

EFEITOS DO PRÉ-TENSIONAMENTO MECÂNICO EM CERÂMICAS PIEZOELÉTRICAS

F. J. Arnold¹ e S. S. Mühlen²

RESUMO -- Os litotriptores urológicos que empregam transdutores ultra-sônicos de potência são constituídos por cerâmicas piezoelétricas e peças metálicas montadas na forma de sanduíche. Este conjunto é pré-tensionado mecanicamente, o que provoca modificações na estrutura da cerâmica e, portanto, altera suas propriedades físicas e o desempenho do transdutor. Este trabalho tem por objetivo investigar a dependência do fator de acoplamento piezoelétrico (k_{33}) e das perdas mecânicas ($\tan d$) em função do pré-tensionamento, e com isso definir uma metodologia que permita conhecer os valores de pré-tensionamento para os quais o transdutor apresente o melhor rendimento.

Palavras-chave: Transdutor Ultra-sônico de Potência, Cerâmica Piezoelétrica, Pré-tensionamento.

INTRODUÇÃO

Os litotriptores (equipamentos usados em medicina para a fragmentação de calcificações) utilizam geralmente transdutores piezoelétricos ultra-sônicos que operam sob potências elevadas. As cerâmicas piezoelétricas são os constituintes principais destes transdutores e por razões de rendimento, seu desempenho em condições de excitação elétrica e mecânica elevadas merece ser estudado.

Devido ao baixo valor da tensão trativa de ruptura das cerâmicas piezoelétricas, é comum aplicar-se uma tensão compressiva residual constante (pré-tensionamento) ao bloco de cerâmicas do transdutor de alta potência, de modo que, em vibração, os picos dos semi-ciclos trativos provocados pela excitação externa não consigam fraturar algumas das cerâmicas componentes do conjunto.

O objetivo deste trabalho é investigar as variações do fator de acoplamento piezoelétrico e das perdas mecânicas em relação ao pré-tensionamento, e dessa forma estabelecer a influência deste último no desempenho dos transdutores.

Os trabalhos mais conhecidos sobre pré-tensionamento em cerâmicas piezoelétricas abordam o problema de forma estática, ou com pulsos cíclicos de compressão, ou ainda com sinais de excitação elétrica em frequências próximas a 1 kHz (bem inferiores à frequência de ressonância), e portanto longe das condições normais de trabalho do transdutor (Krueger and Berlincourt, 1961; Krueger, 1967, 1968; Nishi, 1966).

¹ Professor Doutor, CESET/UNICAMP, Caixa Postal 456, 13484-420 - Limeira - SP;

² Professor Assistente Doutor, CEB-DEB/FEE/UNICAMP, Caixa Postal 6040, CEP 13081-970 - Campinas - SP.

PRINCÍPIOS TEÓRICOS

O fator de acoplamento piezoelétrico é um índice que expressa o potencial de conversão de um transdutor em um dado modo de vibração (Toulis, 1963; Berlincourt *et alii*, 1964). Neste trabalho usou-se o modo de vibração paralelo ao eixo longitudinal de um transdutor cilíndrico (eixo 3 das cerâmicas), representado por k_{33} . Este fator pode ser definido de duas formas: (a) como a razão entre as energias convertida e entregue por uma fonte externa, sendo, neste caso, escrito a partir dos coeficientes das equações piezoelétricas. Esta forma é útil nas aplicações de transdutores que operam em condições quase-estáticas; (b) através das frequências de ressonância e anti-ressonância, que além de serem facilmente medidas, revelam as condições não ideais de operação de um transdutor real. Neste caso ele passa a ser denominado fator de acoplamento piezoelétrico efetivo.

O fator de acoplamento piezoelétrico efetivo k_{33} pode ser calculado pela Equação (1) (Toulis, 1963):

$$k_{33}^2 = 1 - \left(\frac{f_r}{f_a}\right)^2 \quad (1)$$

onde:

f_r = frequência de ressonância, e
 f_a = frequência de anti-ressonância.

As perdas, expressas em porcentagem, quantificam o montante de energia que se transforma em calor. Estas perdas são calculadas por:

$$\tan \delta = k_{33}^2 2\pi f_r |Z_m| C_0^T \quad (2)$$

onde:

δ = ângulo de defasagem entre a tensão e a deformação mecânica, representando perdas;
 Z_m = valor da impedância do transdutor na ressonância, que corresponde a R_1 no circuito equivalente de Mason (Figura 1);
 C = capacitância do transdutor mecanicamente livre, medida sob uma excitação de 800 Hz.

Os transdutores piezoelétricos podem ser representados por circuitos elétricos equivalentes (Berlincourt *et alii*, 1964). Na Figura 1 está mostrado o circuito equivalente de Mason que pode ser dividido em duas partes: a) mecânica, representada por L_1 , C_1 e R_1 que correspondem aos efeitos de massa, compliância e atrito respectivamente; b) elétrica, representada por R_0 e C_0 que correspondem à resistência interna e a capacitância intrínseca da cerâmica.

Tanto o fator de acoplamento piezoelétrico como as perdas na conversão são parâmetros importantes na avaliação do rendimento de um transdutor. O conhecimento dos mesmos é, portanto, imprescindível nos projetos de transdutores otimizados.

A metodologia experimental desenvolvida nesta investigação é quase dinâmica, ou seja, as informações são obtidas através de medidas nos transdutores operando com pequenos sinais elétricos e nas frequências de ressonância e anti-ressonância típicas, exceção feita à medida da capacitância na condição mecanicamente livre, que foi realizada em 800 Hz. Esta medida é feita nesta frequência pois os dipolos das cerâmicas apresentam acúmulo de energia potencial em baixas frequências, o que aproxima a operação da cerâmica da condição de superfícies livres.

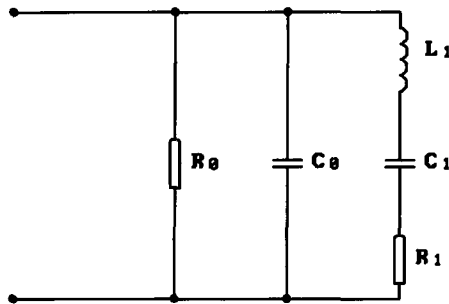


Figura 1. Circuito elétrico equivalente de Mason.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os transdutores empregados neste trabalho são compostos (estrutura de sanduíche) e simétricos em relação à posição das cerâmicas, como aparece na Figura 2. A simetria dos transdutores permite eliminar do equacionamento uma variável que é a diferença das cargas mecânicas na parte frontal e na retaguarda. Nestes transdutores foram usadas duas cerâmicas piezoelétricas anulares de 6,3 mm de espessura e 12,7 e 38,0 mm de diâmetro interno e externo respectivamente, com eletrodos prateados depositados nas superfícies planas. Estas cerâmicas, gentilmente oferecidas pela THORNTON-INPEC (Vinhedo, SP - Brasil), foram conectadas eletricamente em paralelo e acopladas mecanicamente em série. As partes passivas dos transdutores são compostas por cilindros de duralumínio comercial perfurados ao longo do eixo central e o conjunto é atravessado por um parafuso de aço que realiza o pré-tensionamento. Os contatos elétricos (eletrodos) para conexão com os instrumentos de medida foram confeccionados em chapa de latão de 0,3 mm de espessura e possuem dimensões radiais idênticas às da cerâmica.

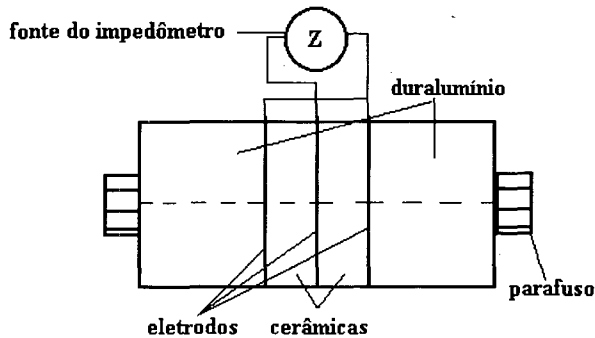


Figura 2. Aspecto construtivo dos transdutores utilizados nos experimentos.

Quando submetidas a compressão, as cerâmicas piezoelétricas geram cargas elétricas superficiais que podem ser recolhidas por um capacitor conectado em paralelo, convertidas em tensão elétrica que é medida por um voltímetro eletrônico. Uma curva de calibração pode ser obtida relacionando os valores de compressão de uma prensa hidráulica automática agindo sobre as cerâmicas (eixo das ordenadas), e as tensões geradas (eixo das abscissas), conforme a montagem da Figura 3. Esta curva é utilizada no ajuste dos pré-tensionamentos aplicados nos transdutores, realizados pelo aperto do parafuso central de maneira contínua e uniforme.

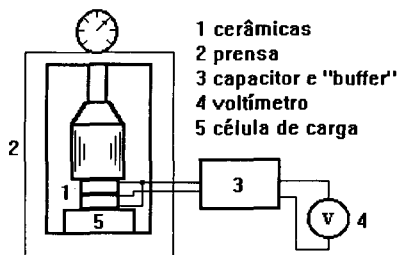


Figura 3. Montagem empregada para relacionar a tensão elétrica gerada e a compressão mecânica aplicada.

Numa faixa de compressão de até 50 MPa constata-se uma relação praticamente linear com a tensão gerada (Figura 4).

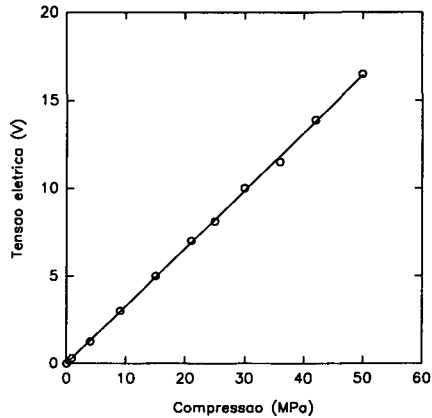


Figura 4. Gráfico da tensão elétrica em função da compressão mecânica.

Uma vez ajustado o pré-tensionamento no transdutor sob ensaio, este foi pousado sobre uma espuma plástica (para reduzir os atritos e a transferência de potência para o meio), e conectado a um impedômetro fasorial (HP4192-A) para as medidas. Este procedimento foi repetido para cada valor de pré-tensionamento em cada transdutor.

Foram construídos 3 transdutores diferenciados pelo comprimento das peças de duralumínio. Os transdutores A, B e C possuem, em cada extremidade, peças de duralumínio de 26, 33 e 41 mm de comprimento (L) respectivamente.

Em cada caso, o transdutor foi excitado com um sinal elétrico alternado e senoidal de $1,0 V_{RMS}$. O impedômetro forneceu: a) os valores dos módulos da impedância e suas respectivas frequências na faixa compreendida entre 10 e 90 kHz dos quais foi possível identificar as frequências de ressonância (no valor mínimo da impedância) e anti-ressonância (no valor máximo da impedância); b) a capacitância na condição mecanicamente livre (medida em 800 Hz).

RESULTADOS

As Figuras 5, 6 e 7 apresentam as variações das frequências de ressonância (curva inferior) e anti-ressonância (curva superior) em função do pré-tensionamento. Essas variações assemelham-se ao caso de uma corda tracionada percorrida por ondas transversais, onde a frequência de ressonância (f) tem uma dependência quadrática com a tração (T).

Os valores de k_{33} foram obtidos das medidas das frequências de ressonância e anti-ressonância que são apresentadas nas Figuras 5, 6 e 7. As Figuras 8, 9 e 10 apresentam os fatores de acoplamento piezoelétrico k_{33} em função do pré-tensionamento nos transdutores A, B e C, respectivamente.

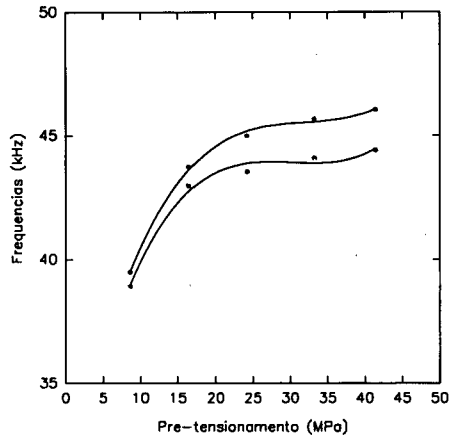


Figura 5. Frequências de ressonância (curva inferior) e anti-ressonância (curva superior) \times pré-tensionamento do transdutor A ($L = 26$ mm).

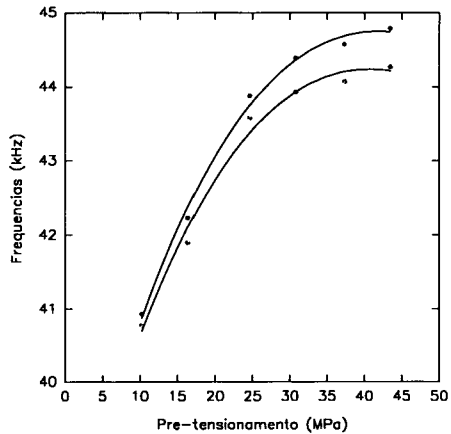


Figura 6. Frequências de ressonância (curva inferior) e anti-ressonância (curva superior) \times pré-tensionamento do transdutor B ($L = 33$ mm).

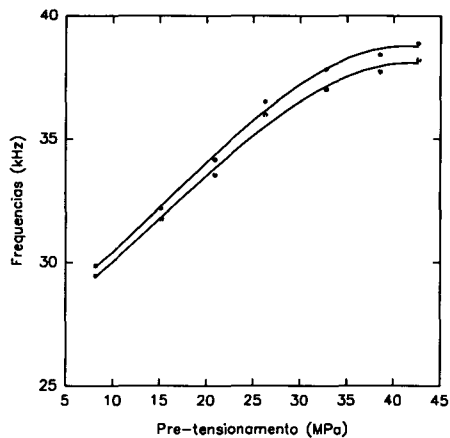


Figura 7. Frequências de ressonância (curva inferior) e anti-ressonância (curva superior) \times pré-tensionamento do transdutor C ($L = 41$ mm)."

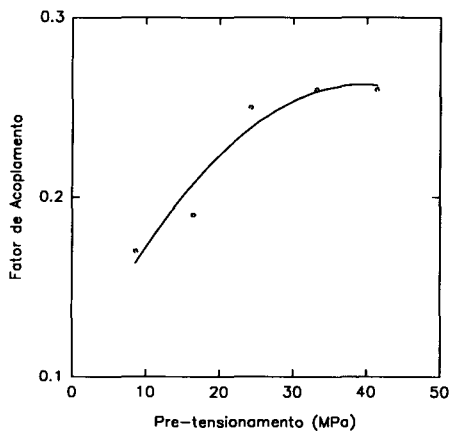


Figura 8. Fator de acoplamento piezoelétrico \times pré-tensionamento do transdutor A ($L = 26$ mm).

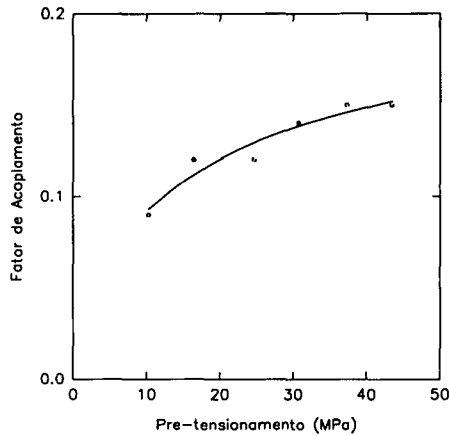


Figura 9. Fator de acoplamento piezoelétrico \times pré-tensionamento do transdutor B ($L = 33$ mm).

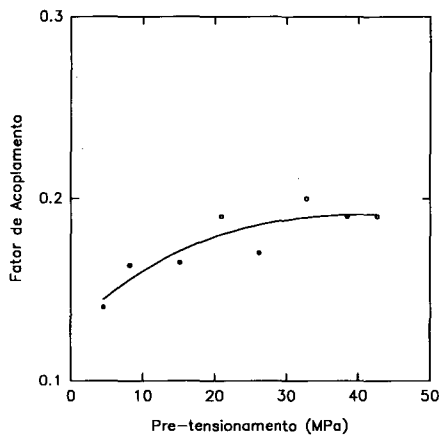


Figura 10. Fator de acoplamento piezoelétrico \times pré-tensionamento do transdutor C ($L = 41$ mm).

Nas Figuras 11, 12 e 13 são apresentados os gráficos das perdas mecânicas calculadas em função do pré-tensionamento nos transdutores A, B e C respectivamente. Observa-se nestas figuras que o pré-tensionamento contribui para a diminuição das perdas mecânicas.

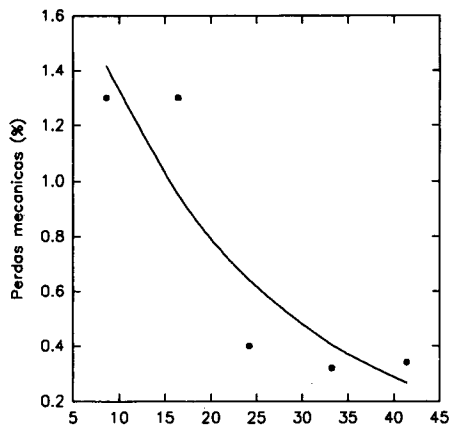


Figura 11. Perdas mecânicas × pré-tensionamento do transdutor A (L = 26 mm).

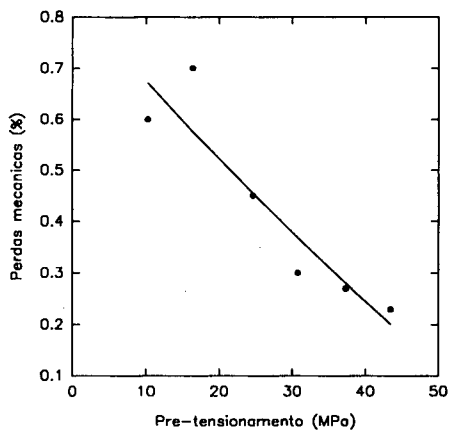


Figura 12. Perdas mecânicas × pré-tensionamento do transdutor B (L = 33 mm).

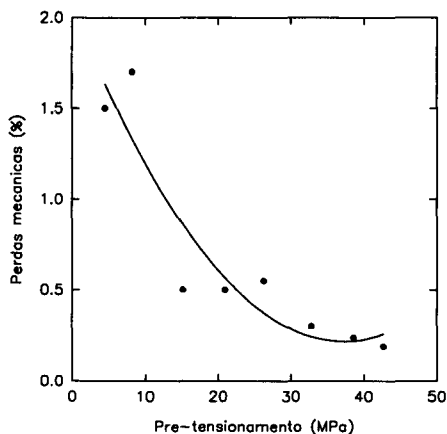


Figura 13. Perdas mecânicas \times pré-tensionamento do transdutor C ($L = 41$ mm).

As medidas das variáveis da Equação 2 (f_r , C e Z_m) mostram que as frequências de ressonância (Figuras 5, 6 e 7) e a capacitância (Figura 14) crescem com o pré-tensionamento, enquanto Z_m diminui o suficiente para fazer com que a função $\tan \delta$ seja decrescente.

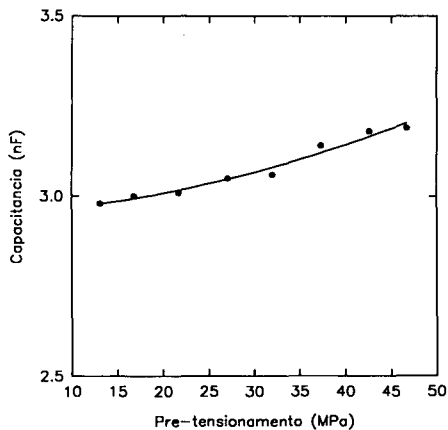


Figura 14. Capacitância em 800 Hz \times pré-tensionamento.

DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Segundo uma modelagem linear e uni-dimensional para um transdutor composto, baseada nas equações de onda homogênea dos meios, nas equações piezoelétricas lineares e nas leis da eletricidade (Hill and El-Dardiry, 1981), o pré-tensionamento não influi na resposta do transdutor. Entretanto, como os resultados experimentais das Figuras 5, 6 e 7 apontam variações de frequência, pode-se concluir que o pré-tensionamento vai afetar os coeficientes elásticos da cerâmica (c_{ij}) e os módulos de Young das peças metálicas, ambos determinam as frequências de ressonância e anti-ressonância dos transdutores.

Foi constatado durante o trabalho experimental que, para pré-tensionamentos inferiores a 10 MPa, as leituras das frequências de ressonância e anti-ressonância medidas não podem ser determinadas pois os picos típicos de mínima e máxima impedância dessas frequências encontram-se muito próximos e as diferenças entre eles são pequenas. Isto representa a formação de vários modos de vibração com baixas taxas de conversão eletromecânica. Com o crescimento do pré-tensionamento verifica-se que esses vários modos vão se transformando em um único modo com impedância de alguns ohms na ressonância e da ordem de kilo-ohms na anti-ressonância.

Os resultados apresentados nas Figuras 8, 9 e 10 mostram que a variação do fator de acoplamento piezoelétrico tende a diminuir com o aumento do pré-tensionamento. As modificações nas frequências e no fator de acoplamento podem ser atribuídos a dois efeitos:

- a) o pré-tensionamento vai melhorando progressivamente o acoplamento entre as diversas partes do transdutor sendo que, a partir de 30 MPa, este se torna um todo e passa a funcionar de forma estável e integrada em um único sistema vibrante. Assim, após este valor, o aumento do pré-tensionamento não gera mais modificações substanciais no comportamento do transdutor;
- b) após 10 MPa de compressão, o pré-tensionamento passa a atuar nos domínios e defeitos estruturais da cerâmica. O pré-tensionamento modifica estes parâmetros até um certo valor (por volta de 30 MPa), a partir do qual a estrutura da cerâmica impede outras modificações e ocorre a saturação dipolar. Alguns autores tem mostrado que a ação de campos externos (Hom *et alli*, 1994) e as variações da polarização por causa das modificações dos defeitos nos dipolos (Lines and Glass, 1977) conduzem a resultados onde observa-se essa saturação.

Não foi possível obter um relacionamento entre as variações das frequências de ressonância e anti-ressonância com o comprimento da peça de duralumínio (L). Estes resultados e outros obtidos com transdutores similares mostram que ocorrem variações entre 10 e 30% nestas frequências com o pré-tensionamento sem estabelecer dependência com L.

Verificou-se também que as perdas mecânicas são pequenas e comparáveis às perdas medidas em cerâmicas sem pré-tensionamento pois a tensão elétrica de excitação é pequena. O excedente das perdas verificado nos transdutores piezoelétricos de potência deve-se então essencialmente à excitação elétrica.

Os resultados deste trabalho demonstram que para valores de pré-tensionamento superiores a 30 MPa ocorre a efetivação do acoplamento eletromecânico e uma redução considerável das perdas calculadas (aproximadamente 40%). O desempenho dos transdutores é sensivelmente aumentado,

sendo recomendado o uso de pré-tensionamentos nesta faixa para transdutores ultra-sônicos de potência.

AGRADECIMENTOS

À THORNTON-INPEC pela cessão das cerâmicas usadas nos experimentos.

REFERÊNCIAS

- BERLINCOURT, D.; CURRAN, D. and JAFFE, H. (1964), "Piezoelectric and Piezomagnetic Materials and their Function in Transducers", In: *Physical Acoustics*, Ed.: W.P. Mason, v. 1A, p. 169-270.
- HILL, R. and EL-DARDIRY, S. (1981), "Variables in the Use and Design of Acoustic Emission Transducers", *Ultrasonics*, Jan., p. 9-16.
- HOM, C.; PILGRIM, S.; SHANKAR, N.; BRIDGER, K.; MASSUDA, M. and WINZER, S. (1994), "Calculation of Quasi-Static Electromechanical Coupling Coefficients for Electrostrictive Ceramic Materials", *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Freq. Control.*, v. 41, n. 4, p. 542-551.
- KRUEGER, H. (1967), "Stress Sensitivity of Piezoelectric Ceramics: Part 1. Sensitivity to Compressive Stress Parallel to the Polar Axis", *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 42, n. 3, p. 636-645.
- KRUEGER, H. (1968), "Stress Sensitivity of Piezoelectric Ceramics: Part 3. Sensitivity to Compressive Stress Perpendicular to the Polar Axis", *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 43, n. 3, p. 583-591.
- KRUEGER, H. and BERLINCOURT, D. (1961), "Effects of High Static Stress on the Piezoelectric Properties of Transducer Materials", *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 33, n. 10, p. 1339-1344.
- LINES, M. and GLASS, A. (1977), *Principles and Applications of Ferroelectrics and Related Material*, Oxford: Clarendon Press.
- NISHI, R. (1966), "Effects of One-Dimensional Pressure on the Properties of Several Transducer Ceramics", *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 40, n. 2, p. 486-495.
- TOULIS, W. (1963), "Electromechanical Coupling and Composite Transducers", *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 35, v. 1, p. 74-80.

EFFECTS OF THE MECHANIC PRE-STRESSING IN PIEZOELECTRIC CERAMICSF. J. Arnold¹ and S. S. Mühlen²

ABSTRACT -- The urological lithotriptors that employ piezoelectric transducers are constituted by piezoelectric ceramics and metallic pieces mounted in sandwich form. This ensemble is mechanically pre-stressed, that causes changes on ceramic structure and, thus, alters their physical properties and the transducer performance. This work proposes to investigate the piezoelectric coupling factor (k_{33}) and the mechanical losses ($\tan d$) dependence with regard to pre-stressing, and thus to define a methodology that allows to obtain the pre-stressing values where the transducer presents best efficiency.

Key-words: Power Ultrasound Transducer, Piezoelectric Ceramic, Pre-stressing.

¹ Associate Professor, UNICAMP - CESET, P.O. Box 456, CEP 13484-420 - Limeira - SP, Brazil

² Associate Professor, UNICAMP - FEE/DEB-CEB, P.O. Box 6040, CEP 13081-970 - Campinas - SP, Brazil