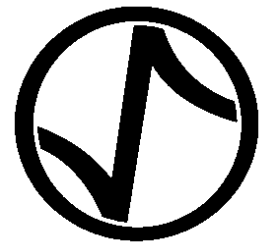


ATCP do Brasil

Soluções Piezoelétricas



Apostila 3 da fase 1

Materiais piezoelétricos:

- **Principais propriedades (do ponto de vista aplicado)**
- **Classificação dos materiais comerciais**
- **Limitações**
- **Testes**

Do curso:

**Materiais e Dispositivos Piezoelétricos:
Fundamentos e Desenvolvimento**

São Carlos – 2004

Índice

| | |
|--|----|
| 1. Introdução | 3 |
| 2. Principais propriedades dos materiais piezoelétricos (do ponto de vista aplicado).... | 4 |
| d_{ij} – Constante de carga piezoelétrica | 4 |
| g_{ij} – Constante de tensão piezoelétrica..... | 4 |
| k_{ij} – Coeficientes de acoplamento..... | 5 |
| Q – Fator de qualidade mecânico..... | 5 |
| Tan δ - Fator de dissipação dielétrica | 5 |
| T_C – Temperatura de Curie | 6 |
| N_k – Constantes de frequência | 6 |
| Z_a – Impedância Acústica | 6 |
| 3. Classificação dos principais materiais piezoelétricos comerciais de acordo com suas propriedades e aplicações. | 8 |
| 4. Limitações dos materiais piezoelétricos | 13 |
| Envelhecimento..... | 13 |
| Instabilidade das propriedades em função de variações de temperatura | 14 |
| Limite de excitação elétrico e mecânico..... | 16 |
| 5. Testando materiais piezoelétricos | 16 |
| Via estimativa do k_{15} | 16 |
| Via estimativa do d_{33} | 17 |

1.Introdução

Existe uma infinidade de materiais piezoelétricos disponíveis no mercado, que vai desde o quartzo, insubstituível em algumas aplicações, até o ultrapassado Titanato de Bário, passando pelas diversas composições, do largamente utilizado, Zirconato Titanato de Chumbo (PZT's). Muitos destes materiais comerciais são equivalentes entre si, mas devido às diferentes especificações de cada empresa, é interessante o estabelecimento de uma classificação padrão e/ou método de seleção, que permita a identificação do material mais adequado de acordo com suas propriedades, com as características da aplicação e com suas limitações.

Nesta apostila,

- Serão apresentadas as principais propriedades dos materiais piezoelétricos do ponto de vista aplicado.
- Os principais materiais piezoelétricos comerciais serão classificados de acordo com suas propriedades e aplicações.
- Serão apresentadas as limitações dos materiais piezoelétricos.
- Serão apresentados alguns métodos práticos de como testar materiais piezoelétricos.

Tendo como objetivo principal, possibilitar e fundamentar a escolha do material piezoelétrico em função da aplicação.

2.Principais propriedades dos materiais piezoelétricos (do ponto de vista aplicado)

d_{ij} – Constante de carga piezoelétrica¹

Unidade: m/V (metros/Volt) ou C/N (Coulombs/Newton)

O que significa: Informa qual é a proporção entre a variação dimensional (Δl) do material piezoelétrico (em metros) e a diferença de potencial aplicada (em Volts), e entre a geração de cargas elétricas (em Coulombs) e a força aplicada no material (em Newtons).

Valores típicos: De 0,2 a 8 Angstrom (10^{-10} metros) por Volt aplicado, e de 20 a 800 pico Coulomb por Newton aplicado, para cerâmicas piezoelétricas de PZT.

Quando/onde é uma informação indispensável: No projeto de posicionadores piezoelétricos e sensores de força/deformação.

g_{ij} – Constante de tensão piezoelétrica

Unidade: Vm/N (Volts x metros/Newton)

O que significa: Informa qual é a proporção entre a diferença de potencial gerada (em Volts) e a força aplicada (em Newton) para uma cerâmica com comprimento de 1 metro.

Valores típicos: De -1 a 60 Volts para cada Newton aplicado (considerando a dimensão do eixo em questão de 1 metro), para cerâmicas piezoelétricas de PZT. Diminuindo-se a dimensão da cerâmica ou aumentando a força, o módulo da tensão gerada também aumenta.

Quando/onde é uma informação indispensável: No projeto de detonadores de impacto e “magic clicks”.

¹ O índice i significa a direção do campo elétrico/força aplicada e o índice j a direção em que está sendo medida a deformação/carga elétrica (sendo i e j igual a 1 para o eixo x, igual a 2 para o eixo y e igual a 3 para o eixo z; o eixo z sempre é o da polarização). Estes índices também podem ser apresentados compactados, substituídos por letras, significando simetrias como a planar (p) e hidrostática (h).

k_{ij} – Coeficientes de acoplamento

Unidade: Adimensional.

O que significa: Eficiência do material na transdução/conversão de energia elétrica em mecânica e vice versa.

Valores típicos: De 0.02 (equivalente a 2% de eficiência) a 0.75 (equivalente a 75% de eficiência), para cerâmicas piezoelétricas de PZT.

Quando/onde é uma informação indispensável: No controle de qualidade das cerâmicas piezoelétricas e no projeto de dispositivos em que não se deseja a conversão cruzada de energia, ou seja, que uma vibração ou deformação em um eixo não gere cargas elétricas ou diferença de potencial em outro eixo. Neste caso, quanto menor o respectivo fator de acoplamento melhor.

Q – Fator de qualidade mecânico

Unidade: Adimensional.

O que significa: É uma medida das perdas mecânicas (amortecimento) do material. Dizer que o fator de qualidade mecânico de um dispositivo ressonante é 100 (de um sino por exemplo), significa que, se excitado momentaneamente em sua frequência de ressonância, irá oscilar $100/2\pi$ vezes antes de atingir o repouso.

Valores típicos: De 50 a 1500, para cerâmicas piezoelétricas de PZT.

Quando/onde é uma informação indispensável: No projeto de dispositivos dinâmicos de alta potência.

Tan δ - Fator de dissipação dielétrica

Unidade: Adimensional.

O que significa: É uma medida das perdas dielétricas do material.

Valores típicos: De 2×10^{-3} a 25×10^{-3} para cerâmicas piezoelétricas de PZT (sob baixo campo).

Quando/onde é uma informação indispensável: No projeto de dispositivos dinâmicos de alta potência e/ou submetidos a altos campos elétricos.

T_c – Temperatura de Curie

Unidade: Graus Celsius

O que significa: É a temperatura na qual a estrutura cristalina do material sofre uma transição de fase e o mesmo deixa de apresentar propriedades piezoelétricas. Depois de ultrapassada esta temperatura, o material perde a polarização remanescente induzida tornando-se inútil para a utilização como elemento transdutor de energia elétrica em mecânica.

Valores típicos: De 150 a 350 °C, para cerâmicas piezoelétricas de PZT.

Quando/onde é uma informação indispensável: No projeto de dispositivos que deverão operar em altas temperaturas e de alta potência.

N_k – Constantes de frequência²

Unidade: Hz m (Hertz x metro)

O que significa: Significa qual seria a frequência de ressonância de uma cerâmica, com a simetria do índice em questão, com sua dimensão principal com 1 metro. Equivale a aproximadamente a metade da velocidade do som no material. É um fator importante, pois permite a estimativa de frequência de ressonância de dispositivos piezoelétricos.

Valores típicos: De 800 a 3000 Hz m, para cerâmicas piezoelétricas de PZT.

Quando/onde é uma informação indispensável: No projeto de dispositivos que operarão em ressonância.

Z_a – Impedância Acústica

Unidade: MRayls (k_g/m^2s)

O que significa: É a taxa com que a energia mecânica se propaga pelo meio, é uma propriedade análoga ao índice de refração.

A diferença entre as impedâncias acústicas de dois meios interfaceados é determinante da fração de energia refletida e transmitida de uma onda incidente nesta interface.

² O índice k pode ser designado como l (longitudinal), p (planar), c (cilíndrico) e 33.

Valores típicos: De 25 a 40 MRayls, para cerâmicas piezoelétricas de PZT (Z_a da água = 2 MRayls e do ar $\cong 1 \times 10^{-3}$ MRayls). É calculada pelo produto da densidade pela velocidade (a velocidade é aproximadamente igual a duas vezes a respectiva constante de frequência, no caso das cerâmicas).

Quando/onde é uma informação indispensável: No projeto de dispositivos irão emitir ou captar ultra-som/vibrações mecânicas.

3. Classificação dos principais materiais piezoelétricos comerciais de acordo com suas propriedades e aplicações.

Quando aplicamos um campo elétrico alternado em uma cerâmica piezoelétrica e medimos a polarização induzida em função do campo, observamos o fenômeno da histerese ferroelétrica, conforme apresentado na Figura 1. A área interna desta curva corresponde à energia dissipada na forma de calor, devido às perdas mecânicas e dielétricas.

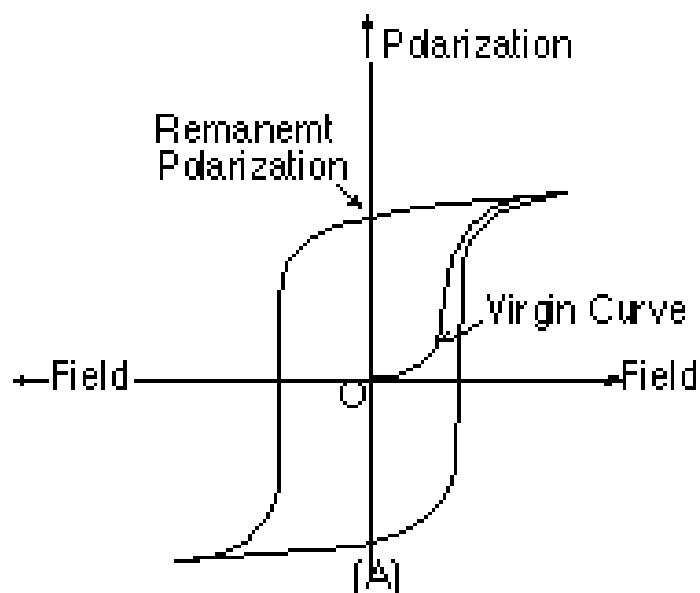


Figura 1 Histerese piezoelétrica.

A principal classificação dos materiais piezoelétricos é baseada na área desta curva, sendo denominados como materiais “Hard” aqueles que apresentam um curva de histerese “fechada”, com área pequena, e como materiais “Soft”, aqueles que apresentam uma curva de histerese “aberta”, com área expressiva³. Os materiais “Hard” também são denominados Materiais de Alta potência e os “Soft” de Materiais de Alta Sensibilidade.

³ O referencial para se determinar se a área da curva é expressiva ou não é subjetivo, mas a diferença entre as curvas dos materiais ditos “Hard” dos “Soft” é evidente, sendo que não há margem para equívocos.



Figura 2 Principal divisão dos materiais piezoelétricos

Os materiais comerciais especiais são cerâmicas piezoelétricas e mono cristais utilizados em aplicações particulares, tais como filtros, ressonadores de alta precisão e elementos ativos de acelerômetros uniaxiais. Estes materiais serão detalhados posteriormente.

Existe uma norma⁴ da marinha americana que subdivide os materiais “Hard” e “Soft” em sub-grupos, através de intervalos de propriedades e de acordo com as principais aplicações, vide Tabela 1. Esta norma costuma ser utilizada como referência por pesquisadores e projetistas, para estabelecer tabelas de equivalência entre os diversos fabricantes de cerâmicas piezoelétricas e facilitar a escolha de materiais e a troca de fornecedores, como o exemplo mostrado na Tabela 2.

Tabela 1 Intervalo de propriedades e classificação de acordo com a norma americana DOD-STD-1376A (SH).

| Propriedade | Navy I | Navy II | Navy III | Navy IV | Navy V | Navy VI |
|---------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| $K_{33}^T (\pm 12,5\%)$ | 1275 | 1725 | 1025 | 1275 | 2500 | 3250 |
| $\text{tg}(\delta)$ | $\leq 0,006$ | $\leq 0,020$ | $\leq 0,004$ | $\leq 0,010$ | $\leq 0,025$ | $\leq 0,025$ |
| $k_p (\pm 8\%)$ | 0,58 | 0,60 | 0,50 | 0,30 | 0,63 | 0,64 |
| $d_{33} (\text{e-12 m/V}) (\pm 15\%)$ | 290 | 390 | 215 | 140 | 495 | 575 |
| $N_p (\text{hz-m}) (\pm 8\%)$ | 2200 | 1950 | 2300 | 3150 | 1950 | 1940 |
| $\rho (\text{g/cm}^3)$ | $\geq 7,45$ | $\geq 7,60$ | $\geq 7,45$ | $\geq 5,50$ | $\geq 7,40$ | $\geq 7,40$ |
| Q | ≥ 500 | ≥ 75 | ≥ 800 | ≥ 400 | ≥ 70 | ≥ 65 |
| $T_c (^\circ\text{C})$ | 325 | 350 | 325 | 115 | 240 | 65 |
| Tipo | Hard | Soft | Hard | Soft | Soft | Soft |

⁴ Ad Hoc Subcommittee Report on Piezoceramics – Revision of DOD-STD-1376A (SH), Naval Research Laboratory, 1986.

Tabela 2 Exemplo de tabela de equivalência baseada na norma americana DOD-STD-1376A (SH).

| | ATCP do BRASIL | FERROPERM | EDO | PKI | MORGAN | CHANNEL |
|---------------|----------------|-----------|-------|---------|---------------|---------|
| Navy Type I | SP-4 | Pz-26 | EC-64 | PKI-402 | PZT-4 | 5400 |
| Navy Type II | SP-5A | Pz-27 | EC-65 | PKI-502 | PZT-5A | 5500 |
| Navy Type III | SP-8 | Pz-28 | EC-69 | PKI-802 | PZT-8 | 5804 |

Na Figura 3 são apresentados os sub-grupos dos materiais “Hard” e “Soft”, baseando-se na norma citada anteriormente.

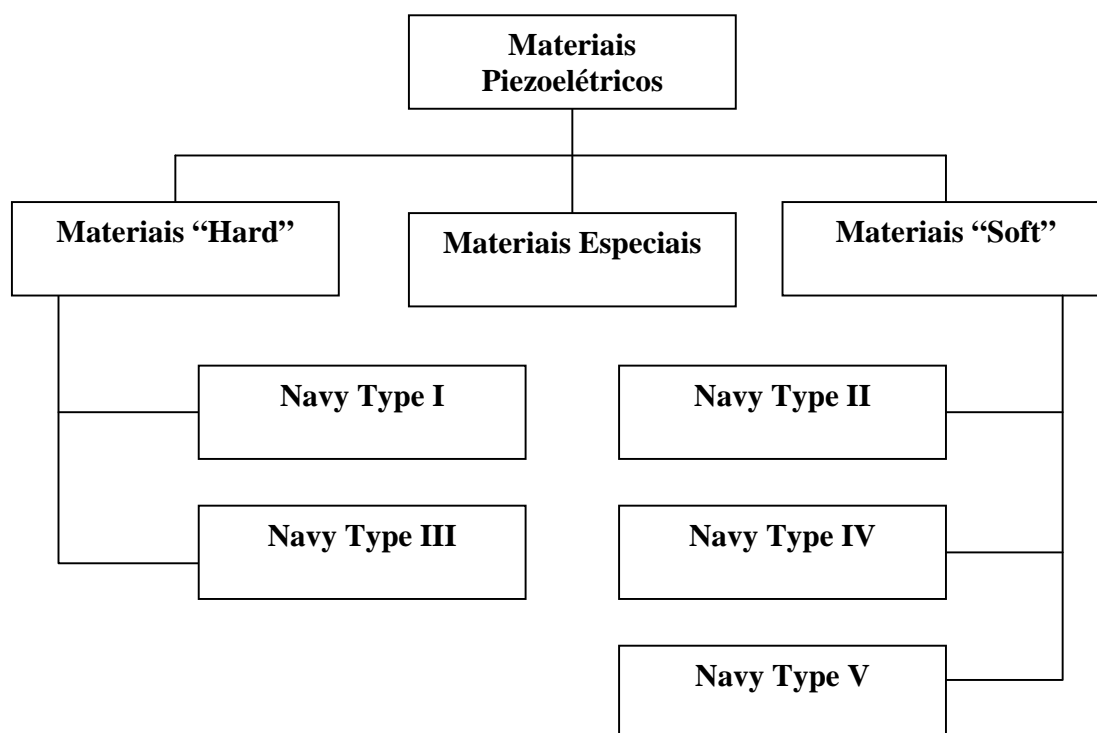


Figura 3 Sub-divisões dos materiais piezoelétricos “Hard” e “Soft” de acordo com a norma americana DOD-STD-1376A (SH).

Sendo as características dos sub-grupos⁵ as seguintes:

Navy Type I (“Hard”): Recomendado para aplicações de média e alta potência em condições de uso contínuo e repetitivo. É capaz de gerar altas amplitudes de vibração mantendo baixas as perdas mecânicas e dielétricas.

-Propriedades de destaque: d_{33} , $\tan \delta$ e Q .

⁵ Todos os sub-grupos são constituídos de PZT’s modificados (PZT = Titanato Zirconato de Chumbo), exceto o Navy Type IV, constituído de um BT modificado (BT= Titanato de Bário).

- Principais aplicações: Sistemas de limpeza por ultra-som e sonares.
- Conhecido comercialmente como: PZT4.

Navy Type II (“Soft”): Alta sensibilidade, ideal para dispositivos de transmissão e recepção de baixa potência,. Apresenta perdas dielétricas e mecânicas que inviabilizam a excitação contínua com alta intensidade.

- Propriedades de destaque: d_{ij} , g_{15} , N_k e T_C .
- Principais aplicações: Dispositivos para NDT⁶, hidrofones e acelerômetros.
- Conhecido comercialmente como: PZT5A.

Navy Type III (“Hard”): Similar, mas menos sensível que o Navy Type I; é capaz de converter o dobro de potência mantendo baixas as perdas mecânicas e dielétricas. Recomendado para aplicações de alta potência.

- Propriedades de destaque: $\tan \delta$, Q e conversão de potência máxima.
- Principais aplicações: sistemas de solda por ultra-som e processamento de materiais.
- Conhecido comercialmente como: PZT8.

Navy Type IV (“Soft”): Adequado para aplicações de média potência. Tornou-se obsoleto com o advento dos PZT's, sendo substituído principalmente pelo Navy Type I (conforme nota de rodapé 5, o sub-grupo Navy Type IV é constituído por BT's e não por PZT's).

- Propriedade de destaque (negativo): T_C .
- Principais aplicações: manutenção de equipamentos antigos.
- Conhecido comercialmente como: Titanato de Bário.

Navy Type V (“Soft”): Adequado para aplicações que requerem altas energias e diferença de potencial.

- Propriedades em destaque: d_{33} , K_{33}^T e g_{33} .
- Principais aplicações: detonadores de impacto e magic clicks.
- Conhecido comercialmente como: PZT5J.

⁶ Non Destructive Testing.

Navy Type VI (“Soft”): Adequado para aplicações que requerem grandes deformações mecânicas (Δl).

-Propriedades em destaque: d_{33} e K_{33} .

-Principais aplicações: posicionadores e atuadores.

-Conhecido comercialmente como: PZT5H.

No grupo de materiais comerciais especiais encontramos materiais diferentes dos PZT's e BT's que constituem os grupos “Hard” e “Soft”. Estes materiais especiais são essencialmente os seguintes:

Monocristais de Quartzo

Os monos cristais de quartzo são insubstituíveis em aplicações que exigem altos fatores de qualidade (é possível obter cristais com Q de até 100.000), tais como em osciladores de precisão utilizados em equipamentos eletrônicos. Estes cristais são encontrados na natureza e lapidados de acordo como as constantes piezoelétricas desejadas.

Titanato de Chumbo (PT)

O titanato de chumbo é um material com constantes piezoelétricas mais modestas do que os PZT's, mas que apresenta uma particularidade muito útil na construção de acelerômetros e dispositivos hidrostáticos: possui constantes com índice $ij=31$ que apresentam valores mínimos, em outras palavras, não ocorre a conversão de energia cruzada entre eixos neste material, permitindo, por exemplo, a construção de acelerômetros perfeitamente unidirecionais.

-Propriedade de destaque: constantes com índice $ij=31$ muito baixas.

-Principais aplicações: acelerômetros e sensores uniaxiais/unidirecionais.

-Conhecido comercialmente como: PT.

4. Limitações dos materiais piezoelétricos

O conhecimento das propriedades e aplicações das principais cerâmicas comerciais pode possibilitar a escolha do material mais adequado, mas não garante necessariamente o bom funcionamento, a estabilidade e a vida útil do dispositivo em que será utilizada. Portanto, é muito importante ter conhecimento das limitações inerentes a estes materiais para a realização de um “desenvolvimento preventivo”, evitando assim, re-projetos para contornar problemas previsíveis.

As principais limitações dos materiais piezoelétricos são as seguintes:

- Envelhecimento natural (e acelerado pelas condições de uso)
- Instabilidade das propriedades em função de variações de temperatura.
- Limites de excitação elétricos e mecânicos.

Sendo a temperatura e suas variações as principais protagonistas destas limitações.

Envelhecimento

Com o passar do tempo, a polarização remanescente induzida durante o processo de fabricação das cerâmicas esvaece naturalmente, independentemente da ação de agentes externos ou do uso do material. Na Tabela 3, podemos encontrar algumas taxas de alteração de propriedades de cerâmicas comerciais supondo o não uso e condições normais de pressão e temperatura. Estas alterações são significativas, principalmente quando o material é utilizado em dispositivos ressonantes em que alterações de capacitância/impedância interferem diretamente no funcionamento da eletrônica de acionamento.

Tabela 3 Taxas de envelhecimento dos materiais piezoelétricos da empresa Morgan Matroc.

| (% por década) | PZT-4 | PZT-5A | PZT-5H | PZT-7A | PZT-8 |
|----------------|-------|--------|--------|--------|-------|
| k_p | -2,3 | -0,2 | -0,35 | 0 | -2 |
| K_{33}^T | -5,8 | -1 | -1,5 | +2 | -5 |
| N_1 | +1,5 | +0,2 | +0,25 | -0,08 | +1 |

Estas taxas de envelhecimento são consideravelmente mais elevadas se o material é utilizado em dispositivos de potência ou submetido a altos campos e deformações. O parâmetro de maior influência sobre as taxas de envelhecimento é a temperatura, quanto

maior a temperatura e mais próxima de T_C (Temperatura de Curie) maiores serão as taxas. Anconselha-se considerar como temperatura máxima de operação 60 % de T_C .

Instabilidade das propriedades em função de variações de temperatura

Em eletrônica, estamos abituados a observar a mudança de propriedades e comportamento em todos os tipos de componentes, desde os resistores, que apresentam resistência maior quando aquecidos, aos semicondutores, que conduzem melhor aquecidos. No caso das cerâmicas, estas alterações também acontecem, porem com maior intensidade e de forma imprevisível, devido à complexidade dos mecanismos envolvidos no efeito piezoelétrico.

Na Figura 4 temos o fator de qualidade mecânico em função da temperatura para diversas composições de PZT. Podemos observar a excelente estabilidade do PZT4, PZT5A e PZT5H na faixa de 0 a 100 °C.

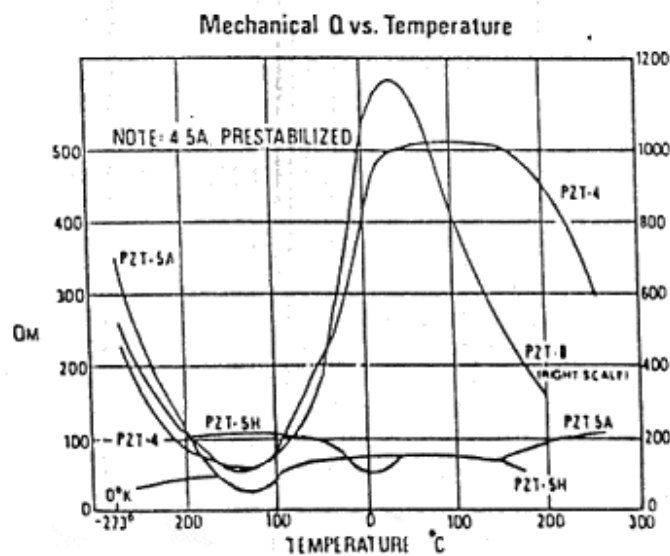


Figura 4 Fator de qualidade mecânico em função da temperatura para diversas composições de PZT.

Na Figura 5 temos a constante dielétrica em função da temperatura para diversas composições de PZT. Podemos observar uma melhor estabilidade para o PZT4 na faixa de 0 a 100 °C.

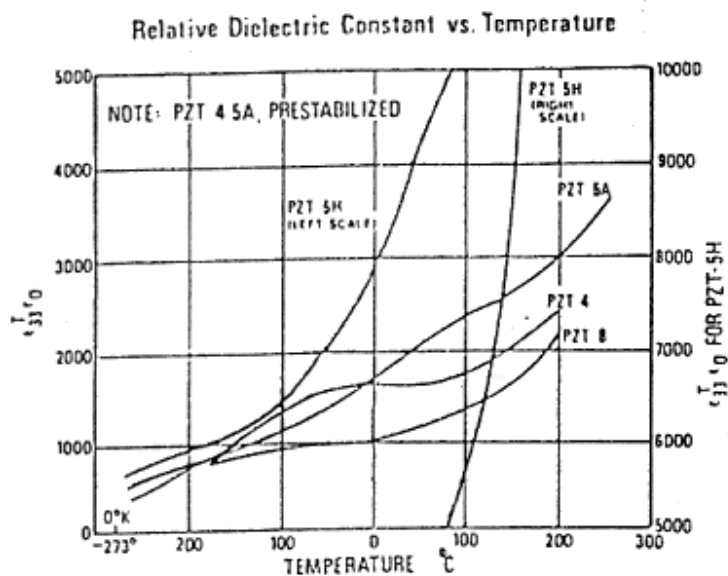


Figura 5 Constante dielétrica em função da temperatura para diversas composições de PZT.

Na Figura 6 temos a constante de carga piezoelétrica em função da temperatura para diversas composições de PZT. Podemos observar uma melhor estabilidade para o PZT4, PZT8 e PZT5A na faixa de 0 a 100 °C.

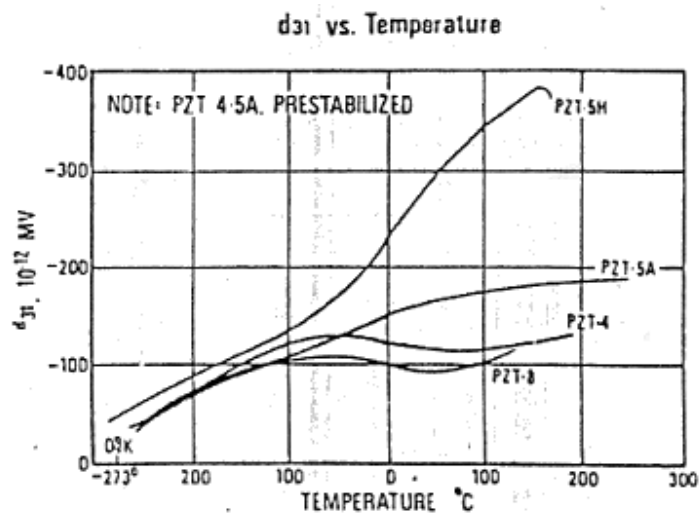


Figura 6 Constante dielétrica em função da temperatura para diversas composições de PZT.

Desconsiderar a dependência das propriedades da temperatura é uma receita infalível para o desenvolvimento de dispositivos e equipamentos instáveis.

Limite de excitação elétrico e mecânico

As cerâmicas piezoelétricas são materiais frágeis poucos resistentes à tração, sendo importante observar os limites de cada material para evitar quebras.

Tabela 4 Limites de tração para alguns materiais piezoelétricos de acordo com a referência da nota de rodapé da página 4.

| (psi) | Navy Type I | Navy Type II | Navy Type V | Navy Type VI |
|----------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| Dinâmico | 6000 | 4000 | 4000 | 4000 |
| Estático | 11000 | 11000 | 10000 | 10000 |

Além dos limites de tração, existem os limites de conversão de potência, que ficam entre 4 e 10 W/cm³kHz, para os materiais tipo “Hard”.

5. Testando materiais piezoelétricos

Existem métodos sofisticados para a caracterização e controle de qualidade de materiais piezoelétricos⁷, mas que não se justificam quando o objetivo é apenas avaliar se uma cerâmica piezoelétrica está “boa” ou não. Para tanto, métodos simples, como a estimativa de k_{15} e de d_{33} , são suficientes.

Via estimativa do k_{15}

Podemos calcular o fator de acoplamento mecânico k_{15} a partir da capacitância da cerâmica medida em alta e baixa frequência, e comparando este valor com a tabela de propriedades do fabricante ou com outra cerâmica nova do mesmo material, ter uma idéia do estado da cerâmica.

$$k_{15} = \sqrt{1 - \frac{C_H}{C_L}}$$

Equação 1 Equação para o cálculo de k_{15}

⁷ R. Holland e E. P. Eernisse, Accurate Measurement of Coefficients in a Ferroelectric Ceramic, IEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, Vol SU-16, no 4, October 1969.

A capacitância em alta frequência (C_H) deve ser medida em uma frequência acima das ressonâncias harmônicas, e C_L em 1 kHz. Para medir C_L , um multímetro com capacímetro é suficiente, para medir C_H , é necessário o uso de gerador de funções e de um arranjo que permita o cálculo de C_H a partir de sua reatância, como por exemplo, o mostrado na Figura 7.

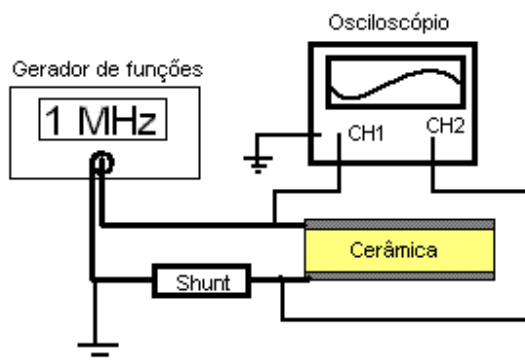


Figura 7 Ilustração simplificada do arranjo para o cálculo das capacitâncias.

Via estimativa do d_{33}

Nada melhor do que avaliar um material piezoelétrico através do efeito piezoelétrico estimando a constante d_{33} . Para fazê-lo, basta submeter a cerâmica em teste a uma força F , medir a carga gerada pela cerâmica com o auxílio de um capacitor e de um voltímetro, e calcular o d_{33} .