o campo externo aplicado.

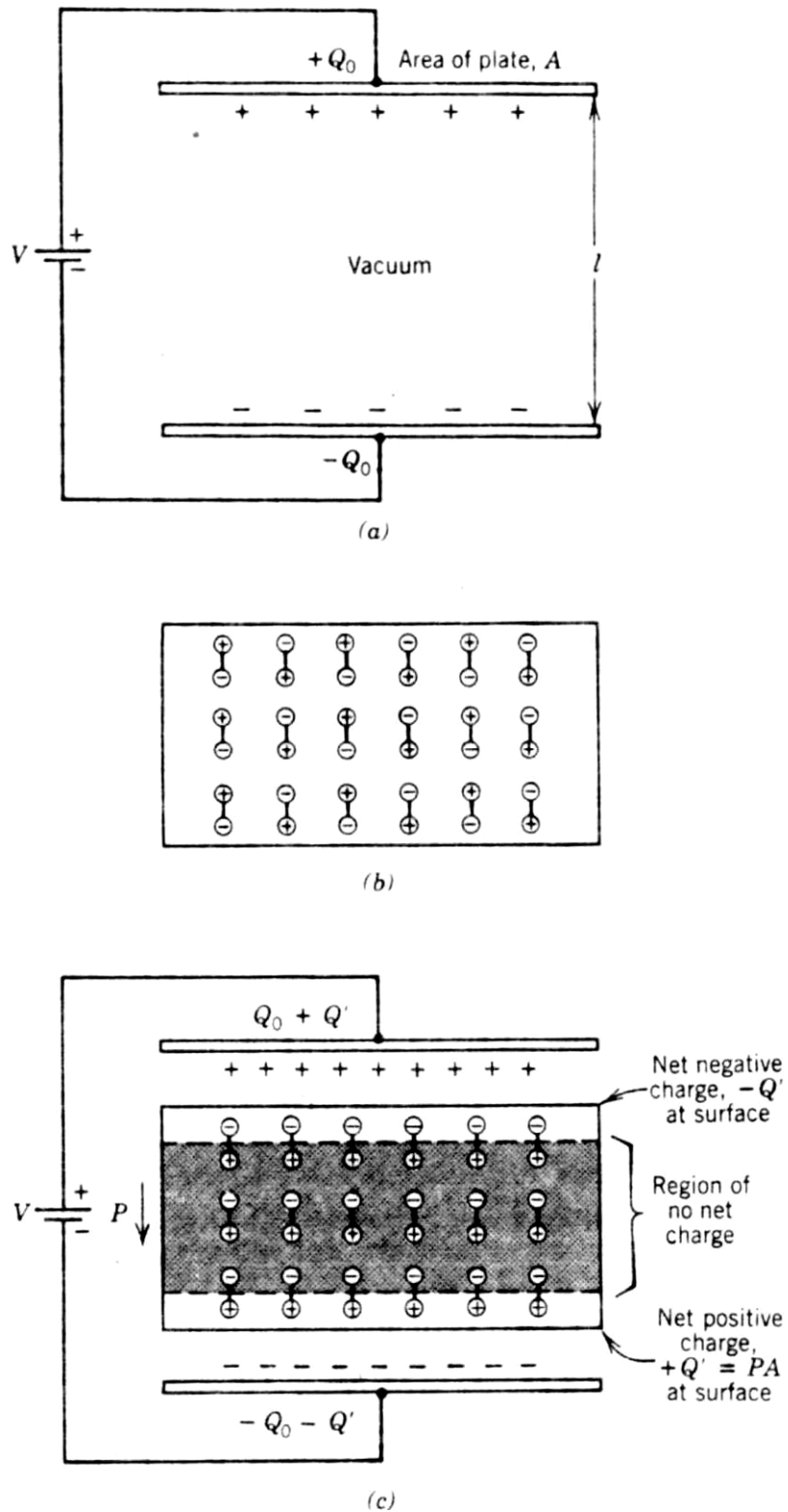


Figura 18.2 - Modelo simplificado de polarização dentro de um material dielétrico.

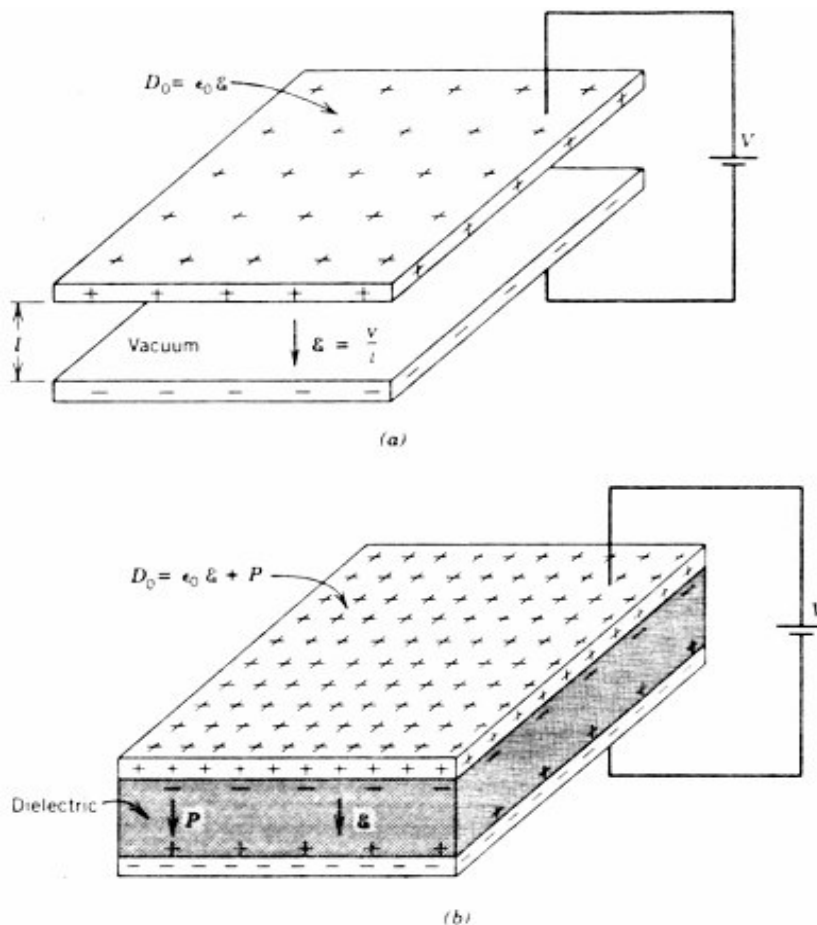


Figura 18.3 - Capacitor de placas paralelas (a) separadas por um vácuo e (b) separadas por um material dielétrico.

Outro efeito do dielétrico é limitar a diferença de potencial que pode ser aplicada entre as placas de um capacitor a certo valor $V_{\text{máx}}$. Se este valor for ultrapassado substancialmente, o material dielétrico se romperá originando um caminho condutor entre as placas. A relação entre a máxima diferença de potencial que um dielétrico pode suportar sem que ocorra sua ruptura (“breakdown”), e a sua espessura denomina-se rigidez dielétrica do material. Seu valor é, geralmente, expresso por V/m e depende da área específica, porosidade, defeitos e pureza do material, assim como da freqüência da tensão aplicada, tempo de aplicação da tensão e condições ambientais (temperatura, umidade, etc...). Todo material dielétrico possui, então, como característica uma rigidez dielétrica que é o valor máximo do campo elétrico que o material pode tolerar sem haver ruptura no poder isolante.

A rigidez dielétrica de materiais sólidos, medida em campos elétricos uniformes e evitando-se o efeito de descargas superficiais, varia de 0,5 a 10^5 KV/m para cristais halogenetos alcalinos, é de 2 a 2×10^6 KV/m para filmes poliméricos e alguns materiais inorgânicos tais como a mica, óxido de alumínio, etc. Valores de propriedades de alguns dielétricos medidas à temperatura ambiente são listados nas Tabelas 18.4 e 18.5.

Tabela 18.4 - Algumas propriedades dos dielétricos (medidas à temperatura ambiente).

Substância	Constante dielétrica K	Rigidez dielétrica KV/mm	Substância	Constante dielétrica K	Rigidez dielétrica KV/mm
Ar (1atm)	1,00059	3	Parafina	2,1-2,5	10
Água (20°C)	80,4	-	Plexiglass ^a	3,4	40
Água (25°C)	78,5	-	Silício	12	-
Etanol	25	-	Germânio	16	-
Baquelite	4,9	24	Poliestireno	2,55	24
Mica	5,4	10-100	Porcelana	7	5,7
Neopreno	6,9	12	Vidro (pirex)	4,7	14
Óleo de transformador	4,5	12	Cerâmica	130	-
Papel	3,7	16	Titanato de estrôncio	310	8

^a Poli (metacrilato de metila) (PMMA)

Tabela 18.5 - Algumas propriedades dos dielétricos (medidas à temperatura ambiente).

Substância	Constante dielétrica K	Rigidez dielétrica KV/mm
Al ₂ O ₃ 99,9%	10,1	9,1
Al ₂ O ₃ 99,5%	9,8	9,5
BeO 99,5%	6,7	10,2
Cordierita	4,1-5,3	2,4-7,9
Nylon 66 reforçado com 33% de fibra de vidro	7,8	17,3
Nylon 66 reforçado com 33% de fibra de vidro (umidade relativa de 50%)	3,7	19,7
Poliéster	3,6	21,7

Como mencionado acima, a rigidez dielétrica é o máximo gradiente de voltagem que pode suportar um isolador sem ruptura, o seu valor experimental é afetado dentre outros detalhes do procedimento, pela geometria da amostra e dos eletrodos. Os valores encontrados variam grandemente. A ruptura de um dielétrico inicia-se com o aparecimento de um número de elétrons na banda de condução, BC; esses elétrons podem ser acelerados rapidamente alcançando elevada energia cinética pela aplicação de um campo elétrico elevado. Parte dessa energia é transferida por colisões aos elétrons de valência, que são promovidos para a BC. Se um número suficientemente grande desses elétrons inicia o processo, estes se automultiplicam e uma avalanche de elétrons aumenta rapidamente, e pode suceder que o dielétrico funda, queime ou vaporize em forma localizada. Entretanto, é necessária uma condução de elétrons para iniciar o processo e Isso pode originar-se de diversas formas. Uma origem comum é o arco entre um terminal de alta voltagem e a superfície contaminada do isolador. Os átomos de impurezas podem também doar elétrons para a BC. Os poros interconectados em dielétricos proporcionam às vezes canais diretos de ruptura como resultado de descargas elétricas de gás. Quando o dielétrico é submetido a um campo elevado por longo tempo, a ruptura é precedida geralmente por fusão local. Nos capacitores velhos, a

ruptura pode ocorrer por intensidade de campo relativamente baixa se o dielétrico sofreu modificação química ou mecânica. A Figura 18.4 mostra a voltagem de ruptura de diversos materiais dielétricos em função da espessura dos mesmos.

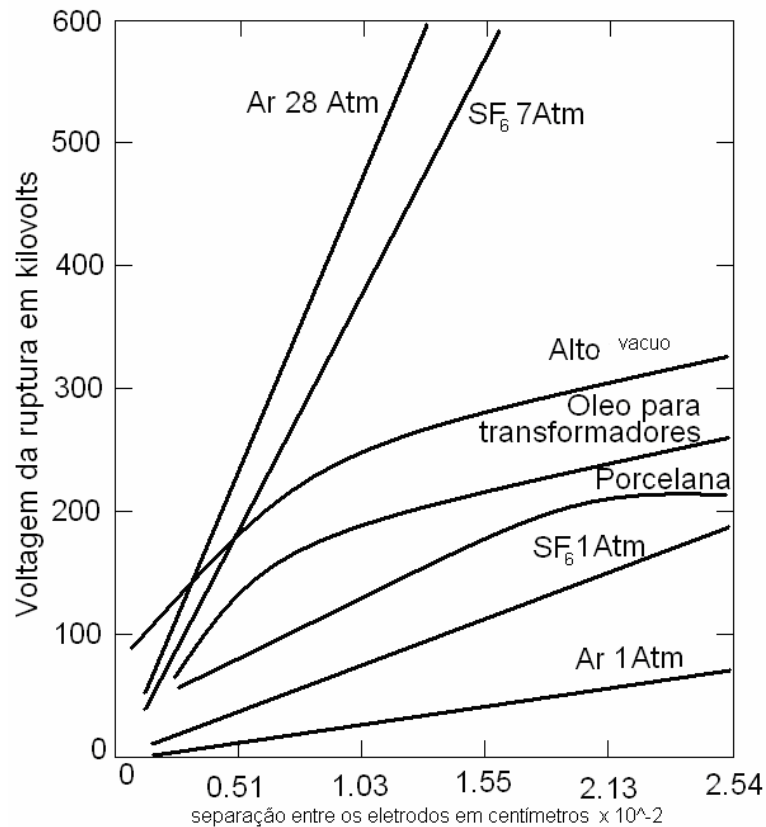


Figura 18.4 - Esforço para ruptura de diversos dielétricos com campos uniformes. Tensão de ruptura em função da espessura do dielétrico.

Exemplo 1: Em um capacitor plano e com ar entre suas placas se aplica uma DDP fixa. Se introduzirmos entre as placas um dielétrico a quantidade de carga por ele armazenada aumentará? Explique.

Sim, uma carga maior Q , é acumulada entre as placas, neste caso, $Q = \epsilon_d \frac{A}{l} V = CV$

onde ϵ_d é a permissividade do meio dielétrico, a qual será maior em magnitude que ϵ_0 . A relação entre as capacitâncias do sistema com o vácuo e com o dielétrico será

$$\frac{C}{C_0} = \frac{\epsilon_d (A/L)V}{\epsilon_0 (A/L)V} = \frac{\epsilon_d}{\epsilon_0} \Rightarrow C = \epsilon_r C_0. \text{ A relação } \epsilon_d/\epsilon_0 \text{ a permissividade relativa } \epsilon_r,$$

freqüentemente é chamada constante dielétrica, a relação $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ é maior que a unidade e representa o incremento na capacidade de armazenamento de carga pela inserção de um meio dielétrico entre as placas. A constante dielétrica é uma propriedade do material e, deve ser uma das primeiras características a serem consideradas no projeto de um capacitor. Assim para qualquer dielétrico $\epsilon_r > 1$.

Exemplo 2: Um condensador simples de duas placas paralelas pode armazenar $7,0 \times 10^{-5}$ C com uma diferença de potencial de 12000 V. Se for usado um material dielétrico de titanato de bário com $\kappa = 2100$ entre placas, as quais têm uma área de $5,0 \times 10^{-5} \text{ m}^2$, qual deve ser a distância de separação entre as placas?

$Q = CV$ e $Q = \epsilon_d \frac{A}{l} V = CV$ onde C é o valor da capacitância do material entre as placas. Mas, $C = K \epsilon_0 \frac{A}{d}$ ou $C = \kappa \epsilon_0 \frac{A}{d}$;

$$\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$\frac{Q}{V} = \kappa \epsilon_0 \frac{A}{d} \Rightarrow d = \frac{V \kappa \epsilon_0 A}{Q} = \frac{12000 * 2100 * 8,854 \times 10^{-12} * 5 \times 10^{-5}}{7 \times 10^{-5}} = 0,159 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Exemplo 3: Um condensador simples de duas placas paralelas armazena $6,5 \times 10^{-5}$ C com um potencial de 12000 V. Se a área das placas for $3,0 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ e a distancia entre as placas for 0,18mm, qual deve ser a constante dielétrica do material colocado entre as placas?

$$Q = C V; C = \kappa \epsilon_0 \frac{A}{d}; \epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$\frac{Q}{V} = \kappa \epsilon_0 \frac{A}{d} \Rightarrow \kappa = \frac{Qd}{VA \epsilon_0} = \frac{6,5 \times 10^{-5} * 0,18 \times 10^{-3}}{12000 * 3,0 \times 10^{-5} * 8,854 \times 10^{-12}} = 3674$$

Exemplo 4: A polarização de um material ferroelétrico é dada por $P = (\xi_r - 1)\xi_0 E$, onde ξ_r é sua permissividade elétrica relativa, ξ_0 a permissividade elétrica do vácuo e E a intensidade do campo elétrico. a) Que tensão deve ser aplicada a um cristal de 0.1mm de espessura do material B, para eliminar totalmente sua polarização, desorientando seus dipolos. b) Que intensidade de campo elétrico deve-se aplicar ao material A, inicialmente despolarizado, para causar uma polarização de $6 \times 10^{-8} \text{ C/m}^2$? Calcule a permissividade elétrica desse material nesse ponto.

a) Considerando que o material esteja saturado positivamente, o campo elétrico que deve se aplicado é de -2.8 V/m. Sendo assim a tensão que deve ser aplicada é de -2.8*0.0001=280μV.

b) O campo elétrico que deve ser aplicado é de 4 V/m.

Temos que $P = (\xi_r - 1)\xi_0 E \rightarrow P = (\xi - \xi_0)E$. Resolvendo para ξ temos:

$$\xi = \xi_0 + P/E$$

$$\xi = 8,85 \times 10^{-12} + 6 \times 10^{-8} / 4 = 150 \times 10^{-9} \text{ F/m.}$$

Exemplo 5: Um disco de 2 cm de diâmetro por 0,025 cm de espessura constituído de esteatita apresentou uma capacitância de 7,2 μF e um fator de dissipação de 72. Determinar a a) permissividade elétrica, b) o fator de perda dielétrica, c) a susceptibilidade elétrica e d) a permissividade elétrica complexa.

$$C = 7,2 \mu\text{F}; r = 1 \text{ cm}; l = 0,025 \text{ cm}; \text{tg } \delta = 72$$

$$\text{a) } C = \epsilon_d \times \frac{A}{l} \Rightarrow 7,2 \mu = \epsilon_d \times \frac{314,1596 \mu}{250 \mu} \Rightarrow \epsilon_d = 5,7295 \mu$$

$$b) \operatorname{tg}\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$$

$\operatorname{tg}\delta$ é o fator de dissipação; ε' é a permissividade relativa; ε'' é o fator de perda dielétrica

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_0} \rightarrow \varepsilon' = 644,8408 \times 10^3 \quad \text{e} \quad \varepsilon'' = 46,4285 \times 10^6$$

$$c) \chi = \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_0} - 1$$

$$\varepsilon_0 = 8,885 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$\varepsilon_d = 5,295 \times 10^{-6} \text{ F/m}$$

$$\chi = 644,8586 \times 10^3$$

$$d) \varepsilon_{\text{efc}} = \varepsilon_r + j \varepsilon''$$

ε_{efc} é a permissividade efetiva complexa; ε'' o fator de perda dielétrica; ε_r permissividade elétrica relativa [F/m].

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_0} = 644,8408 \times 10^3$$

$$\varepsilon_{\text{efc}} = 644,8408 \times 10^3 + j 46,4285 \times 10^6$$

Exemplo 6: Um capacitor de placas paralelas que utiliza um material dielétrico com uma ε_r de 2,5 tem entre placas um espaçamento de 1mm (0,04 pol.). Se for usado um outro material, porém com uma constante dielétrica de 4,0 e a capacitância não for alterada, qual deve ser o novo espaçamento entre placas?

$$\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0$$

$$\varepsilon = (2,5) \cdot 8,85 \times 10^{-12} = 2,2125 \times 10^{-12}$$

$$\varepsilon = (4,0) \cdot 8,85 \times 10^{-12} = 3,54 \times 10^{-12}$$

$$C = \varepsilon \cdot \frac{A}{L} \quad \text{e} \quad \varepsilon \cdot \frac{A}{L} = \varepsilon \cdot \frac{A}{L}$$

$$2,21 \times 10^{-12} \cdot \frac{A}{1\text{mm}} = 3,54 \times 10^{-12} \cdot \frac{A}{L} \quad \quad L = \frac{3,54 \times 10^{-12}}{2,2125 \times 10^{-12}} \Rightarrow L = 1,6\text{mm}$$

Exemplo 7: Um capacitor de placas paralelas com dimensões de 100 mm por 25mm e uma separação entre placas de 3mm deve ter uma capacitância mínima de 38pF quando um potencial CA de 500 V é aplicado a uma frequência de 1MHz. Quais dos materiais listados na Tabela 18.4 são possíveis candidatos? Por quê?

$$C = \varepsilon \frac{A}{l} \rightarrow \varepsilon = \frac{C \cdot l}{A} = \frac{38 \times 10^{-12} [\text{F}] * 3 \times 10^{-3} [\text{m}]}{2,5 \times 10^{-3} [\text{m}^2]} \rightarrow \varepsilon = 45,6 \times 10^{-12}$$

A constante dielétrica é:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{45,6 \times 10^{-12}}{8,85 \times 10^{-12}} = 5,15$$

Assim, observando Tabela 18.4 os possíveis materiais são titanato, mica, Enstatita vidro soda-lime e porcelana. Devido à proximidade das constantes dielétricas tabeladas para estes materiais e a constante dielétrica calculada no exercício.

Exemplo 8: Considere um capacitor de placas paralelas que possui uma área de 2500 mm² e uma separação entre placas paralelas de 2 mm, e que contém um material com constante dielétrica de 4,0 posicionado entre as placas. a) Qual é a capacitância desse capacitor? b) Calcule o campo elétrico que deve ser aplicado para que uma carga de 8,0x10⁻⁹ C seja armazenada em cada placa.

$$a) C = \epsilon \frac{A}{l} = (3,54 \times 10^{-11}) \frac{2,5 \times 10^{-3}}{2 \times 10^{-3}} = 4,43 \times 10^{-11} \text{ [F]}$$

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 = 4 * 8,85 \times 10^{-12} = 3,54 \times 10^{-11}$$

$$b) C = \frac{Q}{V} \rightarrow V = \frac{Q}{C} = \frac{8,0 \times 10^{-9}}{44,25 \times 10^{-12}} = 180 \text{ [V]}$$

$$E = \frac{V}{l} = \frac{180}{2 \times 10^{-3}} = 90,3 \times 10^3 \text{ V/m}$$

Exemplo 9: Uma carga de 3x10⁻¹¹ C deve ser armazenada em cada placa de um capacitor de placas paralelas que possui uma área de 160 mm² e uma separação entre as placas de 3,5 mm. Qual a voltagem necessária se um material com constante dielétrica de 5,0 for posicionado entre as placas? Qual a voltagem necessária se fosse no vácuo? Quais são as capacitâncias para as partes “a” e “b”? Calcule o deslocamento dielétrico para a parte “a”. Calcule a polarização para a parte “a”.

$$\frac{Q}{V} = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{L}$$

$$V = \frac{QL}{\epsilon_r \epsilon_0 A} = \frac{3,5 \times 10^{-11} \text{ C} \cdot 3,5 \times 10^{-3} \text{ m}}{5,8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m} \cdot 160 \text{ mm}^2 \cdot 1 \text{ m}^2 / 10^6 \text{ mm}^2} = 17,3 \text{ V}$$

$$V = \frac{QL}{\epsilon_0 A} = \frac{3,5 \times 10^{-11} \text{ C} \cdot 3,5 \times 10^{-3} \text{ m}}{8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m} \cdot 160 \times 10^{-16} \text{ m}^2} = 86,5 \text{ V}$$

$$\text{Para a parte "a": } C = \frac{Q}{V} = \frac{3,5 \times 10^{-11} \text{ C}}{17,3 \text{ V}} = 2 \times 10^{-12} \text{ F}$$

$$\text{Para a parte "b": } C = \frac{Q}{V} = \frac{3,5 \times 10^{-11} \text{ C}}{86,5 \text{ V}} = 4 \times 10^{-13} \text{ F}$$

$$D = \epsilon_0 E + \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) E$$

$$D = \epsilon_0 \epsilon_r E$$

$$D = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r V}{L}$$

$$D = \frac{8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m} \cdot 5 \cdot 17,3 \text{ V}}{3,5 \times 10^{-3} \text{ m}}$$

$$D = 2,2 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$P = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) \frac{V}{L}$$

$$P = \frac{8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m} \cdot (5 - 1) \cdot 17,3 \text{ V}}{3,5 \times 10^{-3} \text{ m}}$$

$$P = 1,75 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$$

18.4 Dielétricos - descrição atômica

Se uma mesma quantidade de carga elétrica for mantida nas placas do capacitor, antes e após a introdução do dielétrico, haverá uma diminuição do potencial entre as placas do capacitor, com conseqüente diminuição do campo elétrico, ao se introduzir o dielétrico. A introdução do dielétrico enfraquece o campo de um valor igual ao da constante dielétrica relativa do material utilizado:

$$E = \frac{E_0}{\xi} \quad (18.11)$$

Para compreender esse resultado obtido experimentalmente, torna-se necessário examinar alguns aspectos microscópicos da matéria. O que acontece, em termos atômicos e moleculares, quando um dielétrico é submetido à ação de um campo elétrico? Existem duas possibilidades (que veremos mais detalhadamente após esta introdução de conceitos).

Dielétricos polares: Alguns dielétricos, como as moléculas de água, possuem um momento de dipolo elétrico permanente. Tais materiais (chamados de dielétricos polares) tendem a se alinhar com o campo elétrico externo como nos mostra a Figura 18.5. Pelo fato de as moléculas estarem em constante agitação térmica, este alinhamento não é completo, mas aumenta quando cresce a intensidade do campo aplicado ou quando a temperatura diminui.

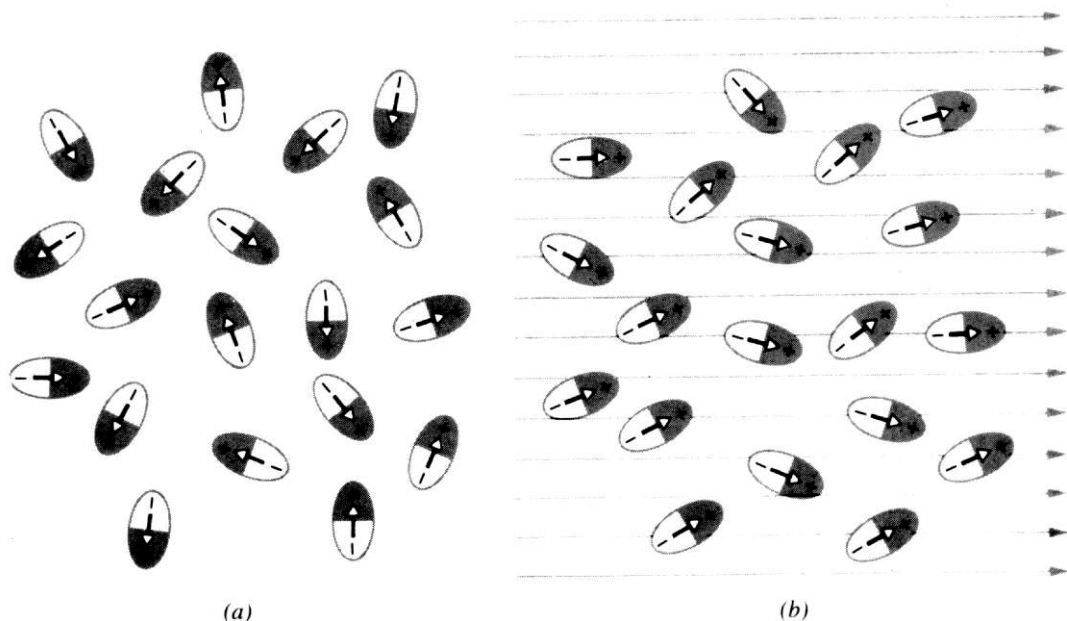


Figura 18.5 - Dielétrico polar, há alinhamento dos mesmos por um campo elétrico externo.

Dielétricos não-polares: Quer as moléculas tenham ou não momentos de dipolo permanentes, elas os adquirem por indução, ao serem colocadas num campo elétrico externo. Sabemos que o campo elétrico externo tende a “esticar” a molécula

separando ligeiramente os centros de carga positiva e negativa. A Figura 18.6a mostra uma lâmina dielétrica sem aplicação de nenhum campo elétrico externo. Na Figura 18.6b, um campo elétrico externo E_0 é aplicado, sendo seu efeito separar ligeiramente os centros das distribuições positiva e negativa. O efeito resultante é uma acumulação de carga positiva na face direita da placa dielétrica, e de carga negativa na face esquerda. A placa como um todo, permanece eletricamente neutra, não havendo excesso de carga em qualquer elemento de volume no interior do dielétrico.

A Figura 18.6c mostra que as cargas superficiais induzidas aparecem de tal maneira que o campo E' , por elas criado, se opõe ao campo externo E_0 . O campo resultante E dentro do dielétrico, que é o vetor soma de E_0 e E' , aponta na mesma direção de E_0 mas tem módulo menor. Deste modo, o efeito do dielétrico é enfraquecer o campo elétrico aplicado dentro do dielétrico.

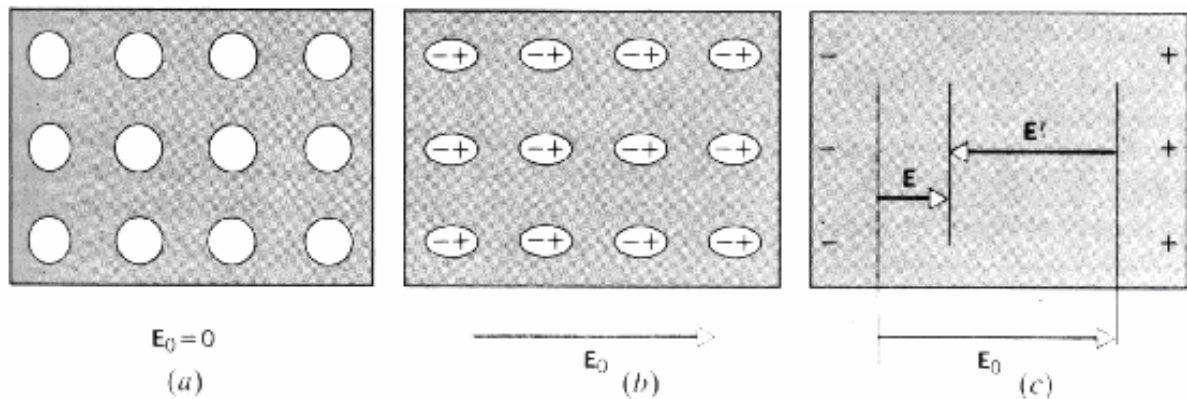


Figura 18.6 - (a) Uma lâmina dielétrica, indicando os átomos neutros no interior da lâmina. (b) Um campo elétrico externo é aplicado, esticando os átomos e separando os centros de carga positiva e negativa. (c) O efeito resultante é o aparecimento de cargas superficiais. Estas cargas criam um campo E' , que se opõe ao campo externo E_0 aplicado.

18.5 Polarização

A maioria dos materiais isolantes tem um número reduzido de elétrons ou íons móveis que permitem uma ínfima passagem de corrente elétrica quando colocados em um campo elétrico. O campo elétrico interage nos isolantes elétricos provocando um ligeiro deslocamento no balanço das cargas positivas e negativas dentro do material para formar um dipolo elétrico e são assim denominados materiais dielétricos. Duas cargas pontuais de módulo q e sinais opostos, separados entre si de uma distância s (eixo do dipolo), constituem um dipolo elétrico. O momento desse dipolo, \vec{p} , é uma grandeza vetorial de módulo qs , com a direção da reta que une as duas cargas e sentido da carga negativa para a positiva. A Figura 18.7 ilustra o momento do dipolo elétrico discreto.

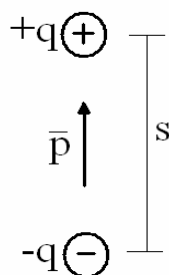


Figura 18.7 - Representação do momento de um dipolo elétrico gerado por duas cargas (de magnitude q) separadas por uma distancia s , o vetor polarização associado \vec{p} , também, é mostrado.

Supor que as cargas estejam ligadas entre si mecanicamente, de tal forma que a distancia s seja sempre constante. Colocando esse dipolo elétrico em um campo elétrico uniforme, de intensidade E (que é também um vetor quantidade), externo (o próprio dipolo será um campo elétrico, porem isso não nos interessa no momento). A extremidade positiva do dipolo é atraída para a direita, e a negativa para a esquerda, por uma força \vec{F} (ou torque) que atuará sobre o dipolo para orientá-lo com o campo aplicado, de intensidade qE , conforme ilustra a Figura 18.8. O campo elétrico fornece um trabalho ao dipolo para girá-lo até que sua direção e sentido seja os mesmos do campo (Figura 18.9). Este processo de alinhamento do dipolo é denominado polarização.

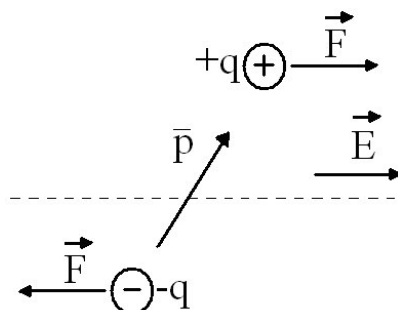


Figura 18.8 - Momento de um dipolo elétrico em um campo elétrico.

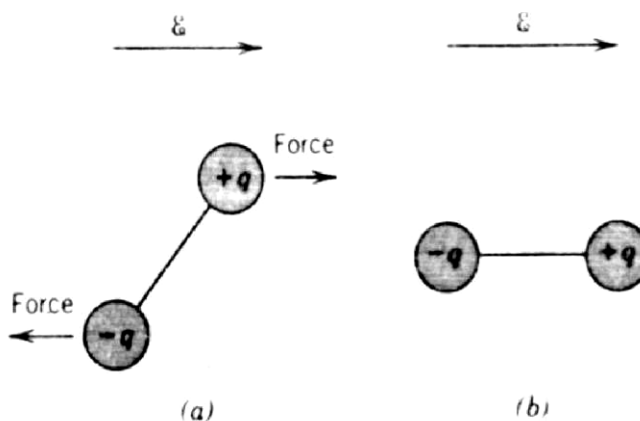


Figura 18.9 - (a) Forças impostas (torque) agindo sobre um dipolo elétrico devido a um campo elétrico. (b) Alinhamento final do dipolo como o campo.

Polarização é então, o alinhamento induzido ou permanente dos momentos de dipolo de moléculas ou átomos por efeito de um campo externo. Os materiais isolantes (ou dielétricos) dependendo do tipo de material e das condições de aplicação do campo externo, basicamente podem apresentar 3 tipos de polarização (um, dois ou mais simultaneamente), eletrônica, iônica e molecular (Figura 18.10). A polarização eletrônica resulta do deslocamento de nuvens de elétrons em relação a núcleos atômicos. A contribuição iônica resulta do deslocamento de íons em relação a outros íons. A polarização molecular resulta da mudança de orientação de moléculas com momento dipolo elétrico permanente por efeito do campo externo aplicado. Em materiais heterogêneos existe um quarto tipo de polarização – interfacial produzida pelo acúmulo de cargas elétricas nas interfaces estruturais. Este tipo não é levado em conta habitualmente e estudos teóricos, mas é importante do ponto de vista prático, já que materiais isolantes comerciais são sempre heterogêneos.

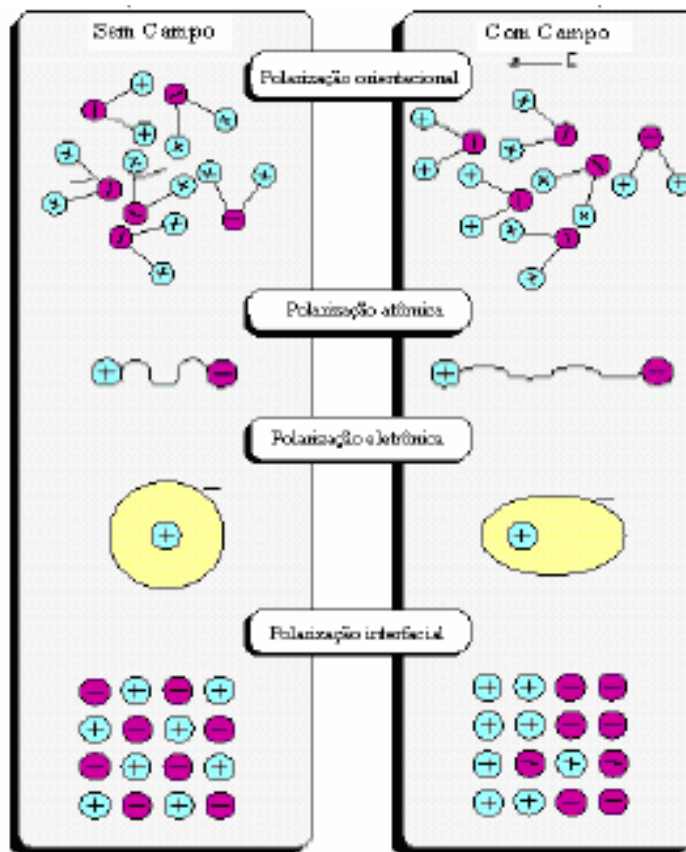


Figura 18.10 - Mecanismos de polarização – esquema ilustrativo.

18.5.1 Polarização eletrônica (dipolo induzido), P_e

No caso de frequências óticas a polarização é de longe a mais importante. Ocorre em todos os materiais dielétricos e é ocasionada por um ligeiro deslocamento dos elétrons que circundam o núcleo atômico para a direção do eletrodo positivo e, por sua vez o núcleo atômico é ligeiramente deslocado para a direção do eletrodo negativo. Como os centros de cargas não são coincidentes há a formação de um pequeno dipolo (Figura 18.10). Apesar de haver tantos momentos dipolares quanto o número de átomos presentes, o momento dipolar resultante, μ_e ,

é baixo de forma que a polarização eletrônica resultante, também é baixa e é dada por:

$$P_e = \Sigma \mu_e \quad (18.12)$$

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. A freqüências elevadas, da ordem de 10^{16} Hz, a polarização eletrônica responde rapidamente às mudanças que ocorrem no campo elétrico. A remoção do campo elétrico aplicado provoca um retorno dos elétrons e do núcleo para a posição original.

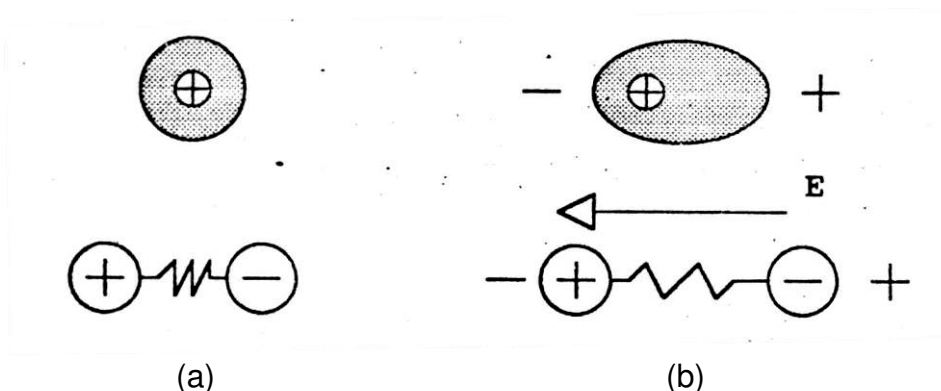


Figura 18.10 - (a) Sem campo elétrico aplicado e (b) com campo elétrico aplicado.

Como isso acontece: suponhamos que um átomo de hidrogênio seja colocado em uma região onde exista um campo elétrico, conforme ilustra a Figura 18.11.

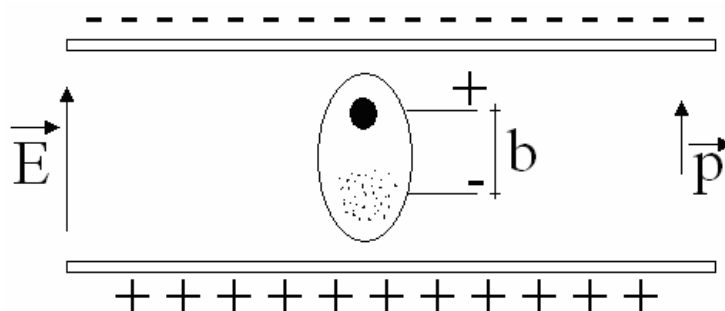


Figura 18.11 - Um átomo num campo elétrico.

O campo elétrico distorce a simetria do átomo, puxando a carga negativa para baixo e o núcleo positivo para cima, quando o equilíbrio é atingido, o átomo ligeiramente distorcido terá um momento de dipolo elétrico, por que os centros de carga positiva e negativa não mais coincidem. O modulo desse momento de dipolo induzido será $p = e \cdot b$, onde b é o deslocamento sofrido pelas cargas, e cujo valor é proporcional a intensidade do campo elétrico aplicado:

$$\vec{p} = \alpha_e \cdot \vec{E} \quad (18.13)$$

A constante de proporcionalidade α_e é uma característica de cada átomo, e é denominada de polarizabilidade eletrônica. O hidrogênio e os metais alcalinos têm valores elevados de α_e , sendo que esse valor cresce com o número atômico do elemento.

Os gases nobres têm valores de α_e muito menores, porém também crescentes com o número atômico do elemento (ver pg. 395 de Kittel, valores de α_e para vários íons).

Assim como os átomos, muitas moléculas não apresentam momentos de dipolos permanentes. São moléculas cujas distribuições atômicas são tais que os centros de carga positivas e negativas coincidem (apolares). No entanto, também nessas moléculas pode-se induzir um momento de dipolo elétrico pela ação de um campo elétrico externo. Obviamente tanto nos átomos como nas moléculas, o momento de dipolo induzido desaparece com a retirada do campo externo.

Porém, como as moléculas são menos simétricas que os átomos, para elas podem-se ter momentos de dipolo induzido não paralelo ao campo aplicado. Consideremos, como exemplo, uma molécula de dióxido de carbono (CO_2), é uma molécula linear, conforme ilustra a Figura 18.12.

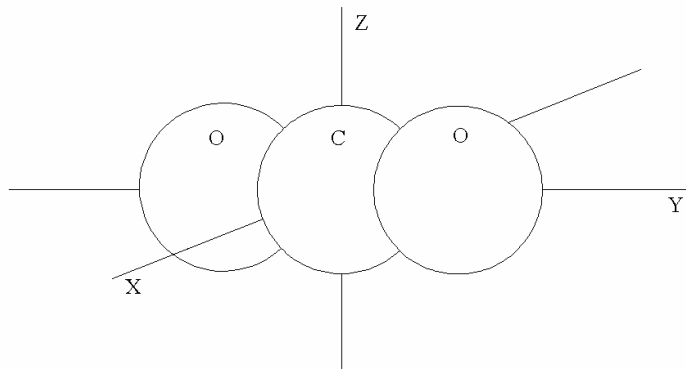


Figura 18.12 - Molécula de CO_2 ($\alpha_{\text{paralelo}} \gg \alpha_{\text{perpendicular}}$).

A estrutura eletrônica dessa molécula sofre deformações diferentes para campos aplicados transversalmente ou longitudinalmente a ela. De fato, a polarizabilidade observada da molécula de CO_2 para um campo aplicado paralelamente ao seu eixo é quase o dobro daquela observada para um campo transversal.

Como resultado, temos um vetor momento de dipolo induzido não paralelo ao campo elétrico que é induzido.

Este exemplo ilustra que a polarizabilidade de uma molécula não é um simples escalar, mas composta por um conjunto de coeficientes que exprime a dependência linear das componentes de um vetor, no caso \vec{p} , relativamente as de um outro, \vec{E} . Tal conjunto de coeficientes é denominado tensor (já observamos que a condutividade elétrica também é um tensor).

Um dielétrico que contém N moléculas por unidade de volume, terá como momento de dipolo elétrico induzido total:

$$\vec{p} = N * \vec{p} = N * \alpha_e * \vec{E} \quad (18.14)$$

A este vetor denominamos de polarização elétrica, e seu módulo fornece o número de momento de dipolo induzido por unidade de volume do dielétrico.

18.5.2 Polarização por orientação de dipolos permanentes, P_o

Envolve moléculas não simétricas que contêm dipolos elétricos permanentes. A maioria dos dipolos permanentes em materiais cerâmicos, por exemplo, não podem ser reorientados por aplicação de um campo elétrico sem que haja a destruição da estrutura dos cristais. Em virtude disto, este mecanismo de polarização não é tão importante para os materiais cerâmicos, mas é muito importante para os polímeros. Algumas moléculas, devido a sua estrutura não simétrica, possuem momento de dipolo elétrico intrínseco, mesmo na ausência de um campo elétrico externo. Nessas moléculas os centróides das distribuições de carga negativas e positivas estão permanentemente separados por uma determinada distância. Tais moléculas são denominadas de polares.

Como exemplo mais simples temos as moléculas diatômicas formadas por átomos diferentes, como o HCl. Para essa molécula o elétron do hidrogênio desloca-se parcialmente em direção a estrutura do Cl, desta forma, resulta em um excesso de carga negativa na extremidade do cloro. Momento de dipolo permanente, regra geral, é mais intensa que qualquer momento que se possa induzir por campos elétricos comuns, usados em laboratório.

Outro exemplo bastante conhecido de molécula polar é a molécula de água, H_2O . Essa molécula tem um momento de dipolo permanente porque é “dobrada” no centro, com os eixos O-H formando um ângulo de cerca de 105° entre si. A Figura 18.13 apresenta alguns exemplos de moléculas polares bem conhecidas.

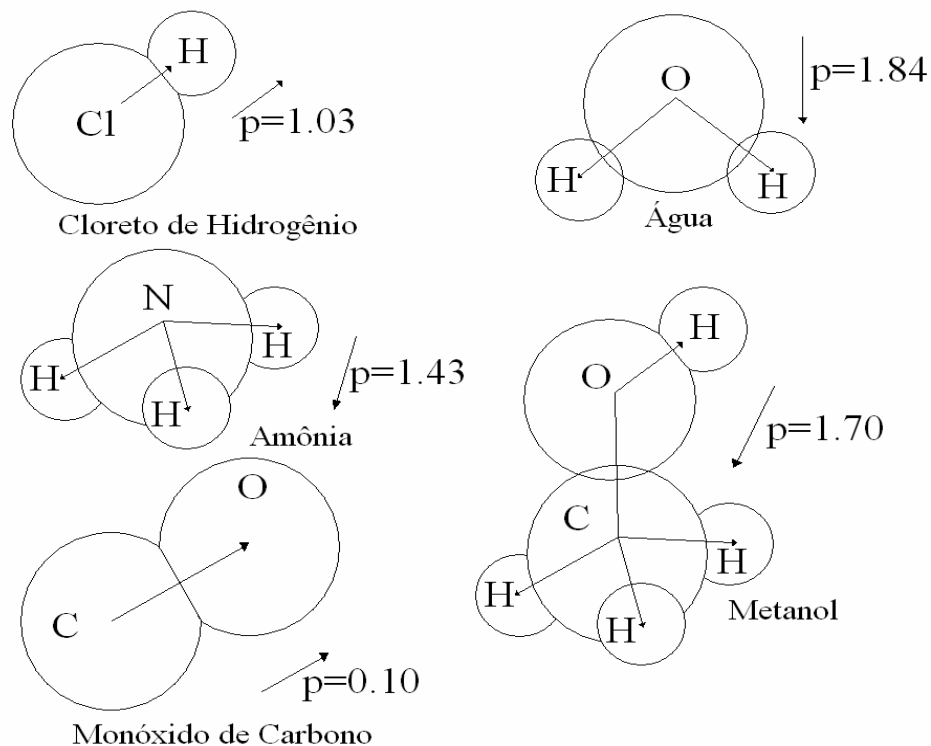


Figura 18.13 - Algumas moléculas polares bem conhecidas O valor observado no momento de dipolo permanente p é dado em unidades de 10^{-18} esu-cm (esu):

unidade eletrostática de carga) para converter para unidades do SI multiplique p por $1/3 \times 10^{11}$).

O comportamento de uma substancia composta por moléculas polares como dielétricos é notavelmente diferente de uma substancia composta de moléculas não polares. Neste ultimo caso, a aplicação de um campo elétrico externo induz um pequeno momento de dipolo em cada molécula. Na substancia polar, os dipolos já estão presentes em grande quantidade, porém, na ausência do campo elétrico externo, são orientados aleatoriamente, de modo a não apresentar um momento de dipolo resultante mensurável.

Um campo elétrico externo alinha tais dipolos, fornecendo como efeito macroscópico uma intensa polarização. Como resultado obtém-se uma constante dielétrica muito maior em dielétricos polares que em não polares. A constante dielétrica relativa da água, por exemplo, é 80, enquanto para um liquido típico não polar esse valor se mantém em torno de 2.

A polarização causada em substancias polares denominada de polarização por orientação. Neste caso também se pode definir uma grandeza α_o , denominada de polarização por orientação, de forma que:

$$\bar{p} = N * \alpha_o * \vec{E} \quad (18.15)$$

onde N é o numero de moléculas polares por unidade de volume do material e \vec{E} o campo elétrico aplicado ao material.

Polarização por orientação molecular não ocorre em cristais iônicos ou em vidros. Porém, outro tipo de polarização também denominada de polarização por orientação, pode ocorrer em tais substancias.

A mais simples imperfeição na rede cristalina é a denominada vacância: falta de um átomo ou íon em uma posição da rede. Em equilíbrio térmico todos os cristais apresentam certo numero de vacâncias. A concentração de equilíbrio de vacâncias diminuem com a diminuição da temperatura.

Pares de vacâncias de sinais opostos associados formam um dipolo elétrico. Impurezas iônicas adjacentes a uma vacância de sinal oposto ao seu também formam um dipolo permanente. Esse dipolo íon-vacância, poderá se orientar sob a ação de um campo externo, desde que existam duas ou mais posições disponível na rede para o íon de impureza. Esse tipo de polarização é o esquematizado na Figura 18.14.

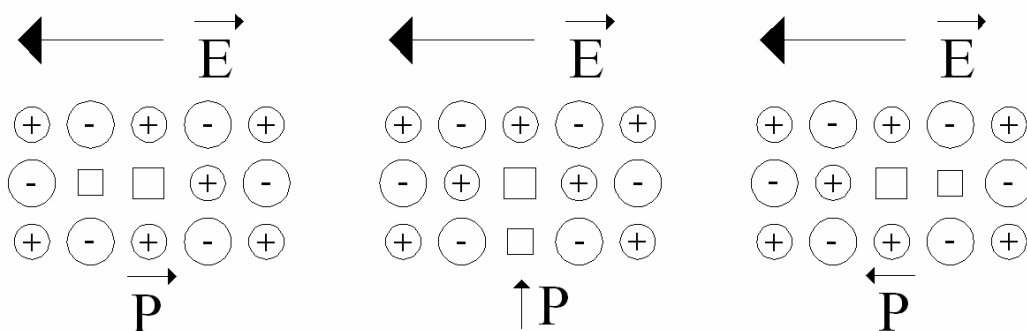


Figura 18.14 - Reorientação de um par de vacâncias na rede. Outros tipos de pares de defeitos fornecem resultados similares.

A adição de cloreto de cálcio, CaCl_2 em cristais de KCl , por exemplo, leva a um aumento de concentração de vacâncias de cátions (vacâncias $++$). Existe uma tendência para os íons de Ca^{2+} nesse cristal de se associar a essas vacâncias fornecendo um dipolo (Figura 18.15). Esse tipo de polarização é também conhecido como polarização por defeitos ou impurezas.

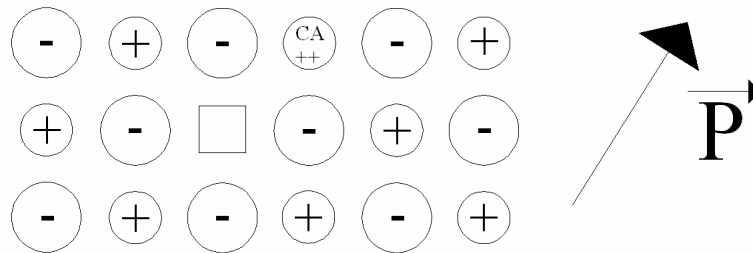


Figura 18.15 - Produção de vacâncias na rede pela dissolução de CaCl_2 em KCl , para garantir a neutralidade elétrica uma vacância positiva é introduzida na rede para cada íon Ca^{++} . Os dois íons Cl^- do CaCl_2 entram como íons negativos normais na rede.

Este tipo de polarização dipolar difere da eletrônica e da iônica com relação ao movimento das partículas por efeito da temperatura. As moléculas dipolares, que se encontram em movimento térmico caótico, se orientam parcialmente pela ação do campo, o qual é a causa da polarização. O mesmo 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;

Alguns autores denominam a polarização que aparece apenas em corpos amorfos e em sólidos não cristalinos polares (caso do vidro) como polarização estrutural, na qual um corpo amorfo é parcialmente constituído de partículas e 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. Em relação á temperatura essas matérias apresentam comportamento semelhante à polarização dipolar.

18.5.3 Polarização iônica (induzida), P_i

Este tipo de polarização envolve o deslocamento de íons positivos e negativos sob a ação de um campo elétrico aplicado e é o tipo mais comum nos materiais cerâmicos. O campo elétrico aplicado ao material pode provocar um deslocamento comparativamente grande em algumas estruturas, porém muito menor do que $1,0 \text{ \AA}$ e, assim, desenvolver constantes dielétricas relativamente altas, devido à polarização iônica. A polarização iônica assim como a eletrônica se

caracteriza por um deslocamento elástico de íons ligados ao núcleo de um átomo. Diferentemente da polarização eletrônica este tipo de polarização é intensificada com o aumento da temperatura, uma vez que se debilitam as forças elásticas interiônicas e aumenta as distâncias entre os íons quando o corpo se dilata; Neste caso também se pode definir uma polarizabilidade iônica, α_i . Obviamente, a polarização desaparece ao se retirar o campo elétrico externo.

A polarização iônica é mais vagarosa do que a polarização eletrônica sob a ação de um campo elétrico variável aplicado. A resposta máxima é da ordem de 10^{13} Hz.

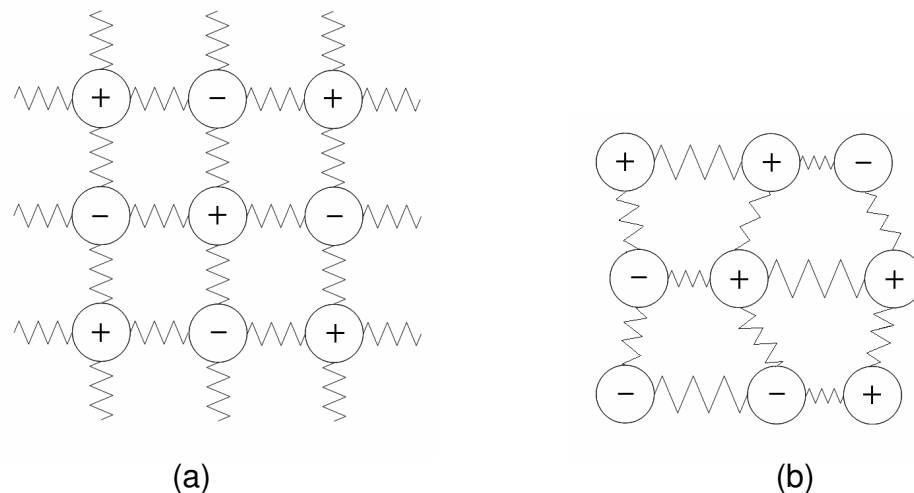


Figura 18.16 - Polarização iônica o campo distorce a rede: (a) sem campo elétrico aplicado e (b) com campo elétrico aplicado.

18.5.4 Polarização de cargas espaciais, P_s .

Envolve as cargas espaciais ou cargas estranhas que se situam nas interfaces. Em outras palavras estas cargas são cargas randomicamente causadas por radiação, deterioração térmica, ou são aquelas absorvidas no material durante o processamento. Seu valor e a frequência de resposta dependem mais da geometria dos contaminantes do que das outras propriedades do material.

Este tipo de polarização ocorre em dielétricos multifásicos (polímeros policristalinos e cerâmicas heterogêneas). Quando uma das faces presentes possui resistividade muito diferente da outra, um campo elétrico externo aplicado pode causar um acúmulo de cargas elétricas nas interfaces entre as faces. Esta região de carga espacial se estende por um volume muito maior que o ocupado pela região não homogênea em si. Essa polarização conhecida como polarização interfacial ou por carga espacial é esquematizada na Figura 18.17. Para este caso defini-se a polarizabilidade por carga espacial, α_c .

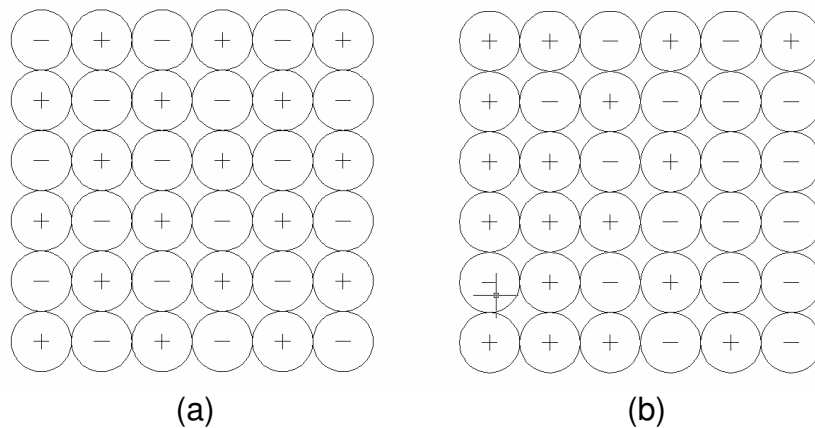


Figura 18.17 - Polarizabilidade por carga espacial (a) sem campo elétrico aplicado e (b) com campo elétrico aplicado.

18.5.5 Polarização total

A polarizabilidade total, α , que pode ocorrer em um dielétrico, é representada pela soma de todas as polarizabilidades possíveis de ocorrer, isto é:

$$\alpha = \alpha_o + \alpha_i + \alpha_e + \alpha_c \quad (18.15)$$

É importante salientar que o próprio dipolo elétrico induzido ou permanente, produz campo elétrico na região que o circunda. A Figura 18.18 esquematiza algumas linhas de campo produzidas por um dipolo.

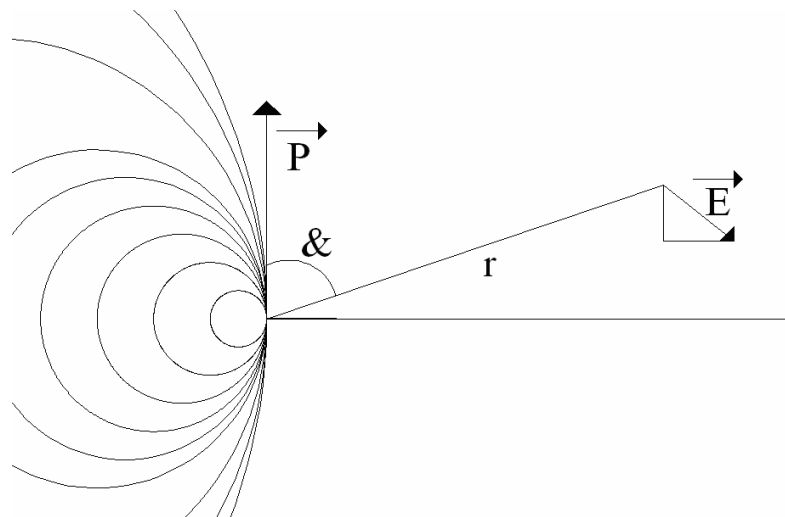


Figura 18.18 - Algumas linhas de campo produzidas por um dipolo.

$$\varphi = \frac{p \cdot \cos\theta}{r^2} \quad E_x = \frac{3 \cdot p \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta}{r^3} \quad E_z = \frac{p(3 \cdot \cos^2\theta - 1)}{r^3} \quad (18.16)$$

18.6 Dependência da polarização com a frequência e temperatura

A polarização total P , a polarizabilidade, α e a permissividade relativa, ϵ_r , de um dielétrico em um campo elétrico alternado, dependem todas da facilidade com que

os dipolos podem inverter seu alinhamento com cada inversão de campo. Em muitas situações práticas a corrente é alternada, e a voltagem, ou campo elétrico que é aplicado, muda de direção com o tempo. Assim no material dielétrico, a cada reversão de sentido, os dipolos tentam se reorientar com o campo, ou seja, um processo que requer um tempo finito. Para cada tipo de polarização, algum tempo mínimo de reorientação existe, o qual depende da facilidade com que cada particular dipolo é capaz de realinhar-se. Uma freqüência de relaxação é resultado de um tempo mínimo de reorientação. Todos os tipos de polarização que podem ocorrer em dielétricos possuem uma certa inércia de momento, isto é, existe um certo tempo necessário para que os dipolos sejam induzidos ou para que os que já existem então que se alinhem com o campo elétrico externo aplicado. Esse tempo é denominado de tempo de relaxação da polarização. Um dipolo não pode manter as trocas de direção de orientação quando a freqüência do campo elétrico aplicado excede a freqüência de relaxação, e, além disso, não proporcionará nenhuma contribuição para a constante dielétrica. Deste modo, esses mecanismos podem não ocorrer se houver uma inversão suficientemente rápida da tensão aplicada.

A dependência de ϵ_r da freqüência do campo é representada na Figura 18.19 para um meio dielétrico que exibe três tipos de polarização; note que o eixo da freqüência está plotado de forma logarítmica. Como indicado na Figura 18.19, quando o mecanismo de polarização cessa de operar, há uma queda abrupta na constante dielétrica; por outro lado ϵ_r está virtualmente independente da freqüência. A absorção da energia elétrica por um material dielétrico que está sujeito à um campo elétrico alternado é chamada perda dielétrica. Esta perda pode ser importante nas freqüências de campo elétrico localizadas nas vizinhanças da freqüência de relaxação para cada tipo operativo de dipolo de um material específico. Uma baixa perda dielétrica é desejada na freqüência de utilização.

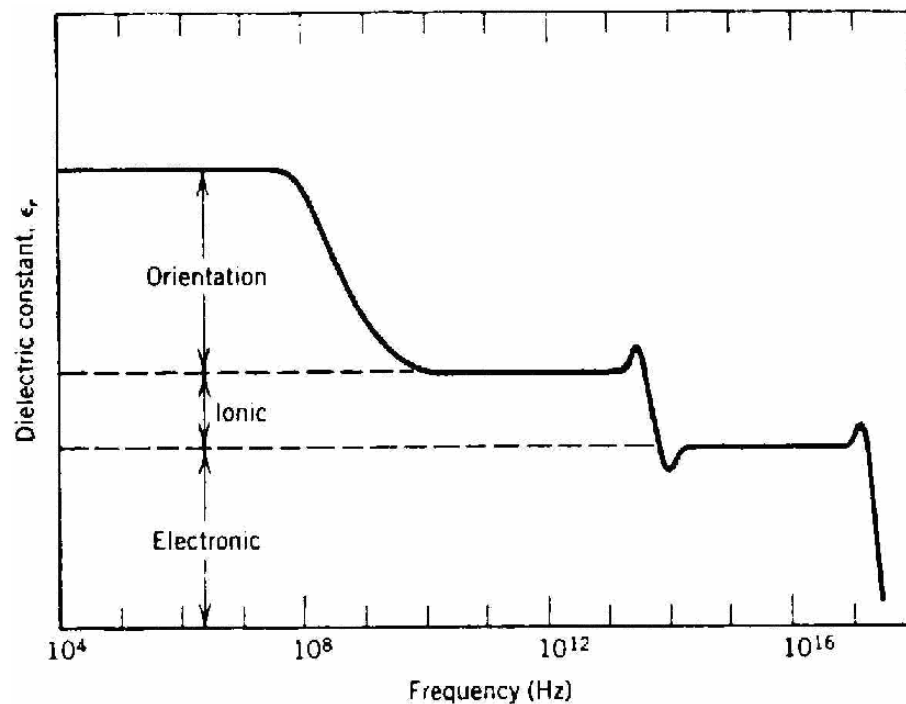


Figura 18.19 - Polarização (ϵ_r) versus freqüência do campo para um meio dielétrico que exibe três tipos de polarização. As polarizações com resposta mais rápida prosseguem nas freqüências mais elevadas.

Obviamente a variação da polarização é refletida pelas constantes dielétricas. Quando a frequência do campo aplicado excede a necessária para ocorrer a polarização, os dipolos não conseguem mais reorientarem-se e o processo cessa. Como o tempo de relaxação dos quatro processos de polarização que foram vistos é diferente, é possível separar-se experimentalmente as contribuições de cada processo ao valor da constante dielétrica como mostrado na Figura 18.20.

A polarização eletrônica é o único processo suficientemente rápido para acompanhar variações muito rápidas de um campo elétrico alternado. Isto é facilmente compressível, uma vez que nesse processo só se tem variação da estrutura eletrônica e pouca massa entra em jogo. Esse tipo de polarização predomina em dielétricos não polares.

A polarização eletrônica responde rapidamente, encontra-se presente a elevadas frequências, trazendo importantes características.

A polarização iônica, não é tão rápida para acompanhar variações intensas do campo, só contribuindo para a constante dielétrica na região do infravermelho do espectro ($f < 10^{14}$ Hz). Nas altas frequências a polarização iônica não se pode manter na inversão de campo, enquanto que a polarização eletrônica se mantém.

A polarização por orientação, envolve a movimentação de toda uma estrutura molecular, estando, assim sujeita a uma determinada força de atrito, é muito mais lenta. Neste caso o tipo de relaxação varia muito de uma substância para a outra. Assim este tipo de polarização é afetada somente a baixas frequência (em frequências inferiores ao infravermelho UHF ou microondas), pois em altas frequências não há tempo suficiente para que as moléculas possam realinhar com cada ciclo.

Finalmente a polarização por carga espacial é mais lenta, só contribui para o valor de ϵ a baixas frequências. A Figura 18.20 mostra a variação da constante dielétrica relativa em função da frequência de campo elétrico aplicado, destacando-se a contribuição de cada processo.

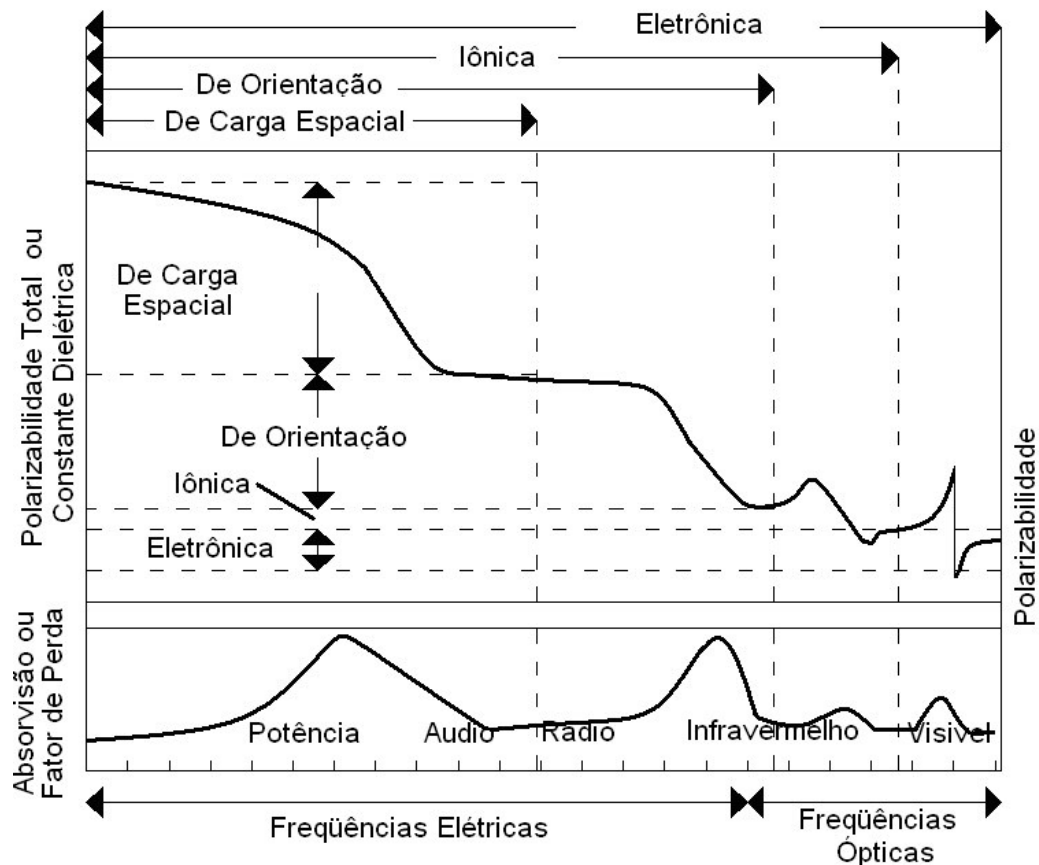


Figura 18.20 - Variação da polarizabilidade total e da absorção dielétrica em função da frequência. A contribuição da polarizabilidade decai à medida que aumenta a frequência característica de ressonância.

A perda de energia q se produz nos dielétricos de deve á condutividade $c-c$ e relaxamento dos dipolos. O fator de perda é uma indicação da energia perdida como calor. Sua variação com a frequência esta indicada na Figura 18.20. Nas frequências ópticas e IV, os máximos ilustram a absorção óptica e IV. A perda dielétrica máxima para qualquer tipo particular de processo de polarização se produz quando seu período de relaxação é o mesmo daquele do campo aplicado, ou seja, quando se produz ressonância, assim todos os máximos da Figura 18.20 se produzem perto do limite de frequência de cada polarização particular. Na Figura 18.21 é mostrada a variação esquemática com a frequência da parte real da constante dielétrica de um dielétrico sólido hipotético com quatro mecanismos de polarização.

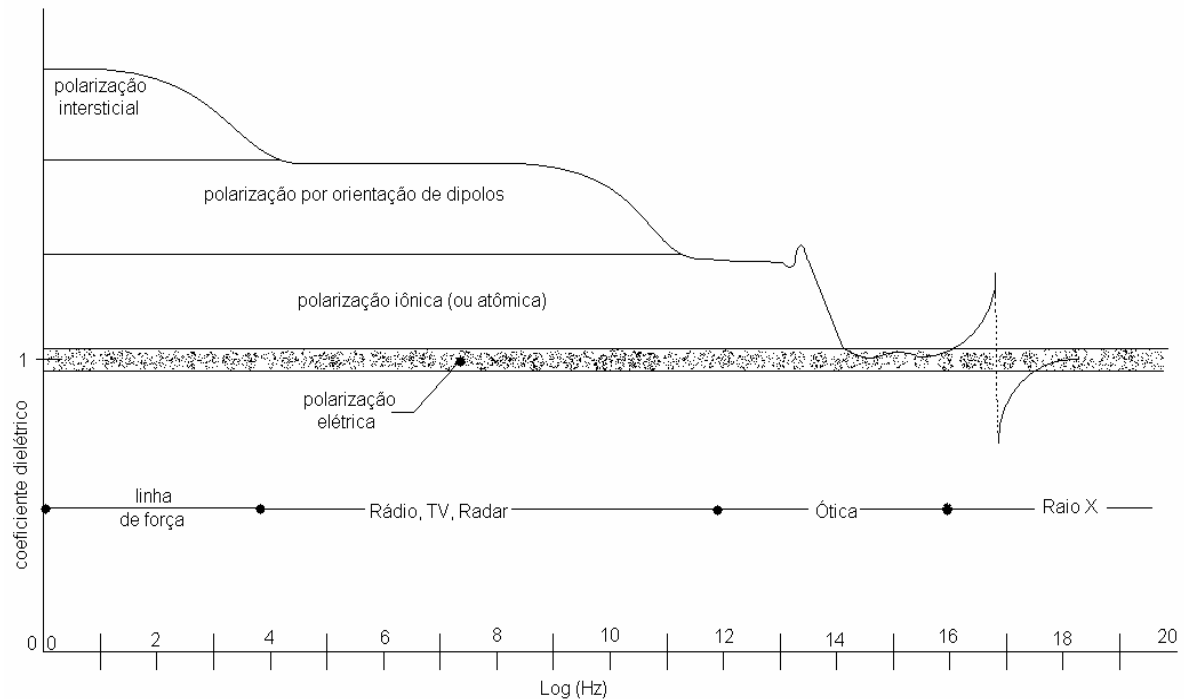


Figura 18.21 - Variação esquemática com a frequência da parte real do coeficiente dielétrico de um dielétrico sólido hipotético com quatro mecanismos de polarização.

Sólidos fortemente covalentes como o diamante apresentam só polarização eletrônica. Desta forma ξ_r pode ser medido opticamente através do índice de refração. Materiais iônicos perdem a contribuição da polarização iônica em frequências abaixo do infravermelho. Para esses materiais é possível medir-se separadamente a contribuição iônica e a eletrônica efetuando-se medidas tanto ópticas como elétricas de ξ_r .

Para uma frequência dada a constante dielétrica relativa dos materiais, ξ depende ainda da temperatura. Em materiais onde predomina a polarizabilidade eletrônica, esse efeito é em geral muito pequeno. Os principais efeitos são sentidos nos materiais que possuem polarização por orientação (materiais moleculares polares) e polarização iônica. Nos primeiros, a constante dielétrica tende a diminuir, devido à agitação térmica provocada e esse efeito pode ser grande, conforme ilustra a Figura 18.22a, para o nitro benzeno (C_6H_5NO), e a Figura 18.22b, para polietileno tereftalato ou poli(tereftalato de etileno) (PET) e outros polímeros.

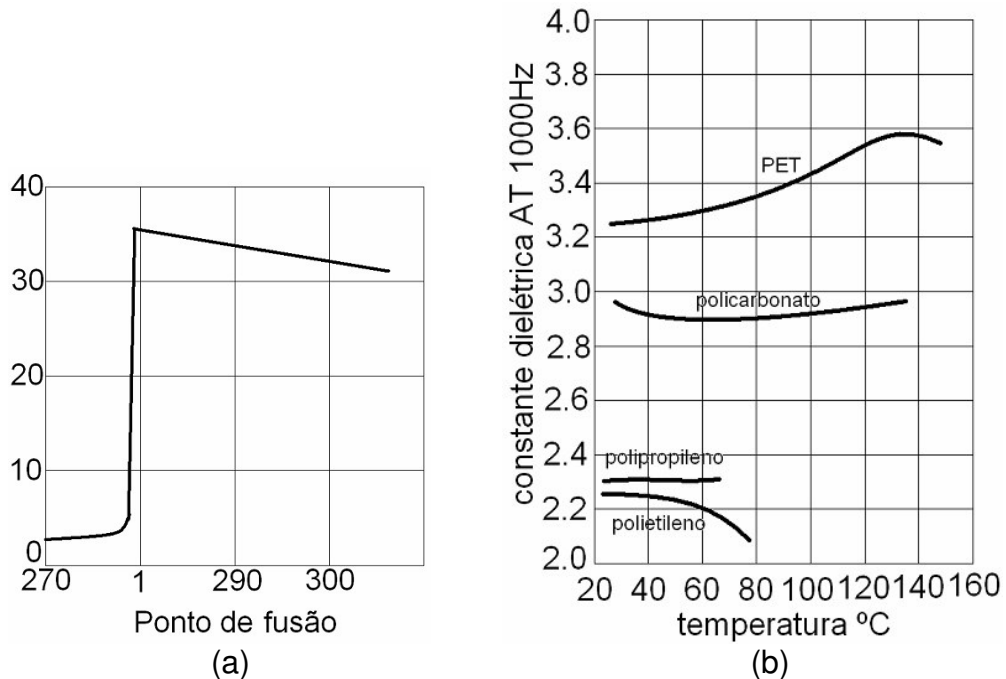


Figura 18.22 - (a) Permissividade relativa do nitro benzeno em função da temperatura. (b) Variação da constante dielétrica em função da temperatura para polietileno tereftalato (PET) e outros polímeros.

Em materiais que possuem polarização iônica com a elevação de temperatura, observa-se uma tendência da constante dielétrica em aumentar, pois há aumento da resposta iônica ao campo com qualquer frequência em consequência do aumento dos portadores de carga e a mobilidade iônica. Este aumento na constante dielétrica sugere que o mecanismo dominante é a polarização iônica.

Cada uma das polarizações citadas é reversível e essencialmente proporcional ao campo elétrico aplicado, para pequenos campos e baixas frequências. E pode-se até escrever que $P / E = \text{módulo constante}$

18.7 Materiais ferroelétricos

Os íons que se deslocam em um cristal sobre a ação de um campo elétrico externo, causam o aparecimento de um dipolo, conforme vimos no início do capítulo, e geralmente retornam as suas posições originais após a retirada do campo elétrico. Porém, em certos materiais, como por exemplo o titanato de bário (BaTiO_3), a temperatura inferior a $120\text{ }^\circ\text{C}$, isso não ocorre. O BaTiO_3 , tem uma estrutura cúbica estável à temperatura acima de $120\text{ }^\circ\text{C}$, conforme mostra a Figura 18.23.

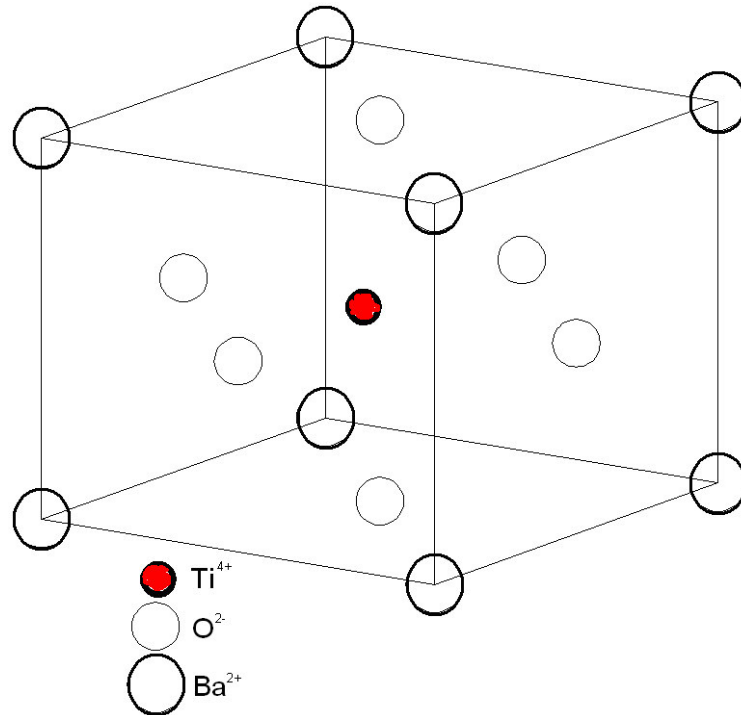


Figura 18.23 - Cella unitária “perovskita” (Ca^{2+}). Íons por célula unitária:5 (distribuição:1 Ti^{4+} , 1 Ba^{2+} e 3 O^{2-}). Cada Ba^{2+} em coordenação 12 com o O^{2-} , Ti^{4+} em coordenação 6 com o O^{2-} . Apenas $\text{Ba}^{2+} - \text{O}^{2-}$,formam FCC.

Ao ser resfriado abaixo de 120°C o (BaTiO_3) sofre uma transformação de fase a uma transformação tetragonal. A temperatura crítica em que ocorre a transformação é conhecida como temperatura de Curie. Neste caso o (BaTiO_3) de estrutura tetragonal é um material ferroelétrico. Nessa estrutura, o íon central Ti^{4+} em relação aos íons O^{2-} pode situar-se em duas posições sendo portanto uma estrutura assimétrica. Como nenhuma dessas posições está no centro da célula unitária, o centróide das cargas positivas não coincidem com o das cargas negativas, formando, portanto um dipolo elétrico. A Figura 18.24 ilustra o que foi descrito, embora esse deslocamento seja inferior a uma pequena fração de angstroms, é muito maior que os deslocamentos químicos que ocorre na maior parte dos sólidos. Como resultado, teremos um momento de dipolo elétrico intenso para a célula unitária, o que leva o (BaTiO_3), a ter uma constante dielétrica muito elevada. ($8\sim 4000$). O valor de ξ variam com a temperatura e com o campo aplicado conforme é mostrado na Figura 18.25. Para valores muito altos de $E(\text{V/cm})$ os domínios são orientados de forma mais efetiva e assim altos valores de ξ resultam. Ao mesmo tempo pode ser verificada forte influencia da temperatura. Os dois picos ondulados a 5°C e -80°C ocorrem devido a variação de fases do material: $T > 120^{\circ}\text{C}$: cúbica; 120 à 5°C :tetragonal; 5°C à -80°C :Ortorrômica; $T < -80^{\circ}\text{C}$ Romboédrica. Felizmente essa influencia da temperatura nos valores da ξ pode ser modificada preparando soluções sólidas com ampla faixa de composições. Parte dos íons Ba^{2+} podem ser substituídos por Pb^{2+} , Sr^{2+} , Ca^{2+} e Cd^{2+} mantendo as características ferroelétricas do material. Assim como o dos íons Ti^{4+} podem ser substituídos por Sn^{4+} , Hf^{4+} , Zr^{4+} , Ce^{4+} e Th^{4+} .

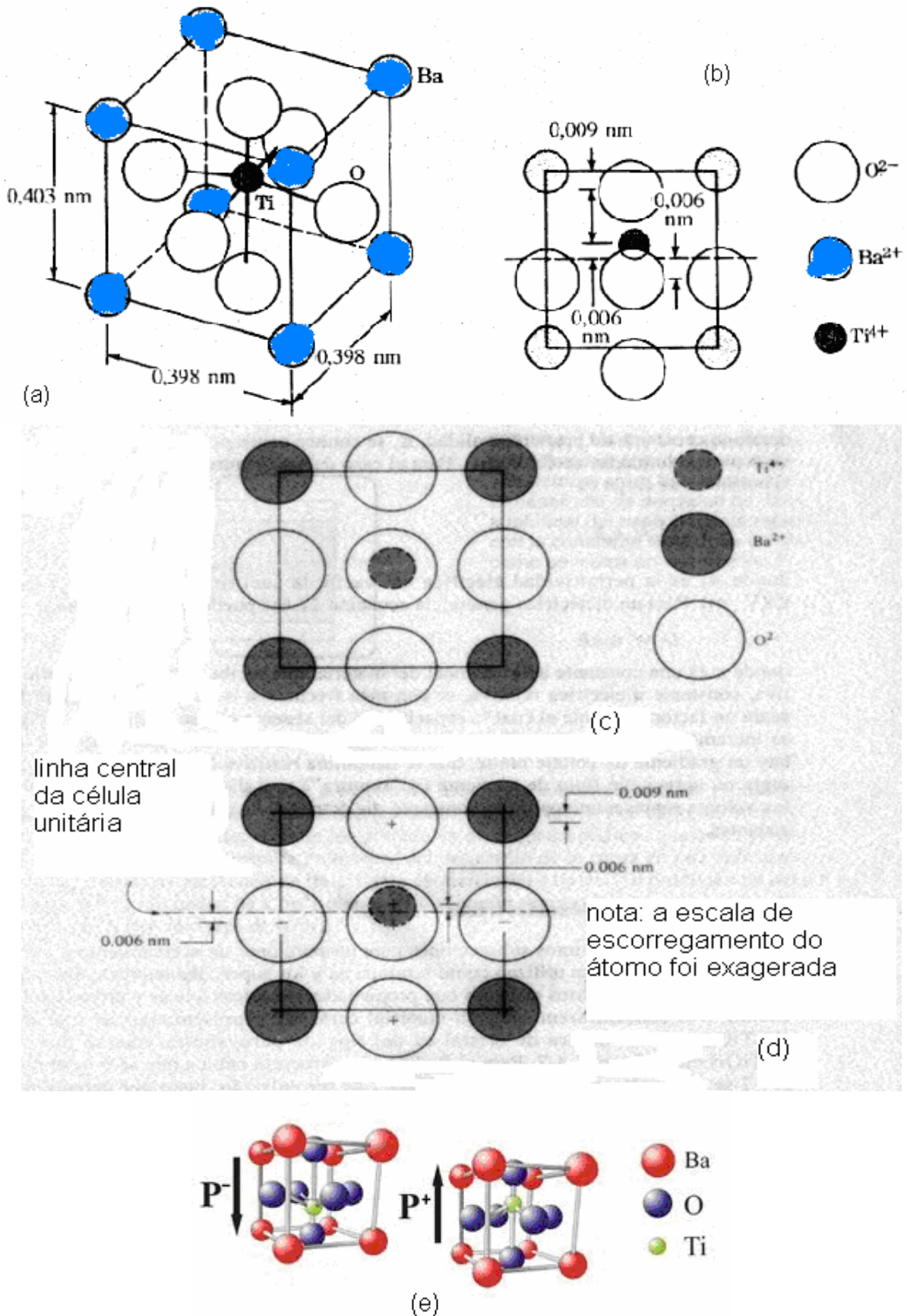


Figura 18.24 - O titanato de bário (BaTiO_3), cúbico (a) e (c) passa a ter uma estrutura tetragonal (b, d, e), abaixo de 120°C (temperatura de Curie) na qual o íon central Ti^{4+} pode situar-se em duas posições.

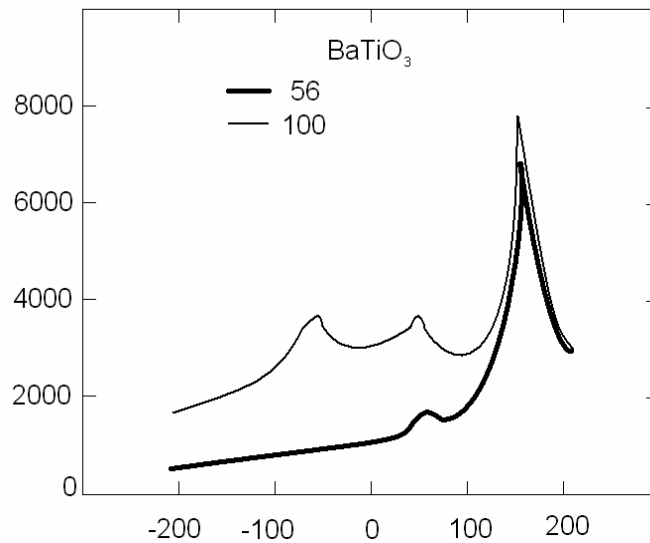


Figura 18.25 - Variação do valor de ξ com a temperatura e E para BaTiO_3 .

É necessário um certo tempo uma vez que uma certa energia é necessária para mover o íon Ti^{4+} de sua posição de mais baixa energia. A Figura 18.26 ilustra os domínios ferroelétricos, sendo assim denominados por que a propriedade de alinhamento espontâneo de dipolos elétricos recebe o nome de ferroeletricidade. Como mostrado na figura, em contraste com o material cúbico, a estrutura de dipolo da célula tetragonal permite elevada polarização em resposta ao campo elétrico aplicado. Isso é mostrado como um efeito macroestrutural e cristalográfico. O material ferroelétrico pode apresentar polarização nula sem campo aplicado devido à orientação aleatório dos domínios a escala microscópica, regiões essas nas quais o eixo c das células unitárias adjacentes tem uma direção em comum. Quando se aplica um campo, são favorecidas as orientações dos dipolos das células unitárias que estão mais ou menos paralelos à direção do campo aplicado. Neste caso os domínios com essas orientações crescem as custas dos domínios orientados menos favoravelmente. O mecanismo específico do movimento da parede do domínio é simplesmente o pequeno deslocamento das posições dos íons dentro da célula unitária, dando como resultado a mudança de orientação do eixo c tetragonal. Tais movimentos da parede do domínio dão como resultado a polarização espontânea. Em contraste com o material paraelétrico a campo apenas provoca um pequeno dipolo induzido (cátions puxados ligeiramente em direção do eletrodo negativo e ânions para o eletrodo positivo).

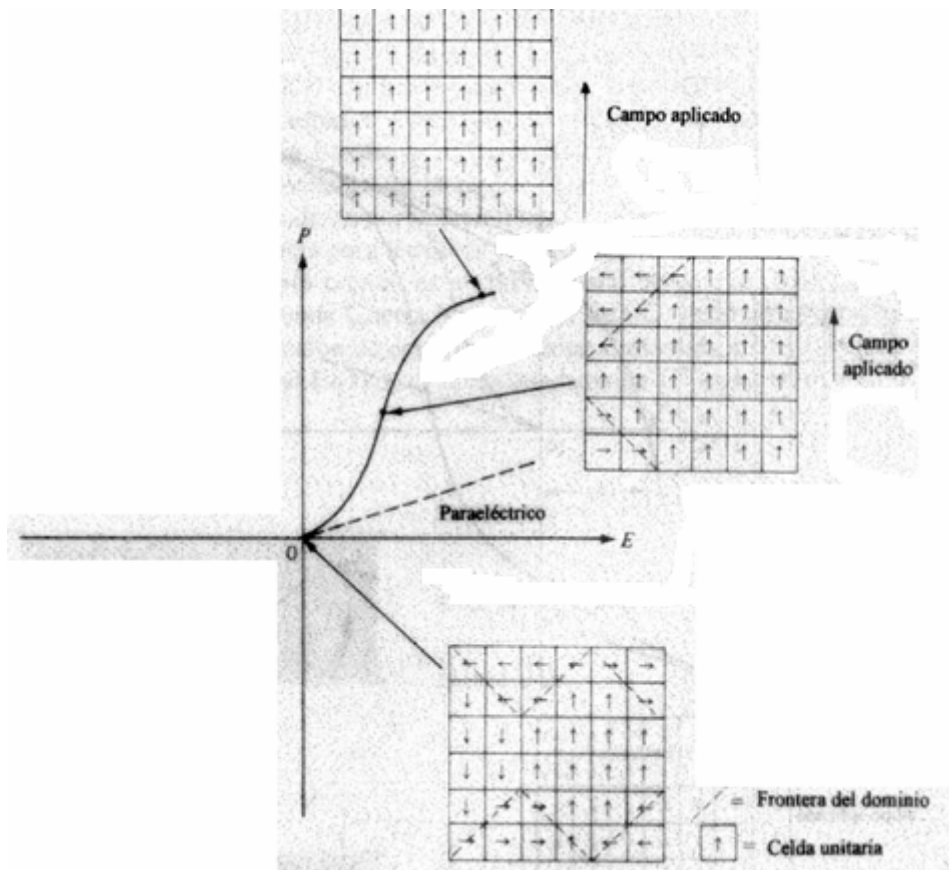


Figura 18.26 - Polarização, P , versus campo elétrico aplicado, E . Para o material paraelétrico apenas observa-se modesta polarização, já o material ferroelétrico apresenta polarização espontânea na qual os domínios das células unitárias orientadas similarmente crescem ao aumentar os campos de igual orientação.

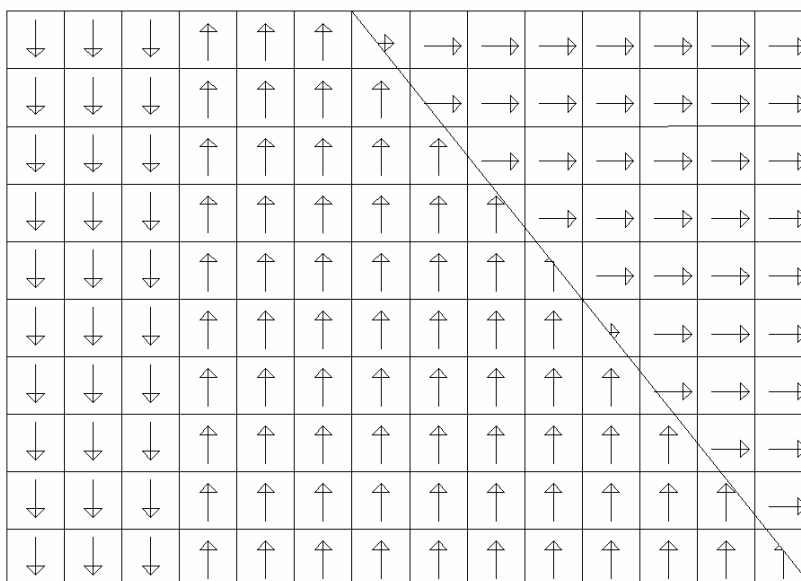


Figura 18.27 - Domínios ferroelétricos.

Em equilíbrio, um material ferroelétrico tem seus domínios orientados aleatoriamente, de forma a não apresentar nenhuma polarização resultante mensurável. Ao se aplicar um campo elétrico externo, as fronteiras entre os domínios se movem de forma a expandir nos domínios orientados mais favoravelmente ao campo aplicado, e concentrar os menos favoravelmente. Como resultado, origina-se uma polarização total não nula no material, que aumenta rapidamente com o campo aplicado, tal como ilustra a parte O-A da curva do diagrama polarização x campo aplicado da Figura 18.28. Essa figura resume o ciclo de histerese que resulta se um campo é aplicado ciclicamente (i.é. AC). Como o alinhamento tende a um máximo (uma vez que a densidade de domínios é finita), atinge-se uma situação na qual um aumento adicional do campo elétrico aplicado apenas melhora ligeiramente a polarização preferencial (parte A-B da curva).

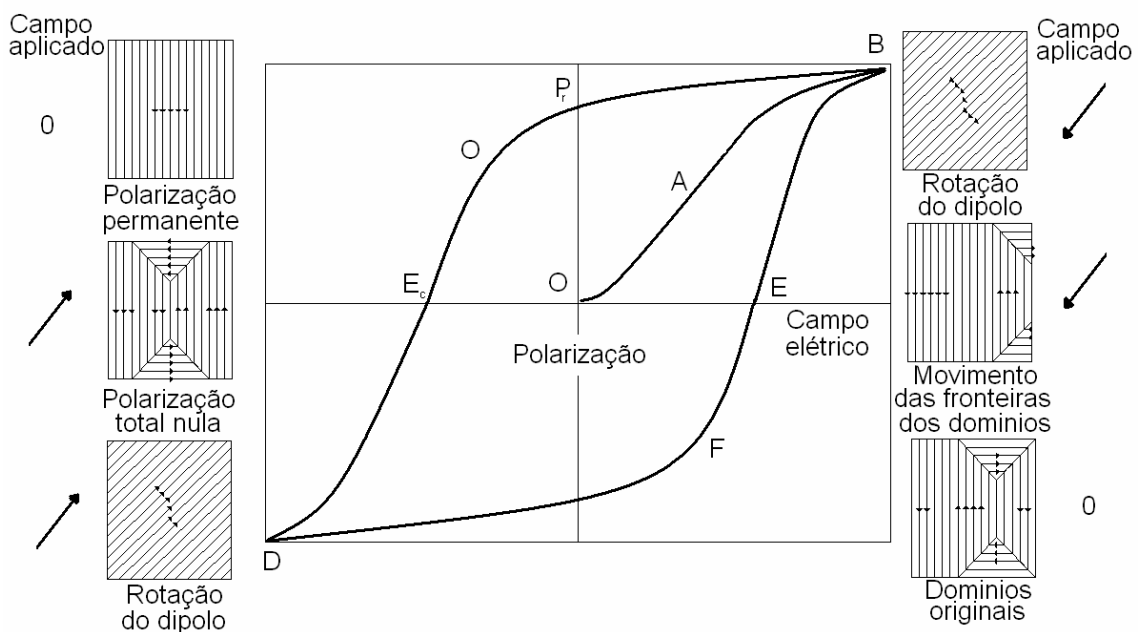


Figura 18.28 - Histerese ferroelétrica. O comportamento acima é chamado de ferroelétrico em virtude da sua semelhança com o comportamento ferromagnético.

A remoção do campo externo não elimina totalmente a polarização preferencial, de forma que uma polarização remanescente, P_r , permanece, até que se aplique um campo coercitivo, E_c , de polaridade oposta. A aplicação cíclica de campos elétricos produz um ciclo de histerese, tal como o percurso BCDFB mostrado na curva da Figura 18.28. (observe a analogia com a curva BxH de um material ferromagnético).

Vários parâmetros importantes podem ser obtidos do ciclo de histerese: Polarização por saturação P_s (ponto B):devida ao crescimento máximo dos domínios, Polarização remanescente, P_r , a qual permanece quando o campo é eliminado. A redução de $E=0$ não recupera a estrutura dos domínios a volumes iguais de polarização oposta, para isso é necessário um campo coercitivo, E_c .

Cada material ferroelétrico apresenta uma temperatura característica, T_c , denominada de temperatura de Curie, acima da qual a energia térmica não permite a formação de domínios e o material perde sua ferroeletricidade, tornando-se um dielétrico comum, muitas vezes denominado de paraelétrico. No caso do (BaTiO_3) , temos $T_c = 120 \text{ }^\circ\text{C}$, pois acima desta temperatura o material perde sua polarização

espontânea, em virtude de sua passagem para a forma cúbica. A Tabela 18.6 mostra alguns cristais ferroelétricos e suas respectivas T_c .

Tabela 18.6 - Temperatura de Curie e polarização espontânea de cristais ferroelétricos.

		T_c [K]	P_s [μCcm^{-2}]	T [K]*
RDP	KH_2PO_4	123	16,000	[96]
	KD_2PO_4 (Fosfato de potássio dideuterium.)	213	13,500	--
	RbH_2PO_4	147	16,800	[90]
	RbH_2AsO_4	111	--	--
	KH_2AsO_4	96	15,000	[80]
	GeTe	670	--	--
TGS	Sulfato de Triglicina	322	8,400	[293]
	Selenato de Triglicina	295	9,600	[273]
Perovskites	BaTiO_3	393	78,000	[296]
	SrTiO_3	~ 0	(9,000)	[4]
	KNbO_3	712	90,000	[523]
	PbTiO_3	763	>150,000	[300]
	LiTaO_3	890	70,000	[720]
	LiNbO_3	1470	900,000	--

*para obter os valores em CGS seu- cm^{-2} , multiplique o valor da tabela por 3×10^3

Além da utilização como dielétricos em capacitores especiais, devido ao alternador de ξ , materiais ferroelétricos têm importantes aplicações pela propriedade piezométrica que apresentam. É importante salientar que todos os cristais no estado ferroelétrico são piezos elétricos, porém podem-se ter cristais não ferroelétricos e que apresentam piezo eletricidade.

18.8 Materiais antiferroelétricos

Em alguns materiais, como por exemplo, o (WO_3), os momentos de dipolos elétricos de células unitárias vizinhas se orientam antiparalelamente, resultando em uma polarização total nula. Tais materiais são denominados de antiferroelétricos. Também nesse caso, tense uma temperatura de transição, com que o material perde essa propriedade. A diferença essencial entre um material ferroelétrico e um antiferroelétrico é que, este último, não apresenta o fenômeno de histerese abaixo de uma temperatura de transição.

18.9 Materiais piezoelétricos

Deformação mecânica também pode causar a polarização de determinados cristais. Isto ocorre devido ao deslocamento relativo entre os íons no cristal, e só ocorre quando este não possui centro de simetria, isto é, os centróides de carga positivas não coincidem. Esse tipo de material denominado piezo elétrico, ou se alonga, ou se contrai quando sujeito a um campo elétrico, pois os comprimentos dos

dipolos são alterados por gradientes de tensão. Essa é uma forma de se transferir energia elétrica em mecânica, pois o cristal vibra com a frequência do campo alternado nele aplicado, e em proporção de diferencial de voltagem. Dispositivos eletromagnéticos que utilizam essa propriedade são os transdutores, normalmente são utilizados para produzir ondas sonoras de alta frequência para sincronização de circuitos eletromagnéticos.

O processo inverso também é possível, ou seja, a inversão de energia mecânica em elétrica tornando-se um cristal piezo elétrico.

Desta forma, pode-se transformar vibrações, ondas sonoras e outros movimentos mecânicos em potenciais elétricos. As principais utilizações de tais dispositivos são os microfones, cristais fonográficos, telefones, dispositivos para sonar, medidor de pressão, etc. entre os materiais mais comumente utilizados por seu efeito piezo elétrico, temos o quartzo, o (BaTiO_3) , o SiO_2 e o PbZrO_3 .

18.10 Propriedades de materiais dielétricos (isolantes)

Os isolantes são caracterizados por uma série de propriedades, cujos valores numéricos os identificam em termos quantitativos e cuja variação informa aspectos qualitativos. Essas propriedades variam o seu valor numérico de acordo com as condições físicas de seu uso (como por exemplo, variações de temperatura e umidade, tensão elétrica aplicada, etc). Assim, para sabermos se uma dada condição de serviço influi, e até que grau, sobre as características do material, é imprescindível comentar de que modo, e em função de que grandezas, as características dos isolantes podem variar.

18.10.1 A constante dielétrica de gases, líquidos e sólidos

A constante dielétrica varia em função da polarização e como os gases tem um afastamento intermolecular bastante grande, e apresentam baixa densidade, a sua polarização é pequena e a constante dielétrica é praticamente igual a um. Os gases apresentam puramente polarização eletrônica, ou uma combinação de polarização eletrônica e dipolar. A constante dielétrica é tanto maior quanto maior o raio molecular. A variação da constante dielétrica de gases com a temperatura e a pressão é justificada pela mudança do número de moléculas por unidade volume, quando a pressão e a temperatura variam.

Isolantes líquidos podem ser constituídos de moléculas polares ou não polares. O valor numérico das constantes dielétricas não é elevado (geralmente $< 2,5$). A variação de a constante dielétrica γ , em função da temperatura, pode ser explicada pela redução do número de moléculas por unidade de volume (densidade) quando a temperatura se eleva. Nos líquidos polares, a polarização é determinada por um deslocamento nas camadas eletrônicas das partículas elementares (polarização eletrônica) e orientação dos dipolos na direção do campo aplicado (polarização dipolar). Como conseqüência, a constante dielétrica de líquidos polares é tanto maior, quanto maior é o número de moléculas por unidade de volume.

Em relação ao valor da constante dielétrica de isolantes sólidos a diversidade estrutural e as variações de matérias-primas neste grupo levam a valores bastante diferenciados de ϵ_r . Assim os sólidos podem se caracterizar por polarizações eletrônicas, iônicas estruturais ou espontâneas bem definidas.

A menor constante dielétrica é encontrada em dielétricos sólidos, constituídos de moléculas não polares, e que assim apresentam uma polarização eletrônica pura. A temperatura influi sobre o valor de ϵ_r , devido à variação com a temperatura do número de partículas por unidade de volume.

Isolantes polares sólidos com estrutura cristalina ou amorfa, bem como isolantes iônicos amorfos, tais como resinas polares, baquelite, ebonite, cloreto de polivinila (PVC), goma-laca e outros, e ainda celulose e seus produtos derivados (papel, tecido) e vidros inorgânicos, constituem um grupo de isoladores em que encontramos simultaneamente as polarizações eletrônicas, iônicas e de estrutura. Classifica-se esse grupo em geral nos 2 sub-grupos a seguir:

- 1° Subgrupo: Constitui-se de dielétricos amorfos, como o caso dos vidros inorgânicos. Sua polarização de estrutura é resultante de uma mudança de orientação de áreas iônicas inteiras, devido à ação da temperatura. A constante dielétrica é relativamente grande, entre 4 e 20, seu coeficiente de temperatura é positivo.
- 2° Subgrupo: Constitui-se de sólidos polares cristalinos e amorfos, nos quais encontramos uma polarização dipolar, semelhante à dos líquidos polares, porém com tempos próprios de polarização bem diferentes. Essa polarização dipolar deriva da existência de grupos polares acentuada influência da ação de campos externos, que introduzem no sólido uma agitação térmica. Exemplo de tais grupos é a celulose devido à presença do radical (OH). As constantes dielétricas desses materiais variam acentuadamente com a temperatura e com a frequência do campo externo aplicado, obedecendo as mesmas leis dos isolantes líquidos polares.

Na Tabela 18.7 são apresentados valores da constante dielétrica em função da frequência para esses dielétricos.

Tabela 18.7 - Constante e rigidez dielétricas de alguns materiais dielétricos.

Material	Constante dielétrica		Rigidez dielétrica (V/mil) ^a
	60 Hz	1 MHz	
Cerâmicas			
Cerâmica titanato	-	15-10000	50-300
Mica	-	5,4-8,7	1000-2000
Enstatita (MgO-SiO ₂)	-	5,5-7,5	200-350
Vidro soda-lime	6,9	6,9	250
Porcelana	6,0	6,0	40-400
Sílica fundida	4,0	3,8	250
Polímeros			
Fenol-formaldeído	5,3	4,8	30-400
Nylon 6,6	4,0	3,6	400
Poliestireno	2,6	2,6	500-700
Polietileno	2,3	2,3	450-500
Politetraflouretileno	2,1	2,1	400-500

^a 1 mil = 0,001 pol.

18.11 Tipos de dielétricos

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

- Ao primeiro grupo pertencem os dielétricos que possuem somente a polarização eletrônica, por exemplo as substâncias sólidas não polares ou debilmente polares em estado cristalino ou amorfo cujas moléculas apresentam ausência ou fraco momento dipolar (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, resinas sintéticas termofixas, alguns hidrocarbonetos cloretados, etc).
- Ao terceiro grupo pertencem os dielétricos inorgânicos sólidos com polarização eletrônica, iônica e íon-eletrônica dipolar (de estrutura). 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 dipolos 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 tem 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 Seignette³ e o de Rochelle, titanato de bário e outros.

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

18.12 Materiais dielétricos de maior utilização, e suas constantes dielétricas

Um considerável número de cerâmicos e polímeros são usados como materiais isolantes. Muitas das cerâmicas, inclusive vidro, porcelana, esteatita, e mica, têm constantes dielétricas na faixa 6 a 10. Estes materiais também exibem um grau alto de estabilidade dimensional e resistência mecânica. Aplicações típicas incluem isolamento elétrico de Linhas de Transmissão, bases de chaves seccionadoras (e/ou interruptores), e receptáculos de lâmpadas. O óxido de titânio (TiO_2) e as cerâmicas de titanato, tais como titanato de bário (BaTiO_3), podem ser fabricadas para ter constantes dielétricas extremamente altas que as fazem especialmente úteis para algumas aplicações capacitivas.

A magnitude da constante dielétrica para a maioria dos polímeros é menor que para as cerâmicas, uma vez que estas últimas podem apresentar os maiores momentos de dipolo; os valores da constante dielétrica para polímeros geralmente situam-se entre 2 e 5. Estes materiais geralmente são utilizados para isolamento de fios, cabos, motores, geradores, e assim por diante, e, além disso, para alguns tipos de capacitor.

³ O Tartrato misto de potássio e sódio ($\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) chamado comumente Sal de Seignette ou Sal da Rochelle foi descoberto em 1672 por Pierre Seignette, farmacêutico da Rochelle.

18.13 Outros Materiais dielétricos e suas aplicações

Outros exemplos de materiais isolantes são: vernizes isolantes, compostos isolantes, tintas isolantes, diluentes e solventes e gases isolantes.

18.13.1 Vernizes isolantes

Podem ser classificados conforme sua finalidade:

- para impregnação;
- para esmaltação;
- adesivos.

Consistem de resinas sintéticas, fenólicas, poliésteres puros ou modificados, epóxis e asfálticas, diluídas com solventes voláteis que são eliminados pela secagem ao ar ou estufa. Devem ser escolhidos com cuidado a fim de melhorarem as características de resistência à temperatura, bem como os sistemas de isolamentos. São usados especialmente como materiais aglutinantes, como material de enchimento e para revestimento. Normalmente os vernizes estão definidos em 4 categorias:

- Classe A - Secagem ao ar ou estufa até 105 °C;
- Classe B - Secagem em estufa a 135 °C;
- Classe C - Secagem em estufa a 155 °C;
- Classe D - Secagem em estufa a 180 °C.

18.13.2 Compostos isolantes

Os compostos têm por finalidade a impregnação de materiais porosos, tais como: madeiras, fibras, telas de papel, etc. Esta impregnação preenche os poros do material, eliminando o ar, a umidade e outras substâncias, melhorando assim a rigidez dielétrica e auxiliando na melhoria de outras características do material. Geralmente são de base asfáltica, do tipo termoplástico ou de base epóxi do tipo termofixo.

18.13.3 Tintas isolantes

As tintas isolantes são utilizadas para cobrir superfícies isoladas ou protegê-las contra possíveis danos, contra os efeitos de atmosfera corrosiva e umidade. Estas tintas devem ser aplicadas, atendendo as especificações, dos fabricantes; nem todas as tintas são isolantes, pois algumas são formuladas com componentes condutores, como é o caso das tintas metálicas.

18.13.4 Diluentes e solventes

Os diluentes ou agentes dissolventes são usados para a fabricação e aplicação de vernizes e tintas. Devido às diversas bases ou resinas básicas empregadas na fabricação, dos diversos tipos de tintas ou vernizes, deve-se ter o cuidado de utilizar o tipo de solvente recomendado pelo fabricante, para cada tipo de tinta, ou corre-se o risco de destruir as qualidades do produto ou comprometer os resultados.

18.13.5 Gases isolantes

18.13.5.1 O ar atmosférico

As características isolantes do ar atmosférico variam com a umidade relativa. Quando seco suas propriedades se aproximam muito com as do vácuo. Nas proximidades de um condutor sujeito a uma diferença de potencial o ar se ioniza, resultando em gás condutor. Se a renovação do ar não se efetuar ou se a diferença de potencial crescer, rapidamente o poder dielétrico do ar poderá ser rompido, causando assim uma perfuração do isolamento. É o ar o isolante natural, entre os condutores de uma linha aérea, fora dos apoios.

18.13.5.2 Nitrogênio

É um gás de elevada estabilidade química, bom poder dielétrico. É utilizado para manter a pressão interna dos tanques de transformadores, reatores e outros equipamentos, acima da pressão atmosférica e dessa forma evitar a penetração de umidade. Dada sua elevada estabilidade química é pouco reagente, não afetando, pois, os demais meios isolantes.

18.13.5.3 O gás SF₆

Sintetizado pela primeira vez no ano de 1900, em Paris, teve suas pesquisas para aplicação industrial iniciadas em 1937. Em 1939, o uso em cabos e capacitores foi patenteado. Pesquisas para sua utilização como meio interruptor são de 1950 e equipamentos blindados e isolados à SF₆ surgiram a partir de 1970.

O SF₆ gás é um dos gases de maior densidade (6,16 kg/m³), quase 5 vezes maior que a do ar. É um gás incolor, inodoro, não tóxico, quimicamente inerte e estável e não inflamável. Sua estrutura molecular está representada na Figura 18.29.

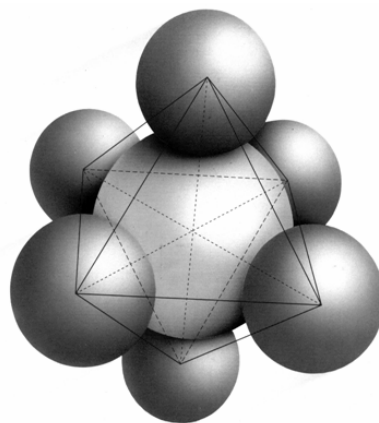


Figura 18.29 - Estrutura molecular do SF₆.

O gás apresenta propriedades térmicas e elétricas notáveis:

- elevada rigidez dielétrica: a 1 atm, é mais que 2 vezes a do ar ou do nitrogênio, e a 3 atm é igual ao do óleo isolante.
- alta eficácia como supressor de arco: comparativamente ao ar é 10 vezes mais eficiente, num tempo 100 vezes menor.

- produz enorme redução do número de elétrons livres (grande afinidade eletrônica do flúor), restabelecendo a rigidez dielétrica. Quanto à decomposição do SF₆, tem-se que:
 - após arco o gás SF₆ tem grande capacidade de recombinação:

$$\text{SF}_6 \rightarrow \text{S} + 6\text{F}$$
 - no entanto ocorre decomposição acima de 500 °C e principalmente sob arco elétrico.
 - os principais sub-produtos são gasosos e sólidos.
 - a presença de umidade e os compostos ácidos (HF). a umidade no gás SF₆ pode ser proveniente de:
 - permeabilidade da água através de o'rings;
 - difusão através de vazamentos;
 - difusão através da micro-porosidade do alumínio;
 - absorção de água pelos materiais orgânicos (graxas, haste de acionamento, isoladores poliméricos).
- O controle consiste em manter o teor dentro dos limites especificados.

18.14 Aplicação dos dielétricos

Os dielétricos se dividem em três principais categorias:

- a) Aqueles com $\xi < 12$;
- b) Aqueles com $\xi > 12$;
- c) Os ferroelétricos. A primeira categoria pode ainda se subdividir em subcategorias com base na temperatura de operação. O algodão a seda, o papel e vários polímeros e líquidos são usados quando a temperatura não excede 90°C.

Materiais inorgânicos como a mica e o abseto e materiais orgânicos são utilizados a temperaturas de até 130°C. Aglutinantes de silicone podem ser usados até a temperatura de 180°C.

Aplicações em temperaturas superiores requerem isolantes de mica, porcelana, vidro e outros materiais inorgânicos similares. Estes últimos são utilizados em aplicações que envolvem alta tensão, pois são menos sensíveis a rupturas. Neste caso é necessário que o dielétrico não absorva a umidade de modo a manter elevada rigidez dielétrica. Para diminuir a absorção de umidade, e ainda eliminar poros e fissuras da superfície, que podem facilitar a condução elétrica, esses dispositivos geralmente tem a sua superfície vitrificada.

18.15 Materiais isolantes sólidos

Isolante elétrico é todo material de tão baixa condutividade que a pequena corrente que passa por ele, quando submetido a uma diferença de potencial, pode ser desprezada. Isolador é um corpo constituído por material isolante. Corrente de fuga são as correntes que fluem pelos materiais isolantes.

18.15.1 Propriedades dos materiais isolantes

Ao escolhermos um material isolante, temos que levar em conta as seguintes propriedades:

- propriedades mecânicas: resistência à tração, à compressão, à esforços cortantes, à fricção, absorção de umidade e gases, e ainda, dureza, fragilidade, ductibilidade, dilatação e contração.
- propriedades elétricas: resistência de isolamento superficial, resistência de isolamento volumétrica, rigidez dielétrica, resistência à impulsão, absorção dielétrica, perda de potência, fator de potência, resistência ao arco.
- propriedades químicas: estabilidade de composição, resistência aos ácidos, álcalis, óleo, luz solar, corrosão e umidade, ponto de inflamação, combustibilidade.
- propriedades térmicas: resistência térmica, calor específico, coeficiente de dilatação térmica e ponto de fusão, ebulição, de solidificação e viscosidade.

18.15.2 Resistência de isolamento

Quando dois condutores são separados por um material isolante, a aplicação de uma diferença de potencial elétrico entre os dois condutores corresponde à circulação de uma corrente de fuga. A resistência elétrica oferecida à circulação desta corrente é a Resistência de Isolamento. Em geral, temos dois caminhos possíveis para a corrente de fuga nos isolantes:

- através do corpo do isolante;
- sobre a superfície do isolante.

Estes caminhos apresentam, cada um, sua própria resistência. Logo temos:

- resistência de isolamento volumétrica;
- resistência de isolamento superficial.

Conforme o tipo de aplicação, uma ou outra destas resistências de isolamento é de maior importância. Na prática, a fuga superficial aumenta em função da deposição de matérias estranhas que, originando uma película, prejudicam o isolamento. Outros fatores podem ser considerados, tais como a umidade relativa e a temperatura. O circuito equivalente de um dielétrico real, a grosso modo, pode ser apresentado como na Figura 18.30.

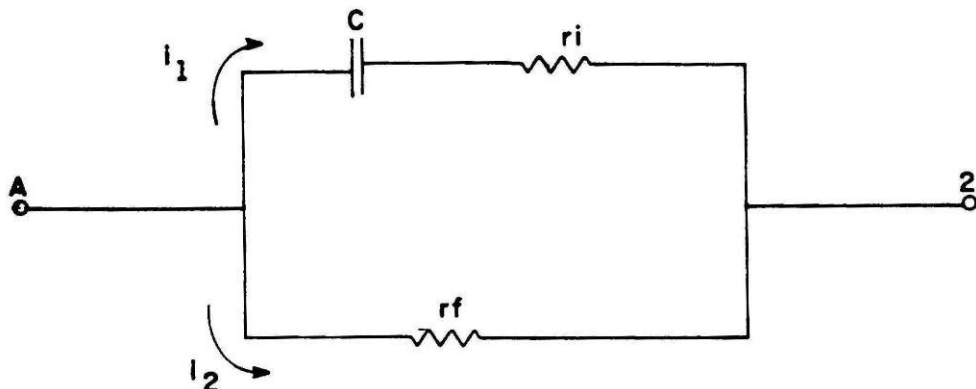


Figura 18.30 - Circuito equivalente de um dielétrico real

No circuito da Figura 18.30, C e r_i , representam, o ramos percorridos pela corrente dentro do dielétrico. A_i está o elemento responsável pelo aquecimento da

massa do material. O ramo de r_f é percorrido pela componente superficial da totalidade da fuga existente. No dielétrico ideal, r_i seria zero e r_f seria infinito. Os valores de C , r_i e r_f não são constantes em todas as condições de trabalho, sendo influenciados por, temperatura, freqüência, fadiga do material e umidade relativa.

18.15.3 Medida da resistência de isolamento

Resistência de Isolamento Superficial: é medida entre dois lados opostos de um quadrado de uma unidade de lado, situado na superfície do isolante (Figura 18.31). A resistividade volumétrica mede-se entre duas faces opostas de um cubo de aresta unitária.

As perdas próprias do material podem variar de acordo com a umidade relativa do ar. Sabemos que a umidade tem a propriedade de reter as partículas (pó) existentes na atmosfera e, como estas, geralmente, são condutoras, provocam o aumento da corrente de fuga nos materiais isolantes. Não só a água provoca a formação de uma película de sujeira nos materiais isolantes, mas também o óleo, graxas, etc.

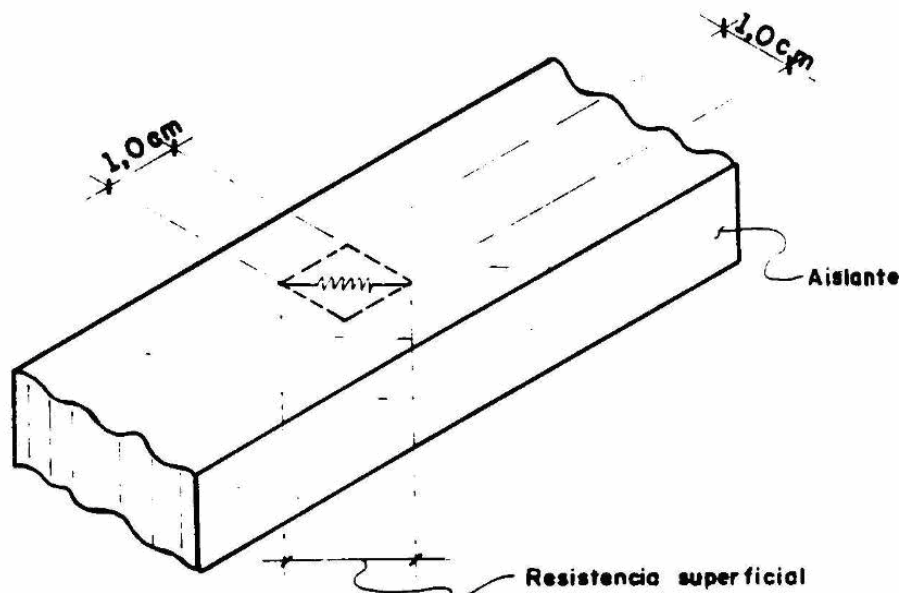


Figura 18.31 - Medição da resistência de Isolamento Superficial

Portanto, as perdas próprias do material (volumétricas) somadas às perdas superficiais formam as perdas totais. Logo, as perdas totais dependem em grande parte das condições de limpeza da superfície do material isolante.

18.15.4 Valores da resistência de isolamento

Geralmente os materiais isolantes são classificados não pela corrente de fuga, mas pela resistência de isolamento, medida em Megaohm (ou megohm). Como ilustração, na tabela 18.8 são apresentadas as resistências superficiais e volumétricas para alguns materiais. A precisão das medidas é baixa (meramente comparativa). A mesma experiência pode apresentar várias discrepâncias, quando repetidas. A umidade foi variada para cada grupo de materiais.

Tabela 18.8 - Valores da resistência de isolamento

Material	$R_{\text{superficial}}$, Megohms			$R_{\text{volumétrica}}$ $M\Omega \times C$
	50% umidade	70% umidade	90% umidade	
Âmbar (resina fóssil)	6×10^8	2×10^8	1×10^5	5×10^{10}
Cera de abelha	6×10^8	6×10^8	5×10^8	2×10^9
Celulóide	5×10^4	2×10^4	2×10^3	2×10^4
Fibra de vidro	2×10^4	3×10^3	2×10^2	5×10^3
Placa de vidro	5×10^4	6×10	2×10	2×10^7
Vidro Kavalier		4×10^3	1×10^3	8×10^9
Borracha (nova)	3×10^9	1×10^8	2×10^3	1×10^{12}
Marfim	5×10^3	1×10^3	3×10	2×10^2
Cimento Khotinsky	7×10^8	3×10^8	5×10^5	2×10^8
Mármore italiano	3×10^3	2×10^2	2×10	1×10^5
Mica incolor	2×10^7	4×10^5	8×10^3	2×10^{11}
Parafina	9×10^9	7×10^9	5×10	1×10^{10}
Porcelana (não esmaltada)	6×10^5	7×10^3	5×10	3×10^8
Quartzo	3×10^6	2×10^3	2×10^2	5×10^{12}
Breu	6×10^8	3×10^8	2×10^8	5×10^{10}
Cera sintética	2×10^9	6×10^8	9×10^7	8×10^9
Verniz	6×10^7	3×10^6	7×10^3	1×10^{10}
Ardósia	9×10	3×10	1×10	1×10^2
Enxofre	7×10^9	4×10^9	1×10^8	1×10^{11}
Madeira	4×10^8	5×10^5	7×10^3	4×10^7

A medição da resistência de isolamento de materiais isolantes, ou seja, do isolamento de máquinas elétricas e equipamentos é realizada em corrente contínua através normalmente de instrumento denominado Megôhmetro (ou Megger). Existem vários tipos de Megger, com tensões de ensaio de 500, 1000, 5000 ou 10.000 Vdc e modos de operação manual ou motorizado, com retificador e bateria, mas os princípios de operação são os mesmos para todos os tipos de instrumentos.

O ensaio de resistência de Isolamento é um ótimo meio de detecção e prevenção de defeitos na isolação de equipamentos elétricos. Através dele pode-se determinar preventivamente se a isolação está deteriorada, antes que ocorra um defeito.

18.16 Ensaio de absorção dielétrica

O ensaio de absorção dielétrica proporciona consideravelmente mais informações sobre a condição da isolação do que o teste anterior. Ele é particularmente útil para um diagnóstico quando nenhum registro anterior da resistência de isolação está disponível. O megôhmetro é aplicado aos terminais do equipamento sob ensaio e é lida a resistência de isolamento a cada minuto até completar os 10 minutos.

Uma curva elevando-se ininterruptamente, indicará um enrolamento limpo e seco, mas uma curva que se achata rapidamente indica isolamento sujo e úmido. O ensaio é usualmente feito com megôhmetro de 500 a 5000 Volts, é geralmente

independente da temperatura. Mas devido que a temperatura deva estar a poucos graus do ponto de orvalho, para prevenir condensação da umidade na isolação, é geralmente melhor conduzir o ensaio após a parada da máquina, ou do equipamento. A Figura 18.32, a seguir, mostra curvas típicas de variação da resistência de isolação com o tempo para enrolamento da armadura de máquinas de classe B.

A razão de duas leituras tempo x resistência, tal como uma leitura de 60 segundos dividida por uma leitura de 30 segundos é chamada Razão de Absorção Dielétrica. Se a razão é uma leitura de 10 minutos por uma leitura de 1 minuto, o valor é chamado de Índice de Polarização. Essas razões proporcionam um quantidade avaliável da condição da isolação com respeito a umidade e outros contaminantes. Os valores recomendados do IP, que determinam se enrolamentos de máquina estão limpos e secos são: isolação classe A 1,5 ou mais; isolação classe B 2, 0 ou mais e para isolação classe F 2,5 ou mais. Se o índice de polarização for menor do que 1, indica a necessidade de um imediato acondicionamento.

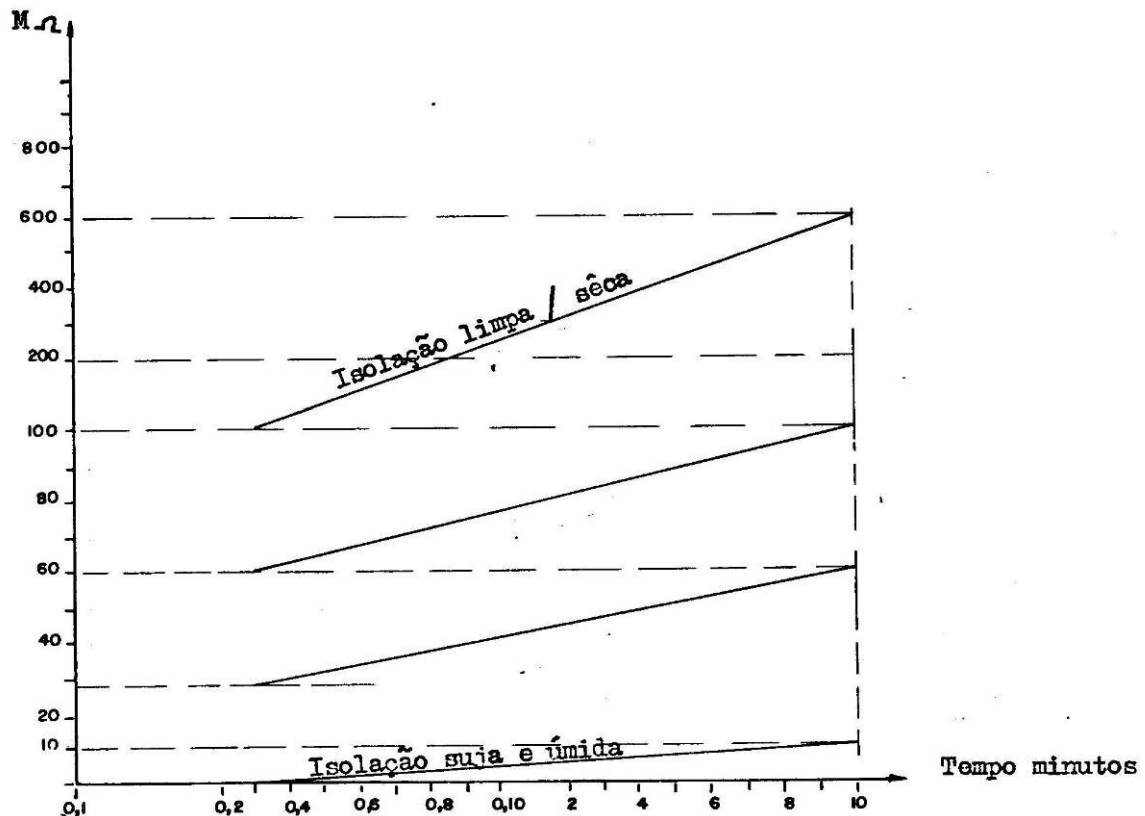


Figura 18.32 - Curvas típicas mostrando a variação da resistência de isolamento com o tempo para isolamento de classe B.

A Tabela 18.9 dá valores das razões e dos índices e as correspondentes condições da isolação que as mesmas indicam.

Tabela 18.9 - Condição da isolação indicada pelas razões de absorção dielétrica e índice de polarização pela aplicação de uma tensão de 500 V c.c.

Condição da isolação	Razão de absorção dielétrica	Índice de polarização
Perigoso	-	menor que 1
Ruim	menor que 1,1	menor que 1,5
Questionável	1,1 a 1,25	1,5 a 2
Regular	1,25 a 1,4	2 a 3
Boa	1,4 a 1,6	3 a 4
Excelente	acima 1,6	acima de 4 **

** Em muitos casos valores aproximadamente 20% maior do que os mostrados indicam um enrolamento seco e quebradiço que falham sob condição de choques ou durante o início de funcionamento (na partida).

18.17 Tipos de materiais isolantes e sua classificação pela temperatura

Cada material pode suportar determinada temperatura sem se deteriorar e os organismos de normalização (ABNT, por exemplo) classificaram os materiais isolantes segundo a temperatura que suas substâncias básicas suportam, conforme a Tabela 18.10:

Tabela 18.10 - Classificação materiais isolantes pela temperatura que suportam

Classe	Designação da classe	Alguns materiais representativos da classe
90 °C	Y (O)	algodão, seda e papelão não impregnado, (fibras de celulose e derivados)
105 °C	A	algodão, seda e papel impregnados ou revestidos ou quando imersos em líquido isolante.
120 °C	E	Laminados de celulose e resinas
130 °C	B	mica, fibra de vidro e asbestos, com substâncias aglutinantes adequadas às elevações de temperaturas correspondentes,
155 °C	F	mica, fibra de vidro e asbestos, com substâncias aglutinantes adequadas às elevações de temperaturas correspondentes.
180 °C	H	elastômeros de silicatos, mica, fibra de vidro e asbestos, com substâncias aglutinantes adequadas às elevações de temperaturas
Acima de 180 °C	C	materiais formados inteiramente por mica, porcelana, vidro, quartzo e materiais orgânicos semelhantes.

A seguir mostraremos algumas características de alguns materiais isolantes e tipos de materiais isolantes empregados em grandes máquinas.

18.18 Materiais isolantes

18.18.1 Mica e produtos de mica

A mica isolante é derivada de uma classe de mineral que possui uma estrutura laminada muito fina e facilmente susceptível a rachaduras, os flocos são flexíveis e consistentes e extremamente resistentes ao calor.

As duas classes mais comumente usadas para finalidade elétricas são: mica ferro magnésia flogopita (1), também chamada âmbar ou mica prata e (2) a mica de potássio moscovita, chamada de Índia, Branca, Rubi ou Mica Potassa (potash mica). A mica flogopita é produzida principalmente em Madagascar e Canadá. A moscovita é produzida principalmente na Índia, Estados Unidos, África e América do Sul. A mica para fins elétricos deve ser rigorosamente selecionada. A resistividade da mica a 25 °C varia em torno de 10^{12} a 10^{16} ohms.cm . O valor da resistividade dependerá evidentemente de impurezas e será tanto menor, quanto maior a temperatura. As micas são variáveis e complexas na composição. A mica moscovita cuja composição ideal é $K_2Al_4Al_2Si_6O_{20}(OH)_4$, possui um aspecto luminoso. Suas cores mais comuns são : branca, rubi (cor de vidro), verde ou marron.

A mica flogopita cuja composição ideal é $K_2Mg_6Al_2Si_6O_{20}(OH)_4$, possui um aspecto opaco. Suas cores mais comuns são : amarelo pálido (âmbar), prata a marron. A mica moscovita é mais rígida e menos flexível comparada com a flogopita.

Característica da mica: mudança da constante dielétrica com a temperatura e mudança do fator de potência com a temperatura. A rigidez dielétrica da mica é em torno de 160 kV/mm, que corresponde ao valor máximo do gradiente de potencial que pode existir dentro do dielétrico sem que haja ruptura do poder isolante. A resistência ao corona com flocos de mica é muito alta comparada com materiais orgânicos.

18.18.2 Asbestos (material inorgânico)

Asbestos é um material cristalino fibroso, e a crisólita é a principal fonte para o uso comercial. É uma sílica hidratada de magnésia cuja fórmula tem a composição $3MgO, 2SiO_2, 2H_2O$. Todavia, a composição pode variar de 37 a 44% de óxido de silício, 39 a 44% de óxido de magnésio, 12 a 15% de H_2O , e acima de 6% de óxido de ferro. Tem uma densidade específica de 2,2 a 2,6. Individualmente as fibras são muito resistentes, apresentando uma tensão de ruptura acima de 400.000 lb/in^2 ; o mineral perde a água aproximadamente a 400°C e torna-se quebradiço. A temperatura de 700°C toda a água é removida e a 775°C a estrutura cristalina é modificada, à temperatura de fusão do asbestos é em torno de 1525°C. Principais lugares onde são encontrados : Canadá, Estados Unidos, Turquia, Rodésia e China.

Muitos asbestos tem magnetita, e outros óxido de ferro como impurezas. Existem processos desenvolvidos para remover impurezas e obter boas propriedades de isolamento elétrica.

Os asbestos não é bom isolante a não ser se for totalmente seco. Ele absorve prontamente toda a umidade para muitas aplicações elétricas. Para que possa ser aplicado para fins elétricos ele é secado e impregnado com vernizes ou aglutinantes inorgânicos, como soluções de fosfato.

Processos refinados têm-se desenvolvido para remover eletrólitos solúveis na água e óxido de ferro. Às fibras, são então dispersas e transformadas em folhas

finas como na fabricação de papel. Esses produtos são chamados de Quinterra e Novabestos. Os materiais são geralmente usados para impregnação ou laminados. Asbestos são também usados para prover barreiras de separação onde resistência ao calor, propriedades de resistência a arco são requeridos. Revestimentos com Asbestos são usados para melhorar a segurança elétrica. Asbestos são usados também em isolamento à prova de fogo.

18.18.3 Vidro

O vidro é uma substância amorfa (sem forma determinada, diz-se de uma substância que não apresenta estrutura cristalina) às vezes constituída de silicatos, embora em muitos casos de borato (sal ou éster do ácido bórico), fosfatos etc. Muitos vidros são feitos pela fusão juntamente com alguma forma de sílica tal como a areia, óxido de álcali tal como os originados do potássio ou soda, e alguma outra base como o cal ou óxido de chumbo. É um material firme e quebradiço quando frio, mas com o calor ele amolece, tornando plástico e finalmente fluído. Pode ser prensado e fundido em uma grande variedade de moldes. As cores são obtidas pela introdução de óxidos metálicos que absorvem luz com apropriado comprimento de onda. O número de fórmulas é bastante variado, mas a constituição mais importante é SiO_2 (sílica), que geralmente pode ser de 50 a 90% do valor constituído. O vidro geralmente possui alta resistividade e alta rigidez dielétrica à temperaturas baixas. Porém, existem vidros que podem se tornar semi-condutores pela adição de material como óxido de vanádio (V_2O_5).

A resistividade típica do vidro à temperatura ambiente é de 10^{11} a 10^{18} ohms.cm. A resistividade pode chegar a 10^{19} ohms.cm, fundindo-se a sílica pura de alta qualidade.

O coeficiente de temperatura é negativo. A altas temperaturas os vidros tornam-se bastante condutivos e eventualmente quando fundidos possuem uma alta condutividade.

As propriedades mecânicas do vidro em geral são certamente escassas, com tensão de ruptura muito baixa, da ordem de 2000 a 12000 Lb/in². Entretanto a ruptura a compressão é muito alta, variando de 20.000 a 50.000 Lb/in².

A densidade dos vidros comuns varia de 2,2 a 2,8; entretanto o cristal, que contém silicato de chumbo, tem uma densidade de 5,9. O coeficiente de dilatação térmica, varia consideravelmente com a composição e tem um valor de $0,8 \times 10^{-6}$ a 13×10^{-6} / °C.

A rigidez dielétrica do vidro, como todos os sólidos, varia com as condições de teste, e variam de 5 a >100 (kV/mm); uma vantagem do vidro, é que ele resiste ao efeito corona e tem uma grande durabilidade à esse efeito, comparado com materiais orgânicos.

18.18.4 Fibra e tira de vidro

Vidro em folhas finas ou tiras torcidas com espessuras abaixo de 0,0025 cm pode ser utilizado em capacitores. Também, processos têm-se desenvolvidos para produzir fibras de vidro de 0,0005 cm de diâmetro, as quais são 2×10^3 torcidas em fios e trançados. As fibras são feitas por vidro derretido através de orifícios pequenos. Essas fibras são feitas com pano de vidro, fita, e usadas com resinas orgânicas como um agente de ligação.

Muitas vezes as fitas de vidro são combinadas com a mica para laminação de bobinas e isolamento de ranhuras.

18.18.5 Composição mica + vidro

Esta é uma composição incluindo mica moída, um ligador vítreo fundível de vidro macio, ou borato de chumbo (borato = designação genérica dos sais e ésteres dos ácidos bóricos), com uma proporção de 2 partes de mica para 1 parte de vidro macio. A mistura é aquecida a uma temperatura suficiente para amolecer o vidro, então o produto é moldado, com prensa hidráulica, através do calor. Este é um material vítreo que pode ser mecanizado, serrado, perfurado e encardaçado. O material tem sido usado para faciamiento de tubos de vácuo, isolamento de juntas de cano etc. Sua temperatura de utilização é de 250 °C. Seu tradicional nome é Micalex. É utilizado no isolamento de condutores.

18.18.6 Porcelana

É usada para isolamento elétrica consistindo aproximadamente de 28% de argila de louça, 10% de argila de terra, 35% de feldspato, 25% pedra, e 2% de talco. O feldspato que tem a composição $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$, serve para ajudar a dissolver os materiais mais insolúveis, argila e quartzo. A porcelana é geralmente fundida a 1200 °C. Durante o processo existe uma contração de 12%. A rigidez dielétrica da porcelana é elevada e comparável a alguns tipos de vidro, estes valores correspondem ao valor máximo de gradiente de potencial que pode existir dentro do dielétrico sem que haja ruptura do poder isolante.

18.19 Comportamento eletromagnético dos materiais cerâmicos

Os materiais cerâmicos são conhecidos pelo seu uso como isolantes elétricos. Como resultado de (1) suas altas constantes dielétricas, (2) suas reações piezelétricas e (3) seu comportamento dielétrico, os materiais cerâmicos atendem os fundamentos dos circuitos eletromagnéticos. Finalmente, os óxidos de muitos dos elementos de transição são semicondutores.

Cerâmicos dielétricos - Muitos óxidos servem bem como isolantes porque a valência eletrônica dos átomos metálicos é transferida permanentemente para os átomos de oxigênio formando íons O^{2-} . Vamos nos referir aos isolantes de velas de ignição, os íons Al^{3+} cercam os elétrons de valência que carregariam o alumínio metálico. Estes elétrons estão agora presos firmemente pelos íons oxigênio. Em outros materiais isolantes, os íons Mg^{2+} perdem seus elétrons para os íons O^{2-} no MgO ; e o silicato e o oxigênio compartilham elétrons com o tetraedro do SiO_4 . Como resultado, composições de $MgO - Al_2O_3$ formam alguns dos melhores isolantes.

Entretanto, materiais normalmente considerados isolantes podem falhar no isolamento, quando submetidos a altas voltagens. Geralmente, esta falha é um fenômeno de superfície. Por exemplo, as velas de um automóvel podem ser curto circuitadas em uma manhã úmida, em virtude da condensação de umidade na superfície, o que passa a permitir a passagem de corrente. Os isoladores são projetados de forma a terem caminhos na superfície os mais longos possíveis (ver Figura abaixo), a fim de diminuir a possibilidade de um curto-circuito através da superfície; como a presença de poros e fissuras facilita a condução, as superfícies

são geralmente vitrificadas, o que as torna não-absorventes. A falha de isolamento através do volume do material ocorre apenas em gradientes de voltagem extremamente elevados. Um campo elétrico muito forte pode ser suficiente para romper os dipolos induzidos no isolador, e, quando se atinge o valor crítico dessa ruptura, o material deixa de ser isolante.

18.20 Isolantes sólidos usados na fabricação de transformadores

18.20.1 Papel

Desde há muito tempo (1920-1925) o papel representa um material indicado para o isolamento elétrico, tendo substituído a proteção de algodão nos enrolamentos dos transformadores. Além de ser um material relativamente barato, sua estrutura permite-lhe ser facilmente impregnado e sua associação com um impregnante bem escolhido confere-lhe ótimas propriedades. O impregnante atualmente associado ao papel é, mais freqüentemente, um óleo mineral.

O papel é formado de longas fibras tubulares, cujo principal constituinte é a celulose, a qual entra igualmente na composição dos papelões, amplamente utilizados em numerosos isolamentos e destinados, sobretudo, a assegurar uma certa resistência mecânica.

Os papéis de algodão e os papéis derivados do cânhamo de manilha foram, durante muito tempo, os únicos a oferecer propriedades satisfatórias para o uso na indústria elétrica.

Atualmente, sabe-se fazer papéis à partir das madeiras, por processos químicos, e o papel "kraft" obtido a partir de coníferas é, hoje em dia, o papel mais utilizado na indústria elétrica.

A celulose, que é o principal constituinte do papel, apresenta-se sob a forma de longas cadeias que são a repetição de um número mais ou menos grande de anéis de glicose (da ordem de 1200/1300), cuja fórmula estrutural é apresentada na Figura 18.33.

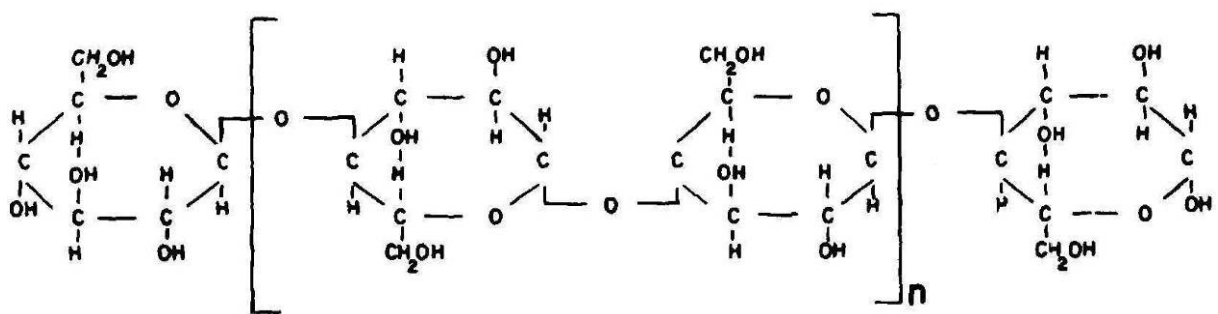


Figura 18.33 - Fórmula estrutural da celulose.

Na madeira, estas cadeias constituem feixes de 200 a 250 macromoléculas em paralelo - os filamentos micelares - os quais, reunidos, formam as fibrilas. As fibras de madeira são constituídas de vários conjuntos destas fibrilas.

O grau de polimerização molecular é o número médio de anéis de glicose - $C_6H_8O_5$ - da molécula de celulose. A Figura 18.34 mostra uma distribuição estatística dos valores do grau de polimerização de papéis novos destinados ao isolamento de transformadores, a partir de cerca de 400 amostras numa experiência do laboratório central da indústria elétrica francesa.

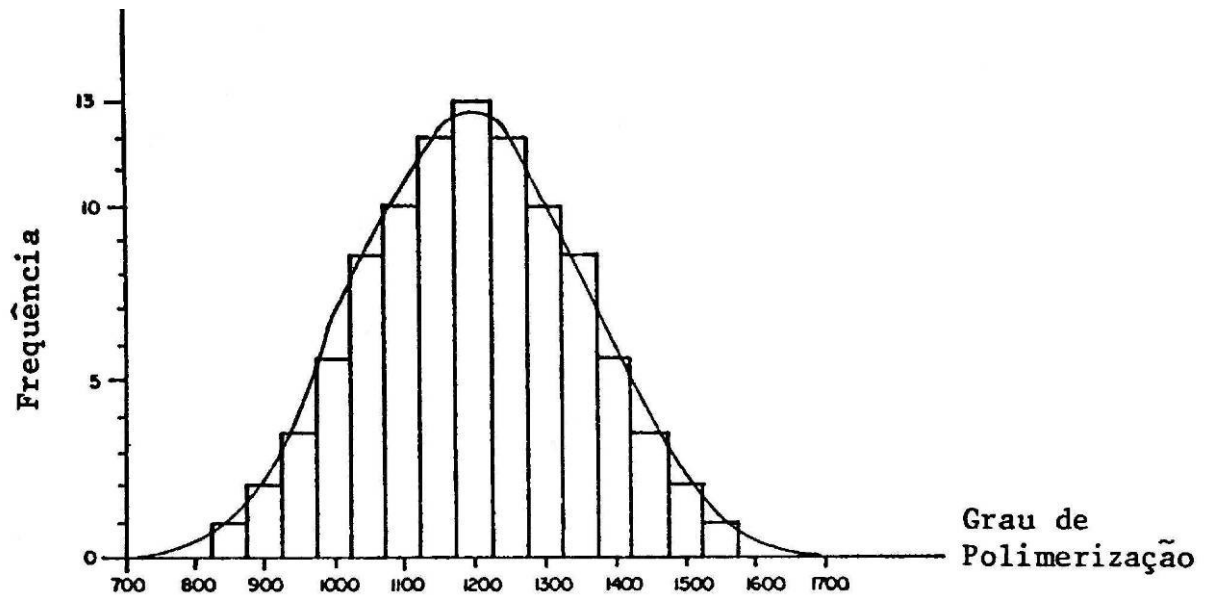


Figura 18.34 - Exemplo típico de distribuição dos valores do grau de polimerização de papéis novos destinados ao isolamento de transformadores.

No curso de degradação da celulose, o seu grau de polimerização decresce continuamente - desde 1200/1300 até aproximadamente 100. Existe uma estreita correlação entre o grau de polimerização e as qualidades mecânicas do papel. A Figura 18.35 mostra a perda de resistência a ruptura à medida que decresce o grau de polimerização. Vê-se que para valores de grau de polimerização inferiores a 150, o papel praticamente perdeu sua resistência mecânica.

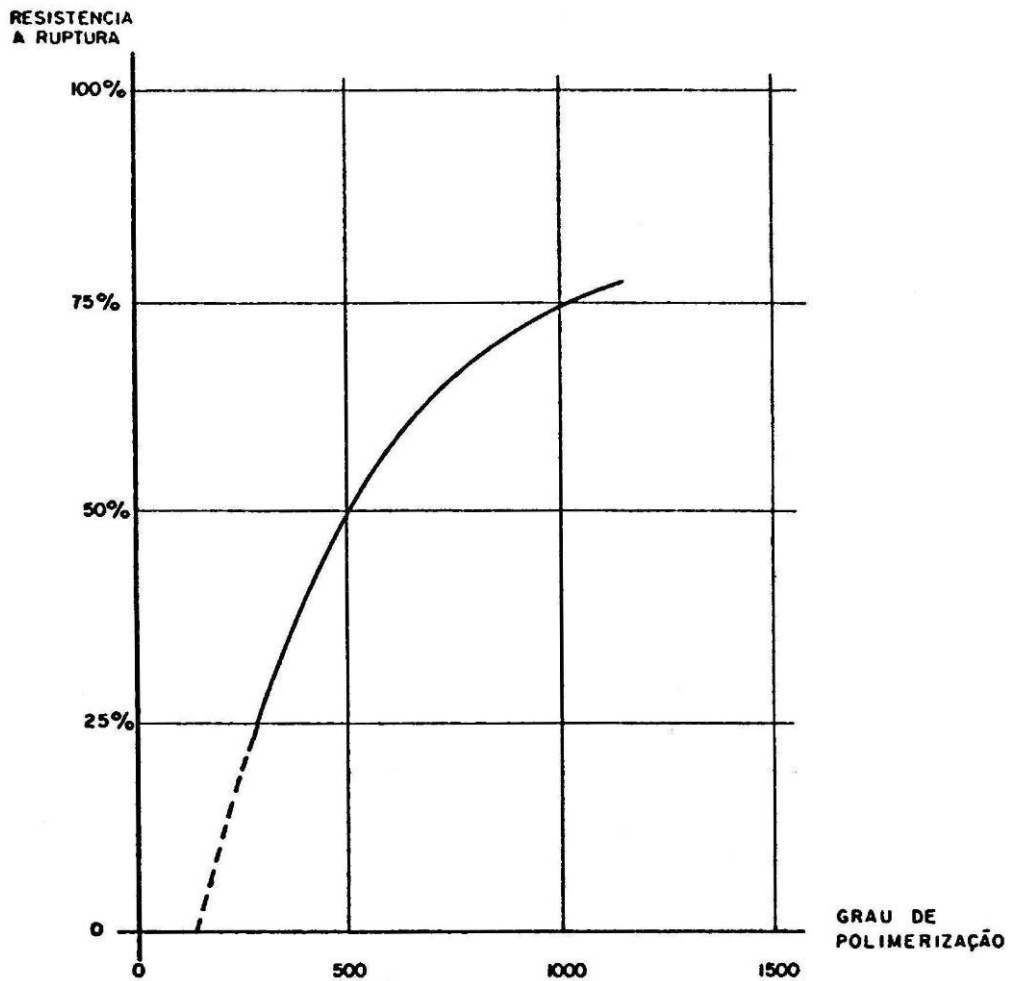


Figura 18.35 - Correlação entre a resistência mecânica à tração e o grau de polimerização.

A temperatura máxima do papel kraft neutro usado para isolar os condutores do enrolamento do transformador, imerso em óleo isolante, é 55°C acima da temperatura ambiente, sem que haja degradação da celulose.

Com o objetivo de poder aumentar os aquecimentos no material elétrico de grande porte, notadamente nos transformadores, procurou-se melhorar a estabilidade térmica do papel através de modificações químicas, surgindo, assim, os papéis termicamente estabilizados. Estas modificações estão baseadas, na maior parte, na substituição parcial dos grupos hidroxila - OH - da celulose por grupos quimicamente mais estáveis, que podem conferir, inclusive, uma higroscopicidade menor ao papel. A temperatura máxima de trabalho do papel termicamente estabilizado imerso no óleo isolante é 65 °C acima da temperatura ambiente.

18.20.2 Fenolite

É formado de conjuntos de lâminas de papel kraft aglutinado com resina fenólica, prensado sob condições específicas de pressão e temperatura e, posteriormente, curado. Possui ótimas qualidades mecânicas e elétricas, além de ser de fácil transformação. É usado em corpos de anéis estáticos, na estrutura de comutadores lineares, em cunhas do núcleo e em alguns calços.

18.20.3 Presspan

Sua constituição provém de fibras de celulose de alta qualidade e de natureza lamelar. Como o nome já diz, é obtido por prensagem. Este material estratificado é usado na fabricação da grande maioria dos calços e estecas que se encontram no transformador bem como capas, barreiras, canaletas, anéis, etc. Tendo em vista que este material é submetido a intensos campos elétricos em certas regiões do transformador, o mesmo deve ser livre de impurezas, principalmente em equipamentos de extra alta tensão.

18.20.4 Permawood

Sua fabricação constitui-se da prensagem de lâminas de madeira com resina e empilhadas de maneira que as fibras fiquem sobrepostas transversalmente. Possui propriedades mecânicas muito boas e propriedades elétricas boas. É usado em suportes de cabos e conexões, anéis de pressão e escora, bem como em alguns tipos de calços.

18.21 Referência bibliográfica do capítulo

CALLISTER, W. D. Jr. **Materials Science and engineering: an introduction**. J. Wiley & Sons, 1997.

SHACKELFORD, James F. **Ciencia de materiales para ingenieros**. 3. ed. México: Prentice Hall, 1995.

VAN VLACK, Laurence Hall. **Princípio de ciência dos materiais**. E. Blucher.

WULFF, J.: SHEPARD, L. A.; ROSE, R. M. **Electronic properties**. Vol. IV, J. Wiley & Sons, Inc. 1965.

REZENDE, E. M – **Materiais usados em electrotécnica**. LIVRARIA INTERCIENCIA LTDA. Rio de Janeiro, 1977.

SMITH, W. E. **Materiais Elétricos** , VI, VII. Blucher. 1977.

SMITH, W. F. **Princípio de ciência e engenharia dos materiais**. 3 ed. Portugal: McGraw-Hill, 1998.

Exercícios

Questões de 1-20 são obrigatória para todos, entregar em duplas.

- 1.) Quais são as principais propriedades dos Materiais Isolantes sólidos?
- 2.) As propriedades elétricas dos materiais isolantes sólidos são: Resistência de isolamento superficial, resistência de isolamento volumétrica, rigidez dielétrica, resistência à impulsão, absorção dielétrica, perda de potência, fator de potência, resistência ao arco. Defina cada uma de essas propriedades.

- 3.) Como é realizado o ensaio de Resistência de Isolamento Superficial?
- 4.) Como é realizado o ensaio de Resistência de Isolamento Volumétrica.
- 5.) Elabore uma tabela comparativa dos valores de Resistência de Isolamento Superficial e Volumétrica.
- 6.) O Ensaio de Absorção Dielétrica proporciona importantes informações sobre as condições da isolação do material, como é realizado o ensaio? .
- 7.) Como se classificaram os materiais isolantes segundo a temperatura que as substâncias suportam? Faça uma tabela.
- 8.) Como podem ser classificados os materiais isolantes segundo: sua natureza (ou estado físico): sua origem: sua composição: sua temperatura máxima de trabalho. De exemplos.
- 9.) A maior parte da isolação sólida dos transformadores é constituída de papel e, portanto, de natureza celulósica. Descreva as características do tipo de papel utilizado neste caso, qual a estrutura molecular do mesmo.
- 10.) Quais os mecanismos de degradação que sofre o papel isolante utilizado em transformadores.
- 11.) Quais os tipos de degradação que o papel pode sofrer?
- 12.) Existem vários ensaios para avaliar o envelhecimento do papel isolante, quais são?
- 13.) Quais as principais funções de um líquido isolante dentro de um equipamento elétrico-.
- 14.) Quais os tipos de óleos utilizados como isolantes em equipamentos elétricos, qual sua origem.
- 15.) Os ensaios determinam as características básica que permitem verificar o comportamento do óleo quanto à sua função de resfriamento e isolação, quais são essas características?.
- 16.) Os ensaios determinam as características básica que permitem verificar o comportamento do óleo, quais são esses ensaios?
- 17.) As propriedades físicas de um óleo isolante são obtidas pelos ensaios de: densidade, tensão interfacial, cor, ponto de fulgor, viscosidade, índice de refração e ponto de anilina. Em que consistem esses ensaios?
- 18.) Quais as propriedades químicas que são medidas e quais os ensaios indicados?
- 19.) Descreva cada um de esses ensaios químicos.
- 20.) Quais os ensaios realizados para um controle das características elétricas de óleo isolante? Como são realizados esses ensaios?
- 21.) De que maneira a adição de impurezas pode alterar a condutividade elétrica de um material (a) condutor e (b) semicondutor? Se o material for um isolante elétrico, como impurezas, podem alterar o valor de sua permissividade elétrica? Essa alteração depende da frequência da tensão alternada aplicada? Explique.
- 22.) Cite pelo menos duas propriedades importantes para a caracterização de um material isolante elétrico (dielétrico).
- 23.) Explique porque o fator de perda dielétrica ($\epsilon'' = \epsilon' \tan \delta$) do cloreto de polivinila é alto para tensões alternadas com frequência próxima de 10^{11} Hz. Como a temperatura pode influir no valor de ϵ'' ?
- 24.) São desejáveis capacitores que tenham alta capacidade de estocagem de carga e baixo fator de dissipação. Durante a fabricação de um dielétrico constituído de material cerâmico, que propriedades são importantes e que fatores devem ser controlados?

- 25.) Um disco de 2cm de diâmetro por 0,025 cm de espessura constituído de enstatita apresentou uma capacitância de $7,2 \mu\text{F}$ e um fator de dissipação de 72. Determinar:
- A permissividade elétrica
 - O fator de perda dielétrica
 - A susceptibilidade elétrica
 - A permissividade elétrica complexa
- 27.) Um capacitor plano com ar entre as placas é carregado a um potencial V por meio de uma barreira que é, então, desligada. Em seguida, um dielétrico é introduzido entre as placas. Descreva qualitativamente o que acontece à carga, à capacitância, à ddp entre as placa e a intensidade do campo elétrico.
- 28.) Por que a permissividade elétrica de um dielétrico pode depender da frequência da tensão alternada a ele aplicada? Essa dependência é sempre influenciada pela temperatura? Por que?.
- 29.) A polarização de um material ferroelétrico é dada por $P = (\epsilon_r - 1) \epsilon_0 E$, onde ϵ_r é sua permissividade elétrica relativa, ϵ_0 permissividade elétrica do vácuo ($= 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$) e E a intensidade do campo elétrico aplicado. (a) Que tensão deve ser aplicada a um cristal do 0,1mm de espessura do material B (Figura 1), para eliminar totalmente sua polarização, desorientando seus dipolos. (b) Que intensidade de campo elétrico deve-se aplicar ao material A, inicialmente despolarizado, para causar uma polarização de $6 \times 10^{-8} \text{ C/m}^2$? Calcule a permissividade elétrica desse material nesse ponto.

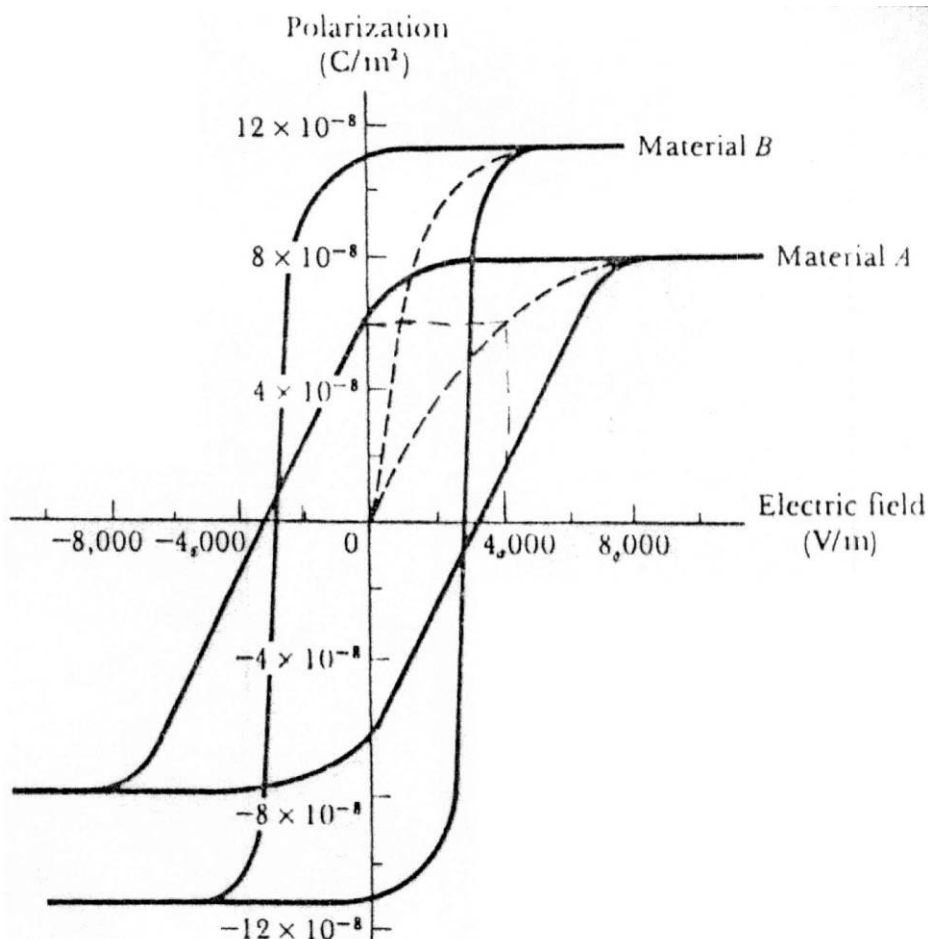


Figura 1 - Curvas de histerese para dois materiais ferroelétricos.

- 30.)** O aço ao silício com grãos orientados é superior ao aço ao silício ordinário como material magnético mole, por ter uma perda de energia por ciclo de histerese nitidamente menor. Usando os dados da tabela I, explique, com auxílio do ciclo de histerese, por que o material com grãos orientados tem somente cerca de $\frac{1}{4}$ da perda de energia do aço ao silício ordinário.
- 31.)** Defina, brevemente, o que você entende por:
- Permissividade elétrica relativa
 - Fator de dissipação elétrica
 - Rigidez dielétrica
 - Temperatura de Curie de um material ferroelétrico
 - Piezoeletricidade
 - Polarização e polarizabilidade
- 31.)** Em um capacitor plano e com ar entre suas placas se aplica uma ddp fixa. Se introduzirmos entre as placas um dielétrico a quantidade de carga por ele armazenada aumentará? Explique.
- 32.)** Explique, sucintamente, o que você entende por:
- Rigidez dielétrica
 - Temperatura de Curie de um material ferroelétrico
 - Piezoeletricidade
- 33.)** Cite os principais tipos de polarizações que podem ocorrer em um dielétrico, explicando sucintamente cada um deles. Que relação existe entre permissividade elétrica de um material e as polarizações que nele podem ocorrer? Como e por que a frequência da tensão aplicada a um dielétrico pode influir no seu fator de dissipação ($\text{tg}\delta$)?