

MARCO AURÉLIO BRIZZOTTI ANDRADE

**ANÁLISE DE MATERIAIS PIEZELÉTRICOS
COMPÓSITOS PARA APLICAÇÕES EM
TRANSDUTORES DE ULTRA-SOM**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia

São Paulo
2006

MARCO AURÉLIO BRIZZOTTI ANDRADE

**ANÁLISE DE MATERIAIS PIEZELÉTRICOS
COMPÓSITOS PARA APLICAÇÕES EM
TRANSDUTORES DE ULTRA-SOM**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Mecatrônica

Orientador:
Prof. Dr. Julio Cezar Adamowski

São Paulo
2006

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 23 de março de 2006.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Andrade, Marco Aurélio Brizzotti

**Análise de materiais piezelétricos compósitos para aplica-
coes em transdutores de ultra-som / M.A.B. Andrade. -- ed.rev. --
São Paulo, 2006.**

171 p.

**Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de
Sistemas Mecânicos.**

**1.Ultra-som 2.Materiais piezelétricos 3.Materiais compósitos
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento
de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II.t.**

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Julio Cezar Adamowski, que desde a iniciação científica soube indicar os melhores caminhos para conduzir os trabalhos.

À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pela concessão da bolsa de mestrado (processo nº 03/10300-0).

Aos meus pais, que mantiveram a ajuda financeira, mesmo depois de eu começar a receber a bolsa de mestrado.

Ao Nicolás Pérez, do Laboratório de Acústica e Ultra-som do Instituto de Física da Universidade da República do Uruguai, pela ajuda na elaboração do projeto de pesquisa que resultou concessão da bolsa de mestrado.

Aos meus irmãos, Maurílio e Mateus por terem permitido que eu monopolizasse o computador de casa durante alguns finais de semana.

Ao Dr. Gilder Nader por ter ensinado a utilizar o software ANSYSTM e o analisador de impedância elétrica.

Aos professores Flávio Buiochi e Emílio C. N. Silva pelas sugestões no trabalho.

Aos colegas Ronny, Cícero, Fernando (Stump), Rogério (Sertão), João, Daniel, Mário, Ediguer, Jimmy, Wagner e Nakasone pelas discussões acadêmicas e não acadêmicas.

Ao técnico Gilberto pela usinagem das peças utilizadas na construção dos transdutores de ultra-som.

Ao pessoal do laboratório de Fenômenos de Superfície – LFS, especialmente aos funcionários Leandro Justino de Paula e Jovanio Oliveira dos Santos pelo suporte e apoio na utilização da máquina de corte.

Às agências de fomento CNPq e FINEP/CTPETRO.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é analisar materiais piezelétricos compósitos com conectividade 1-3 e 2-2 para aplicações em transdutores de ultra-som na faixa de MHz utilizando modelos matemáticos e verificações experimentais. O estudo de um material piezelétrico compósito pode ser feito através de seus três principais tipos de modos de vibração: modo planar, modo de espessura e modo lateral. Neste trabalho, é utilizado o método dos elementos finitos para modelar os modos planares, de espessura e laterais de um compósito, e modelos analíticos para modelar o modo de espessura e o modo lateral. A modelagem do modo de espessura de um transdutor de ultra-som é feita a partir de um modelo analítico unidimensional. A modelagem unidimensional de um transdutor de ultra-som é feita através do cálculo das propriedades efetivas do material piezelétrico compósito. Essas propriedades são utilizadas no modelo da matriz distribuída para prever a impedância elétrica de um compósito e a resposta impulsiva de um transdutor de ultra-som. Com o objetivo de validar os modelos, foram construídos um material piezelétrico compósito com conectividade 1-3 e outro com conectividade 2-2 através da técnica “dice-and-fill”, utilizando cerâmica de PZT-5A e resina epóxi. O compósito com conectividade 1-3 foi utilizado na construção de um transdutor de ultra-som. Os resultados teóricos da impedância elétrica e da resposta impulsiva são comparados com os obtidos experimentalmente. A impedância elétrica experimental é obtida através de um analisador de impedâncias, enquanto que a resposta impulsiva experimental do eco do transdutor é medida acoplando o protótipo do transdutor a um tarugo de acrílico. Devido à periodicidade do compósito foi feito um estudo teórico da propagação de ondas mecânicas em meios periódicos, mostrando que existem determinadas faixas de frequências que não se propagam no material. Foi verificado que esta periodicidade é responsável pela diminuição das amplitudes dos modos radiais de um material piezelétrico compósito quando comparados com os modos radiais de um disco de cerâmica piezelétrica. Também foram feitos ensaios em tanque de imersão para determinar as propriedades mecânicas de amostras de epóxi e amostras de tungstênio e epóxi em função da fração de volume de tungstênio na amostra.

ABSTRACT

The objective of this work is to analyze piezoelectric composite materials with 1-3 and 2-2 connectivity for applications in ultrasonic transducers in the megahertz frequency range. The analysis is done through mathematical models and experimental validation. The analysis of piezoelectric composite materials can be done through the study of its three main vibrational modes: planar mode, thickness mode, and the lateral mode. In this work, it is used the Finite Element Method to model the planar, thickness and the lateral modes of the composite, and it is used analytical models to model the thickness and the lateral modes. The modeling of the thickness mode of an ultrasonic transducer is obtained through an unidimensional analytical model. The unidimensional modeling of the transducer is done by calculating the effective properties of the piezoelectric composite material. The effective properties are used in a distributed matrix model to calculate the electrical impedance of the composite and the impulse response of an ultrasonic transducer. To validate the models, a 1-3 and a 2-2 piezoelectric composite were built using the “dice-and-fill” technique. These composite were constructed using a piezoelectric ceramic of PZT-5A and epoxy. The piezoelectric composite with 1-3 connectivity was used in the fabrication of an ultrasonic transducer. The theoretical results of the electrical impedance and the impulse response are compared with the experimental results. The experimental electrical impedance is measured by using an impedance analyzer, and the experimental impulse response is measured by coupling the ultrasonic transducer prototype to an acrylic block. Due to the periodicity of the composite, it was analyzed the behaviour of mechanical waves in periodic media, showing that there are frequency ranges that the waves cannot propagate. It was verified that the periodicity is responsible for the suppression of the radial modes in a piezoelectric composite when compared with the radial modes of a disk of piezoelectric ceramic. It is also conducted measurements in a water filled tank to determine the mechanical properties of samples of epoxy, and Tungsten/epoxy composites as a function of the volume fraction of Tungsten.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	4
1.2. Organização do Trabalho.....	4
2. PIEZELETRICIDADE	8
2.1. Introdução	8
2.2. Materiais Elásticos.....	8
2.3. Materiais Dielétricos.....	10
2.4. Materiais Piezelétricos.....	11
2.5. Notação Reduzida	12
2.6. Efeitos de Simetria.....	14
2.6.1. Material Isotrópico	15
2.6.2. Material Piezelétrico de Classe de Simetria δmm	23
3. ONDAS MECÂNICAS	28
3.1. Propagação de Ondas Mecânicas em Sólidos	28
3.1.1. Propagação de Ondas Mecânicas em Materiais Isotrópicos ..	29
3.1.2. Representação da Velocidade em Meios Anisotrópicos	30
3.1.3. Propagação de Ondas Mecânicas em Materiais Piezelétricos	33
3.2. Propagação de Ondas Mecânicas em Fluidos	37
3.3. Fenômenos de Transmissão.....	39

3.3.1. Incidência Normal	40
3.3.2. Incidência Oblíqua	42
3.4. Ondas de <i>Lamb</i>	44
4. TRANSDUTORES DE ULTRA-SOM.....	52
4.1. Introdução	52
4.2. Modelagem do Transdutor.....	53
4.2.1. Material Piezelétrico	54
4.2.2. Material não Piezelétrico.....	60
4.2.3. Aplicações do Modelo da Matriz Distribuída.....	62
4.2.4. Modelagem de Perdas em Materiais Piezelétricos.....	67
4.3. Parâmetros Importantes em Materiais Piezelétricos	68
5. MATERIAIS PIEZELÉTRICOS COMPÓSITOS.....	69
5.1. Introdução	69
5.2. Construção de Materiais Piezelétricos Compósitos	70
5.3. Modelagem Unidimensional de um Material Piezelétrico Compósito 1-3	71
5.4. Modelagem Unidimensional de um Material Piezelétrico Compósito 2-2	76
6. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	82
6.1. Introdução	82
6.2. Princípio Variacional.....	82
6.3. Elementos Finitos	84
6.4. Impedância Elétrica de um Material Piezelétrico.....	86
7. SIMULAÇÕES E VERIFICAÇÕES EXPERIMENTAIS	87
7.1. Introdução	87
7.2. Caracterização de Resinas Epóxi.....	87
7.3. Caracterização de Misturas de Tungstênio e Epóxi	91

7.4. Modelagem Unidimensional de Materiais Piezelétricos	96
7.5. Modelagem de Materiais Piezelétricos Através do Método dos Elementos Finitos	98
7.6. Construção e Modelagem Unidimensional de Materiais Piezelétricos Compósitos 1-3	102
7.7. Modelagem de Materiais Piezelétricos Compósitos 1-3 Utilizando o Método dos Elementos Finitos	106
7.8. Construção e Modelagem Unidimensional de Materiais Piezelétricos Compósitos 2-2	124
7.9. Modelagem de Materiais Piezelétricos Compósitos 2-2 Utilizando o Método dos Elementos Finitos	128
7.10. Determinação da Frequência de Ressonância do Primeiro Modo Lateral de Materiais Piezelétricos Compósitos 2-2 Utilizando um Modelo Analítico	135
7.11. Construção e Modelagem de Transdutores Piezelétricos Compósitos	141
7.12. Ondas em Materiais Periódicos	145
7.13. Modos Planares em um Material Piezelétrico Compósito	153
8. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	159
8.1. Conclusões	159
8.2. Trabalhos Futuros	160
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	162

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Metodologia utilizada neste trabalho para estudar materiais piezelétricos compósitos	6
Figura 1.2. Metodologia utilizada neste trabalho para estudar transdutores de ultra-som.....	7
Figura 2.1. Orientação das tensões em um elemento de volume infinitesimal	9
Figura 2.2. Transformação de coordenadas	14
Figura 2.3. Representação gráfica de um material de classe de simetria $6mm$	23
Figura 3.1. Deslocamento das partículas em uma onda: (a) posição de equilíbrio; (b) onda longitudinal; (c) onda de cisalhamento com polarização na direção x_1 ; (d) onda de cisalhamento com polarização na direção x_2	30
Figura 3.2. Curvas do inverso da velocidade em função da direção de propagação para onda longitudinal e de cisalhamento no plano x_1x_2	31
Figura 3.3. Curvas do inverso da velocidade em função da direção de propagação para onda longitudinal e duas de cisalhamento, sendo a cisalhamento 1 com polarização na direção x_2 e a cisalhamento 2 com polarização no plano x_1x_3	32
Figura 3.4. Superfície do inverso da velocidade em função da direção de propagação para onda longitudinal em um material isotrópico	32
Figura 3.5. Curvas do inverso da velocidade em função da direção de propagação para onda longitudinal e duas ondas de	

Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

