

MODELAGEM E CONSTRUÇÃO DE UM TRANSDUTOR ULTRASSÔNICO PIEZOCOMPÓSITO 1-3 PARA EMISSÃO EM AR

David Julio da Costa, djuliodacosta@yahoo.com.br¹
Marco Aurélio Brizzotti, marcobrizzotti@gmail.com¹
Julio Cezar Adamowski, jcadamow@usp.br¹
Flávio Buiochi, fbuiochi@usp.br¹

¹Universidade de São Paulo, Av. Profº Luciano Gualberto nº 380, 05508-970, São Paulo, SP, Brasil

Resumo: Este trabalho apresenta a modelagem e a construção de um transdutor ultrassônico para emissão em ar usando um compósito piezolétrico 1-3 e uma camada de acoplamento frontal de epóxi com espessura de um quarto de comprimento de onda. A camada de acoplamento fica em contato direto com o ar e tem a função de aumentar a eficiência de transmissão de energia do transdutor. É usada a técnica de corte e preenchimento para construir um compósito 1-3 de PZT/epóxi com 20 mm de diâmetro e frequência central de 500 kHz. Um modelo físico simples é usado para calcular as propriedades efetivas e a impedância elétrica do compósito 1-3. Os resultados da impedância elétrica simulados são comparados aos experimentais medidos por um impedômetro. As propriedades efetivas do piezocompósito são inseridas em um modelo de matriz distribuída para calcular a impedância elétrica do transdutor. Finalmente, o transdutor de ultrassom é construído usando o piezocompósito e a camada de acoplamento frontal. A impedância elétrica do transdutor é medida e comparada com a obtida teoricamente. Os resultados experimentais se aproximam dos resultados simulados.

Palavras-chave: transdutor de ultrassom, piezocompósito, emissão em ar

1. INTRODUÇÃO

Grande parte dos ensaios não destrutivos aplicados no meio industrial faz uso de sistemas ultrassônicos para a avaliação da integridade de materiais. Estes sistemas utilizam transdutores ultrassônicos para a emissão e a recepção de ultrassom. Tais transdutores convertem energia elétrica em energia mecânica (transdutor emissor) ou vice-versa (transdutor receptor). Durante o ensaio não destrutivo as ondas de ultrassom, geradas no transdutor emissor, passam através da peça submetida ao ensaio e retornam ao transdutor emissor (modo pulso-eco) ou chegam a um transdutor receptor (modos pitch-catch e transmissão/recepção) (Castaings e Cawley, 1996).

Para a geração e a recepção do ultrassom é necessário um acoplamento mecânico entre o transdutor e a peça de ensaio de modo que ocorra uma emissão e/ou recepção eficientes de energia do transdutor para a peça de ensaio e vice versa. O acoplamento pode ser feito através da imersão total da peça de ensaio na água, ou pelo contato direto do transdutor com a peça através de uma camada de gel ou pela utilização de um jato de água entre o transdutor e a peça. Entretanto, existem aplicações que inviabilizam esses acoplamentos, pois podem danificar o material em contato com água ou gel, ou dificultar a automatização (Hayward, 1997). Conseqüentemente, a remoção do meio de acoplamento e a sua substituição pelo ar tornam-se muito vantajosa. Porém, as restrições impostas pelo acoplamento em ar são consideráveis. Devido à atenuação no ar e à grande diferença de impedância acústica entre o transdutor e o ar, a sensibilidade resultante é extremamente baixa (~ -60dB) e a largura de banda é muito estreita (~ 5%) (Arenas, 2004). Como muitos dos materiais a serem inspecionados são sólidos, que apresentam uma diferença de impedância muito grande em relação ao ar, resulta numa baixa transmissão de energia ultrassônica no material (Hsu, 2006).

A largura de banda de um transdutor está relacionada inversamente à duração do pulso e ao número de ciclos em cada pulso. Já a sensibilidade está relacionada à pressão acústica de saída em uma dada voltagem de entrada (no caso de um transdutor emissor) ou à voltagem de saída à uma dada pressão acústica de entrada no transdutor (no caso de um transdutor receptor). Quanto maior a perda de energia na transmissão ou recepção da onda de ultrassom, menor é a sensibilidade.

Os recentes desenvolvimentos dos transdutores de acoplamento em ar, na faixa de operação de 300kHz a 3MHz, se devem à melhora nos projetos dos transdutores. Por exemplo, o desempenho dos transdutores pode ser melhorado pela adição de múltiplas camadas de casamento que possuem impedância acústica e atenuação muito baixa, tais como membranas porosas, com poros da ordem de submícron (Arenas, 2004). No entanto, continua a dificuldade inerente à alta impedância acústica da cerâmica piezolétrica que pode ser diminuída pela utilização de materiais piezocompósitos.

Os materiais piezocompósitos são um tipo de material muito utilizado na fabricação de transdutores de ultrassom.

Esses materiais são formados por pequenos elementos de cerâmica piezolétrica, com geometrias definidas ou aleatórias, inseridos numa matriz de polímero, possibilitando obter transdutores que apresentam baixa influência dos modos radiais e preponderando os modos de espessura. Segundo *Smith e Auld* (Smith e Auld, 1991) são várias as vantagens obtidas com a substituição da cerâmica pura pelo piezocompósito. Nos piezocompósitos, em comparação com a cerâmica pura, o fator de acoplamento eletromecânico, a largura de banda e a eficiência são maiores e a impedância acústica e as perdas dielétricas e mecânicas são menores.

Um estudo conduzido por Hayward e Gachagan (Hayward e Gachagan, 1996) mostra que há um grande potencial na aplicação de transdutores piezocompósitos do tipo 1-3 para acoplamento em ar. Esses transdutores oferecem uma considerável vantagem para operação em ar quando comparados com os convencionais. A rigidez mecânica pode ser ajustada por uma escolha apropriada do tipo e da proporção em volume do material de preenchimento e da cerâmica (Han e Roh, 1999). Além disso, a otimização do projeto é possível variando a forma das barras paralelas de cerâmicas e a sua distribuição (Hayward e Gachagan, 1996).

Neste trabalho são apresentadas a modelagem e a construção de um transdutor ultrassônico para emissão em ar usando um compósito piezolétrico 1-3 e uma camada de acoplamento frontal. A camada de acoplamento frontal é constituída de epóxi e tem espessura de um quarto de comprimento de onda. Ela fica em contato direto com o ar e tem impedância acústica menor que a da cerâmica, aumentando a eficiência de transmissão do transdutor. Um modelo físico simples é usado para calcular as propriedades efetivas do piezocompósito. Este modelo pode ser aplicado quando a escala espacial lateral do compósito é suficientemente pequena em relação ao comprimento de onda, de modo que o compósito possa ser tratado como um meio homogêneo efetivo. Tais propriedades efetivas são usadas em um modelo de matriz distribuída para calcular a impedância elétrica do compósito 1-3 e do transdutor. Os resultados experimentais se aproximam dos resultados simulados.

2. MODELO TEÓRICO DO TRANSDUTOR

Para calcular a impedância elétrica de um piezocompósito e de um transdutor ultrassônico com emissão em ar pode-se utilizar o modelo da matriz distribuída. Neste modelo o transdutor piezolétrico é representado por meio de modelos de linhas de transmissão acústicas ou eletroacústicas.

O transdutor modelado neste trabalho consiste basicamente de um piezocompósito 1-3 de espessura l_c e uma camada frontal de espessura l_m . A Figura (1) mostra a representação esquemática do transdutor.

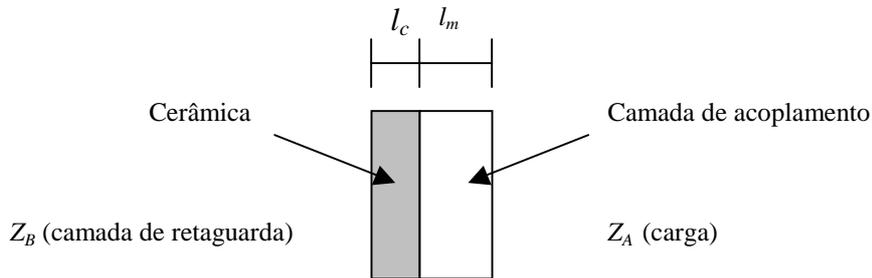


Figura 1. Representação esquemática do transdutor

Na análise que se segue, modela-se o transdutor por meio de um sistema de três portas, duas acústicas e uma elétrica, conforme mostra a Fig. (2).

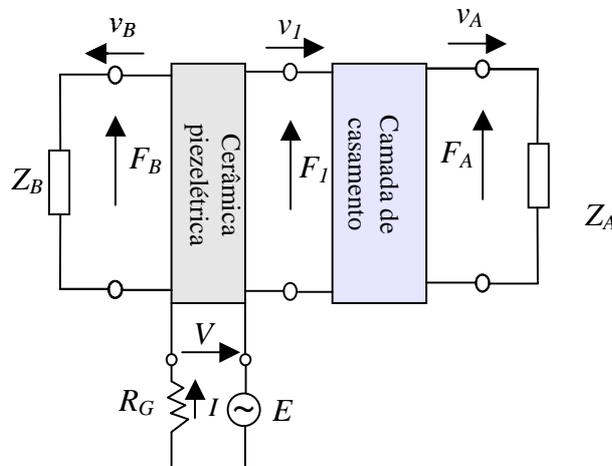


Figura 2. Modelo de três portas de um transdutor piezolétrico com camada frontal.

As duas portas acústicas representam a interação acústica do transdutor com os meios semi-infinitos externos, camada de retaguarda (Z_B) e carga (Z_A), e a porta elétrica representa a interação elétrica entre a cerâmica piezoeletrica e o circuito de excitação, composto por um gerador de sinais (E) com resistência interna (R_E). Existe ainda um terminal acústico intermediário que representa a interação acústica entre a cerâmica piezoeletrica e a camada de acoplamento frontal.

O modelo da matriz distribuída permite representar o elemento piezocompósito, e cada uma das camadas de acoplamento frontais por meio de matrizes. A matriz que representa o piezocompósito 1-3, além de considerar a camada de retaguarda Z_B , relaciona a tensão elétrica (V) e a corrente (I) no terminal elétrico com a força (F) e a velocidade da partícula (v_1) no terminal intermediário que fica entre a cerâmica piezoeletrica e a camada de acoplamento do transdutor. Esta relação é representada por:

$$\begin{pmatrix} V \\ I \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} F_1 \\ v_1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

onde A corresponde a matriz do piezocompósito. Já a matriz que representa a camada de acoplamento frontal relaciona a força (F_1) e a velocidade da partícula (v_1), no terminal acústico com a força (F_2) e a velocidade da partícula (v_2) na carga. Esta relação é dada por:

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ v_1 \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} F_A \\ v_A \end{pmatrix} \quad (2)$$

onde M_1 é a matriz da primeira camada de acoplamento frontal adjacente ao piezocompósito. Assim, substituindo primeiramente a Eq. (3) na Eq. (2) e depois na Eq. (1), acha-se a relação entre a corrente e a tensão elétrica no terminal elétrico com a força e a velocidade na carga, que é dada por:

$$\begin{pmatrix} V \\ I \end{pmatrix} = AM \begin{pmatrix} F_A \\ v_A \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} F_A \\ v_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_A \\ v_A \end{pmatrix} \quad (3)$$

onde a matriz T é o resultado do produto entre as matrizes A , e M . A seguir é apresentada a representação de cada uma dessas matrizes.

2.1. Matriz do piezocompósito 1-3 – considere um piezocompósito 1-3 em que a escala espacial lateral do compósito é suficientemente pequena em relação ao comprimento de onda, de modo que o compósito possa ser tratado como um meio homogêneo efetivo. Suponha que a espessura seja muito menor que as suas demais dimensões e que a espessura, a área transversal e a velocidade de propagação da onda no piezocompósito sejam representadas, respectivamente, por l_c , A_c e c_c . Considere que a impedância acústica do piezocompósito e do meio de retaguarda sejam iguais a Z_B e Z_C , respectivamente. Se as constantes dielétricas, piezoeletricas e a frequência angular forem representadas, respectivamente, por ϵ_{33}^S , e_{33} e ω , a matriz A é dada por:

$$A = \frac{1}{\cos(\beta) - 1 + j\zeta \sin(\beta)} \begin{pmatrix} \frac{\epsilon_{33}^S}{e_{33} C_0} & \frac{e_{33}}{j\omega \epsilon_{33}^S} \\ j\omega \epsilon_{33}^S & 0 \\ e_{33} & \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \cos(\beta) + j\zeta \sin(\beta) & -Z_c [\zeta \cos(\beta) + j \sin(\beta)] \\ \frac{\sin(\beta)}{jZ_c} & 2[\cos(\beta) - 1] + j\zeta \sin(\beta) \end{pmatrix} \quad (4)$$

onde $\beta = \omega l_c / c_c$, $\zeta = Z_B / Z_c$ e $C_0 = \epsilon_{33}^S A_c / l_c$ é a capacitância da cerâmica.

2.2. Matriz da camada de acoplamento frontal – Considere uma camada de acoplamento frontal que tem espessura l_m , velocidade de propagação c_m e impedância acústica Z_m . A matriz M desta camada frontal é dada por:

$$M = \begin{pmatrix} \cos(\beta_m) & jZ_m \sin(\beta_m) \\ \frac{j}{Z_m} \sin(\beta_m) & \cos(\beta_m) \end{pmatrix} \quad (5)$$

onde $\beta_m = \omega l_m / c_m$.

2.3. Impedância elétrica do transdutor – a impedância elétrica da entrada do transdutor (Z_E) é obtida a partir da substituição da equação de impedância acústica $F_A = Z_A v_A$ na Eq. (3). Após a substituição tem-se:

$$Z_E = \frac{V}{I} = \frac{T_{12} + T_{11} Z_A}{T_{22} + T_{21} Z_A} \quad (6)$$

onde T_{ij} são os elementos da matriz T .

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, foram simuladas as impedâncias elétricas do piezocompósito 1-3 e do transdutor piezocompósito com emissão em ar. Foi construído um transdutor a partir de um piezocompósito 1-3 e de uma camada de acoplamento feita de epóxi, sendo que o meio de propagação das ondas de ultrassom na camada de retaguarda e na carga foi o ar. O piezocompósito 1-3 foi obtido após a cerâmica piezelétrica pura ser cortada através da técnica de corte e preenchimento. As propriedades efetivas do piezocompósito 1-3 são mostradas na Tab. (1).

Tabela 1. Propriedades efetivas do piezocompósito 1-3.

Piezocompósito 1-3	
$\bar{c}_{33}^E (10^{10} \text{ N/m}^2)$	4.99
$\bar{e}_{33} (C/m^2)$	14
$\bar{\epsilon}_{33}^S / \epsilon_0$	530
$\bar{\rho} (kg/m^3)$	4900

Essas propriedades foram obtidas a partir de um modelo unidimensional, em que o valor efetivo foi determinado por interação entre as curvas teóricas e experimentais da condutância e da susceptância. Na frente do piezocompósito 1-3 utilizou-se uma camada frontal de epóxi, cujas propriedades estão indicadas na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades físicas do material da camada de acoplamento frontal.

Polímero GY 279/HY 951	
$c_{33} (10^{10} \text{ N/m}^2)$	0.704
$c_{12} (10^{10} \text{ N/m}^2)$	0.422
$\rho (kg/m^3)$	1126.8

As principais etapas na fabricação do transdutor ultrassônico com emissão em ar foram a construção do material piezocompósito, das camadas de acoplamento frontal e do encapsulamento. Primeiramente uma cerâmica de titanato zirconato de chumbo (PZ37, da fabricante Ferroperm) com um diâmetro de 20.0 mm e uma espessura de 2.5mm foi colada, através de uma camada de breu, em um vidro circular de 30 mm de diâmetro e 2 mm de espessura. A camada de breu era de aproximadamente 0.4 mm de espessura e tinha a função de manter os pilares colados ao vidro, na posição vertical, durante a etapa de corte. A camada de breu foi obtida pela deposição, no centro do vidro, de aproximadamente 5 gramas de breu sólido no formato de partículas com diâmetros de cerca de 3mm, que após um período de aquecimento à temperatura de 80 °C por um minuto adquire uma consistência gelatinosa, que permanece durante alguns segundos após o término do aquecimento. Durante o período em que o breu se encontrava viscoso, a cerâmica foi colocada sobre ele e levemente pressionada de encontro ao vidro. Então o conjunto vidro/piezocerâmica foi secado à temperatura ambiente por 2 horas.

Após a colagem da cerâmica no vidro deu-se início a etapa de realização dos cortes. Os cortes foram feitos em duas direções perpendiculares entre si através do uso de uma máquina de corte automática (Buehler® Isomet 4000) com um disco de corte de 150 µm de espessura. A rotação e a velocidade de avanço do disco foi de 3000 rpm e 1.5 mm/s, respectivamente. A célula unitária do compósito é mostrado na Fig. 3.

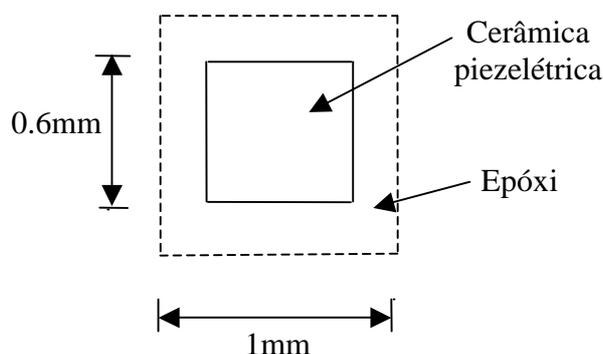


Figura 2. Célula unitária do piezocompósito 1-3.

Os cortes na cerâmica foram preenchidos com epóxi (GY 279 com endurecedor HY 951 em uma razão de mistura de 10:1) da fabricante Huntsman. Durante a mistura do epóxi com o endurecedor houve o surgimento de algumas bolhas de ar que foram removidas antes da deposição no interior dos cortes. Para isso, a mistura foi desgaseificada em uma câmara de vácuo por 5 minutos. Após a deposição do epóxi nos cortes, o conjunto cerâmica/epóxi foi colocado na estufa por 2 horas à temperatura de 50°C e, em seguida, curado por 24 horas à temperatura ambiente. Após esta etapa, o conjunto foi aquecido à 70 °C durante 10 segundos para permitir a retirada do piezocompósito de sobre o vidro. Foram utilizadas lixas para a remoção do breu e do excesso de polímero do piezocompósito. Após a remoção do excesso de polímero, as duas superfícies planas do compósito foram metalizadas com tinta condutiva de prata. A Fig. 4 é uma representação esquemática do piezocompósito durante o procedimento de corte.

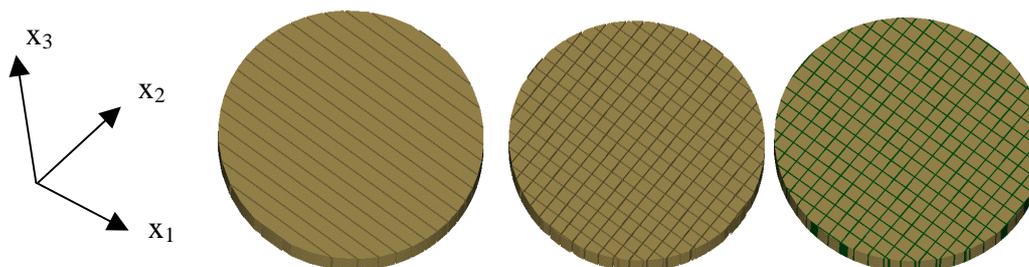


Figura 4. Representação esquemática do piezocompósito durante o procedimento de corte.

Primeiramente foram realizados cortes na direção x_1 , seguido de cortes na direção perpendicular x_2 e finalmente o preenchimento dos cortes com resina epóxi.

A caracterização do piezocompósito foi feita através da medição de sua impedância elétrica em um analisador de impedância (HP 4194A).

Para a construção da camada de acoplamento de epóxi, foram misturadas resina Araldite GY279 e endurecedor HY951, da fabricante Huntsman, numa proporção de 10 gramas de resina para uma de endurecedor. Este epóxi foi escolhido devido à sua baixa viscosidade. Então a resina de epóxi foi depositada em um molde de vidro e desgaseificada em uma câmara de vácuo e colocada na estufa por 2 horas a uma temperatura de 50°C, seguido de cura por 24 horas à temperatura ambiente. O molde de vidro continha uma cavidade com a espessura de $\lambda/4$ e foi construído a partir de peças de vidros que foram revestidas com uma película de desmoldante e juntadas com silicone. A Figura (5) mostra uma representação esquemática do molde de vidro.

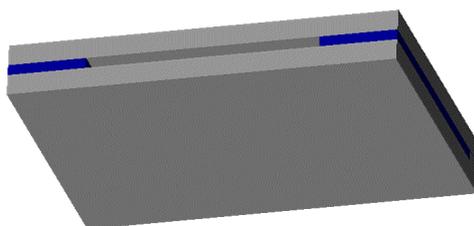


Figura 5. Representação esquemática do molde de vidro.

Após a realização dos cortes, da caracterização do piezocompósito e da construção da camada de acoplamento, seguiu-se a montagem do transdutor. A Figura (6) mostra uma representação esquemática da montagem do transdutor.

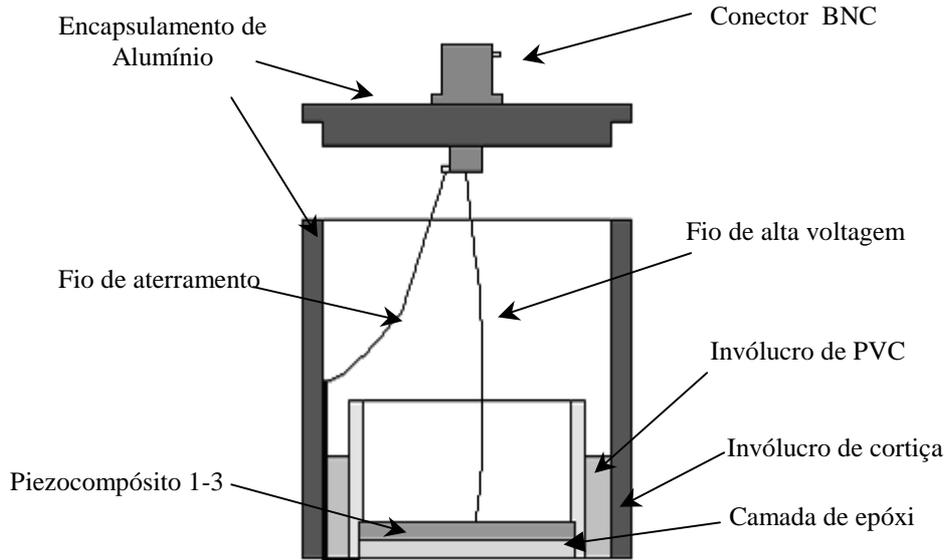


Figura 6. Representação esquemática da montagem do transdutor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura (7) mostra as curvas da parte real e imaginária da impedância e da admitância elétrica do piezocompósito 1-3, nos casos teórico (linha azul) e experimental (linha vermelha).

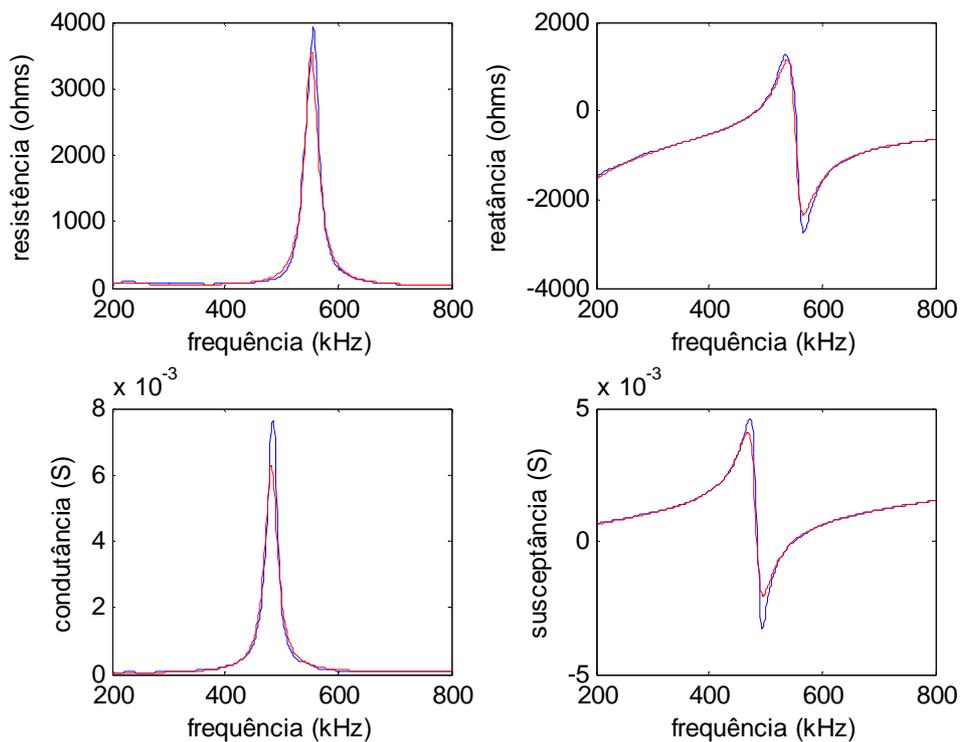


Figura 7. Parte real e imaginária da impedância e da admitância elétrica do piezocompósito.

As propriedades utilizadas para a obtenção das curvas teóricas mostradas na fig. (6) considerou o piezocompósito como um meio homogêneo vibrando no modo de espessura e por isso são denominadas propriedades efetivas. Pode-se notar uma boa concordância tanto na parte real como na imaginária, e uma frequência de ressonância elétrica no modo de espessura próxima de 0.5 MHz. Isto mostra que um piezocompósito 1-3 pode ser modelado considerando-o como um meio homogêneo e as propriedades efetivas.

A Figura (8) mostra as curvas da parte real e imaginária da impedância e admitância elétrica do transdutor obtido a partir do piezocompósito 1-3 e da camada de acoplamento de epóxi. As linhas de cores azul representam as curvas teóricas e as linhas vermelhas as curvas experimentais.

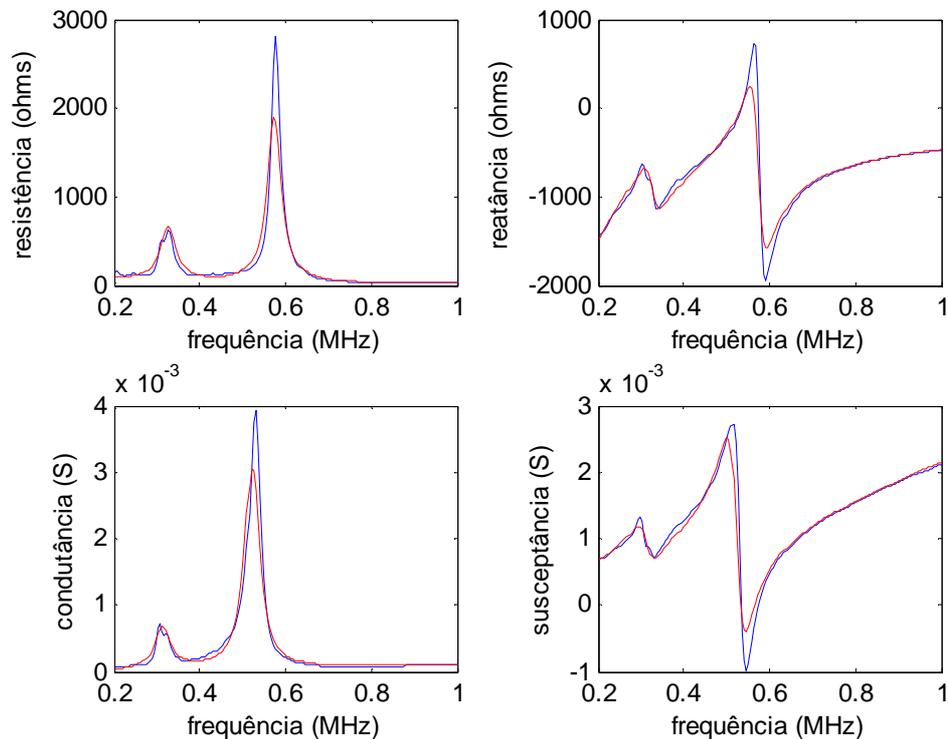


Figura 8. Parte real e imaginária da impedância e da admitância elétrica do transdutor.

As Figs. (7) e (8) mostram que um transdutor piezocompósito pode ser modelado a partir das propriedades efetivas. Tais propriedades também comprovam que usando estas propriedades no modelo da matriz distribuída é possível calcular a impedância elétrica do transdutor. Pela fig. (8) pode-se observar o surgimento de um novo pico de frequência próximo a 300 kHz e que a frequência central do transdutor está em torno de 520 kHz.

5. CONCLUSÃO

Um modelo físico simples foi usado para calcular as propriedades efetivas de um compósito piezelétrico 1-3. Estas propriedades foram usadas em um modelo de matriz distribuída para se obter a impedância elétrica do piezompósito e do transdutor com emissão em ar. Para validar os resultados teóricos, um piezocompósito 1-3 foi construído. Este compósito foi usado na construção de um transdutor com uma camada de acoplamento de epóxi. A impedância elétrica do piezocompósito 1-3 e do transdutor foram medidas em um analisador de impedância. Na observação das curvas de impedância elétrica do piezocompósito e do transdutor os resultados teóricos e experimentais apresentam excelentes resultados.

6. REFERÊNCIAS

- Arenas, T. E. G. A., 2004, "Acoustic Impedance Matching of Piezoelectric Transducers to the Air", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 51, No. 5, pp. 624-633.
- Castings, M., Cawley, P., 1996, "The Generation, Propagation, and Detection of Lamb Waves in Plates Using Air-Coupled Ultrasonic Transducers", Journal of the Acoustical Society of America, Vol.100, No. 5, pp. 3070-3077.
- Han, K., Roh, Y., 1999, "The Performance of a 1-3 Mode Piezocomposite Ultrasonic Transducer in Relation to the Properties of its Polymer Matrix", Sensors and Actuators, Vol. 75, p. 176-185, 1999.
- Hsu, D. K., 2006, "Nondestructive Testing Using Air-Borne Ultrasound", Ultrasonics, Vol. 44, pp. e1019-e1024.
- Hayward, G., 1997, "Air Coupled NDE – Constraints and Solutions for Industrial Implementation", IEEE Ultrasonics Symposium, pp. 665-673.
- Hayward, G., Gachagan, A., 1996, "An Evaluation of 1-3 Connectivity Composite Transducers for Air-Coupled Ultrasonic Applications", Journal of the Acoustical Society of America, Vol.99, No. 4, pp. 2148-2157.
- Smith, W. A., Auld, B. A., 1991, "Modeling 1-3 Composite Piezoelectrics: Thickness-Mode Oscillations", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 38, No. 1, pp. 40-47.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

MODELING AND CONSTRUCTION OF A 1-3 PIEZOELECTRIC COMPOSITE TRANSDUCER FOR EMISSION IN AIR

David Julio da Costa, djuliodacosta@yahoo.com.br¹
Marco Aurélio Brizzotti, marcobrizzotti@gmail.com¹
Julio Cezar Adamowski, jcadamow@usp.br¹
Flávio Buiochi, fbuiochi@usp.br¹

¹University of São Paulo, Av. Profº Luciano Gualberto nº 380, 05508-970, São Paulo, SP, Brasil

Abstract : *This paper presents the modeling and construction of an ultrasonic transducer for emission in air using a 1-3 piezoelectric composite and a quarter-wavelength-thick epoxy coupling layer. The coupling layer is in direct contact with the air and has the function to increasing the transducer efficiency in energy transmission. A simple physical model is used to calculate the effective properties of the composite. These properties are used in a distributed matrix model to calculate the composite and transducer electrical impedances. The dice-and-fill technique is used to construct a 20-mm-diameter 500-kHz lead zirconate titanate(PZT)/epoxy composite. The composite electrical impedance simulated results are compared with the experimental results measured by an impedance analyzer. Finally, the air-coupled ultrasonic transducer is constructed using the piezoelectric composite and a matching layer. The transducer electrical impedance is measured and compared with the theoretically results using the distributed matrix model. The experimental and simulated results show good agreement.*

Palavras-chave: *ultrasonic transducer, piezocomposite, aircoupled*