

Application note RT-ATCP-01

Cerâmicas piezoelétricas: funcionamento e propriedades

ATCP Engenharia Física

www.atcp.com.br / ha@atcp.com.br

São Carlos - Brasil

Autor: Antônio Henrique Alves Pereira (Pereira A.H.A.)

[Revisado e publicado online em 1º março de 2010]

INTRODUÇÃO

Em qualquer escala de frequência ou potência, o elemento ativo e núcleo da maioria dos transdutores ultra-sônicos é piezoelétrico, podendo ser classificado em um dos seguintes grupos [1]:

- cerâmicas piezoelétricas,
- cristais de quartzo,
- compósitos piezoelétricos,
- cristais hidrossolúveis,
- monocristais piezoelétricos,
- semicondutores piezoelétricos, e
- polímeros piezoelétricos;

O que torna fundamental o conhecimento das propriedades e do comportamento eletro-mecânico destes materiais para toda empresa e profissional que trabalha com ultra-som. Destes grupos, as Cerâmicas Piezoelétricas é o que apresenta a maior flexibilidade de formato e de propriedades, sendo largamente utilizadas na fabricação de equipamentos ultra-sônicos de potência, de ensaios não destrutivos e de atuadores. Os materiais piezoelétricos também são utilizados em detonadores de impacto, geradores de faíscas (*magic clicks*), nebulizadores, atuadores, posicionadores, transformadores e em diversas aplicações onde o efeito piezoelétrico é útil.

O objetivo deste *application note* é possibilitar uma visão geral dos materiais piezoelétricos, em especial das cerâmicas piezoelétricas, com o intuito de facilitar a utilização destes materiais com entendimento de suas propriedades e características pelos clientes da ATCP Engenharia Física.

HISTÓRIA

O efeito piezoelétrico foi descoberto em 1880 pelos irmãos Curie e utilizado em uma aplicação prática pela primeira vez por Paul Langevin no desenvolvimento de sonares durante a primeira guerra mundial. Langevin utilizou cristais de quartzo acoplados a massas metálicas (inventado o transdutor tipo Langevin) para gerar ultra-som na faixa de algumas dezenas de kHz's. Após a primeira guerra mundial, devido à dificuldade de se excitar transdutores construídos com cristais de quartzo por estes demandarem geradores de alta tensão, iniciou-se o desenvolvimento de materiais piezoelétricos sintéticos. Estes esforços levaram à descoberta e aperfeiçoamento nas décadas de 40 e 50, das cerâmicas piezoelétricas de Titanato de Bário pela então URSS e Japão, e das cerâmicas piezoelétricas de Titanato Zirconato de Chumbo (PZT's) pelos EUA [2,3].

O desenvolvimento das cerâmicas piezoelétricas foi revolucionário. Além de apresentarem melhores propriedades que os cristais após "polarizadas", também oferecem geometrias e dimensões flexíveis por serem fabricadas através da sinterização de pós cerâmicos conformados via prensagem ou extrusão. Atualmente as cerâmicas piezoelétricas tipo PZT, em suas diversas variações, são as cerâmicas predominantes no mercado. Também podemos encontrar outros materiais, como por exemplo, o PT (PbTiO_3) e o PMN ($\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$), utilizados em dispositivos que exigem propriedades especiais e muito específicas, como transdutores para alta temperatura.

O QUE SÃO E COMO FUNCIONAM

As cerâmicas piezoelétricas são corpos maciços semelhantes às utilizadas em isoladores elétricos, vide Fig. 1; são constituídas de inúmeros cristais ferroelétricos microscópicos, sendo inclusive denominadas como policristalinas.



Figura 1 – Exemplos de cerâmicas piezoelétricas. Da esquerda para a direita: disco para equipamentos de ultra-som para fisioterapia, tubo para sonares e anel para máquinas de solda por ultra-som.

Particularmente nas cerâmicas tipo PZT, estes pequenos cristais possuem estrutura cristalina tipo Perovskita, que apresenta simetria tetragonal, romboédrica ou cúbica simples, dependendo da temperatura em que o material se encontra, vide Fig. 2. Estando abaixo de uma determinada temperatura crítica, conhecida como temperatura de Curie, a estrutura Perovskita apresenta a simetria tetragonal em que o centro de simetria das cargas elétricas positivas não coincide com o centro de simetria das cargas negativas, dando origem a um dipolo elétrico, como ilustrado no item 1 da Fig. 2.

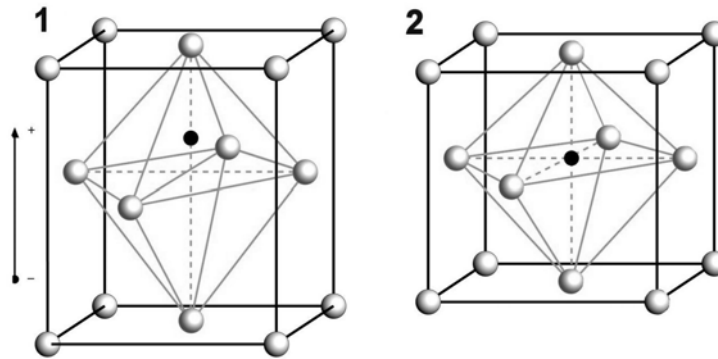


Figura 2 - Estrutura Perovskita das cerâmicas piezoelétricas tipo PZT: 1) Abaixo da temperatura de Curie. 2) Acima da temperatura de Curie.

A existência deste dipolo faz com que a estrutura cristalina se deforme na presença de um campo elétrico e gere um deslocamento elétrico quando submetida a uma deformação mecânica, o que caracteriza o efeito piezoelétrico inverso e direto respectivamente. A deformação mecânica ou a variação do dipolo elétrico da estrutura cristalina da cerâmica não implica necessariamente em efeitos macroscópicos, visto que os dipolos se arranjam em domínios, que por sua vez se distribuem aleatoriamente no material policristalino. Para que ocorram manifestações macroscópicas é necessária uma orientação preferencial destes domínios, conhecida como polarização¹. Inclusive esta polarização se esvaece com o tempo e uso, inutilizando o material para a transformação de energia elétrica em mecânica [4,5].

Nos sistemas de solda e limpeza por ultra-som, por exemplo, é explorado o efeito piezoelétrico inverso, com a aplicação de um campo elétrico alternado em uma cerâmica piezoelétrica devidamente polarizada, ocorre a transdução de uma parte considerável da energia da excitação elétrica em energia mecânica, através da deformação da cerâmica e conseqüente geração de ultra-som, vide exemplo do efeito piezoelétrico inverso da Fig. 3.

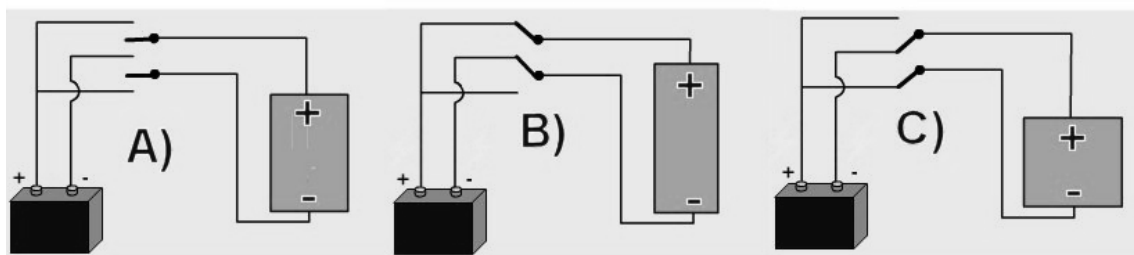


Figura 3 - Efeito piezoelétrico inverso em um bastão de cerâmica piezoelétrica polarizado no comprimento: Um campo elétrico aplicado em concordância com o campo utilizado na polarização faz com que ele se alongue, e um campo com polaridade invertida, que ele se contraia.

PRINCIPAIS CONSTANTES

Em sólidos ordinários, o deslocamento elétrico pode ser considerado uma função exclusiva do vetor campo elétrico (E) e das constantes dielétricas (ϵ); e a deformação mecânica (S) uma função

¹ No processo de polarização o corpo cerâmico recebe eletrodos em um par de faces paralelas através das quais se submete o material aquecido a um campo elétrico com intensidade próxima ao limite de ruptura dielétrica, induzindo uma polarização macroscópica remanescente após este processo.

exclusiva das tensões mecânicas (T) e constantes elásticas (s), como apresentado em notação matricial pelas equações:

$$\begin{aligned} D_m &= \varepsilon_{mk}^S E_k \\ S_i &= s_{ij}^E T_j \end{aligned} \quad (1).$$

Nos materiais piezoelétricos ocorre o acoplamento das variáveis mecânicas e elétricas: Ao mesmo tempo em que a deformação depende das tensões mecânicas, ela também depende do campo elétrico, e ao mesmo tempo em que o deslocamento elétrico depende do campo, ele também depende da deformação mecânica. Podemos visualizar melhor este acoplamento na equação (também escrita em notação matricial [6]):

$$\begin{aligned} D_m &= e_{mi} S_i + \varepsilon_{mk}^S E_k \\ S_i &= s_{ij}^E T_j + d_{mi} E_m \end{aligned} \quad (2).$$

Existe um conjunto de coeficientes (e e d) que são utilizados para caracterizar os materiais piezoelétricos, e particularmente nos casos de interesse recorrentes, as cerâmicas piezoelétricas. Através destes coeficientes e constantes podemos ter uma idéia do desempenho piezoelétrico e à que aplicações este ou aquele material é mais adequado [7].

Coefficientes de acoplamento k

Podendo ser definidos e calculados de diversas formas, os coeficientes de acoplamento k podem ser interpretados como o rendimento do material em absorver a energia elétrica fornecida pela fonte de excitação.

Constantes piezoelétricas d

As constantes piezoelétricas d estabelecem uma proporcionalidade entre a geração de cargas e as tensões mecânicas aplicadas (efeito piezoelétrico direto) e entre a deformação em função de um campo elétrico aplicado (efeito piezoelétrico inverso). Nas equações 3-A e 3-B temos a definição diferencial das constantes d a temperatura e campo elétrico constante. Podemos comparar o caráter piezoelétrico de diferentes materiais através das constantes d , sendo especialmente relevantes no projeto de atuadores e posicionadores.

$$d_{nij}^{\theta} = \left[\frac{\partial D_n}{\partial T_{ij}} \right]_{E,\theta} \quad (\text{C/N}) \quad (3-A),$$

$$d_{nij}^{\theta} = \left[\frac{\partial S_{ij}}{\partial E_n} \right]_{T,\theta} \quad (\text{m/V}) \quad (3-B).$$

Constantes dielétricas K

As constantes dielétricas estabelecem uma proporcionalidade entre o deslocamento elétrico e o campo elétrico aplicado. Na equação 4 temos a definição diferencial da permissividade dielétrica ε a temperatura e campo elétrico constante, sendo $K = \varepsilon/\varepsilon_0$.

$$\varepsilon_{nm}^{T,\theta} = \left[\frac{\partial D_n}{\partial E_m} \right]_{T,\theta} \quad (\text{C}^2/\text{Nm}^2) \quad (4).$$

As constantes dielétricas são importantes porque determinam a capacitância da cerâmica piezoelétrica, que por sua vez é determinante no cálculo e projeto dos circuitos casadores de impedância.

Constantes piezoelétricas g

Definidas como a razão entre as constantes d e ε , correlacionam a resposta em tensão elétrica do material a uma tensão mecânica aplicada (possui dimensão de Vm/N), sendo especialmente relevantes no projeto de sensores.

Constantes elásticas s

As constantes elásticas s estabelecem uma proporcionalidade entre a deformação e a tensão aplicada. São as “constantes de mola” do material. A partir das constantes elásticas, definidas na forma diferencial como apresentado na equação 5, podemos calcular a velocidade de propagação de ondas

acústicas no material piezoelétrico em qualquer direção e polaridade, e estimar variações dimensionais em função de pressões estáticas.

$$S_{ijkl}^{E,\theta} = - \left[\frac{\partial S_{ij}}{\partial T_{kl}} \right]_{E\theta} \quad (5).$$

Constantes de frequência N

Em geometrias em que temos um modo de vibração desacoplado, a constante de frequência é definida como o produto da frequência de ressonância pela dimensão em questão, podendo ser esta um comprimento, diâmetro ou espessura. A partir da constante de frequência podemos estimar a frequência de ressonância para a mesma geometria com dimensões diferentes.

As constantes de frequência são muito úteis no projeto de transdutores ultra-sônicos para a estimativa da frequência de operação. Também podemos estimar as velocidades de propagação do som em um material através das constantes de frequência, duplicando-as.

Fator de qualidade mecânico Q_m e fator de dissipação dielétrico $\tan\delta$

O fator de Qualidade mecânico e o fator de dissipação dielétrico são umas das constantes mais importantes na definição das possíveis aplicações dinâmicas do material, por determinarem quais serão as perdas de energia do processo de transdução. É a partir deles que se determina, por exemplo, se o material em questão é adequado para aplicações de potência tais como os sistemas de limpeza por ultra-som.

Temperatura de Curie

É a temperatura crítica onde a estrutura cristalina do material sofre a transição de fase da simetria tetragonal para cúbica. Uma cerâmica policristalina que é submetida a uma temperatura superior ou igual à temperatura de Curie, quando resfriada recupera suas características piezoelétricas microscópicas, mas não as macroscópicas, por perder a orientação preferencial dos domínios gerada pelo processo de polarização, que possibilita a utilização prática do material como transdutor eletro-mecânico.

Limite de tração dinâmico

É o limite máximo de tração a que o material pode ser submetido dinamicamente sem se romper/quebrar. Este limite deve ser levado em consideração principalmente no projeto de transdutores de potência, onde as cerâmicas piezoelétricas são submetidas a altos campos elétricos que promovem tanto a contração (compressão) quanto à expansão (tração) do material.

Taxa de envelhecimento

É a taxa com que as propriedades piezoelétricas do material se alteram no tempo à medida que a orientação dos domínios de dipolos, realizada pelo processo de polarização, se esvaece.

MATERIAIS COMERCIAIS & APLICAÇÕES

Os principais materiais piezoelétricos comerciais e as respectivas propriedades estão listados na Tabela 1 apresentada na página seguinte.

O PZT-4 é utilizado normalmente em sistemas de limpeza por ultra-som e fisioterapia, o PZT-8 em sistema de solda por ultra-som, o PZT-5A em sensores e transdutores para ensaios não destrutivos, o PZT-5J e 5H para geradores de faísca por impacto (detonadores e *magic clicks*) e posicionadores respectivamente.

Tabela I – Principais materiais piezoelétricos comerciais e as respectivas constantes.

Material	PZT-4	PZT-8	PZT-5A	PZT-5J	PZT-5H
k_p	0,60	0,50	0,61	0,60	0,63
k_{33}	0,68	0,63	0,70	0,71	0,73
d_{33} (10^{-12} C/N)	300	215	400	460	550
d_{31} (10^{-12} C/N)	-11,5	-9,5	-170	-210	-265
g_{33} ($\times 10^{-3}$ Vm/N)	26	25	25	22	19
g_{31} ($\times 10^{-3}$ Vm/N)	-11	-11	-11	-9	-9
K_3^T (baixo sinal) C. dielétrica relativa	1250	1000	1750	2450	3100
Fator de dissipação $\tan \delta$ (baixo campo)	0,004	0,004	0,020	0,020	0,020
Densidade (kg/m^3)	7600	7600	7650	7500	7500
Temp. de Curie ($^{\circ}\text{C}$)	325	330	360	260	190
Fator de qualidade Q_m	500	1000	75	70	65
s^E_{11} ($\times 10^{-12}$ m^2/N)	12	11	19	23	21
s^E_{33} ($\times 10^{-12}$ m^2/N)	16	14	16	16	15
N_p (Hz-m) (modo planar)	2200	2270	1950	2000	1950
N_t (Hz-m) (modo espessura)	1905	2032	1800	1950	2000

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GALLEGO, J.; Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers, J. Phys. E: Sci. Instrum., 22 804-816 1989
- [2] SUSLICK, K.S.; The Chemical Effects of Ultrasound, Scientific American February 1989.
- [3] CADY, W. G.; Piezoelectricity: An Introduction to the Theory and Applications of Electromechanical Phenomena in Crystals, Dover Press, 1964.
- [4] JAFFE, B.; Piezoelectric Ceramics, Academic Press, 1971.
- [5] Piezoelectric ceramics: Properties and Applications, Morgan Electro Ceramics Inc. technical publication.
- [6] NYE, J.F.; Physical Properties of Crystals, Clarendon Press, 1985.
- [7] IKEDA, T.; Fundamental of Piezoelectricity, Oxford University Press, 1990.

Notas: i) O conteúdo deste application note foi adaptado da dissertação de mestrado “DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE TRANSDUTORES ULTRA-SÔNICOS DE POTÊNCIA BI-FREQÜENCIAIS PARA SISTEMAS DE LIMPEZA POR ULTRA-SOM”, do mesmo autor, apresentada em 2005 na UFSCar pelo PPGCEM e de web sites relevantes sobre o assunto em questão. ii) A ATCP Engenharia Física não se responsabiliza pelo uso das informações contidas neste relatório e eventuais perdas e danos associados.

Você tem sugestões e/ou críticas para melhorar este artigo?
Envie para ha@atcp.com.br a/c Henrique Alves. Obrigado!

PRODUTOS RELACIONADOS FORNECIDOS PELA ATCP



CERÂMICAS PIEZOELÉTRICAS DE ALTA QUALIDADE EM QUALQUER QUANTIDADE

Para solda e limpeza (anéis em PZT-4 e PZT-8):	Para sensores (discos em PZT-5A):
<ul style="list-style-type: none">• 50 x 20 x 5,15 mm• 38,1 x 19,1 x 5,15 mm• 38 x 13 x 6,35 mm• 50,8 x 19,1 x 3 mm• 30 x 10 x 06 mm• 25 x 12 x 3,15 mm• 25 x 10 x 4,15 mm	<ul style="list-style-type: none">• 15 x 0,9 mm• 25 mm e 30 mm em diversas espessuras <p>(placas em PZT-5A):</p> <ul style="list-style-type: none">• 12 x 06 x 1,2 mm• 06 x 06 mm x 2 MHz

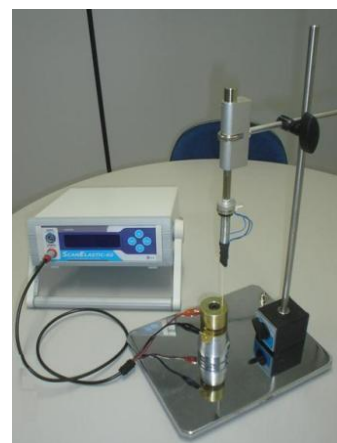
Outras geometrias, como discos e placas, medidas e materiais são fornecidas sob encomenda. O prazo de entrega varia entre 1 e 90 dias, dependendo do estoque e da programação de importações.

ANALISADOR DE TRANSDUTORES TRZ-03

O TRZ-03 foi desenvolvido para a análise de impedância de Transdutores Ultra-sônicos, Conjuntos Acústicos bem como para Pesquisas, Desenvolvimentos e Controle de Qualidade, em que se necessita mensurar características elétricas em função da frequência.

Com o TRZ-02, sua empresa ou laboratório contará com um diferencial tecnológico de ponta inédito na América Latina.

- Frequência de operação: 1- 200 kHz
- Faixa de impedância: 2 - 200k Ohms
- Precisão em frequência: +/-0,02 - %



CONSULTORIAS PARA:

- Desenvolvimento e melhoria de equipamentos ultra-sônicos de potência
- Desenvolvimento e melhoria de dispositivos piezoelétricos
- Determinação do material piezoelétrico ideal em função da aplicação
- Caracterização de materiais piezoelétricos e transdutores ultra-sônicos

ATCP Engenharia Física

www.atcp.com.br / ha@atcp.com.br

São Carlos - Brasil